

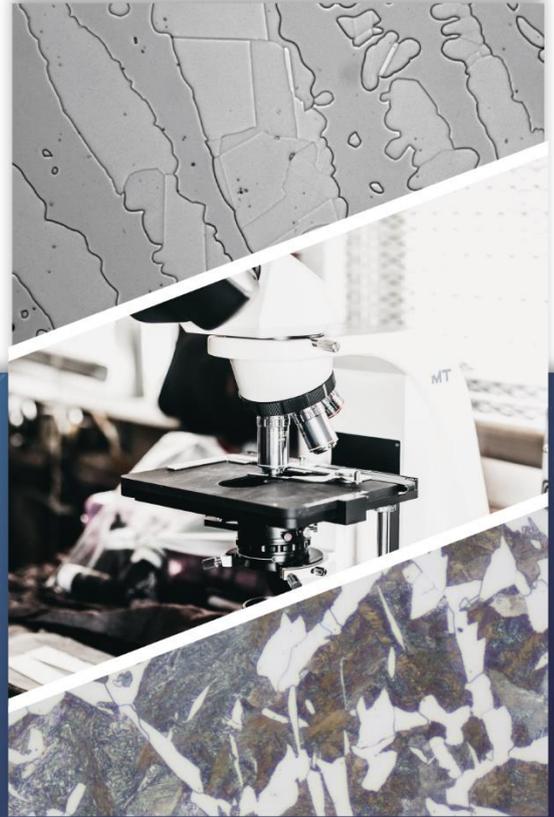


HIMACROW

Harmonized Personnel Training for Macro and Microscopic
Metallographic Examination of Structural Materials



HIMACROW.EU



Educational Materials for HIMACROW Training Course

For the Personnel with the responsibility for **Macroscopic**
and **Microscopic** Metallographic Examination of Base
Materials and their Joints Made by Welding and Allied
Techniques (**Standard & Comprehensive Levels**).

Project Nr. 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835.



<https://himacrow.eu/>



The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein. Project Nr. 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835





Índice

Introdução.....	6
1. CU1: Introdução ao exame metalográfico.....	8
1.1. Tipos de exame metalográfico; condições de segurança no trabalho durante a preparação de amostras para exames metalográficos.....	8
1.1.1. Segurança da amostragem.....	8
1.1.2. Segurança de montagem.....	8
1.1.3. Segurança da preparação mecânica.....	9
1.1.4. Segurança no polimento eletrolítico e na gravação.....	9
1.1.5. Segurança da gravura (materiais tóxicos e inflamáveis).....	10
1.2. Métodos de preparação de amostras para exame macro e microscópico.....	14
1.2.1. Amostragem.....	14
1.2.2. Montagem.....	14
1.2.3. Marcação.....	15
1.2.4. Limpeza.....	16
1.2.5. Secagem.....	17
1.2.6. Preparação mecânica da superfície, Retificação.....	17
1.2.7. Preparação mecânica da superfície, polimento.....	18
1.2.8. Polimento eletrolítico.....	18
1.2.9. Gravura.....	18
1.3. Exame macroscópico e sua aplicação na tecnologia de soldadura.....	20
1.3.1. Visão geral do exame macroscópico.....	20
1.3.2. Características macroscópicas das juntas soldadas.....	27
1.3.3. Defeitos em juntas soldadas.....	38
1.3.4. Avaliação da qualidade da soldadura.....	53
1.3.5. Reparação de soldaduras e exame pós-soldadura.....	63
1.3.6. Métodos de ensaio mecânico de materiais metálicos.....	75
1.4. Exame microscópico e sua aplicação na tecnologia de soldadura.....	85
1.4.1. Fases de equilíbrio.....	87
1.4.2. Tratamentos térmicos.....	90
1.4.3. Aspectos microestruturais de uma soldadura.....	94
2. CU2: Métodos específicos de preparação de amostras para exames macro e microscópicos.....	97
2.1. Polimento eletrolítico, polimento químico, gravação a cores - finalidade e aplicação.....	97
2.1.1. Introdução ao polimento eletrolítico Definição, finalidade e funcionamento.....	97
2.1.2. O princípio do polimento químico.....	111
2.1.3. Gravura a cores. Definição e objetivo.....	121



2.1.4	Diferenças entre polimento eletrolítico, polimento químico, decapagem colorida....	132
2.2	Demonstração do polimento eletrolítico e da gravação a cores.....	141
2.2.1	Polimento eletrolítico - objetivo, aplicação e demonstração.....	141
2.2.2	Prática de polimento eletrolítico.....	143
2.2.3	Problemas comuns e solução quando se utiliza a técnica de electropolimento para a preparação de amostras metalográficas.....	149
2.2.3	Manuseamento e eliminação de electrólitos provenientes do polimento eletrolítico	155
2.2.4	Resolução de problemas e sugestões para o polimento eletrolítico de amostras metalográficas.....	157
2.2.5	Exemplos reais de polimento eletrolítico e gravação a cores.....	160
2.2.6	Gravura a cores - objetivo, aplicação e demonstração.....	161
2.2.6	Prática com gravura a cores.....	164
2.2.7	Problemas comuns e solução quando se utiliza a gravação a cores para a preparação de amostras metalográficas.....	175
2.2.8	Manuseamento e eliminação de reagentes da Gravura a Cores.....	181
2.2.9	Resolução de problemas e dicas em amostras metalográficas gravadas a cores.....	182
2.2.10	Exemplos reais de gravura a cores.....	183
2.2.11	Compreender e descrever as diferenças em termos dos seus efeitos no acabamento da superfície e na microestrutura da amostra.....	185
2.3	A análise de imagens como ferramenta no exame metalográfico.....	187
2.3.1	Amostragem e preparação de amostras.....	188
2.3.2	Seleção do campo.....	188
2.3.3	Medições 2D.....	188
2.3.4	Determinação da fração volumétrica.....	191
2.3.5	Tamanho do grão.....	199
2.4	Demonstração das capacidades do programa para análise de imagens.....	209
2.5	Introdução à microscopia de varrimento.....	221
2.5.1	Modos de funcionamento.....	224
2.5.2	Formas de contraste.....	229
2.5.3	Melhoria da resolução e do contraste.....	231
2.5.4	Requisitos dos espécimes.....	232
2.5.5	Análise EDS.....	232
2.6	Demonstração das capacidades do microscópio de varrimento.....	235
2.6.1	Exame das superfícies de fratura.....	235
2.6.2	SEM aplicado à análise de falhas de ligas metálicas e suas juntas de soldadura.....	240
3	CU3: Demonstrações de exame macro e microscópico.....	246
3.1	Demonstração da avaliação de amostras macroscópicas de articulações.....	246



3.1.1	Considerações de carácter geral	246
3.1.2	Análise macroscópica em superfícies não preparadas	247
3.1.3	A análise macroscópica de materiais metálicos em superfícies não preparadas permite o exame e a avaliação destas características estruturais	250
3.1.4	Análise macroscópica em superfícies preparadas	253
3.1.5	Exames macroscópicos de materiais metálicos em superfícies preparadas.....	261
3.1.6	Perguntas	263
3.2	Formação prática na identificação sem ajuda de imperfeições de soldadura em amostras macroscópicas.....	263
3.2.1	Introdução às imperfeições de soldadura	263
3.2.2	Técnicas de inspeção visual para identificação de imperfeições de soldadura	273
3.2.3	Exame macroscópico de juntas soldadas	275
3.2.4	Formação prática na identificação de imperfeições de soldadura	279
3.2.5	Prática com técnicas de inspeção visual.....	280
3.2.6	Exame e análise de espécimes macroscópicos.....	286
3.2.7	Precauções de segurança durante a inspeção de soldaduras	291
3.3	Formação prática na preparação de amostras.....	299
3.3.1	Aços ao carbono.....	299
3.3.2	Aço inoxidável austenítico.....	301
3.3.3	Cobre e ligas.....	302
3.3.4	Alumínio e ligas	302
3.3.5	Titânio e ligas.....	302
3.3.6	Polímeros.....	302
3.4	Normas para a avaliação da qualidade das juntas realizadas por soldadura e técnicas afins	303
3.4.1	EN ISO 17639 Ensaio destrutivo de soldaduras em materiais metálicos - Exame macroscópico e microscópico de soldaduras.....	303
3.4.2	ISO/TR 15608 Soldadura - Diretrizes para um sistema de agrupamento de materiais metálicos	304
3.4.3	ISO/TR 17671-2 Soldadura - Recomendações para a soldadura de materiais metálicos - Parte 2: Soldadura por arco de aços ferríticos	304
3.4.4	ISO/TR 16060 Ensaio destrutivo de soldaduras em materiais metálicos - Condicionadores para exame macroscópico e microscópico.....	305
3.4.5	EN ISO 17637 Ensaio não destrutivo de soldaduras - Ensaio visual de juntas soldadas por fusão	305
3.4.6	ISO 15614-1 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1: Soldadura por arco e a gás de aços e soldadura por arco de níquel e ligas de níquel.....	305



3.4.7	ISO 15614-2 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 2: Soldadura por arco de alumínio e suas ligas.....	307
3.4.8	EN 10247 Exame micrográfico do teor de inclusões não metálicas dos aços através de imagens normalizadas.....	307
3.4.9	ISO 6520-1, Soldadura e processos afins - Classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos - Parte 1: Soldadura por fusão.....	307
3.4.10	ISO/TS 17845 Soldadura e processos afins - Sistema de designação de imperfeições	308
3.4.11	ISO 6520-1 Soldadura e processos afins - Classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos - Parte 1: Soldadura por fusão.....	308
3.5	Formação prática para a identificação da estrutura de espécimes microscópicos.	308
3.5.1	Aço carbono e aço de baixa liga	308
3.5.2	Aço inoxidável austenítico	312
3.5.3	Aço inoxidável duplex.....	316
3.5.4	Estrutura martensítica.....	317
3.6	Demonstração de diferentes tipos de estruturas microscópicas	318
3.6.1	Análise de soldadura	318
3.6.2	Análise de fases	319
3.6.3	Análise da porosidade	319
3.6.4	Descarburização.....	320
3.6.5	Estruturas de cobre	321
3.6.6	Estruturas de alumínio	321
3.6.7	Estruturas em ferro fundido.....	322
3.1	Demonstração dos métodos de preparação de amostras para exame metalográfico.....	324
3.1.1	Ensaio macroscópicos das etapas de preparação de amostras metalográficas.....	324
3.1.2	Ensaio microscópicos das etapas de preparação de amostras metalográficas.....	326



Introdução

A metalografia é o estudo da microestrutura das ligas metálicas. Pode ser definida mais precisamente como a disciplina científica que observa a distribuição espacial dos grãos, constituintes, inclusões ou fases nas ligas metálicas, em relação às suas propriedades, em toda a gama de temperaturas.

Uma das primeiras abordagens remonta a cerca da década de 1860, quando Henry Clifton Sorby (10 de maio de 1826 - 9 de março de 1908), utilizou nos metais algumas técnicas de petrografia e observou a sua estrutura. Agora era possível associar as características químicas, físicas e mecânicas de um metal ou liga metálica à sua estrutura metalográfica, o que para a metalurgia foi a transição da ciência empírica para a ciência real. No entanto, os processos da indústria siderúrgica de há 120-130 anos não permitiam obter ligas metálicas com um baixo controlo de inclusões ou impurezas; por conseguinte, as características acima mencionadas eram frequentemente aleatórias e não facilmente reproduzíveis. Consequentemente, o desenvolvimento das técnicas de metalografia ocorreu nos últimos 50-60 anos, após o desenvolvimento da indústria do ferro e do metal.

Hoje em dia, o técnico e o analisador metalográfico encontram um espaço relevante na indústria, nos laboratórios metalúrgicos, no controlo de qualidade, na investigação e no desenvolvimento; estas figuras requerem conhecimentos multifacetados em vários sectores científicos e industriais, devem ter um bom conhecimento da metalurgia das ligas metálicas e da sua soldabilidade.

Este documento tem como objetivo fornecer orientações práticas e teóricas para técnicos metalográficos, analistas, engenheiros e gestores de laboratórios.

Os principais ensaios metalográficos podem ser divididos em duas grandes famílias: exames macrográficos e micrográficos. O primeiro fornece informações macroscópicas, por exemplo, imperfeições de soldadura, enquanto o segundo fornece informações microscópicas, por exemplo, o tipo de microestrutura, a dimensão do grão, o teor de inclusões, etc.

O exame macroscópico insere-se geralmente nas seguintes atividades:

- Certificação do processo de soldadura e do pessoal de soldadura.
- Otimização do processo de soldadura.
- Controlo de qualidade durante o fabrico.
- Análise de falhas.

Por outro lado, o exame micrográfico nas seguintes aplicações:

- Otimização do processo de soldadura.
- Controlo de qualidade durante o fabrico.
- Avaliação da vida útil a longo prazo de alguns tipos de ligas.
- Análise de falhas.



- Investigação e desenvolvimento.

As técnicas de preparação, as ferramentas de análise e as informações que podemos obter através de exames metalográficos serão descritas nos capítulos seguintes.



Fig. 1.1 - Henry Clifton Sorby (10 de maio de 1826 - 9 de março de 1908).

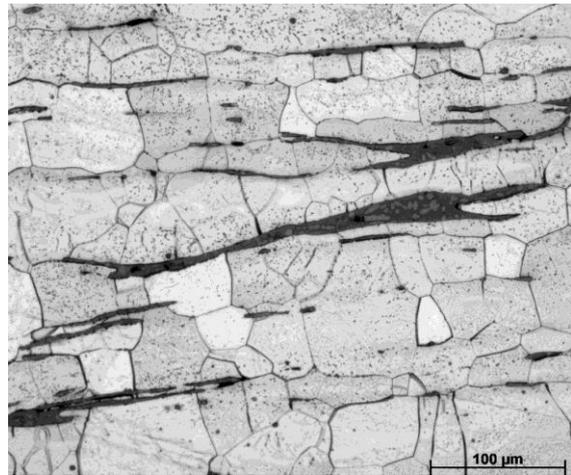


Fig. 1.2 - Pormenor micrográfico de um aço retirado de uma ponte ferroviária de 1880.



1. CU1: Introdução ao exame metalográfico

Uma parte muito importante dos ensaios de materiais é o exame metalográfico. A composição química, a macroestrutura e a microestrutura dos materiais determinam as propriedades do material. O exame metalográfico inclui o conhecimento da preparação de amostras metalográficas e dos métodos de exame, microscopia ótica, análise de imagens, etc. O especialista em metalografia deve conhecer as regras e os regulamentos importantes em matéria de segurança no trabalho.

1.1. Tipos de exame metalográfico; condições de segurança no trabalho durante a preparação de amostras para exames metalográficos

A segurança e a saúde no trabalho são importantes num laboratório metalográfico, tendo em conta a utilização de máquinas, produtos químicos, plásticos, etc. O trabalho no laboratório que envolve máquinas, produtos químicos, etc., torna imperativo o cumprimento de todas as regras e regulamentos relevantes em matéria de segurança no trabalho. O laboratório, com funções como o corte, a preparação de amostras e a gravação, envolve uma série de perigos potenciais. As precauções mais importantes em matéria de segurança e saúde são mencionadas a seguir, tendo em conta que nem todos os perigos potenciais ou medidas de segurança e saúde necessárias são mencionados. Todos os materiais armazenados no laboratório devem ter uma Ficha de Dados de Segurança de Material (MSDS). A MSDS foi concebida para fornecer ao pessoal do laboratório e ao pessoal de emergência os procedimentos corretos para manusear ou trabalhar com uma determinada substância. As MSDS incluem informações como dados físicos, efeitos na saúde, primeiros socorros, reatividade, armazenamento, eliminação, equipamento de proteção e procedimentos de derrame/vazamento. Estas fichas são particularmente úteis se ocorrer um derrame ou outros acidentes.

1.1.1. Segurança da amostragem

Devem ser utilizadas luvas e proteção para os olhos quando se trabalha com máquinas e ferramentas. As máquinas de corte abrasivo têm uma proteção para o operador contra o fluido de arrefecimento, pedaços de um disco de corte partido, etc. De acordo com as normas de segurança, a máquina só pode ser ligada quando a caixa de proteção estiver fechada. Ao cortar com discos de baquelite ou de borracha, formam-se fumos e, nas máquinas maiores, a câmara de corte deve estar ligada a um sistema de exaustão.

1.1.2. Segurança de montagem

Com o embutimento por compressão a quente, o principal perigo são as altas temperaturas utilizadas nas prensas de embutimento. Devem ser utilizadas luvas para manusear os embutimentos a quente e, ao encher a prensa com material de embutimento, como pó de baquelite, deve ser evitada a inalação de poeiras.



No embutimento a frio, existem vários perigos potenciais. As resinas de embutimento a frio são potencialmente perigosas para a saúde, pelo que todo o manuseamento deve ser efetuado com luvas de borracha (látex) para evitar o contacto com a pele e a mistura e o endurecimento devem ter lugar num recinto fechado para o fumo (gás, fumos). Quando se utiliza um forno para acelerar o endurecimento do epóxi, também devem ser utilizadas luvas. Devem estar disponíveis informações MSDS (Ficha de Dados de Segurança dos Materiais) para todas as resinas de montagem.

Alguns materiais de fixação a frio:

Epóxi

Este material, tanto a resina como o endurecedor, podem danificar a pele, provocando reações alérgicas. O material nunca deve entrar em contacto com a pele e os vapores não devem ser inalados. Todo o trabalho com epóxi deve ser realizado sob uma câmara de fumo, utilizando equipamento de proteção individual (EPI especificado na MSDS). Recomenda-se que os recipientes e as varetas de agitação sejam eliminados após a mistura. O epóxi não é perigoso quando está completamente endurecido, pelo que não é necessária qualquer proteção para manusear a amostra.

Acrílicos e poliésteres

A mistura deve ser sempre efetuada sob uma câmara de fumo e devem ser utilizadas luvas ao manusear estes materiais para evitar a inalação e o contacto com a pele.

1.1.3. Segurança da preparação mecânica

O operador deve usar uma bata de laboratório, luvas, óculos de proteção e máscaras para evitar quaisquer lesões. Durante a preparação manual, quando se utiliza um disco de lixar/polir, devem ser tomadas precauções. O operador tem de utilizar uma amostra bem montada com um tamanho adequado para a preparação manual. As máquinas de preparação semiautomáticas são basicamente seguras de utilizar. Se um espécime for afastado do suporte do espécime durante a rotação, o espécime será mantido dentro da máquina, e as velocidades dos discos e suportes são relativamente baixas. Para evitar a contaminação e as impurezas, especialmente quando se utilizam discos de trituração e pasta abrasiva, que criam uma lama muito fina, que é difícil de remover, devem ser utilizadas luvas de borracha ou de plástico. No caso de máquinas grandes que utilizam um lubrificante inflamável à base de álcool, os fumos do álcool podem ser bastante fortes e a máquina deve ser ligada a um sistema de exaustão de fumos. Uma melhor solução poderá ser mudar o lubrificante para um tipo à base de água. Os sistemas totalmente automáticos são totalmente fechados e não funcionam se as proteções não estiverem fechadas.

1.1.4. Segurança no polimento eletrolítico e na gravação

O perigo potencial mais grave no polimento e gravação eletrolíticos é a mistura, manuseamento, utilização e armazenamento de eletrólitos. Durante o processo de polimento, devem ser



tomadas precauções para evitar o aquecimento do eletrólito, que pode provocar um incêndio ou mesmo uma explosão. É importante manter um nível correto de eletrólito no recipiente, porque um nível inferior de eletrólito pode gerar bolsas de ar na câmara de polimento, provocando uma faísca entre o ânodo e o cátodo, o que pode levar à ignição da solução no eletrólito. Para este tipo de operações, deve ser utilizada uma bata de laboratório, luvas e óculos de proteção para evitar ferimentos.

1.1.5. Segurança da gravura (materiais tóxicos e inflamáveis)

O procedimento de gravação deve ser efetuado com luvas e proteção ocular, sob uma câmara de fumo. Os perigos potenciais mais graves estão relacionados com a mistura, o manuseamento e o armazenamento dos produtos químicos utilizados para os gravadores, bem como para os eletrólitos. O utilizador deve dispor de informações suficientes sobre todos os produtos químicos utilizados através de formação e das fichas de dados de segurança dos materiais (MSDS), que devem estar sempre disponíveis no laboratório. Os gravadores/eletrólitos são, na sua maioria, misturas de soluções de diferentes materiais misturados no laboratório. Durante a mistura, podem estabelecer-se reações muito perigosas, tais como: fogo, explosão e dissolução, criando substâncias e/ou fumos perigosos. Por norma, a mistura deve começar sempre com a água (álcool) e depois misturar os outros ingredientes. No entanto, muitas vezes é necessário seguir um procedimento especial para obter a segurança necessária, e certas combinações de produtos químicos são conhecidas por serem perigosas. A informação sobre este assunto deve estar disponível no laboratório. Os materiais mais comuns nos laboratórios de metalografia são:

Etanol: O etanol utilizado num laboratório tem a seguinte identificação de perigos: Os solventes orgânicos podem ser absorvidos por inalação e ingestão e causar danos permanentes no sistema nervoso. O líquido pode irritar a pele, os olhos e o trato respiratório.

Ácido acético: Deve ter-se extremo cuidado ao misturar com outros ácidos como o ácido perclórico e o ácido nítrico. As misturas de ácido acético e ácido perclórico devem ser evitadas.

Ácido crómico: Substância de oxidação muito forte, uma reação muito forte com material orgânico ou de fácil oxidação e não pode ser misturado com segurança com ácido acético e com a maioria dos líquidos orgânicos, como álcoois ou glicerol. POISONOUS!

Ácido nítrico: Ácido oxidante forte, que cria gases com muitos materiais orgânicos e metais. Não armazenar soluções de mais de 5% de ácido nítrico em etanol.

Ácido perclórico: Ácido muito agressivo que pode provocar explosões graves em concentrações elevadas. Muito perigoso em contacto com metais que se oxidam facilmente, como o bismuto. O contacto com material orgânico também deve ser evitado; se for absorvido por um material orgâ-



nico, o material deve ser colocado em água. O material orgânico nunca deve ser utilizado para limpar o ácido perclórico.

Ácido pícrico: Oxidante agressivo e deve ser sempre armazenado em condições húmidas. Em condições secas, o risco de explosão é elevado. A armazenagem deve ser efetuada em local fresco e devem ser criadas condições de segurança contra incêndios.

Os materiais tóxicos são substâncias que, quando inaladas ou ingeridas, podem provocar a morte ou problemas de saúde graves.

Várias substâncias tóxicas que são frequentemente utilizadas num laboratório metalográfico são:

- Produtos químicos à base de metais: Be, Pb, Cr, Cu, Ag, Sn, Zn, Ni (não ZnO_2): Venenoso em líquidos ou vapores.
- Carboidratos clorados: Estes solventes são muito perigosos para a inalação.
- Cianetos: Reagem fortemente com ácidos, mesmo o teor de CO_2 no ar atmosférico húmido provoca uma reação. Muito venenosos.
- Ácido fluorídrico, anidro: Em concentrações superiores a 0,5 % do ácido é muito perigoso, causando danos muito graves nos tecidos. Ataca quase todos os metais e vidros. Muito perigoso.
- Mercúrio: Os produtos químicos que se ligam ao mercúrio e os vapores de mercúrio são venenosos.
- Metanol: Venenoso.
- Ácido oxálico (anidro) (desidratado): Em concentrações superiores a 5 %, o ácido oxálico é venenoso.
- Fosgênio (cloreto de carbonilo): Muito perigoso para o sistema respiratório.

Os líquidos inflamáveis são utilizados na preparação metalográfica para polimento eletrolítico, lubrificação, gravação e limpeza.

O número de líquidos inflamáveis armazenados no laboratório deve ser reduzido ao mínimo e cuidadosamente protegido contra o calor e a possível ignição. Todas as regras e regulamentos devem ser seguidos cuidadosamente aquando do manuseamento de líquidos inflamáveis. O aquecimento em recipientes abertos deve ser feito com especial cuidado, utilizando uma câmara de fumos e placas de aquecimento elétricas especiais.

Todos os contentores com matérias perigosas devem ser marcados, os exemplos dos símbolos de perigo são apresentados no Quadro 1.1.5.1.

Quadro 1.1.5.1. Símbolos dos perigos

Categoria de perigo	Símbolo de perigo
Explosivo	
Oxidação	
Extremamente inflamável	
Corrosivo	



Irritante	
Tóxico	

A eliminação pode ser um problema e deve ser efetuada de acordo com as regras e regulamentos das autoridades locais.

Referências:

- [1.1.1] Bramfitt B. L., Benschoter A. O.: Guia do Metalógrafo, Práticas e Procedimentos para Ferros e Aços. 1st. Ed. ASM International, Materials Park, EUA 2002. 169-244.
- [1.1.2] McCall J. L., Mueller W. M.: Metallographic Specimen Preparation, Optical and Electron Microscopy 1st. ed. Plenum Press, New York, USA 1973. 1-348.
- [1.1.3] Vander Voort G. F.: Metallography Principles and Practice. 4ª ed. ASM International, Materials Park, 2007. 1-258.
- [1.1.4] Kay Geels: Preparação de amostras metalográficas e metalográficas, microscopia ótica, análise de imagens e ensaios de dureza ASTM International, West Conshohocken, EUA 2007. 1-761.

1.2. Métodos de preparação de amostras para exame macro e microscópico

As etapas de preparação dos provetes são apresentadas na Figura 1.2.1.

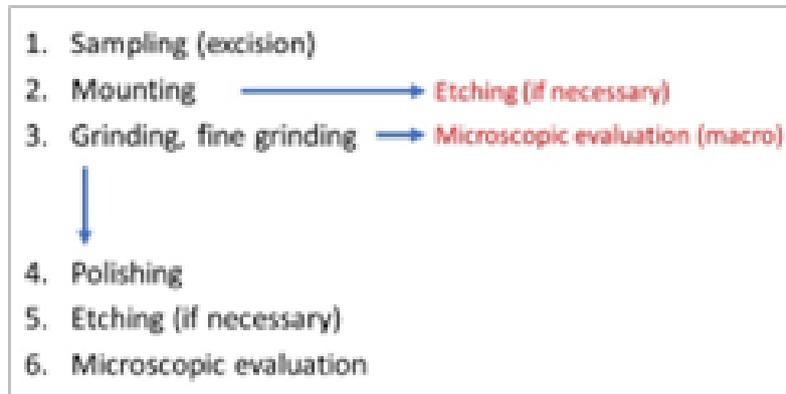


Figura 1.2.1. Fluxo de preparação de amostras macroscópicas e microscópicas

1.2.1. Amostragem

Ao examinar as juntas soldadas, é aconselhável seguir as recomendações das respetivas normas. Durante o processo de corte, é importante garantir que a estrutura do material da amostra não seja alterada. Assim, o corte não deve provocar o aquecimento do espécime ou a sua deformação plástica, pois ambos podem levar a alterações na estrutura do material e a falsas interpretações. O processamento pode ser efetuado através de corte mecânico ou maquiagem. Normalmente, os especialistas em metalografia utilizam um disco de corte abrasivo diamantado com velocidade ajustável e arrefecimento a água, bem como uma serra mecânica/elétrica com um sistema de arrefecimento para efetuar o corte da amostra. Para chapas e folhas finas, o corte com tesoura também é uma opção. No entanto, em casos específicos, os laboratórios utilizam técnicas de corte especializadas, como por exemplo, para materiais com elevados níveis de dureza, os processos mais comuns são a electro erosão ou o corte por jato de água. A superfície cortada sofrerá inevitavelmente uma deformação, pelo que é necessário continuar a processar a superfície por retificação.

1.2.2. Montagem

O embutimento refere-se ao encapsulamento da amostra maquinada ou de uma amostra de pequenas dimensões num material polimérico ou noutros compostos. Dependendo do tipo de resina utilizada e da natureza da amostra, podem ser aplicados métodos de embutimento a frio ou a quente. O objetivo principal é assegurar que nem a estrutura nem a composição química da amostra sejam alteradas durante o processo de embutimento [1, 2, 3]. No embutimento a frio, é normalmente utilizada uma resina de dois componentes. Durante a cura da resina, ocorre uma reação exotérmica, que não causa alterações estruturais nos metais e suas ligas. Para evitar falhas, é necessário seguir as especificações recomendadas pelo fabricante. O embutimento a quente refere-se a um processo de incorporação de uma amostra de metal numa resina plástica termoendurecível, utilizando calor e



pressão. Proporciona um ambiente estável e uniforme para examinar a estrutura interna e as propriedades dos metais e ligas. Devem ser tomadas precauções no caso de amostras pequenas, frágeis ou que tenham um baixo ponto de fusão.

1.2.3. Marcação

A marcação de amostras metalográficas é essencial para uma identificação adequada da amostra que garante que o especialista metalográfico utiliza a amostra correta para análise. A marcação não deve, de forma alguma, influenciar a microestrutura da superfície a ser examinada; por conseguinte, deve ter-se cuidado antes de efetuar a marcação. Também deve ser tido em consideração que a marcação é escrita numa área onde não seja removida e/ou danificada durante o processo de preparação.

Marcação com tinta à prova de água

Recomenda-se que seja efetuada sobre a resina ou o mais longe possível da zona de análise. Deve ter-se o cuidado de evitar remover ou bater parcialmente na resina. Como alternativa, pode utilizar-se tinta de marcação ou lápis.

Etiqueta de identificação

Normalmente, a etiqueta é colocada na parte de trás do espécime e, no caso de amostras incorporadas, deve ser inserida numa resina razoavelmente transparente, bem como no exterior do espécime/montagem. Deve ter-se o cuidado de evitar a sua remoção durante a limpeza com água e álcool.

Gravação

Um dos métodos de marcação mais utilizados é a gravação por vibração. Uma agulha vibratória muito dura induz uma deformação visível da superfície da amostra/montagem. Este método provoca tensão na camada de material por baixo da superfície, pelo que não deve ser utilizado para amostras finas, como as folhas. A eletrogravura provoca menos danos na superfície, mas só pode ser utilizada em materiais condutores de eletricidade. A gravação numa superfície limpa e lisa é efetuada através da fusão/evaporação do metal, provocada por uma faísca a alta temperatura. A gravação manual, utilizando um cinzel, também é possível para a maioria dos materiais que não tenham valores de dureza elevados.

Stampagem

É possível apor um número ou código no espécime, mas não é necessariamente recomendado, pois pode ser facilmente removido durante o manuseamento ou processamento.



1.2.4. Limpeza

É importante que o ambiente em que o processo decorre esteja livre de impurezas e que as mãos do operador estejam limpas.

Considerando que o processo de preparação inclui frequentemente diferentes granulações de papel de lixa (grão 80 a 5000), pano de polimento e suspensão de diamante (1 a 3 μm), que são progressivamente alterados, é evidente que pode ocorrer contaminação cruzada, pelo que se recomenda a utilização de cada papel de lixa apenas uma vez, porque os grãos maiores de uma etapa anterior produzirão contaminação cruzada.

Limpeza antes do início da preparação

A falta de uma limpeza cuidadosa pode impedir que as resinas de embutimento por compressão a frio e a quente adiram à superfície do espécime. Além disso, a oxidação e outras contaminações devem ser removidas, exceto se estes produtos forem examinados. Por exemplo, os métodos de limpeza mais grosseiros, como a granulagem e a escovagem de arame, podem danificar a superfície, pelo que se deve considerar se isto pode influenciar o resultado da preparação.

Limpeza durante e após a preparação

Em princípio, o espécime e o suporte do espécime (espécimes fixos) devem ser limpos entre cada passo do processo de trituração e polimento, mas na trituração húmida em papel SiC, utilizando um fluxo constante de água, uma limpeza cuidadosa pode ser limitada ao último passo de trituração. Na retificação com outros materiais, como discos compósitos rígidos, e no polimento, a limpeza entre cada passo é absolutamente necessária. Existem, no entanto, alguns materiais ou alguns constituintes de materiais que serão preferencialmente atacados pela água (revestimentos de zinco em aço, inclusões de chumbo em aços de maquinaria, etc.), pelo que a água deve ser completamente evitada nos últimos passos de preparação.

Limpeza manual

Para limpar a maior parte dos metais e outros materiais sem poros, fissuras, etc., a limpeza manual é o método mais eficaz. O espécime ou o suporte do espécime é mantido sob água morna corrente e enxaguado com uma escova macia ou com uma bola de algodão embebida em água com detergente. No caso de materiais macios e após o último passo de polimento, utiliza-se uma bola de algodão para limpar a superfície preparada. A limpeza é concluída com a pulverização de álcool etílico de um frasco de spray sobre a superfície preparada e, eventualmente, com a passagem de um pano antes de a superfície ser levada para secagem. O etanol contendo um aditivo de desnaturação pode ser utilizado desde que o aditivo não deixe uma película no espécime. No caso de espécimes com poros, fissuras, etc., e de suportes com um intervalo entre o material de suporte e o espécime, recomenda-se a limpeza por ultrassons, exceto no caso de materiais frágeis.

No caso das amostras de polímeros, sugere-se que a limpeza seja efetuada com água destilada, uma vez que o etanol pode dissolver alguns materiais poliméricos.

Limpeza por ultrassons

A limpeza por ultrassons é eficiente e relativamente rápida, removendo a sujidade de poros, fendas, fissuras, etc. A amostra ou o suporte da amostra é colocado num tanque com um líquido, água com um detergente, álcool ou um solvente orgânico como a acetona. Em casos de sujidade difícil de remover, podem ser utilizados ácidos fracos e soluções básicas. Um transdutor vibra sob o fundo do tanque, com 20-40 kHz, criando bolhas de gás (cavitação) no líquido. Estas bolhas implodem e ocorre um efeito de fricção que remove a sujidade. A sujidade contamina o líquido e, por isso, a amostra deve ser enxaguada, como mencionado acima, antes da secagem. Os ultrassons penetram no vidro, pelo que é possível colocar um ou mais copos no tanque com água e um detergente à volta dos copos. Quando as amostras são colocadas apenas nos copos, num líquido adequado, este líquido pode ser facilmente trocado quando contaminado. A limpeza demora normalmente 0,5-1 min. Alguns materiais moles, muito porosos e quebradiços não devem ser limpos por ultrassons ou apenas durante 10-30 s. Utilizando suportes de amostras, todo o suporte pode ser colocado no tanque.

1.2.5. Secagem

A secagem deve ser efetuada com uma corrente de ar suave. É importante que a camada de álcool não seque na superfície preparada, mas que seja soprada e evapore dos lados da amostra/montagem. O ar pode ser fornecido por um secador de cabelo fixo, permitindo que ambas as mãos estejam livres para limpar o espécime com algodão macio e álcool. Também pode ser utilizado ar comprimido, mas neste caso deve ser assegurado ar limpo, seco e isento de óleo. Recomenda-se a utilização de um secador de cabelo para o espécime acabado, para evitar possíveis gotas de óleo do ar comprimido.

1.2.6. Preparação mecânica da superfície, Retificação

A superfície da amostra é retificada com discos abrasivos progressivamente mais finos. O material abrasivo utilizado pode ser à base de carboneto de silício ou discos de lixa de diamante. Os materiais abrasivos estão disponíveis comercialmente em várias granulometrias que variam de P60 a P4000. Os materiais abrasivos com granulometrias de P2000 a P4000 também são considerados agentes de polimento. Quer se utilize o lixamento manual ou automático, durante cada passo de lixamento, a amostra é rodada 90 graus para remover os riscos do lixamento anterior. Assim, a retificação elimina os riscos de retificação anteriores com riscos perpendiculares e mais finos (ver Figura 1.2.2). A retificação é realizada com um fornecimento contínuo de água, onde a água ajuda a remover partículas soltas, detritos e o calor gerado pela fricção.

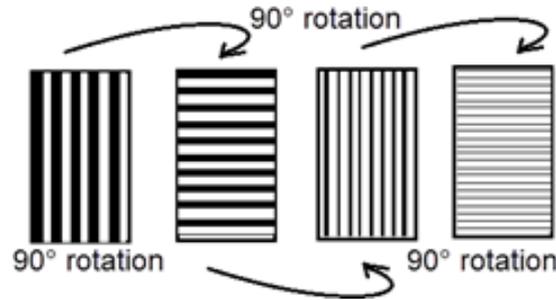


Figura 1.2.5.1. Preparação da superfície por retificação

1.2.7. Preparação mecânica da superfície, polimento

O passo seguinte consiste em polir a superfície preparada até ao nível de suavidade desejado. O polimento pode ser efetuado através de métodos mecânicos, químicos ou electrolíticos. O polimento mecânico é efetuado utilizando um disco de polimento ou um pano de polimento. O material do pano de polimento pode ser natural ou sintético. Para o polimento, pode ser utilizada uma pasta de polimento ou uma suspensão de água destilada contendo óxido de alumínio, óxido de magnésio ou partículas de diamante com dimensões entre 0,05 e 15 μm , que devem ser compatíveis com o material e a dureza do pano de polimento. Durante o polimento manual, a amostra deve ser movida num movimento circular oposto à direção de rotação do disco de polimento. Após o polimento, a superfície é lavada com água destilada seguida de álcool. A aplicabilidade do álcool deve ser verificada para amostras não metálicas. A superfície é então seca com ar quente e soprado. Após o polimento da superfície, podem ser efetuados exames macroscópicos. Com uma ampliação de 50 vezes, certas fissuras, defeitos de soldadura e fusão inadequada tornam-se visíveis.

1.2.8. Polimento eletrolítico

A preparação eletrolítica é um método rápido e eficiente para a preparação metalográfica, proporcionando uma superfície sem deformações, ao passo que a retificação e o polimento mecânicos tendem a deixar uma fina camada de deformação na superfície. Utilizando o equipamento de polimento eletrolítico, a amostra é configurada como ânodo num eletrólito adequado e o material é removido por dissolução controlada da superfície da amostra. O polimento eletrolítico pode ser seguido por um processo de gravura eletrolítica para fazer sobressair os contrastes na microestrutura do espécime.

1.2.9. Gravura

Os exames mais pormenorizados são efetuados por corrosão da superfície de acordo com as recomendações da norma ISO 16060. O agente de corrosão deve ser selecionado de acordo com a qualidade do material a examinar. O agente de corrosão ataca seletivamente a superfície da amostra, em graus variáveis, nos limites e superfícies dos grãos, tornando-os visíveis ao microscópio. As microestruturas alteradas resultantes do tratamento térmico também podem ser efetivamente

examinadas, especialmente no caso dos aços ferramenta. As técnicas de gravação a cores fornecem mais informações e melhoram o reconhecimento. O agente de corrosão forma uma película de cor estável na superfície da amostra, que pode ser um óxido, sulfureto, cromato ou composto complexo. O cumprimento rigoroso da ordem de mistura e das proporções é essencial durante a preparação do condicionador. Para materiais quimicamente resistentes, pode ser utilizada a gravação eletrolítica. No condicionamento convencional, a superfície da amostra é imersa no condicionador e movida suavemente. O tempo de ataque depende também da resolução do microscópio, sendo necessários períodos mais longos para microscópios de baixa resolução e períodos mais curtos para microscópios de alta resolução. Após a gravação, a amostra é lavada com água, seguida de uma lavagem com álcool e depois seca com ar quente. A Tabela 1.2.8.1 apresenta alguns materiais de gravação comuns.

Tabela 1.2.8.1. Os agentes de corrosão mais utilizados

Nome	Etchant	Área de aplicação
Nital	97 ml de álcool etílico; 3 ml de ácido nítrico a 69%	Aço não ligado e aço de baixa liga
Pikral	100 ml de álcool etílico; 4 g de ácido pícrico	Aço não ligado e aço de baixa liga
Ácido clorídrico - cloreto de ferro	960 ml de álcool etílico; 20 ml de ácido clorídrico a 35%; 50 g de cloreto de ferro (III)	Cobre e suas ligas
Keller	950 ml de água destilada; 25 ml de ácido nítrico a 69%, 15 ml de ácido clorídrico a 35%; 10 ml de ácido fluorídrico a 40%	Titânio e suas ligas, alumínio e suas ligas
Kroll	10 ml de ácido fluorídrico a 40%; 30 ml de ácido nítrico a 69%; 960 ml de água destilada	Alumínio e suas ligas
Solução de ácido oxálico	100 ml de água (H ₂ O) e 10 g de ácido oxálico (C ₂ H ₂ O ₄)	Aço inoxidável

Referências:

[1.2.1] Bramfitt B. L., Benschoter A. O.: Guia do Metalógrafo, Práticas e Procedimentos para Ferros e Aços. 1st. Ed. ASM International, Materials Park, 2002. 169-244.

[1.2.2] McCall J. L., Mueller W. M.: Metallographic Specimen Preparation, Optical and Electron Microscopy 1st. ed. Plenum Press, New York, 1973. 1-348.



[1.2. 3] Vander Voort G. F.: Metallography Principles and Practice. 4ª ed. ASM International, Materials Park, 2007. 1-258.

[1.2. 4] EN ISO 17639:2022 Ensaios destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Exame macroscópico e microscópico de soldaduras 2022.

[1.2. 5] ISO 15614-1:2017 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1: Soldadura por arco e a gás de aços e soldadura por arco de níquel e ligas de níquel.

[1.2. 6] ISO/TR 16060:2003 Ensaios destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Condições para exame macroscópico e microscópico, 2003.

1.3. Exame macroscópico e sua aplicação na tecnologia de soldadura

Neste capítulo, iremos explorar a importância do exame macroscópico no domínio da tecnologia de soldadura. A soldadura é um processo de união amplamente utilizado em várias indústrias, e a qualidade e integridade das juntas soldadas desempenham um papel crucial no desempenho e fiabilidade das estruturas e componentes. O exame macroscópico fornece informações valiosas sobre a estrutura geral, defeitos e qualidade das soldaduras, permitindo aos engenheiros e técnicos avaliar a integridade da soldadura e tomar decisões informadas relativamente à sua adequação a aplicações específicas.

1.3.1. Visão geral do exame macroscópico

Neste subcapítulo, iremos fornecer uma visão geral aprofundada do exame macroscópico e da sua importância na tecnologia de soldadura. Discutiremos a finalidade e os objetivos do exame macroscópico, as suas vantagens em relação a outros métodos de ensaio e a forma como complementa outras técnicas de inspeção, tais como os ensaios não destrutivos e o exame microscópico.

O exame macroscópico, também conhecido como inspeção visual, é uma técnica fundamental utilizada na tecnologia de soldadura para avaliar a qualidade, a integridade e o acabamento de soldaduras e juntas soldadas. Envolve a observação direta e a avaliação da superfície da soldadura e das áreas adjacentes, utilizando o olho nu ou ferramentas de ampliação.

Definição e objetivo do exame macroscópico

O objetivo do exame macroscópico é identificar e analisar as características gerais, os defeitos e o acabamento das soldaduras. O objetivo é garantir que as soldaduras cumprem as normas, especificações e critérios de desempenho exigidos. Este método de exame desempenha um papel fundamental no controlo da qualidade das soldaduras, permitindo a deteção e avaliação de problemas visíveis e ocultos que podem afetar a integridade estrutural, a funcionalidade e a fiabilidade dos



componentes soldados. O exame macroscópico tem uma importância significativa na tecnologia de soldadura por várias razões:

Garantia de qualidade: O exame macroscópico permite avaliar a qualidade da soldadura e a conformidade com as normas e especificações da indústria. Ajuda a identificar defeitos, descontinuidades e desvios dos critérios aceitáveis, assegurando que as soldaduras são estruturalmente sólidas e cumprem os requisitos de desempenho desejados.

Deteção precoce de defeitos: A inspeção visual permite a deteção precoce de defeitos nas soldaduras, tais como fissuras, porosidade, falta de fusão, penetração incompleta, subcotação e reforço excessivo. A deteção destes problemas numa fase inicial permite acções correctivas imediatas, reduzindo o risco de danos ou falhas adicionais.

Custo-eficácia: O exame macroscópico é um método relativamente simples e económico em comparação com outras técnicas de ensaio avançadas. Fornece informações valiosas sobre o estado geral das soldaduras, ajudando no processo de tomada de decisões relativamente a inspeções adicionais ou reparações necessárias.

Complementação de Ensaio Não Destrutivos (NDT): O exame macroscópico complementa outras técnicas de inspeção, incluindo métodos de ensaio não destrutivos, como o ensaio ultrassónico, a radiografia e a inspeção por partículas magnéticas. Ajuda a identificar potenciais áreas de preocupação para uma avaliação mais detalhada utilizando métodos NDT, optimizando assim o processo de inspeção.

Documentação visual: O exame macroscópico permite a documentação visual das soldaduras e das suas características. Fotografias, vídeos ou esboços tirados durante o exame servem como registos essenciais para referência, análise e comunicação entre inspetores de soldadura, engenheiros e partes interessadas.

O exame macroscópico oferece várias vantagens na avaliação das soldaduras:

Observação em tempo real: A inspeção visual proporciona uma avaliação em tempo real, permitindo a identificação imediata de defeitos e anomalias visíveis.

Custo-efetivo: O exame macroscópico é um método relativamente barato e acessível que requer um mínimo de equipamento e formação.

Ampla aplicabilidade: Pode ser aplicado a vários tipos, tamanhos e materiais de soldadura, tornando-o versátil em diferentes aplicações de soldadura.

Não destrutivo: O exame macroscópico não causa qualquer dano aos espécimes ou estruturas testadas.

No entanto, é essencial reconhecer as limitações do exame macroscópico:



Sensibilidade de superfície: Incide principalmente nas características da superfície das soldaduras, limitando a deteção de defeitos subsuperficiais ou internos.

Subjetividade: A interpretação dos resultados da inspeção visual pode ser subjectiva, dependendo da experiência, competência e acuidade visual do inspetor.

O exame macroscópico desempenha um papel crucial no controlo da qualidade da soldadura, fornecendo informações valiosas sobre a integridade geral e o acabamento das soldaduras. Ajuda a garantir que as soldaduras cumprem os requisitos especificados, incluindo a geometria, as tolerâncias dimensionais, o aspeto e a ausência de defeitos visíveis. Ao combinar o exame macroscópico com outras técnicas de inspeção, como os ensaios não destrutivos e o exame microscópico, é possível obter uma avaliação abrangente da qualidade da soldadura. Esta abordagem integrada aumenta a fiabilidade, o desempenho e a segurança das estruturas, componentes e sistemas soldados.

Na União Europeia (UE), o exame macroscópico na tecnologia de soldadura é orientado por várias normas e directrizes que fornecem requisitos e recomendações para o processo de inspeção. Algumas das principais normas da UE relacionadas com o exame macroscópico na soldadura incluem:

EN ISO 5817 - Soldadura - Juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas (níveis de qualidade para imperfeições): Esta norma fornece critérios para avaliar as imperfeições macroscópicas em juntas soldadas por fusão. Define diferentes níveis de qualidade e critérios de aceitação com base no tipo e dimensão das imperfeições observadas durante o exame macroscópico.

EN ISO 17637 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios visuais de juntas soldadas por fusão: Esta norma especifica os requisitos para o ensaio visual de juntas soldadas por fusão. Descreve os princípios gerais, o equipamento, os procedimentos e os critérios de aceitação para o exame macroscópico, a fim de assegurar uma inspeção adequada das superfícies de soldadura e a identificação de defeitos visíveis.

EN 970 - Exame não destrutivo de juntas soldadas por fusão: Esta norma fornece directrizes para o exame visual de juntas soldadas por fusão. Abrange os princípios gerais, o equipamento, as técnicas e os critérios de aceitação do exame macroscópico para avaliar as condições da superfície, os perfis de soldadura e a presença de defeitos visíveis.

EN 1290 - Ensaios Destrutivos de Soldaduras em Materiais Metálicos - Exame Macroscópico de Soldaduras: Esta norma especifica os requisitos para o exame macroscópico de juntas soldadas através de métodos de ensaio destrutivos. Detalha os procedimentos para cortar, preparar e examinar macro secções de soldaduras para avaliar a sua qualidade e identificar quaisquer defeitos ou discontinuidades.



Estas normas, entre outras, fornecem orientações sobre as técnicas de exame macroscópico, critérios de aceitação e requisitos de documentação em tecnologia de soldadura na União Europeia. A conformidade com estas normas assegura uma avaliação consistente e fiável das soldaduras, promove o controlo de qualidade e apoia a utilização segura e eficiente de estruturas e componentes soldados.

Importância do exame macroscópico na tecnologia de soldadura

O exame macroscópico desempenha um papel crucial na tecnologia de soldadura, fornecendo informações valiosas sobre a qualidade, integridade e fiabilidade das juntas soldadas. Este método de inspeção envolve a inspeção visual e a avaliação das superfícies e macroestruturas da soldadura para detetar e avaliar várias características, defeitos e descontinuidades. A importância do exame macroscópico na tecnologia de soldadura pode ser compreendida através dos seguintes aspectos:

Controlo e garantia de qualidade: O exame macroscópico é uma ferramenta fundamental para o controlo e garantia da qualidade na soldadura. Permite a identificação e avaliação de imperfeições visíveis, tais como fissuras, falta de fusão, porosidade e rebaixamento, que podem comprometer a integridade estrutural e o desempenho das juntas soldadas. Ao detetar e tratar estes defeitos numa fase inicial, o exame macroscópico ajuda a garantir que as soldaduras cumprem as normas de qualidade especificadas e os requisitos regulamentares.

Avaliação da integridade da soldadura: O exame macroscópico fornece informações valiosas sobre a integridade geral das juntas soldadas. Permite a inspeção do perfil da soldadura, incluindo a forma, o tamanho e o reforço, que são cruciais para alcançar a resistência da junta e a capacidade de carga desejadas. Ao avaliar a macroestrutura, incluindo a estrutura do grão, a segregação e as características da zona afetada pelo calor (ZTA), o exame macroscópico ajuda a avaliar as propriedades mecânicas, como a dureza, a tenacidade e a suscetibilidade à fissuração, e garante que as soldaduras são adequadas para as aplicações pretendidas.

Deteção e Localização de Defeitos: O exame macroscópico permite a identificação e a localização de defeitos em juntas soldadas. A inspeção visual da superfície da soldadura e da macroestrutura da secção transversal ajuda a identificar defeitos comuns, como descontinuidades da soldadura, porosidade, falta de fusão, penetração incompleta e rebaixamento. Ao caracterizar com precisão estes defeitos, o exame macroscópico ajuda a determinar a sua gravidade, extensão e potencial impacto no desempenho e vida útil das estruturas soldadas.

Reparação e avaliação de soldaduras: O exame macroscópico fornece informações críticas para avaliar a necessidade de reparação de soldaduras e avaliar a eficácia dos procedimentos de reparação. Ao identificar os defeitos e as suas causas, o exame macroscópico ajuda a planear e a executar estratégias de reparação adequadas para retificar os problemas observados. Também permite o



exame pós-reparação para garantir que a soldadura reparada cumpre as normas de qualidade exigidas e mantém a sua integridade estrutural.

Técnica complementar: O exame macroscópico complementa outras técnicas de inspeção utilizadas na tecnologia de soldadura, tais como os métodos de ensaios não destrutivos (NDT) e o exame microscópico. Enquanto os métodos NDT, como a radiografia, os testes ultra-sónicos e a inspeção por partículas magnéticas, fornecem informações valiosas sobre defeitos e descontinuidades internas, o exame macroscópico centra-se nas características da superfície e nos defeitos visíveis. Além disso, o exame microscópico, incluindo a análise metalográfica e a microscopia, fornece informações detalhadas sobre as características microestruturais. Ao combinar o exame macroscópico com outras técnicas de inspeção, é possível obter uma avaliação abrangente das juntas soldadas, melhorando a avaliação global da qualidade e integridade da soldadura.

O exame macroscópico é de extrema importância na tecnologia de soldadura. Permite o controlo de qualidade, a avaliação da integridade, a deteção de defeitos e a avaliação de reparações. Ao utilizar este método de inspeção, os soldadores, inspetores de soldadura e engenheiros podem garantir a produção de soldaduras de alta qualidade que cumprem as normas e especificações exigidas. Além disso, o exame macroscópico desempenha um papel crucial no aumento da segurança, fiabilidade e desempenho de estruturas e componentes soldados em várias indústrias, incluindo os sectores da construção, fabrico, transportes e energia.

Vantagens e limitações do exame macroscópico

Inspeção visual: O exame macroscópico permite a inspeção visual direta das superfícies e macroestruturas da soldadura. Isto permite aos inspetores identificar irregularidades na superfície, desvios no perfil da soldadura e defeitos visíveis a olho nu. A inspeção visual fornece feedback em tempo real, permitindo uma avaliação imediata e a tomada de decisões.

Económica: O exame macroscópico é um método de inspeção relativamente económico quando comparado com técnicas sofisticadas de ensaios não destrutivos. Requer um equipamento mínimo e pode ser realizado por pessoal treinado, utilizando ferramentas básicas como lentes de aumento, espelhos de inspeção e iluminação adequada.

Acessibilidade: O exame macroscópico é acessível e pode ser aplicado em vários ambientes, incluindo inspeções no terreno e avaliações no local. Não requer configurações complexas nem uma preparação extensa, o que o torna adequado para inspeções no local.

Complementar a outras técnicas: O exame macroscópico complementa outras técnicas de inspeção, tais como os métodos de ensaios não destrutivos (NDT) e o exame microscópico. Fornece uma avaliação ao nível da superfície que complementa as capacidades de deteção de defeitos internos dos



métodos NDT. A combinação do exame macroscópico com outras técnicas melhora a inspeção e avaliação global das juntas soldadas.

Resultados rápidos e imediatos: Com o exame macroscópico, os inspetores podem obter resultados imediatos durante o processo de inspeção. Os defeitos e irregularidades são imediatamente visíveis, permitindo uma tomada de decisão imediata relativamente à aceitação ou rejeição das soldaduras. Este feedback imediato permite ações corretivas atempadas e reduz potenciais atrasos no processo de soldadura.

Limitações do exame macroscópico:

Inspeção apenas da superfície: O exame macroscópico limita-se às características da superfície e aos defeitos visíveis das juntas soldadas. Pode não fornecer informações sobre defeitos internos ou características microestruturais que podem afetar o desempenho da soldadura a longo prazo. Para ultrapassar esta limitação, são necessárias técnicas complementares, como os ensaios não destrutivos e o exame microscópico.

Subjetividade: A inspeção visual depende da experiência, conhecimento e capacidade de interpretação do inspetor. A avaliação das soldaduras pode ser influenciada pelo julgamento individual, o que pode introduzir algum nível de subjetividade no processo de avaliação. Para minimizar a subjetividade, devem ser seguidos procedimentos e critérios de inspeção padronizados.

Sensibilidade de deteção limitada: O exame macroscópico pode ter uma sensibilidade limitada na deteção de certos tipos de defeitos, especialmente aqueles que são pequenos, subsuperfícies ou não são visualmente aparentes. Alguns defeitos, tais como microfissuras ou porosidade localizada, podem não ser facilmente detetáveis apenas por exame macroscópico.

Influência da condição da superfície: A precisão e a eficácia do exame macroscópico podem ser afetadas pelo estado da superfície da soldadura. Os contaminantes da superfície, os revestimentos ou a rugosidade da superfície podem obscurecer a visibilidade dos defeitos e podem exigir a preparação ou limpeza da superfície antes da inspeção.

Incapacidade de determinar a integridade interna: O exame macroscópico não pode avaliar a integridade interna das juntas soldadas. Não fornece informações sobre a solidez das soldaduras no interior do material, incluindo a presença de fissuras internas, falta de fusão ou penetração incompleta. Para avaliar a integridade interna, são necessárias técnicas complementares como a radiografia, o ensaio ultrassónico ou outros métodos de ensaio não destrutivos.

Papel do exame macroscópico no controlo da qualidade da soldadura

Deteção de defeitos: O exame macroscópico permite a deteção de defeitos visíveis em juntas soldadas. Permite que os inspetores identifiquem discontinuidades, tais como fissuras, porosidade, falta de fusão, penetração incompleta e rebaixamento, entre outras. Ao examinar a macroestrutura da



soldadura, os inspetores podem determinar a presença e a gravidade dos defeitos que podem comprometer as propriedades mecânicas e o desempenho da junta.

Avaliação do perfil da soldadura: O exame macroscópico ajuda a avaliar a geometria e o perfil da soldadura. Permite aos inspetores avaliar fatores como a forma, o tamanho e a consistência do cordão de soldadura, bem como o alinhamento e a penetração da junta. Desvios do perfil de soldadura especificado podem indicar problemas com a técnica de soldadura, parâmetros de soldadura ou ajuste da junta, o que pode afetar a qualidade geral e a resistência da soldadura.

Aceitação ou rejeição de soldaduras: Com base nos resultados do exame macroscópico, os inspetores podem tomar decisões informadas relativamente à aceitação ou rejeição de juntas soldadas. Os critérios de aceitação, tal como definidos pelas normas e especificações da indústria, fornecem diretrizes para determinar se uma soldadura cumpre as normas de qualidade e desempenho exigidas. O exame macroscópico ajuda a avaliar as soldaduras em relação a estes critérios e fornece provas objetivas para a aceitação ou rejeição.

Avaliação da reparação de soldaduras: Nos casos em que são identificados defeitos, o exame macroscópico ajuda a avaliar a eficácia e a integridade das reparações de soldaduras. Permite que os inspetores avaliem a qualidade das soldaduras reparadas, assegurando que estas resolvem os defeitos originais e cumprem as normas exigidas. Ao realizar um exame macroscópico após as reparações, os inspetores podem verificar se as juntas reparadas estão sólidas e aptas para o serviço.

Documentação e manutenção de registos: O exame macroscópico contribui para o processo de documentação e manutenção de registos no controlo de qualidade da soldadura. Os inspetores registam as suas observações, conclusões e avaliações durante o exame, fornecendo um registo permanente da inspeção da soldadura. Esta documentação serve como prova de conformidade com os procedimentos de controlo de qualidade e facilita a rastreabilidade e a responsabilidade no processo de soldadura.

Garantia de Qualidade e Conformidade: O exame macroscópico é uma parte integrante dos programas de garantia de qualidade na soldadura. Garante que as juntas soldadas cumprem os requisitos de qualidade especificados, as normas da indústria e as especificações do cliente. Ao realizar o exame macroscópico, os fabricantes podem demonstrar a conformidade com os requisitos regulamentares e aumentar a confiança do cliente na integridade e fiabilidade dos seus produtos soldados.

Melhoria dos processos: O exame macroscópico também desempenha um papel na melhoria do processo e na melhoria contínua da qualidade. Ao analisar os resultados do exame macroscópico, os fabricantes podem identificar defeitos recorrentes, avaliar as causas principais e implementar ações corretivas. Este ciclo de feedback ajuda a otimizar os procedimentos de soldadura, a melhorar a mão de obra e a minimizar a ocorrência de defeitos em soldaduras futuras.



1.3.2. Características macroscópicas das juntas soldadas

Este subcapítulo centrar-se-á nas diferentes características macroscópicas que podem ser observadas nas juntas soldadas. Examinaremos perfis de soldadura comuns, tais como soldaduras de filete, soldaduras de topo e soldaduras de ranhura, e discutiremos as características e variações específicas associadas a cada tipo de junta. Através de técnicas de inspeção visual e de medição, podemos avaliar a geometria, as dimensões e o aspeto geral das soldaduras, fornecendo informações sobre os parâmetros do processo de soldadura e a configuração da junta.

O exame metalográfico de juntas soldadas inclui a análise macroscópica e a análise microscópica. A metalografia tem sido descrita como uma ciência e uma arte. Tradicionalmente, a metalografia tem sido o estudo da estrutura microscópica de metais e ligas, utilizando metalógrafos óticos, microscópios eletrónicos ou outro equipamento de análise de superfícies. Mais recentemente, à medida que os materiais evoluíram, a metalografia expandiu-se para incorporar materiais que vão desde a eletrónica aos compósitos de artigos desportivos. Ao analisar a microestrutura de um material, o seu desempenho e fiabilidade podem ser melhor compreendidos. Assim, a metalografia é utilizada no desenvolvimento de materiais, na inspeção de entrada, no controlo da produção e do fabrico e na análise de falhas; por outras palavras, na fiabilidade do produto.

O exame metalográfico é uma parte integrante da investigação da qualidade das juntas soldadas, que envolve, entre outros:

- identificação de defeitos macro microscópicos;
- exame da estrutura metalográfica em todas as áreas características das juntas soldadas;
- determinação da dureza no metal de base, no ZIT e na soldadura;
- determinação da proporção dos constituintes estruturais e determinação da granulometria média;
- classificação por tamanho dos grãos da estrutura;
- determinação de outras grandezas estereométricas da estrutura (grau de dispersão de fase, grau de deformação, grau de orientação, etc.).

Dependendo da dimensão dos componentes estruturais, o exame é efetuado por microscopia ótica ou eletrónica com ampliações até 160.000:1.

A análise metalográfica é utilizada para:

- verificação dos materiais de base;
- assimilação de novos materiais de soldadura;
- verificação das tecnologias de soldadura aplicadas ao fabrico de alguns produtos;
- verificar a oportunidade de aplicar o tratamento térmico pós-soldadura;
- análise das causas de alguns acidentes e de outros.



Dos exames metalográficos, espera-se obter informações sobre:

- a existência de constituintes frágeis na ZIT e na soldadura;
- indicação de defeitos de soldadura, tanto em termos de natureza como de dimensão geométrica e número;
- encontrar os picos de dureza das zonas características;
- caracterização estrutural completa do metal de base, da ZIT e da soldadura;
- a natureza e a distribuição da fase secundária.

O exame macroscópico é um método de inspeção visual utilizado para examinar a superfície de uma solda ou de um objeto metálico para identificar quaisquer defeitos ou irregularidades visíveis. Envolve a utilização do olho nu ou de uma lente de aumento para observar a superfície da soldadura ou do metal e identificar quaisquer descontinuidades superficiais, tais como fissuras, porosidade, falta de fusão, subcotação e contaminação da superfície.

Na tecnologia de soldadura, o exame macroscópico é uma ferramenta de controlo de qualidade essencial que ajuda a garantir que os processos e procedimentos de soldadura são realizados corretamente e que o produto final soldado cumpre as normas de qualidade exigidas. É utilizado para examinar a superfície de uma soldadura depois de esta ter sido concluída para verificar se existem defeitos visíveis. É particularmente útil na tecnologia de soldadura porque permite a deteção de defeitos superficiais que podem não ser visíveis a olho nu. Isto ajuda a identificar potenciais problemas numa fase inicial, permitindo a adoção de medidas corretivas antes de o produto final estar concluído. Além disso, o exame macroscópico pode ajudar a identificar a causa de quaisquer defeitos, permitindo o desenvolvimento de procedimentos de soldadura mais eficazes. Além disso, pode ser utilizado para avaliar a qualidade do metal de base antes da soldadura. Ao examinar a superfície do metal de base, podem ser identificadas quaisquer irregularidades ou defeitos na superfície, que podem afetar a qualidade da soldadura. Isto pode ajudar a evitar a ocorrência de defeitos de soldadura e a garantir que o produto final cumpre as normas de qualidade exigidas.

Além disso, o exame macroscópico pode ser utilizado para avaliar a eficácia de um procedimento ou técnica de soldadura. Ao examinar a superfície da junta soldada, a qualidade e a consistência da soldadura podem ser avaliadas, e quaisquer áreas de fraqueza ou defeitos podem ser identificadas. Isto pode ajudar a melhorar o processo de soldadura e a desenvolver procedimentos de soldadura mais eficazes. Além disso, pode ser utilizado para análise forense em casos de falhas de soldadura ou acidentes. Ao examinar a superfície da soldadura ou do objeto metálico, a causa da falha ou do acidente pode ser identificada, o que pode ajudar a evitar a ocorrência de incidentes semelhantes no futuro.



Em geral, o exame macroscópico é uma ferramenta importante na tecnologia de soldadura que ajuda a garantir a qualidade e a segurança dos produtos soldados. Permite a deteção e correção de defeitos numa fase precoce, garantindo que o produto final cumpre as normas de qualidade exigidas e é seguro para utilização. Permite a deteção e correção de defeitos numa fase precoce, melhora os processos e procedimentos de soldadura e ajuda a prevenir falhas e acidentes de soldadura.

Introdução às características macroscópicas

As características macroscópicas são as características observáveis das juntas soldadas que podem ser examinadas visualmente sem o auxílio de uma ampliação. Estas características fornecem informações valiosas sobre a estrutura, a qualidade e o desempenho da soldadura. Ao examinar cuidadosamente as características macroscópicas, os inspetores e engenheiros podem avaliar a integridade da junta e identificar quaisquer problemas ou desvios potenciais em relação às especificações desejadas. As características macroscópicas das juntas soldadas englobam vários aspetos, incluindo a morfologia do cordão de soldadura, a zona de fusão, a zona afetada pelo calor (ZTA) e o material de base. Vamos explorar estas características com mais pormenor:

Morfologia do cordão de soldadura: A morfologia do cordão de soldadura refere-se ao aspeto físico e à forma do metal de solda depositado. Pode variar consoante o processo de soldadura, o material de adição e a configuração da junta. As morfologias comuns do cordão de soldadura incluem perfis convexos, côncavos, planos ou irregulares. A geometria e a uniformidade do cordão de soldadura fornecem informações sobre a técnica de soldadura, a entrada de calor e o grau de penetração alcançado durante o processo de soldadura.

Zona de fusão: A zona de fusão é a região onde o metal de base e o metal de solda sofreram fusão e mistura completas. Representa a área onde ocorreu a fusão do metal de base e do material de enchimento. A zona de fusão deve apresentar uma fusão e penetração adequadas, assegurando uma junta sólida e forte. O exame da zona de fusão ajuda a determinar a extensão da fusão, a ausência de defeitos e a qualidade geral da soldadura.

Zona afetada pelo calor (HAZ): A ZTA é a parte do metal de base adjacente à zona de fusão que foi sujeita a calor durante a soldadura. A entrada de calor pode causar alterações metalúrgicas, tais como crescimento de grão, transformações de fase e alterações nas propriedades mecânicas. O tamanho e as características da ZTA são influenciados por fatores como os parâmetros de soldadura, a composição do material e a taxa de arrefecimento. O exame da ZTA permite a avaliação de potenciais alterações microestruturais e a presença de problemas relacionados com o calor, como o crescimento excessivo de grão ou variações de dureza.

Material de base: O material de base, ou material de base, refere-se ao metal que está a ser unido por soldadura. O exame macroscópico do material de base fornece uma referência para avaliar a



integridade da soldadura. Envolve a avaliação da composição do material de base, da estrutura do grão, do estado da superfície e de quaisquer características ou defeitos pré-existentes que possam afetar a qualidade da soldadura. A comparação das características macroscópicas do material de base com as da soldadura pode ajudar a identificar discontinuidades, desvios ou incompatibilidades.

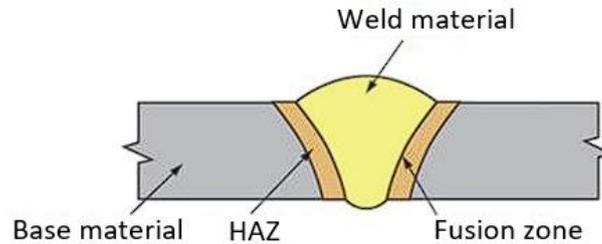


Fig. 1.3.1: Componentes das juntas soldadas. Fonte: <https://www.kobelco-welding.jp/education-center/medium/medium02.html>

O exame macroscópico permite uma análise abrangente destas características através da inspeção visual da junta de soldadura e das áreas circundantes. Fornece uma compreensão a nível macro da qualidade da soldadura, tal como a extensão da fusão, o reforço adequado, a ausência de fissuras e a conformidade geral com as especificações pretendidas. A interpretação das características macroscópicas requer um olho treinado e um conhecimento do processo de soldadura, dos materiais e das normas aplicáveis. Além disso, é importante considerar os requisitos específicos do componente ou estrutura soldada, uma vez que diferentes aplicações podem ter critérios únicos para avaliar as características macroscópicas. Esta informação serve de base para avaliar a conformidade da soldadura com as especificações, identificando quaisquer problemas ou desvios potenciais e tomando decisões informadas relativamente à aceitabilidade da junta.

Perfis de soldadura e configurações de juntas

Na tecnologia de soldadura, o perfil de soldadura e a configuração da junta desempenham um papel significativo na determinação da resistência, integridade e desempenho da junta soldada. O perfil de soldadura refere-se à forma e às dimensões da secção transversal soldada, enquanto a configuração da junta descreve a disposição e a geometria da junta a ser soldada. A compreensão destes aspetos é essencial para avaliar a qualidade da soldadura e garantir a sua adequação à aplicação pretendida.

Configuração da soldadura e perfis de juntas

Soldadura de filete: Uma soldadura de filete é um tipo comum de perfil de soldadura utilizado para unir duas superfícies que são aproximadamente perpendiculares uma à outra. Forma uma secção transversal de forma triangular e é frequentemente utilizada para juntas sobrepostas, juntas em T e juntas de canto. O tamanho da soldadura de filete é especificado pelo comprimento da perna e pela espessura da garganta.

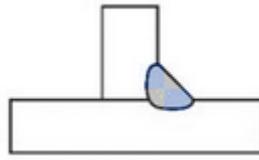


Fig. 1.3.2: Soldadura de filete

Soldadura de ranhura: Uma soldadura de ranhura é utilizada para unir duas placas ou secções com uma ranhura ou espaço entre elas. A ranhura pode ser preparada de várias formas, tais como quadrada, em V, em U, em J ou biselada, para acomodar o processo de soldadura e proporcionar uma penetração e fusão suficientes. As soldaduras de ranhuras são normalmente utilizadas em aplicações estruturais e requerem uma preparação e um controlo precisos para garantir uma qualidade de soldadura adequada.

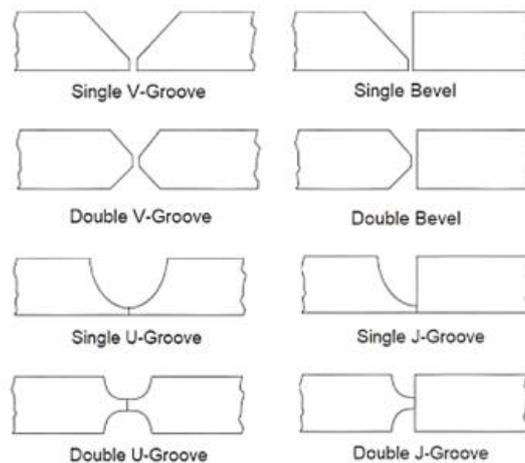


Fig. 1.3.3: Tipos de soldadura de ranhura

Soldadura de topo: A soldadura topo a topo envolve a união de dois bordos adjacentes do material de base, criando uma fusão em penetração total, em que toda a espessura da junta se funde, ou em penetração parcial, em que apenas uma parte se funde. Os perfis de soldadura de topo podem variar entre quadrados, em forma de V, em forma de U e biselados, dependendo da configuração da junta. Em contrapartida, uma junta de topo une dois materiais de ponta a ponta sem sobreposição, com opções de configurações quadradas ou biseladas. A escolha do método de soldadura é ditada pela espessura e pelos requisitos da junta, e a obtenção de uma junta de topo forte depende de um ajuste meticuloso, do alinhamento e de parâmetros de soldadura precisos.

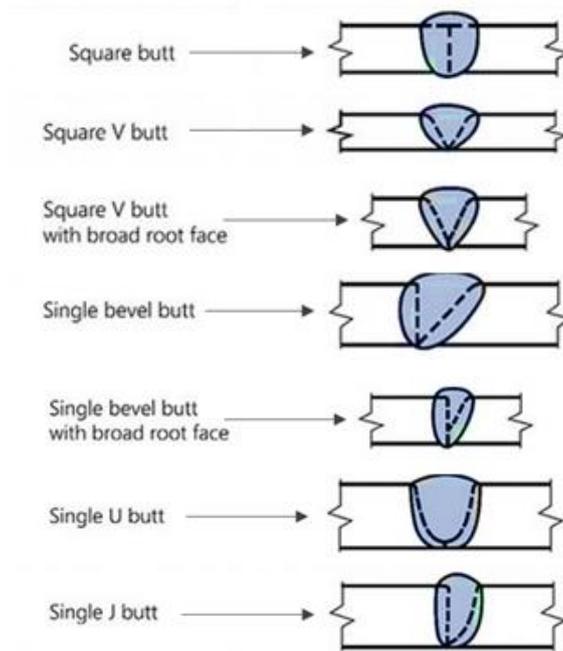


Fig. 1.3.4: Tipos de soldadura de topo



Fig. 1.3.5: Junta de topo

Junta sobreposta: Numa junta sobreposta, duas peças sobrepostas de material são unidas por soldadura ao longo da região sobreposta. É normalmente utilizada para unir placas finas ou componentes de chapa metálica. A resistência de uma junta sobreposta depende da dimensão da sobreposição, do comprimento da soldadura e do processo de soldadura utilizado.



Fig. 1.3.6: Junta sobreposta

Junta em T: Uma junta em T é formada quando a extremidade de uma peça é soldada à superfície de outra peça, criando uma configuração em forma de T. As juntas em T são amplamente utilizadas em aplicações estruturais e requerem uma consideração cuidadosa dos parâmetros de soldadura e do reforço para garantir uma resistência e transferência de carga adequadas.

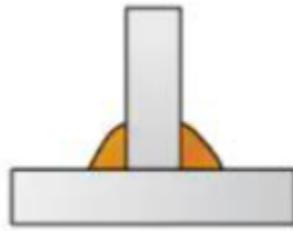


Fig. 1.3.7: Junta em T

Junta de canto: Uma junta de canto é criada quando duas peças de material se encontram num ângulo de 90 graus e são soldadas entre si. É normalmente utilizada em estruturas de caixas, estruturas e sistemas de tubagem. A preparação adequada da soldadura, a penetração e o reforço são cruciais nas juntas de canto para garantir a integridade estrutural e a resistência a concentrações de tensão.



Fig. 1.3.8: Junta de canto

A avaliação dos perfis de soldadura e das configurações da junta é vital na tecnologia de soldadura, uma vez que têm um impacto direto na resistência, na capacidade de carga e na facilidade de manutenção da junta soldada. O exame destas características envolve a inspeção visual da secção transversal da soldadura, a medição das dimensões, a avaliação do reforço e a verificação da conformidade com os requisitos especificados. É importante aderir às normas, códigos e especificações aplicáveis ao avaliar os perfis de soldadura e as configurações das juntas. Estas normas fornecem diretrizes para perfis de soldadura, dimensões, reforço e critérios de qualidade aceitáveis com base na aplicação específica e no material a soldar. Ao examinar cuidadosamente os perfis de soldadura e as configurações das juntas, os soldadores, inspetores e engenheiros podem garantir que a soldadura cumpre os requisitos de resistência e integridade necessários, minimizando o risco de falha e garantindo a longevidade e o desempenho da estrutura ou componente soldado.

Tamanho, forma e penetração da soldadura

A dimensão, a forma e a penetração da soldadura são parâmetros cruciais na soldadura que afetam diretamente a resistência, a integridade e o desempenho da junta soldada. Avaliar e compreender estes aspetos é essencial para avaliar a qualidade da soldadura e garantir a sua adequação à aplicação pretendida.



Dimensão da soldadura: A dimensão da soldadura refere-se às dimensões da secção transversal da soldadura, incluindo o seu comprimento, largura e profundidade. A dimensão da soldadura é normalmente especificada em termos do comprimento da perna, da espessura da garganta ou da largura da soldadura. A dimensão correta da soldadura é importante para atingir a resistência necessária e a capacidade de carga da junta. É determinado por fatores como a conceção da junta, a espessura do material, o processo de soldadura e os parâmetros de soldadura.

Forma da soldadura: A forma da secção transversal da soldadura pode variar consoante a configuração da junta, o processo de soldadura e a técnica de soldadura utilizada. As formas comuns de soldadura incluem perfis convexos, côncavos e planos. A forma desejada é determinada pelo procedimento de soldadura e pelos requisitos da aplicação. A forma da soldadura pode influenciar fatores como a concentração de tensões, a resistência à fadiga e a capacidade de suportar as cargas aplicadas.

Penetração da solda: A penetração da solda refere-se à profundidade a que o metal de solda se estende no material de base. É uma medida da fusão e ligação entre a soldadura e o metal de base. A penetração adequada da soldadura é essencial para obter uma junta forte e fiável. Uma penetração insuficiente pode resultar numa fusão incompleta, na falta de resistência da junta e numa capacidade de carga reduzida. A penetração excessiva, por outro lado, pode levar a uma entrada excessiva de calor, distorção e potenciais defeitos.

A avaliação da dimensão, forma e penetração da soldadura envolve técnicas de inspeção visual, medição e avaliação. A inspeção visual permite a observação direta da secção transversal da soldadura e a identificação de quaisquer desvios em relação aos requisitos especificados. As ferramentas de medição, tais como medidores de soldadura, paquímetros e técnicas de microscópio, podem ser utilizadas para determinar com precisão as dimensões e avaliar a qualidade da soldadura.

É importante consultar as normas, códigos e especificações relevantes ao avaliar o tamanho, a forma e a penetração da soldadura; estes fornecem diretrizes e critérios de aceitação para as dimensões de soldadura desejadas e a profundidade de penetração com base na aplicação específica, no tipo de material e no processo de soldadura utilizado. O cumprimento destas normas garante que a soldadura cumpre os requisitos de resistência e integridade necessários. A comunicação e a documentação adequadas das dimensões, da forma e da penetração da soldadura são essenciais para o controlo de qualidade e a rastreabilidade. Estes registos servem de referência para futuras inspeções, reparações e atividades de manutenção. Ao examinar e avaliar de perto o tamanho, a forma e a penetração da soldadura, os soldadores, inspetores e engenheiros podem garantir que a junta soldada cumpre os requisitos de resistência e integridade necessários.



Perfis de reforço e de soldadura de filete

Os perfis de soldadura de reforço e de filete são aspetos importantes do exame macroscópico na tecnologia de soldadura. Fornecem informações valiosas sobre a qualidade, a resistência e a integridade estrutural da junta soldada. A compreensão e a avaliação destas características são cruciais para garantir a fiabilidade e o desempenho da soldadura.

Reforço

O reforço, também conhecido como reforço de soldadura ou coroa de soldadura, refere-se ao excesso de metal de soldadura que se estende para além da superfície original do material de base. É tipicamente observado no lado superior de uma junta de soldadura, normalmente visto em soldaduras de filete e soldaduras de topo. O reforço desempenha um papel significativo no aumento da resistência e da capacidade de carga da junta, fornecendo material adicional para a distribuição de tensões. No entanto, o reforço excessivo pode levar a problemas como a concentração de tensões, a redução da vida à fadiga e a potencial interferência com componentes ou estruturas adjacentes.

A avaliação adequada do reforço de soldadura envolve a medição da sua altura ou profundidade, o que pode ser feito através de inspeção visual, medidores de soldadura ou profilómetros. Os níveis aceitáveis de reforço são normalmente especificados em normas, códigos ou especificações de projeto relevantes, tendo em conta fatores como o processo de soldadura, a conceção da junta e a espessura do material. A avaliação do reforço assegura a conformidade com estes requisitos e garante a integridade estrutural da junta soldada.

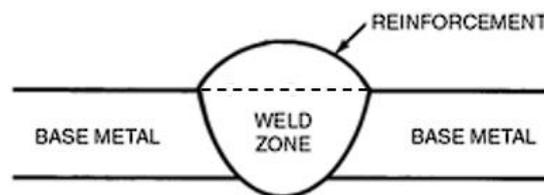


Fig. 1.3.9: Reforço na soldadura

Perfis de soldadura em ângulo

As soldaduras de filete são normalmente utilizadas em várias aplicações de soldadura, especialmente para unir componentes com juntas sobrepostas, juntas em T ou juntas de canto. O perfil da soldadura em ângulo refere-se à forma e às dimensões da secção transversal da soldadura nestas juntas. Desempenha um papel vital na determinação da força, da capacidade de carga e da resistência à fadiga da junta.

O perfil da soldadura em ângulo é tipicamente caracterizado pelo comprimento da perna, espessura da garganta e raio do dedo do pé. O comprimento da perna refere-se à distância desde a

raiz da junta até à intersecção do cordão de soldadura com o material de base. A espessura da garganta representa a distância mais curta entre a raiz e a face da soldadura. O raio do dedo do pé refere-se à suavidade e arredondamento da transição entre a soldadura e o material de base.

A avaliação adequada dos perfis de soldadura em ângulo envolve a inspeção visual e a medição exata utilizando ferramentas como os calibradores de soldadura em ângulo ou os calibradores de perfil. Os valores medidos são depois comparados com os requisitos especificados nas normas, códigos ou especificações do projeto aplicáveis. Os desvios em relação aos perfis de soldadura em ângulo exigidos podem indicar problemas como tamanho de soldadura insuficiente, fusão inadequada ou técnicas de soldadura impróprias. A resolução destes desvios é necessária para garantir a resistência e a integridade desejadas da junta. A avaliação do reforço e dos perfis de soldadura em ângulo é essencial para avaliar a qualidade e a integridade estrutural das juntas soldadas. Através da inspeção visual e de medições precisas, os soldadores, inspetores e engenheiros podem verificar a conformidade das soldaduras com as normas e especificações relevantes. Ao garantir o reforço adequado e os perfis de soldadura em ângulo, a resistência, fiabilidade e desempenho da junta soldada podem ser mantidos, minimizando o risco de falha e promovendo a qualidade geral da soldadura.

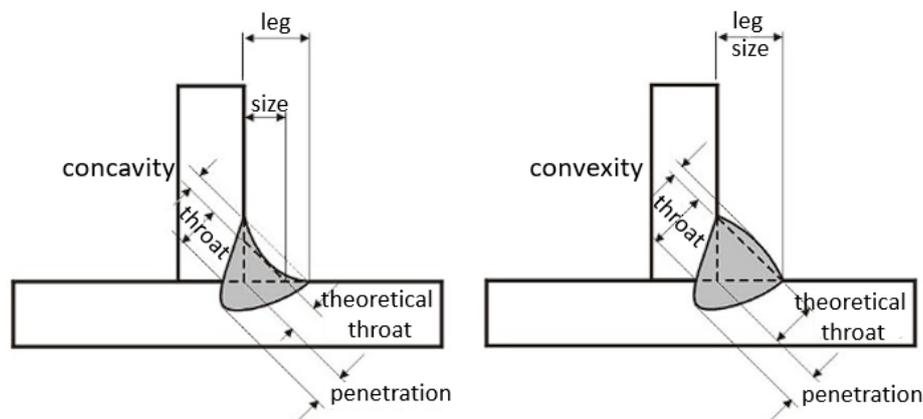


Fig. 1.3.10: Elementos geométricos dos perfis de soldadura em ângulo [1.3.25]

Perfis de soldadura de ranhuras e ângulos de bisel

Os perfis de soldadura de ranhura e os ângulos de chanfro são aspetos importantes do exame macroscópico na tecnologia de soldadura. Fornecem informações valiosas sobre a geometria, a resistência e a integridade das juntas de soldadura de ranhuras. A compreensão e a avaliação destas características são cruciais para garantir a qualidade e o desempenho da soldadura.

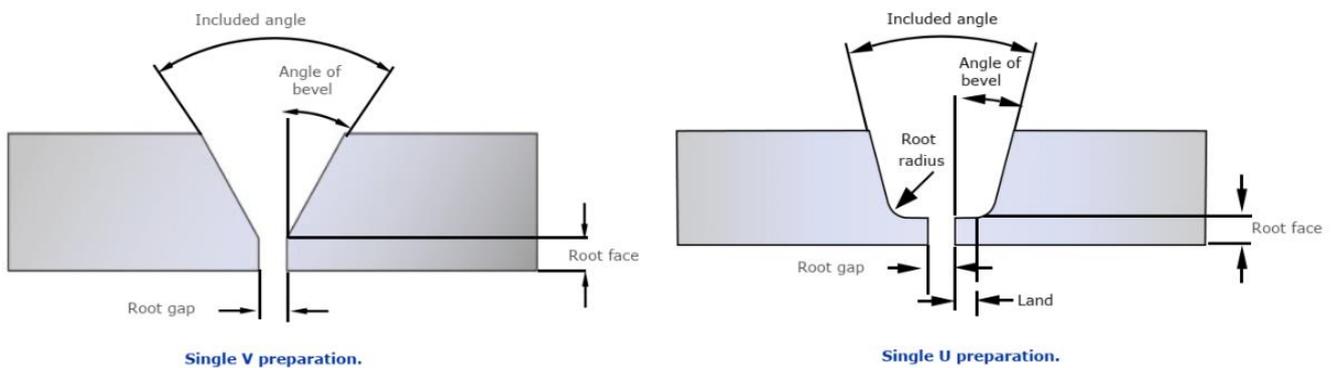


Fig. 1.3.11: Representação do ângulo de chanfro para perfis de soldadura de ranhuras em V e U [1.3.26]

Perfis de soldadura de ranhura

As soldaduras de ranhuras são normalmente utilizadas em várias aplicações de soldadura em que dois ou mais componentes são unidos através do preenchimento de uma ranhura entre eles. O perfil da soldadura de ranhura refere-se à forma e às dimensões da secção transversal da soldadura na junta de ranhura. Desempenha um papel vital na determinação da força, da capacidade de carga e da resistência à fadiga da junta.

O perfil da soldadura de ranhura é tipicamente caracterizado pela sua profundidade, largura e ângulo das paredes laterais. A profundidade representa a distância entre a raiz da soldadura e a superfície do material de base. A largura refere-se à distância entre as paredes laterais da ranhura. O ângulo das paredes laterais, também conhecido como ângulo incluído, é o ângulo formado entre as paredes laterais da ranhura.

A avaliação adequada dos perfis de soldadura de ranhuras envolve uma inspeção visual e uma medição precisa utilizando ferramentas como medidores de profundidade, medidores de largura ou medidores de perfil. Os valores medidos são depois comparados com os requisitos especificados nas normas, códigos ou especificações do projeto aplicáveis. Os desvios em relação aos perfis de soldadura de ranhuras exigidos podem indicar problemas como uma penetração incorreta da soldadura, uma fusão inadequada ou uma preparação incorreta da ranhura. A resolução destes desvios é necessária para garantir a resistência e a integridade desejadas da junta.

Ângulos de bisel

Os ângulos de bisel são um aspeto essencial das soldaduras de ranhuras, particularmente em juntas com uma configuração de ranhura em V ou em U. O ângulo de bisel refere-se ao ângulo formado entre as superfícies preparadas do material de base antes da soldadura. Determina a forma e o tamanho da ranhura e influencia fatores como a penetração da soldadura, o volume da soldadura e a facilidade de soldadura.



A avaliação correta dos ângulos de bisel envolve uma inspeção visual e uma medição precisa utilizando ferramentas como transferidores ou medidores de ângulos. Os valores medidos são depois comparados com os requisitos especificados nas normas, códigos ou especificações do projeto aplicáveis. Os desvios dos ângulos de bisel exigidos podem indicar problemas como uma preparação incorreta da ranhura, parâmetros de soldadura incorretos ou um ajuste incorreto da junta. A retificação destes desvios é necessária para garantir a penetração adequada da soldadura, a fusão e a resistência da junta.

A avaliação dos perfis de soldadura de ranhuras e dos ângulos de chanfro é crucial para avaliar a qualidade e a integridade das juntas de soldadura de ranhuras. Ao inspecionar visualmente e medir com precisão estas características, os soldadores, inspetores e engenheiros podem verificar a conformidade das soldaduras com as normas e especificações relevantes. Ao garantir perfis de soldadura de ranhuras e ângulos de bisel adequados, a resistência, fiabilidade e desempenho da junta soldada podem ser mantidos, minimizando o risco de falha e promovendo a qualidade geral da soldadura.

1.3.3. Defeitos em juntas soldadas

As juntas soldadas são suscetíveis a vários tipos de defeitos que podem comprometer a sua integridade estrutural e o seu desempenho. Neste subcapítulo, iremos explorar os diferentes tipos de defeitos que podem ser identificados através de um exame macroscópico. Discutiremos defeitos como a porosidade, a falta de fusão, a subcotação, o reforço excessivo, as fissuras e as irregularidades da superfície. A compreensão das causas, características e implicações destes defeitos é essencial para avaliar a qualidade da soldadura e garantir a fiabilidade a longo prazo das estruturas soldadas.

Defeitos de soldadura comuns e suas causas

Compreender os defeitos de soldadura comuns e as suas causas é essencial para prevenir a sua ocorrência e garantir soldaduras de alta qualidade. Neste texto técnico, vamos explorar alguns dos defeitos de soldadura mais comuns e os fatores que contribuem para a sua formação.

Porosidade

A porosidade é um defeito de soldadura predominante caracterizado pela presença de pequenas bolsas de gás ou espaços vazios no metal de soldadura. Pode enfraquecer a soldadura e torná-la suscetível de fissuração. As principais causas da porosidade incluem:

- Contaminantes na superfície do metal de base ou do material de enchimento, tais como óleo, humidade ou ferrugem.
- Cobertura inadequada do gás de proteção ou fluxo de gás durante a soldadura, conduzindo a uma proteção inadequada contra os gases atmosféricos.



- Parâmetros de soldadura excessivos, como corrente ou velocidade de deslocação elevadas, que podem resultar na retenção de gases.



Fig. 1.3.12.1: Porosidade mostrada através de desenho bidimensional

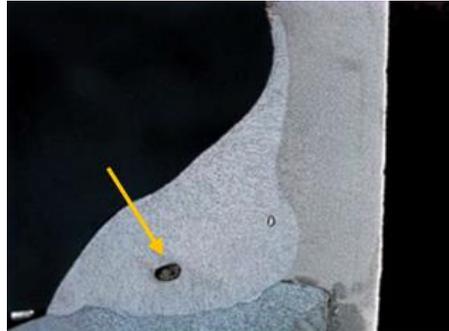


Fig. 1.3.12.2: Um exemplo macrográfico de porosidade [1.3.25]

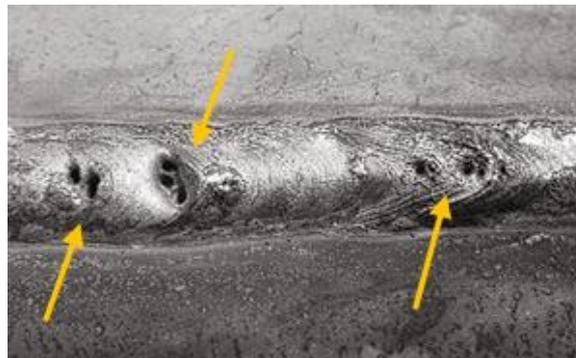


Fig. 1.3.12.3: Um exemplo de porosidade [1.3.27]

Falta de fusão

A falta de fusão ocorre quando há uma ligação incompleta entre o metal de base e o material de enchimento ou entre as camadas adjacentes da soldadura. Pode conduzir a juntas fracas e a uma capacidade de carga reduzida. Algumas causas comuns de falta de fusão incluem:

- Entrada de calor insuficiente, que impede a fusão e a ligação corretas do metal de base e do material de enchimento.
- Penetração inadequada, em que a soldadura não atinge a profundidade total da junta, resultando numa fusão incompleta.
- Mau ajuste da junta, com lacunas ou desalinhamento que impedem a fusão correta entre as superfícies metálicas.



Fig. 1.3.13.1: Falta de fusão demonstrada através de um desenho bidimensional

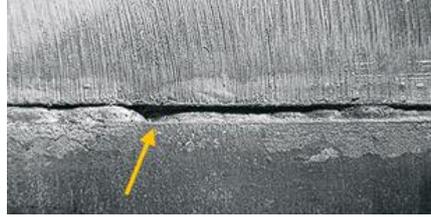


Fig. 1.3.13.2: Um exemplo de falta de fusão [1.3.28]

Fendas

As fissuras em juntas soldadas são defeitos que podem ocorrer de várias formas, tais como fissuras a quente, fissuras a frio ou fissuras por tensão. As fissuras podem comprometer significativamente a integridade estrutural da soldadura e podem propagar-se sob cargas aplicadas ou condições de serviço. As causas das fissuras incluem:

- Níveis elevados de tensão residual, que podem ser causados por técnicas de soldadura incorretas, pré-aquecimento inadequado ou arrefecimento rápido.
- Conceção inadequada da junta, conduzindo a concentrações de tensão e a áreas localizadas de elevada tensão.
- Consumíveis de soldadura incompatíveis ou propriedades do metal de base inadequadas, resultando em incompatibilidade metalúrgica e maior suscetibilidade a fissuras.



Fig. 1.3.14.1: Fissura representada através de desenho bidimensional



Fig. 1.3.14.2: Um exemplo de fissura [1.3.25]

Cortes inferiores

Os cortes inferiores são uma depressão semelhante a uma ranhura ao longo da extremidade da soldadura ou das paredes laterais da soldadura. Enfraquece a junta e pode atuar como um ponto de concentração de tensões. Os cortes inferiores podem ser causados por:



- Entrada excessiva de calor ou correntes de soldadura elevadas, levando a uma fusão excessiva e à remoção de material nos bordos da soldadura.
- Técnica de soldadura incorreta, como a manipulação incorreta do arco de soldadura ou a trelagem excessiva.



Fig. 1.3.15.1: Corte inferior representados através de desenho bidimensional

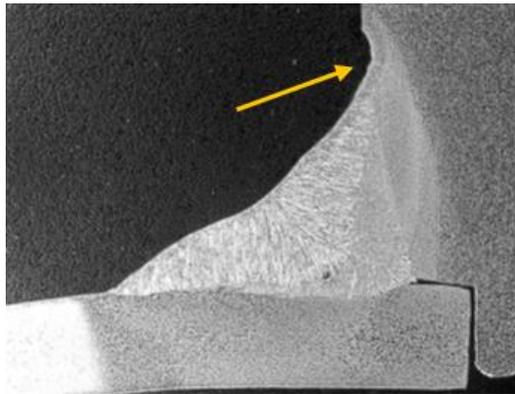


Fig. 1.3.15.2: Exemplo macrográfico de um corte inferior [1.3.25]

Salpicos

Os salpicos referem-se à ejeção de pequenas gotas de metal fundido durante a soldadura, que podem depositar-se em superfícies próximas. Embora os salpicos não afetam diretamente a integridade da soldadura, podem criar problemas estéticos e indicar condições de soldadura inadequadas ou contaminação do elétrodo.



Fig. 1.3.16.1: Salpicos mostrados através de desenho bidimensional



Fig. 1.3.16.2: Um exemplo de salpicos [1.3.25]



Penetração incompleta

A penetração incompleta ocorre quando a soldadura não penetra totalmente na espessura da junta. Esta situação pode enfraquecer a junta e comprometer a sua capacidade de suporte de carga. As causas da penetração incompleta incluem:

- Insuficiente aporte de calor ou parâmetros de soldadura que não fornecem energia adequada para fundir e fundir toda a espessura da junta.
- Preparação incorreta da junta, tal como um espaço de junta demasiado estreito ou superfícies de junta que não estão devidamente limpas e preparadas.
- Técnica de soldadura incorreta, como o ângulo incorreto do eléctrodo ou a manipulação incorreta do arco de soldadura.



Fig. 1.3.17.1: Penetração incompleta mostrada através de desenho bidimensional

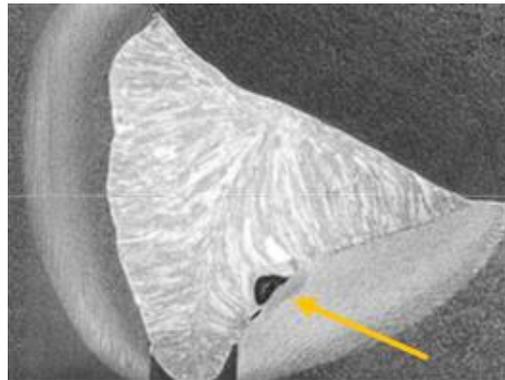


Fig. 1.3.17.2: Um exemplo macrográfico de penetração incompleta [1.3.25]

Penetração excessiva

A penetração excessiva refere-se ao facto de o metal de solda penetrar demasiado profundamente no metal de base, resultando numa fusão excessiva. Pode levar a distorção, perda de resistência da junta e potenciais defeitos na parte de trás da soldadura. A penetração excessiva é frequentemente causada por:

- Entrada excessiva de calor ou correntes de soldadura elevadas, que causam uma fusão e penetração excessivas no metal de base.
- Conceção ou ajuste inadequado da junta, tal como juntas com espaço de raiz insuficiente ou ângulo de bisel incorreto.



Fig. 1.3.18.1: Penetração excessiva mostrada através de desenho bidimensional

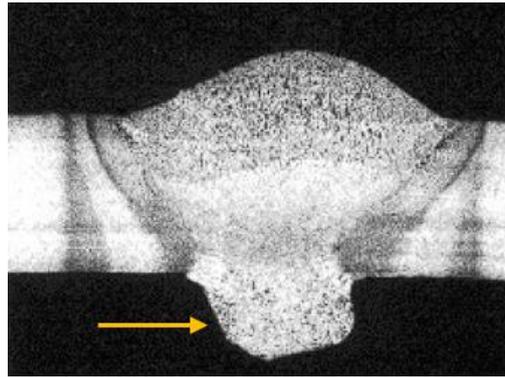


Fig. 1.3.18.2: Um exemplo macrográfico de penetração excessiva [1.3.29]

Inclusões

As inclusões são materiais estranhos, como escória ou partículas não metálicas, que ficam presos no metal de soldadura. Podem enfraquecer a soldadura e atuar como pontos de concentração de tensão. As inclusões podem ser causadas por:

- Contaminação dos consumíveis de soldadura, como o material de enchimento ou o fluxo, com sujidade, ferrugem ou humidade.
- Técnica de soldadura inadequada, como manipulação ou movimento excessivo do eletrodo, causando a inclusão de escória.



Fig. 1.3.19.1: Inclusões mostradas através de desenho bidimensional

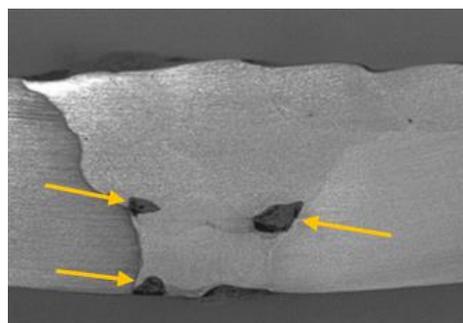


Fig. 1.3.19.2: Um exemplo macrográfico de inclusão de escória [1.3.25]

Distorção

A distorção refere-se à deformação ou ao desalinhamento do metal de base ou da junta soldada devido ao processo de soldadura. Pode resultar em imprecisões dimensionais, desajustes com componentes adjacentes ou concentrações de tensão. A distorção é influenciada por vários fatores, incluindo:

- Expansão e contração térmicas durante a soldadura, especialmente quando se soldam secções espessas ou quando se utilizam elevados aportes térmicos.

- Conceção incorreta da junta, tal como uma provisão inadequada para expansão e contração ou utilização inadequada de fixações para controlar a distorção.

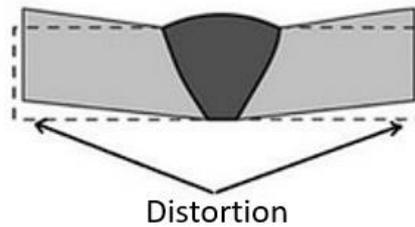


Fig. 1.3.20.1: Distorção mostrada através de desenho bidimensional [1.3.30]



Fig. 1.3.20.2: Um exemplo de distorção [1.3.31]

Reforço inadequado

O reforço inadequado refere-se à acumulação insuficiente de metal de solda em soldas de filete ou à altura inadequada do cordão de solda em soldas de ranhura. Pode afetar a resistência e a capacidade de carga da junta. As causas de um reforço inadequado incluem:

- Tamanho de soldadura insuficiente ou técnica de soldadura incorreta, resultando numa deposição inadequada do metal de soldadura.
- Seleção incorreta dos parâmetros de soldadura ou dos consumíveis, conduzindo a uma fusão insuficiente ou à formação incompleta do cordão de soldadura.



Fig. 1.3.21.1: Reforço excessivo mostrado através de desenho bidimensional



Fig. 1.3.21.2: Reforço insuficiente mostrado através de desenho bidimensional

Porosidade e inclusões de gás



A porosidade e as inclusões de gás são defeitos comuns que podem ocorrer em juntas soldadas e que têm um impacto significativo nas suas propriedades mecânicas e no seu desempenho. Compreender as causas, as características e os métodos de deteção destes defeitos é crucial para garantir a qualidade e a fiabilidade das soldaduras. Nesta secção, iremos aprofundar o tema da porosidade e das inclusões de gás e as suas implicações no campo da metalografia.

A porosidade refere-se à presença de pequenos vazios ou cavidades no metal de solda ou na interface de solda. Estes vazios podem variar em tamanho, forma e distribuição. São normalmente causados pelo aprisionamento de gases, como o hidrogénio, o azoto ou o oxigénio, durante a solidificação do metal de solda. As fontes destes gases podem incluir humidade, contaminantes nas superfícies que estão a ser soldadas, ou a decomposição de certos compostos presentes no metal de base ou nos consumíveis de soldadura.

As inclusões de gás, por outro lado, são cavidades discretas cheias de gás que são tipicamente maiores do que os poros associados à porosidade. Podem ser esféricas, alongadas ou de forma irregular e são frequentemente encontradas no metal de solda. As inclusões de gás podem resultar do aprisionamento de gases durante a solidificação ou da libertação de gases dissolvidos à medida que a soldadura arrefece. A presença de inclusões de gás pode ter efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas da soldadura, tais como a redução da sua ductilidade, o aumento da sua suscetibilidade à fissuração e o comprometimento da sua integridade estrutural.

Causas da porosidade e das inclusões de gás

Humidade e contaminantes: A humidade ou os contaminantes presentes nas superfícies a soldar podem levar à libertação de gases durante a soldadura, resultando em porosidade e inclusões de gás.

Proteção inadequada: Gases de proteção ou fluxos inadequados podem não fornecer proteção suficiente contra os gases atmosféricos, levando à sua incorporação no metal de solda.

Metal de base e consumíveis: Certos compostos presentes no metal de base ou nos consumíveis de soldadura podem decompor-se durante a soldadura, libertando gases que podem causar porosidade e inclusões de gás.

Parâmetros de soldadura: Parâmetros de soldadura inadequados, tais como uma entrada excessiva de calor ou um controlo inadequado do arco, podem gerar níveis excessivos de gás na poça de fusão, levando à porosidade.

Características da porosidade e das inclusões de gás

Tamanho e forma: A porosidade pode variar de pequenos vazios esféricos a cavidades maiores de forma irregular. As inclusões de gás são frequentemente maiores e podem ter várias formas, incluindo esféricas, alongadas ou irregulares.



Distribuição: A porosidade e as inclusões de gás podem ser distribuídas aleatoriamente ao longo da soldadura ou concentradas em áreas específicas, dependendo das condições de soldadura e das propriedades do material.

Conectividade: A porosidade pode estar interligada, formando redes dentro da soldadura, enquanto as inclusões de gás são tipicamente discretas e isoladas.

Efeito nas propriedades mecânicas: Tanto a porosidade como as inclusões de gás podem reduzir as propriedades mecânicas da soldadura, tais como a resistência, a ductilidade e a tenacidade, tornando-a mais propensa a falhas.

Métodos de deteção

Inspeção visual: O exame da superfície pode revelar a presença de porosidade visível ou inclusões de gás, embora possa não detetar defeitos mais pequenos ou subsuperfícies.

Exame metalográfico: Podem ser preparadas e analisadas amostras de secções transversais da soldadura utilizando microscopia ótica ou microscopia eletrónica. Isto permite uma caracterização precisa da porosidade e das inclusões de gás, incluindo o seu tamanho, forma, distribuição e conectividade.

Ensaio não destrutivo (NDT): Técnicas como o ensaio ultrassónico, o ensaio radiográfico ou o ensaio de correntes de Foucault podem detetar e localizar defeitos internos, incluindo porosidade e inclusões de gás, sem necessidade de preparação ou destruição de amostras.

Ensaio com Penetrante: Este método envolve a aplicação de um líquido penetrante na superfície da soldadura, que pode infiltrar-se e realçar a porosidade de rutura da superfície ou as inclusões de gás, ajudando na sua deteção.

A deteção e caracterização precisas da porosidade e das inclusões de gás permitem aos soldadores e inspetores avaliar a qualidade da soldadura e tomar as medidas corretivas adequadas. Ao identificar as causas destes defeitos, tais como ajustar os parâmetros de soldadura, otimizar as práticas de proteção ou melhorar a limpeza do material, podem ser tomadas medidas para minimizar a sua ocorrência e melhorar a integridade e fiabilidade das juntas soldadas.

Falta de fusão e penetração incompleta

A falta de fusão e a penetração incompleta são defeitos de soldadura comuns que podem afetar significativamente a integridade e a resistência das juntas soldadas. Na metalografia, o estudo destes defeitos desempenha um papel crucial na compreensão das suas causas, características e métodos de deteção.

Causas da falta de fusão e da penetração incompleta



Entrada de calor inadequada: Um aporte de calor insuficiente durante o processo de soldadura pode impedir a fusão adequada entre o metal de base e o metal de adição, levando a uma falta de fusão ou a uma penetração incompleta.

Técnica de soldadura inadequada: A manipulação incorreta da tocha de soldadura ou do eletrodo, tal como uma velocidade de deslocação ou ângulo do eletrodo inadequados, pode resultar numa fusão e penetração inadequadas.

Conceção e ajuste da junta: Uma má conceção da junta, incluindo uma folga excessiva ou um mau ajuste entre os metais de base, pode impedir a fusão e a penetração adequadas.

Controlo do banho de solda: O controlo inadequado do banho de fusão, como a tecelagem excessiva ou a manipulação incorreta do arco, pode contribuir para uma fusão e penetração insuficientes.

Características da falta de fusão e da penetração incompleta

Falta de fusão: A falta de fusão ocorre quando há uma falha na ligação adequada do metal de adição ou do metal de base. Aparece como uma área não fundida entre o metal de base e o metal de solda.

Penetração Incompleta: A penetração incompleta refere-se à falha do metal de solda em penetrar em toda a espessura da junta. É caracterizada por uma fusão parcial entre o metal de base e o metal de solda, resultando numa falta de continuidade na junta.

Localização e extensão: A falta de fusão e a penetração incompleta podem ocorrer em vários locais dentro da solda, como a raiz, as paredes laterais ou a superfície. A extensão do defeito pode variar desde descontinuidades localizadas até abranger uma porção significativa da junta.

Efeito na resistência da junta: A falta de fusão e a penetração incompleta podem reduzir significativamente a resistência e a capacidade de suporte de carga da junta soldada. Estes defeitos criam caminhos potenciais para a iniciação e propagação de fissuras, levando à falha prematura sob tensões aplicadas.

Métodos de deteção

Inspeção visual: O exame visual da superfície da soldadura pode frequentemente revelar a presença de falta de fusão ou penetração incompleta. No entanto, pode não ser suficiente para detetar defeitos internos ou para uma caracterização precisa.

Exame metalográfico: A análise da secção transversal da soldadura utilizando microscopia ótica ou microscopia eletrónica permite uma inspeção detalhada da zona de soldadura. Este método ajuda a identificar a presença, a extensão e a localização da falta de fusão e da penetração incompleta.

Ensaio Radiográficos: As técnicas de ensaio não destrutivas, como a radiografia de raios X ou de raios gama, podem detetar defeitos internos, incluindo a falta de fusão e a penetração incompleta, fornecendo uma imagem bidimensional da soldadura.



Ensaio por ultrassons: O exame ultrassónico utiliza ondas sonoras para detetar e avaliar defeitos internos. Pode detetar eficazmente a falta de fusão e a penetração incompleta através da análise dos ecos refletidos pelos defeitos.

Rebaixos e penetração excessiva

Os cortes inferiores e a penetração excessiva são defeitos de soldadura comuns que podem ocorrer durante o processo de soldadura. No campo da metalografia, estes defeitos são de grande importância, uma vez que podem afetar a integridade estrutural e as propriedades mecânicas das juntas soldadas. Vamos explorar estes defeitos, incluindo as suas causas, características e métodos de deteção.

Causas que levam à ocorrência de cortes inferiores

Os cortes inferiores são normalmente causados por calor excessivo ou técnicas de soldadura inadequadas. As causas mais comuns para os cortes inferiores incluem:

- Corrente ou tensão de soldadura elevada que provoca uma entrada excessiva de calor.
- Controlo inadequado dos parâmetros de soldadura, como a velocidade de deslocação e o comprimento do arco.
- Ângulo incorreto do maçarico ou técnica de manipulação inadequada.
- Seleção insuficiente ou incorreta do metal de adição.

Características dos cortes inferiores

Os cortes inferiores são caracterizados por uma ranhura ou cavidade ao longo dos bordos da junta de soldadura. A profundidade e a largura do corte inferior podem variar consoante a gravidade do defeito. Os cortes inferiores podem enfraquecer a junta ao reduzir a espessura efetiva da garganta, comprometendo a resistência mecânica e a resistência à fadiga.

Métodos de deteção de cortes inferiores

A metalografia oferece vários métodos para a deteção e avaliação de rebaixos em juntas soldadas:

Inspeção visual: Os cortes inferiores são frequentemente visíveis a olho nu. A inspeção visual pode ajudar a identificar a presença e a extensão do defeito.

Exame macroscópico: Ao seccionar a junta de soldadura e examiná-la ao microscópio, a profundidade e a extensão dos rebaixos podem ser medidas e avaliadas.

Análise microestrutural: As técnicas metalográficas, como a gravação, podem revelar as alterações microestruturais associadas aos cortes inferiores, ajudando a determinar a sua gravidade e impacto na junta soldada.

Causas da Penetração Excessiva



A penetração excessiva refere-se à extensão do metal de solda para além da profundidade desejada no metal de base. Pode ocorrer devido a fatores como:

- Corrente ou tensão de soldadura elevadas que resultam numa entrada excessiva de calor.
- Preparação ou montagem inadequadas da junta, conduzindo a um controlo inadequado da forma e dimensão do banho de soldadura.
- Técnica de soldadura incorreta ou manipulação inadequada da tocha de soldadura.
- Cobertura inadequada do gás de proteção ou do fluxo.

Características da Penetração Excessiva

A penetração excessiva é caracterizada por uma penetração excessiva do metal de solda no metal de base. Isto pode levar a problemas como a falta de fusão, a distorção e a redução da resistência da junta. A penetração excessiva pode ser observada visualmente através do exame da secção transversal da junta de soldadura.

Métodos de deteção de penetração excessiva

A metalografia fornece várias técnicas para detetar e avaliar a penetração excessiva:

Inspeção visual: A penetração excessiva pode ser identificada visualmente através do exame da secção transversal da junta de soldadura.

Exame macroscópico: Através da preparação de secções transversais da junta de soldadura e da sua observação ao microscópio, é possível avaliar a profundidade e a extensão da penetração excessiva.

Análise microestrutura: As técnicas metalográficas, incluindo a gravação, podem revelar a profundidade de penetração e avaliar o seu impacto na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta soldada.

A compreensão das causas, características e métodos de deteção de cortes inferiores e penetração excessiva é crucial no campo da metalografia. Através da inspeção visual, do exame macroscópico e da análise microestrutura, os metalógrafos podem avaliar a gravidade destes defeitos e o seu impacto na integridade e no desempenho das juntas soldadas. Este conhecimento permite um controlo de qualidade eficaz e ajuda a garantir a produção de soldaduras sólidas em várias indústrias.

Fissuras em juntas soldadas

As fissuras em juntas soldadas apresentam desafios significativos no domínio da tecnologia de soldadura e representam defeitos significativos que podem ocorrer em juntas soldadas, comprometendo a integridade estrutural e as propriedades mecânicas dos componentes soldados. Compreender as causas, as características, a deteção e a avaliação destes defeitos é essencial para garantir a fiabilidade e a segurança das estruturas soldadas. Através da implementação de medidas preventivas adequadas, da realização de inspeções minuciosas e da utilização de métodos de reparação efi-



cazes, os engenheiros e os profissionais podem atenuar os riscos associados às fissuras, conduzindo a uma melhor qualidade da soldadura, a um melhor desempenho estrutural e a uma maior segurança em várias indústrias e aplicações.

Tipos e características de fissuras em juntas soldadas

- Fissuras a quente: Fissuras de liquefação, fissuras de solidificação
- Fissuras a frio: Fissuras induzidas pelo hidrogénio, fissuras retardadas, fissuras de inclusão, etc.
- Fissuras de corrosão sob tensão
- Fissuras de fadiga
- Fraturas frágeis
- Fraturas dúcteis
- Microfissuras e microvazios

Fatores que influenciam a formação de fissuras

- Parâmetros de soldadura: Entrada de calor, velocidade de soldadura, pré-aquecimento
- Propriedades do material: Resistência, tenacidade, suscetibilidade à fragilização por hidrogénio
- Tensões residuais
- Técnica de soldadura: Conceção da junta, forma do cordão de soldadura, seleção do metal de adição
- Condições ambientais: Humidade, meios corrosivos, temperatura

Deteção e avaliação de fissuras

Inspeção visual: Exame da superfície, avaliação macroscópica

Técnicas de ensaios não destrutivos (NDT): Ensaio por ultrassons, radiografia, ensaio de partículas magnéticas, ensaio de penetração de corantes

Exame microscópico: Metalografia, microscopia ótica, microscopia eletrónica

Análise da superfície de fratura: Fractografia, análise do percurso da fenda, determinação dos modos de fratura

Ensaio mecânicos: Ensaio de tração, ensaio de impacto Charpy, ensaio de resistência à fratura

Avaliação da gravidade da extensão da fissura relativamente à reparação

- Dimensionamento e medição de fissuras
- Determinação do potencial de propagação de fissuras
- Avaliação das taxas de crescimento de fissuras
- Adequação aos cálculos e normas de serviço

Mitigação e reparação de fissuras



- Técnicas de reparação de soldaduras: Sobreposição de soldadura, dessoldadura, tratamento térmico pós-soldadura
- Métodos de alívio de tensões: Tratamento térmico, recozimento para alívio de tensões
- Modificação e reforço de soldaduras
- Seleção de materiais e otimização de processos para evitar a formação de fissuras

Relatórios e documentação

- Documentação pormenorizada das avaliações de fissuras e fraturas
- Formatos e normas de comunicação (por exemplo, ASTM, ISO)
- Comunicação dos resultados da avaliação aos intervenientes relevantes
- Recomendações para reparação, substituição ou investigação adicional

Irregularidades da superfície e salpicos

As irregularidades da superfície e os salpicos são problemas comuns encontrados nos processos de soldadura que podem afetar o aspeto, a funcionalidade e a qualidade das juntas soldadas. As irregularidades da superfície referem-se a desvios da superfície lisa e uniforme desejada, enquanto os salpicos se referem à expulsão de gotículas de metal fundido durante a soldadura. O presente texto técnico fornece uma visão aprofundada das irregularidades superficiais e dos salpicos na soldadura, incluindo os seus tipos, causas, deteção, prevenção e técnicas de mitigação.

Tipos e características das irregularidades da superfície

- Superfícies rugosas: Fusão incompleta, penetração insuficiente, parâmetros de soldadura inadequados
- Cortes inferiores e enchimento inferior: Excesso de calor, técnica de soldadura incorreta, preparação inadequada da junta
- Sobreposição e reforço excessivo: Técnica de soldadura incorreta, controlo inadequado do tamanho da soldadura
- Fissuras na superfície: Tensão térmica, arrefecimento rápido, tratamento térmico incorreto
- Porosidade da superfície: Contaminantes, gás de proteção impróprio, técnica de soldadura inadequada
- Oxidação e cores de têmpera: Cobertura insuficiente de gás de proteção, exposição ao ar, limpeza inadequada

Causas de irregularidades e salpicos na superfície

- Parâmetros de soldadura inadequados: Corrente de soldadura, tensão, velocidade de deslocação
- Seleção incorreta do eletrodo ou do fio de enchimento
- Má adaptação e preparação da junta



- Contaminantes na peça de trabalho ou nos consumíveis de soldadura
- Cobertura inadequada do gás de proteção ou caudal de gás
- Presença de humidade ou óleo na superfície da peça de trabalho
- Limpeza insuficiente da peça de trabalho antes da soldadura
- Técnica de soldadura e competência do operador

Deteção e Avaliação de Irregularidades de Superfície

Inspeção visual: Exame da superfície para detetar irregularidades, salpicos e defeitos

Microscopia ótica: Exame das características e morfologia da superfície

Técnicas de ensaios não destrutivos (NDT): Ensaio ultrassónicos, radiografia, ensaios de partículas magnéticas

Prevenção e controlo de irregularidades e salpicos na superfície

- Parâmetros de soldadura adequados e otimização da técnica
- Preparação e adaptação adequadas das juntas
- Limpeza eficaz e remoção de contaminantes
- Seleção do gás de proteção e do caudal adequados
- Utilização de agentes anti salpicos e revestimentos
- Manutenção e calibração do equipamento de soldadura
- Formação e qualificação de soldadores

Mitigação e reparação de irregularidades na superfície

- Retificação e retoque de superfícies
- Modificação e mistura de perfis de soldadura
- Remoção do excesso de armadura e dos cortes inferiores
- Utilização de materiais de enchimento adequados para a reparação

Relatórios e documentação

- Documentação pormenorizada das irregularidades da superfície e dos salpicos
- Formatos e normas de comunicação (por exemplo, ISO, AWS)
- Comunicação dos resultados da avaliação aos intervenientes relevantes
- Recomendações para prevenção, atenuação e reparação

As irregularidades da superfície e os salpicos na soldadura podem afetar significativamente a qualidade e o desempenho das juntas soldadas. A implementação de parâmetros de soldadura adequados, a otimização da preparação da junta, a manutenção da limpeza e a utilização de gás de proteção adequado e de medidas anti respingos são fundamentais para obter superfícies lisas e sem defeitos. Através da melhoria contínua, da monitorização e do cumprimento das normas estabeleci-



das, os profissionais podem garantir soldaduras de alta qualidade com uma estética, funcionalidade e fiabilidade superiores.

1.3.4. Avaliação da qualidade da soldadura

A avaliação da qualidade de uma soldadura é um aspeto crítico da tecnologia de soldadura. Neste subcapítulo, discutiremos a forma como o exame macroscópico é utilizado para avaliar a qualidade global de uma soldadura. Iremos explorar os critérios de aceitação, incluindo o tamanho, a localização e a gravidade dos defeitos, bem como o aspeto visual e o alinhamento da soldadura. Seguindo as directrizes e normas estabelecidas, podemos fazer avaliações objectivas e determinar a aceitação ou rejeição de juntas soldadas, para as aplicações pretendidas, com base nos resultados do exame macroscópico.

CrITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DA QUALIDADE DA SOLDADURA

Os critérios de aceitação da qualidade da soldadura servem de directrizes e normas para avaliar a adequação e a integridade das juntas soldadas. Estes critérios definem os limites permitidos para várias características da soldadura e garantem que a soldadura cumpre os requisitos especificados e as expectativas de desempenho. O estabelecimento de critérios de aceitação claros e consistentes é crucial para o controlo de qualidade, a conformidade com as normas da indústria e a garantia da segurança e fiabilidade das estruturas soldadas. Esta secção fornece uma visão geral dos principais factores e parâmetros considerados na determinação dos critérios de aceitação para a qualidade da soldadura.

CÓDIGOS E NORMAS DE SOLDADURA

- Normas internacionais: ISO 3834, ISO 15614, ISO 9606, etc.
- Normas nacionais: AWS D1.1, ASME Secção IX, EN ISO 15614, etc.
- Normas específicas do sector: API 1104, ASME B31.3, etc.

ATRIBUTOS DE SOLDADURA E NÍVEIS DE ACEITAÇÃO

- Dimensões da soldadura: Tamanho, forma, reforço, penetração e perfis de soldadura em ângulo
- Descontinuidades: Porosidade, fissuras, falta de fusão, penetração incompleta, rebaixos, etc.
- Aspeto visual: Irregularidades da superfície, salpicos, descoloração e contaminação
- Propriedades mecânicas: Resistência à tração, resistência ao impacto, dureza, etc.

TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (NDT)

- Ensaios ultra-sónicos (UT): Detecção de falhas internas, descontinuidades e defeitos de ligação
- Ensaios radiográficos (RT): Avaliação de defeitos internos e superficiais utilizando raios X ou raios gama



- Ensaio de partículas magnéticas (MT): Detecção de defeitos superficiais e quase superficiais em materiais ferromagnéticos
- Ensaio de líquidos penetrantes (PT): Identificação de defeitos e fissuras de rutura da superfície
- Inspeção visual: Exame do aspeto, dimensões e condições da superfície da soldadura

Níveis e critérios de aceitação

- Níveis de aceitação: Aceitável, reparável ou rejeitável com base na gravidade e no impacto dos defeitos
- Critérios de aceitação: Limites e limiares específicos para cada atributo ou parâmetro da soldadura
- Classificação de defeitos: Categorização de defeitos com base no tamanho, localização e tipo

Avaliação e interpretação

- Pessoal qualificado: Inspectores certificados ou técnicos de NDT para uma avaliação precisa
- Documentação e manutenção de registos: Documentação adequada dos resultados das inspeções, dos procedimentos e das decisões de aceitação
- Conformidade com as normas: Verificação da qualidade da soldadura em relação aos códigos e especificações aplicáveis

Reparação de soldaduras e exame pós-soldadura

- Procedimentos de reparação: Métodos e requisitos definidos para tratar as não-conformidades
- Exame pós-reparação: Validação das soldaduras reparadas para garantir a conformidade com os critérios de aceitação

Na União Europeia (UE), várias normas são aplicáveis à deteção e avaliação da falta de fusão e da penetração incompleta em juntas soldadas. Estas normas fornecem orientações e requisitos para métodos de ensaio, critérios de aceitação e procedimentos de controlo de qualidade.

EN ISO 5817 - Soldadura - Juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas (Níveis de qualidade para imperfeições): Esta norma especifica os níveis de qualidade para a falta de fusão e a penetração incompleta, entre outras imperfeições, em juntas soldadas por fusão. Fornece critérios de aceitação baseados na inspeção visual e no exame radiográfico.

EN ISO 17636-2 - Ensaio não destrutivo de soldaduras - Ensaio radiográfico - Parte 2: Técnicas de raios X e raios gama com filme: Esta norma especifica os requisitos para os ensaios radiográficos de soldaduras utilizando técnicas de raios X e raios gama com película. Abrange a deteção e avaliação da falta de fusão e da penetração incompleta, bem como de outros defeitos de soldadura.



EN ISO 17636-3 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios radiográficos - Parte 3: Técnicas digitais: Esta norma fornece requisitos para o ensaio radiográfico de soldaduras utilizando técnicas digitais. Inclui a deteção e avaliação da falta de fusão e da penetração incompleta, juntamente com outros defeitos de soldadura.

EN ISO 16810 - Ensaios não destrutivos - Ensaios ultra-sónicos - Técnica de difração por tempo de voo como método de deteção e dimensionamento de descontinuidades: Esta norma especifica a técnica de difração de tempo de voo (TOFD) para a deteção e dimensionamento de descontinuidades de soldadura, incluindo a falta de fusão e a penetração incompleta.

EN ISO 23278 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaio de partículas magnéticas: Esta norma descreve os requisitos para a utilização do ensaio de partículas magnéticas para detetar defeitos superficiais e quase superficiais em soldaduras. Fornece critérios para avaliar as indicações e determinar a sua aceitabilidade com base na dimensão, forma e localização.

EN ISO 3452 - Ensaios não destrutivos - Ensaios de penetração: Esta norma define os requisitos para a realização de ensaios de penetração de líquidos para detetar defeitos de rutura de superfície em soldaduras. Especifica os critérios de aceitação para avaliar as indicações com base no seu tamanho, forma e visibilidade.

EN ISO 10042 - Soldadura - Juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas - Níveis de qualidade para imperfeições: Esta norma aborda especificamente os níveis de qualidade para imperfeições em juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas. Define os limites e as dimensões aceitáveis das imperfeições para garantir a integridade da soldadura.

EN ISO 15614-1 - Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1: Soldadura por arco e a gás de aços e soldadura por arco de níquel e ligas de níquel: Esta norma centra-se na qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos. Fornece orientações para a realização de ensaios de procedimentos de soldadura, incluindo os critérios de aceitação para a qualidade da soldadura. **Parte 2: Soldadura por arco de alumínio e suas ligas:** Esta norma especifica como uma especificação preliminar de procedimento de soldadura é qualificada por ensaios de procedimento de soldadura.

EN ISO 14731 - Coordenação de soldadura - Tarefas e responsabilidades: Esta norma define as tarefas e responsabilidades do pessoal de coordenação de soldadura envolvido na garantia da qualidade da soldadura. Descreve os requisitos para a gestão dos processos de soldadura, incluindo a inspeção e os critérios de aceitação.

EN ISO 3834 - Requisitos de qualidade para a soldadura por fusão de materiais metálicos: Esta norma especifica os requisitos de qualidade para a soldadura por fusão de materiais metálicos.



Abrange aspectos como os procedimentos de soldadura, as qualificações do pessoal, a inspeção e os critérios de aceitação para garantir a qualidade global das juntas soldadas.

Inspeção visual e normas de aceitação

A inspeção visual desempenha um papel crucial na avaliação da qualidade das soldaduras, e existem várias normas europeias que fornecem orientações para a inspeção visual e critérios de aceitação.

Normas da UE relacionadas com a inspeção visual e normas de aceitação:

EN ISO 17637 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios visuais de juntas soldadas por fusão

Esta norma especifica os requisitos para os ensaios visuais de juntas soldadas por fusão. Descreve os procedimentos, o equipamento e os critérios de aceitação para avaliar as condições da superfície, as dimensões e o aspeto geral das soldaduras utilizando técnicas de inspeção visual.

EN ISO 5817 - Soldadura - Juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas (Níveis de qualidade para imperfeições)

Como mencionado anteriormente, esta norma fornece níveis de qualidade para imperfeições em juntas soldadas por fusão. Inclui critérios de aceitação visual para vários tipos de imperfeições, tais como porosidade, rebaixamento, falta de fusão, etc.

EN ISO 13920 - Soldadura - Tolerâncias gerais para construções soldadas - Dimensões para comprimentos e ângulos - Forma e posição

Esta norma especifica as tolerâncias gerais para construções soldadas e fornece directrizes para desvios dimensionais e geométricos em estruturas soldadas. Ajuda a definir critérios de aceitação com base em desvios admissíveis das dimensões e ângulos especificados.

EN 1290 - Soldadura - Determinação do número de ferrite (FN) em metais de solda de aço inoxidável Cr-Ni ferrítico-austenítico austenítico e duplex

Embora esta norma seja específica para a determinação da ferrite em soldaduras de aço inoxidável, destaca os critérios de aceitação visual para a determinação do teor de ferrite em soldaduras utilizando vários métodos, tais como o exame macroscópico e as técnicas de gravura.

EN ISO 17635 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Regras gerais para materiais metálicos

Esta norma estabelece regras gerais para ensaios não destrutivos de soldaduras em materiais metálicos. Inclui disposições para inspeção visual, bem como outros métodos de ensaio, tais como ensaios radiográficos, ensaios ultra-sónicos e ensaios de partículas magnéticas.

EN ISO 10275 - Soldadura - Preparação de juntas - Parte 3: Soldadura com gás inerte metálico e soldadura com gás inerte de tungsténio do cobre e suas ligas

Embora específica para o cobre e as suas ligas, esta norma fornece directrizes para a preparação de juntas na soldadura com gás inerte metálico (MIG) e na soldadura com gás inerte de tungsténio



(TIG). Inclui critérios de aceitação visual para a qualidade da soldadura, incluindo as condições da superfície e a penetração.

EN ISO 10042 - Soldadura - Juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas - Níveis de qualidade para imperfeições

Esta norma especifica níveis de qualidade para imperfeições em juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas. Define critérios de aceitação visual para vários tipos de imperfeições, tais como porosidade, falta de fusão, fissuras e rebaixos.

Requisitos dimensionais e alinhamento

A avaliação da qualidade da soldadura para requisitos dimensionais e de alinhamento envolve a avaliação da conformidade das juntas soldadas com as tolerâncias dimensionais e os critérios de alinhamento especificados. A avaliação tem como objetivo garantir que os componentes soldados cumprem as dimensões, o encaixe e o alinhamento previstos no projeto, assegurando assim a integridade estrutural e a funcionalidade do produto final.

No domínio da metalografia, podem ser utilizadas várias técnicas e métodos para avaliar a qualidade da soldadura no que diz respeito aos requisitos dimensionais e ao alinhamento. Estes incluem:

Inspeção visual: A inspeção visual é o método mais básico e mais comumente utilizado para avaliar os requisitos dimensionais e o alinhamento das juntas soldadas. Envolve o exame visual da junta de soldadura para detetar quaisquer desvios das dimensões especificadas, tais como reforço excessivo da soldadura, enchimento insuficiente ou penetração excessiva da raiz. A inspeção visual também ajuda a detetar desalinhamentos, desvios angulares ou distorções que possam afetar o ajuste geral e a função do componente soldado.

Medição e Metrologia: Podem ser utilizadas ferramentas de medição de precisão, como paquímetros, micrómetros, medidores de altura e sistemas de alinhamento a laser, para medir dimensões e alinhamentos críticos de juntas soldadas. Estas medições são comparadas com as tolerâncias dimensionais especificadas nos desenhos de engenharia ou nas normas aplicáveis para avaliar a qualidade da soldadura. As técnicas de medição devem garantir a precisão e a repetibilidade para obter resultados fiáveis.

Máquinas de medição por coordenadas (CMM): As CMMs são dispositivos de metrologia avançados que permitem medições precisas e automatizadas de geometrias complexas. As CMMs utilizam sondas para captar as coordenadas tridimensionais de características específicas ou pontos de referência na junta soldada. Os dados adquiridos são comparados com o modelo CAD ou com os requisitos dimensionais especificados para avaliar a qualidade da soldadura em termos de conformidade dimensional e alinhamento.



Técnicas de Ensaios Não Destrutivos (NDT): Os métodos NDT, tais como testes ultra-sónicos, testes de partículas magnéticas ou varrimento a laser, também podem ser utilizados para avaliar os requisitos dimensionais e o alinhamento em juntas soldadas. Estas técnicas podem fornecer informações detalhadas sobre as características internas e externas, identificar quaisquer desvios em relação às dimensões especificadas e avaliar as características de alinhamento sem causar danos à soldadura.

Análise estatística: As técnicas de análise estatística, tais como os estudos de capacidade do processo, podem ser empregues para avaliar a qualidade global da soldadura relativamente aos requisitos dimensionais e de alinhamento. Estas análises envolvem a recolha de dados de uma amostra representativa de juntas soldadas, a análise estatística dos dados e a determinação da capacidade do processo para cumprir as tolerâncias dimensionais e os critérios de alinhamento especificados.

As normas europeias, como a EN ISO 13920, EN 1090-2 e EN ISO 5817, fornecem critérios de aceitação e directrizes para avaliar a qualidade da soldadura em termos de requisitos dimensionais e de alinhamento. Estas normas definem limites de tolerância, métodos de inspeção e técnicas de medição para garantir a conformidade com os requisitos dimensionais especificados. A avaliação da qualidade da soldadura em termos de requisitos dimensionais e de alinhamento é essencial para garantir a funcionalidade, o desempenho e a integridade estrutural dos componentes soldados e para cumprir as normas da indústria e as expectativas dos clientes.

Avaliação da gravidade e classificação dos defeitos

A avaliação da qualidade da soldadura para avaliar a gravidade e a classificação dos defeitos envolve a determinação da importância e do impacto dos defeitos na integridade estrutural, no desempenho e na operacionalidade das juntas soldadas. Esta avaliação visa categorizar os defeitos com base nos seus níveis de gravidade, dar prioridade às acções correctivas e garantir a conformidade com as normas e especificações aplicáveis.

Para avaliar a gravidade e a classificação dos defeitos de soldadura, podem ser utilizadas várias técnicas e métodos no domínio da metalografia. Estes incluem:

Inspeção visual: A inspeção visual é o passo inicial na avaliação da gravidade e classificação do defeito. Envolve o exame visual da junta de soldadura para detetar a presença de defeitos como fissuras, porosidade, falta de fusão, subcotação e salpicos. O inspetor avalia o tamanho, a forma, a localização e a distribuição dos defeitos para determinar a sua gravidade e classificação.

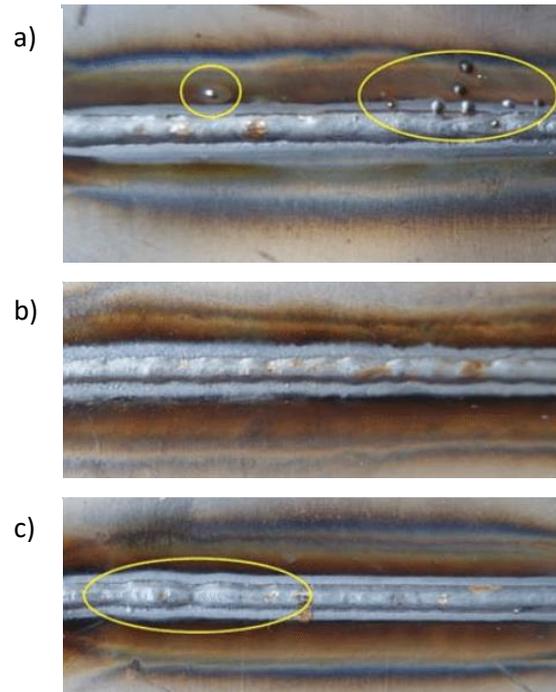


Fig 1.3.22: Imperfeições detectadas durante as inspeções visuais: salpicos locais (a); zona afetada pelo calor irregular (b); risers locais e sulco incompletamente preenchido da face da soldadura (c) [1.3.32]

Técnicas de Ensaios Não Destrutivos (NDT): Os métodos NDT, como os ensaios ultra-sónicos, os ensaios radiográficos, os ensaios de partículas magnéticas e os ensaios de penetração de corantes, são normalmente utilizados para avaliar a gravidade e a classificação dos defeitos. Estas técnicas fornecem informações detalhadas sobre o tamanho, a forma, a localização e a extensão dos defeitos na junta soldada. Os métodos NDT podem ajudar a identificar defeitos críticos que podem comprometer a integridade da soldadura e classificá-los com base nos seus níveis de gravidade.

Tabela 1.3.1: Várias técnicas utilizadas nos ensaios não destrutivos:

Defeito interno	RT: Ensaios Radiográficos
	UT: Ensaio por ultra-sons
	VI: Inspeção visual
Defeito de superfície ET	MT: Ensaio de partículas magnéticas
Defeito de abertura da superfície	PT: Ensaio com Penetrante

Exame macroscópico: O exame macroscópico envolve a utilização de macrografias e secções transversais da junta soldada para avaliar a gravidade e a classificação do defeito. As macrografias fornecem uma representação visual detalhada dos defeitos, permitindo uma melhor avaliação das suas dimensões, distribuição e relação com a estrutura da soldadura circundante. O corte transversal envolve o corte da junta de soldadura para expor as características internas e os defeitos, permitindo um exame minucioso da sua natureza, tamanho e posição.

Critérios e normas de aceitação: A avaliação da qualidade da soldadura quanto à gravidade e classificação dos defeitos baseia-se em critérios e normas de aceitação estabelecidos. As normas europeias, como a EN ISO 5817 e a EN ISO 10042, fornecem diretrizes e especificações para a avaliação dos níveis de gravidade de vários defeitos de soldadura. Estas normas definem níveis de aceitação e fornecem critérios para a classificação de defeitos com base no seu tamanho, comprimento, profundidade e outros parâmetros.

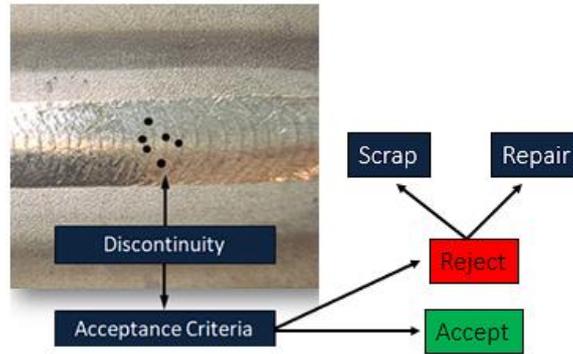


Fig. 1.3.23: Avaliação crítica da soldadura: Aplicação de critérios de aceitação para avaliação da qualidade

[1.3.33]

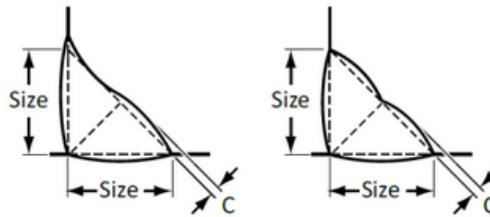


Fig. 1.3.24.1: Perfis de soldadura em ângulo aceitáveis [1.3.33]

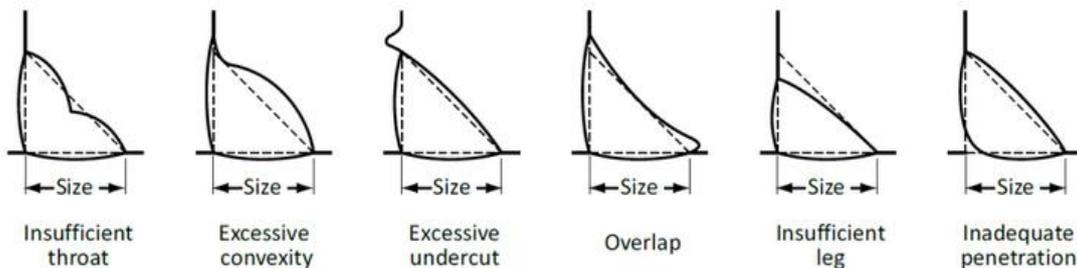


Fig. 1.3.24.2: Perfis de soldadura em ângulo inaceitáveis [1.3.33]

Opinião de especialistas: Em alguns casos, a perícia e a experiência de pessoal qualificado desempenham um papel crucial na avaliação da gravidade e classificação dos defeitos. Metalúrgicos qualificados, inspetores de soldadura e engenheiros com um conhecimento profundo dos processos de soldadura e das características dos defeitos podem fornecer informações e pareceres valiosos para determinar a gravidade dos defeitos e o seu impacto na qualidade da soldadura.

Durante a avaliação da qualidade da soldadura, os defeitos são normalmente classificados em diferentes categorias, tais como defeitos críticos, maiores e menores, com base em critérios de



aceitação predefinidos. A classificação ajuda a dar prioridade às acções correctivas, a determinar a necessidade de reparação ou de retrabalho e a garantir a conformidade com as normas e especificações relevantes. É importante notar que a gravidade e a classificação dos defeitos podem variar consoante a aplicação específica, o tipo de soldadura, o material e os requisitos da indústria. Por conseguinte, a avaliação da qualidade da soldadura deve ter em conta o contexto específico e os critérios definidos pelas normas e especificações aplicáveis. Ao avaliar a gravidade e a classificação dos defeitos, a avaliação da qualidade da soldadura ajuda a identificar os defeitos críticos que podem comprometer a integridade da junta soldada e garante a aplicação de medidas correctivas adequadas. Esta avaliação desempenha um papel crucial na manutenção da integridade estrutural, do desempenho e da segurança dos componentes soldados em várias indústrias e aplicações.

Ensaios não destrutivos para avaliação da qualidade da soldadura

A avaliação da qualidade da soldadura através de técnicas de ensaios não destrutivos (NDT) é um aspeto crucial para garantir a integridade e a fiabilidade das juntas soldadas. Os métodos NDT são utilizados para avaliar a qualidade das soldaduras sem causar qualquer dano aos componentes soldados, permitindo uma inspeção e avaliação abrangentes dos defeitos das soldaduras.

Várias técnicas NDT são normalmente utilizadas na avaliação da qualidade da soldadura, incluindo

Ensaio ultra-sónicos (UT): O UT utiliza ondas sonoras de alta frequência para detetar e avaliar defeitos internos e superficiais em juntas soldadas. As ondas ultra-sónicas são transmitidas para a soldadura e as ondas reflectidas são analisadas para identificar indicações como falta de fusão, porosidade, fissuras e outras descontinuidades. O tamanho, a localização e a natureza destas indicações são avaliados para determinar o seu impacto na qualidade da soldadura.



Fig. 1.3.25: Ensaio ultrassónico da soldadura [1.3.34]

Ensaio Radiográficos (RT): O RT envolve a utilização de raios X ou raios gama para criar uma imagem da soldadura e detetar defeitos internos. As imagens radiográficas fornecem uma visão detalhada das descontinuidades da soldadura, incluindo fissuras, falta de fusão, porosidade e inclusões. O tamanho, a forma e a densidade destas indicações são examinados para avaliar a sua gravidade e o impacto na qualidade da soldadura.

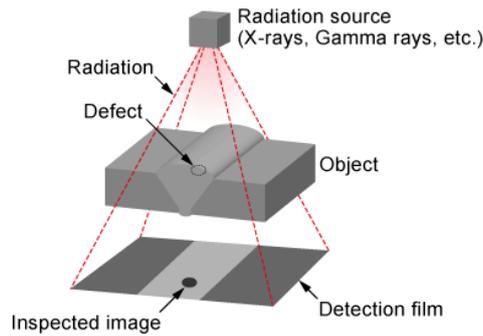


Fig. 1.3.26: Ensaio radiográfico [1.3.35]

Ensaio de partículas magnéticas (MT): O MT é utilizado principalmente para detetar defeitos de rutura de superfície em materiais ferromagnéticos. Envolve a magnetização da área de soldadura e a aplicação de partículas magnéticas, que se juntam em áreas com fugas de fluxo magnético causadas por descontinuidades na superfície, tais como fissuras e falta de fusão. As indicações são examinadas visualmente para determinar a sua gravidade e influência na qualidade da soldadura.



Fig. 1.3.27: Ensaio magnético [1.3.36]

Ensaio de Penetrante Líquido (PT): O PT é utilizado para detetar defeitos de rutura de superfície em materiais não porosos. Um penetrante líquido é aplicado na superfície da soldadura e, após um tempo de permanência especificado, o excesso de penetrante é removido e é aplicado um revelador. O penetrante que se infiltra nos defeitos superficiais torna-se visível sob condições de iluminação adequadas, permitindo a identificação e avaliação de defeitos como fissuras e porosidade.



Fig. 1.3.28: Ensaio de Penetrante Líquido [1.3.37]

Inspeção visual (VI): Embora considerada um método de inspeção separado, a inspeção visual é um componente essencial da avaliação da qualidade da soldadura. Envolve um exame visual minucioso da junta de soldadura para identificar defeitos de superfície, tais como fissuras, subcortes, salpicos e fusão incompleta. A inspeção visual complementa outras técnicas NDT e fornece uma avaliação qualitativa da qualidade da soldadura.



Fig. 1.3.29: Inspeção visual [1.3.38]

Durante o NDT para a avaliação da qualidade da soldadura, as indicações e os defeitos são avaliados com base em critérios de aceitação predefinidos fornecidos por normas relevantes, tais como a EN ISO 17636 e a EN ISO 9712. Estas normas definem as dimensões, comprimentos, localizações e tipos de indicações aceitáveis nas soldaduras. Os resultados dos NDT são registados e documentados, permitindo uma análise mais aprofundada e a tomada de decisões relativamente à aceitação ou rejeição da soldadura. As técnicas NDT fornecem informações valiosas sobre as condições internas e superficiais das juntas soldadas, permitindo a deteção, avaliação e caracterização de defeitos de soldadura. Ao utilizar estas técnicas, a avaliação da qualidade da soldadura pode identificar defeitos críticos, avaliar a sua gravidade e determinar as acções adequadas necessárias para manter a integridade e a fiabilidade das soldaduras. É importante notar que as técnicas NDT devem ser efectuadas por pessoal qualificado que tenha recebido formação e certificação adequadas de acordo com as normas relevantes, como a EN ISO 9712. Isto garante a precisão e a fiabilidade da avaliação e melhora o controlo global da qualidade dos componentes soldados em várias indústrias.

1.3.5. Reparação de soldaduras e exame pós-soldadura

As reparações de soldaduras são frequentemente necessárias para retificar defeitos ou melhorar a integridade de uma junta. Este subcapítulo centrar-se-á no papel do exame macroscópico na avaliação da eficácia das reparações de soldaduras. Discutiremos as técnicas e os procedimentos utilizados para avaliar a junta reparada, assegurando que esta cumpre as normas e especificações exigidas. Além disso, exploraremos a importância do exame pós-soldagem para verificar a integridade e a fiabilidade da junta reparada.



O exame macroscópico é uma técnica fundamental na tecnologia de soldadura que permite a avaliação abrangente de juntas soldadas. Ao examinar as características macroscópicas, identificar defeitos, avaliar a qualidade da soldadura e garantir a eficácia das reparações, podemos melhorar o desempenho, a segurança e a fiabilidade das estruturas e componentes soldados. Assim, vamos mergulhar no fascinante mundo do exame macroscópico e da sua aplicação na tecnologia de soldadura!

As especificações do exame macroscópico para a tecnologia de soldadura podem variar consoante o sector e a aplicação. No entanto, algumas especificações comuns incluem:

1. Ampliação: O nível de ampliação utilizado durante o exame macroscópico deve ser adequado à dimensão do defeito que está a ser examinado. Normalmente, é utilizada uma ampliação de 5x a 10x para o exame geral da soldadura, enquanto que uma ampliação de até 50x pode ser utilizada para um exame mais pormenorizado. Além disso, é importante notar que a ampliação não deve ser tão elevada que o campo de visão se torne demasiado pequeno, dificultando a identificação da localização ou extensão do defeito. A utilização de ampliações mais elevadas pode também aumentar a probabilidade de falsos positivos, em que irregularidades superficiais que não são defeitos são identificadas como tal. Por conseguinte, o nível adequado de ampliação deve ser determinado com base na dimensão e no tipo de defeitos a examinar, bem como no acabamento e na textura da superfície do material a inspecionar. Isto pode ajudar a garantir que os defeitos são identificados com precisão e que o processo de inspeção é eficiente e eficaz

2. Iluminação: Durante o exame macroscópico, deve ser utilizada uma iluminação adequada para garantir que todos os defeitos da superfície sejam visíveis. A iluminação deve ser dirigida para a superfície a examinar num ângulo que proporcione uma visibilidade óptima. A iluminação utilizada durante o exame macroscópico deve ser suficientemente clara para iluminar todos os defeitos da superfície e minimizar as sombras ou o encandeamento que possam obscurecer a visão. A direção da iluminação também deve ser cuidadosamente considerada para garantir que a superfície a ser examinada é iluminada num ângulo que proporcione uma visibilidade óptima. Isto pode implicar a utilização de várias fontes de luz ou o ajuste do ângulo da iluminação para minimizar o encandeamento e as sombras.

Para além disso, a temperatura da cor da iluminação também deve ser considerada. Diferentes tipos de iluminação, como a fluorescente ou a LED, podem produzir diferentes temperaturas de cor, o que pode afetar o aspeto dos defeitos da superfície. A temperatura de cor adequada deve ser selecionada com base no material a inspecionar e no tipo de defeitos a examinar.

Em geral, é essencial uma iluminação adequada para o exame macroscópico, de modo a garantir que todos os defeitos da superfície sejam visíveis e identificados com exatidão. A iluminação



deve ser cuidadosamente selecionada e posicionada de modo a proporcionar uma visibilidade óptima e a minimizar quaisquer reflexos ou sombras que possam obscurecer a visão

3. Preparação da superfície: A superfície a examinar deve ser limpa e preparada de acordo com as normas da indústria. Quaisquer contaminantes da superfície, como óleo, gordura ou ferrugem, devem ser removidos para garantir que todos os defeitos da superfície sejam visíveis. Colheita de amostras

Para as juntas soldadas, é necessário realizar exames em todas as áreas características (BM, ZTA, SOLDA), razão pela qual as amostras metalográficas incluem toda a secção transversal da junta.

Dependendo das necessidades da investigação, as amostras são recolhidas de forma diferente. Especialmente para as análises de danos, a amostragem é efectuada tendo em conta as hipóteses de trabalho que devem ser verificadas e o estado e a natureza do material em investigação; em muitos casos, são examinadas em paralelo amostras de referência de áreas não afectadas ou de material semelhante não sujeito a condições de funcionamento.

Ao verificar as tecnologias de soldadura, os materiais de base e a assimilação dos materiais de soldadura, as amostras são recolhidas de forma a serem representativas de todo o lote investigado. O não cumprimento desta condição conduz a interpretações incorrectas com consequências graves.

A amostragem e a preparação das amostras metalográficas são efectuadas de acordo com a norma STAS 4203.

A obtenção da superfície plana é conseguida por limagem, fresagem ou polimento. O desbaste é efectuado com a ajuda de papéis metalográficos que apresentam uma finura crescente das partículas abrasivas formadas por carboneto de silício. De acordo com o grão dos papéis metalográficos utilizados, o lixamento pode ser:

- grosseiro quando se utiliza papel metalográfico com grão grosseiro (80, 100, 180, 240, 320);
- fino quando se utiliza papel metalográfico de grão fino (400, 500, 600, 800);
- muito fino quando se utilizam papéis metalográficos muito finos (1000, 1200, 1500, 2000, 2500).

O lixamento pode ser efectuado manual ou mecanicamente. No lixamento manual (recomendado para amostras grandes e soldadas), o papel é colocado numa placa de vidro montada num suporte de madeira. A amostra metalográfica, ao ser ligeiramente pressionada, desloca-se sempre numa direcção, realizando um movimento de vaivém. Em cada mudança de papel, é necessário rodar a amostra em 90° para que as novas rugas formem um ângulo reto com as anteriores. A lixagem começa com papel de grão grosso (300...400) e termina com papel de grão fino (800...900) e extrafino (1000).



No caso da retificação mecânica, são utilizadas máquinas de retificação horizontais ou verticais em que o papel metalográfico é fixado em discos rotativos. Durante a operação de retificação, devem ser respeitadas as seguintes regras:

- não mudar para outra folha metalográfica antes de se ter verificado que todos os riscos da lixagem anterior desapareceram;
- a folha metalográfica é limpa de poeiras metálicas ou abrasivas de cada vez que é utilizada (se for efectuada uma lixagem a seco);
- durante a retificação, a peça não deve aquecer;
- não serão utilizados os mesmos papéis para ligas ferrosas e não ferrosas;
- No final da operação de moagem, a amostra é lavada para remover todas as inclusões que aderiram durante a moagem.

O polimento das amostras soldadas é efectuado mecanicamente com a máquina de polir equipada com um disco rotativo no qual é fixado um feltro de lã merino. Durante o polimento, é depositada no feltro uma suspensão de óxido de Al, óxido de Mg e pó de diamante de diferentes granulações. Após o polimento, a superfície da amostra deve ter um aspeto espelhado (sem rugas). A amostra polida é lavada com água, desengordurada com álcool e depois seca com algodão ou papel de filtro, sendo recomendada a secagem numa corrente de ar quente.

Ataque metalográfico: o objetivo da operação é realçar a estrutura cristalina. A superfície polida é atacada com reagentes adequados que dissolvem ou colorem seletivamente os constituintes presentes, tornando-os distinguíveis uns dos outros. O ataque é efectuado por imersão ou por fricção da superfície da amostra com um pedaço de algodão embebido em reagentes. Se a amostra não for suficientemente atacada, repete-se a operação. Em geral, para obter contadores fortes, os reagentes serão utilizados tão diluídos quanto possível, pelo que o ataque será efectuado com tempos de espera mais longos. Além disso, para a pesquisa num tamanho maior do microscópio, será realizado um ataque mais fraco, para a observação em melhores condições dos detalhes da estrutura, e vice-versa no caso da pesquisa num tamanho pequeno. Na prática, considera-se que a amostra está atacada quando a superfície preparada perdeu o seu brilho metálico em todas as zonas características, tornando-se mate e as zonas podem ser observadas. Um ataque demasiado intenso distorce a estrutura.

Após o ataque metalográfico, a amostra é lavada com água, depois com álcool e seca por pressão sobre papel de filtro ou sob uma corrente de ar quente. A escolha do reagente para o ataque metalográfico é efectuada de acordo com a norma SR CEN ISO/TR 16060.

4. Critérios de aceitação: Os critérios de aceitação dos defeitos de superfície devem ser definidos com base nas normas da indústria e nos requisitos da aplicação. Os critérios devem especificar o



tipo, a dimensão e a localização dos defeitos que são aceitáveis e dos que não são. Os critérios de aceitação dos defeitos de superfície devem ser estabelecidos com base nas normas da indústria e nos requisitos da aplicação. Isto envolve a especificação do tipo, tamanho e localização dos defeitos que são aceitáveis e os que não são. Os critérios de aceitação podem variar consoante o material a inspecionar, a utilização prevista do produto e a importância da junta soldada na estrutura global.

Por exemplo, na indústria aeroespacial, os critérios de aceitação de defeitos superficiais em juntas soldadas podem ser muito mais rigorosos do que noutras indústrias, devido ao papel crítico que os componentes aeroespaciais desempenham na garantia da segurança. Neste caso, os critérios de aceitação podem especificar que quaisquer defeitos superficiais, independentemente do tamanho ou localização, não são aceitáveis.

Do mesmo modo, na indústria automóvel, os critérios de aceitação dos defeitos superficiais podem ser menos rigorosos, mas continuam a exigir que os defeitos estejam dentro de determinados limites de dimensão e localização para garantir que a junta soldada cumpre as normas de resistência e durabilidade exigidas.

O estabelecimento de critérios de aceitação claros é importante para garantir que os produtos soldados cumprem as normas de qualidade exigidas e são seguros para a utilização pretendida. Isto pode ajudar a evitar defeitos e falhas, reduzir o risco de acidentes e garantir que os produtos satisfazem as expectativas dos clientes. Os níveis de aceitação de imperfeições em juntas soldadas são efectuados de acordo com a norma SR EN ISO 5817. A classificação das imperfeições geométricas em juntas soldadas de materiais metálicos é efectuada de acordo com a norma SR EN ISO 6520-1.

5. Relatório: Deve ser fornecido um relatório pormenorizado que inclua os resultados do exame macroscópico, incluindo quaisquer defeitos encontrados e a sua localização. O relatório deve também incluir recomendações de medidas correctivas, se necessário. Após a realização do exame macroscópico, deve ser elaborado um relatório pormenorizado que inclua os resultados do exame, os defeitos encontrados e a sua localização na junta soldada. O relatório deverá também incluir recomendações para acções correctivas, se necessário, com base nos critérios de aceitação e nas normas da indústria.

O relatório deve ser claro e conciso, fornecendo um resumo dos resultados da inspeção, incluindo os defeitos encontrados, a sua dimensão e localização. Deve também incluir fotografias ou diagramas que ilustrem a localização e a extensão dos defeitos.

Se forem identificados quaisquer defeitos que não cumpram os critérios de aceitação, o relatório deve incluir recomendações para acções correctivas, tais como a reparação ou substituição



da junta soldada. O relatório deve também fornecer um calendário claro para a ação correctiva e quaisquer inspecções de acompanhamento necessárias.

Em geral, um relatório detalhado é essencial para documentar os resultados da inspeção e garantir que quaisquer defeitos sejam identificados e tratados de forma atempada e eficaz. Isto pode ajudar a melhorar a qualidade e a segurança dos produtos soldados e a garantir que estes cumprem as normas exigidas pela indústria e as expectativas dos clientes.

Importância da reparação de soldaduras

A reparação de soldaduras desempenha um papel significativo na manutenção da integridade e funcionalidade dos componentes soldados. Quando são detectados defeitos ou discontinuidades nas juntas soldadas durante a inspeção ou o ensaio, a reparação da soldadura torna-se necessária para retificar os problemas e restaurar a qualidade e o desempenho desejados da soldadura. A importância da reparação de soldaduras pode ser destacada nos seguintes aspectos:

Integridade estrutural: As soldaduras são frequentemente componentes críticos em estruturas, maquinaria e equipamento. Quaisquer defeitos ou falhas na soldadura podem comprometer a integridade estrutural, conduzindo a potenciais falhas ou acidentes. A reparação de soldaduras ajuda a resolver estes problemas, eliminando ou atenuando os defeitos, assegurando que a junta soldada recupera a sua força e capacidade de carga pretendidas.

Desempenho funcional: Os componentes soldados estão sujeitos a várias condições de funcionamento, incluindo tensão mecânica, flutuações de temperatura e ambientes corrosivos. As soldaduras com defeito podem prejudicar a funcionalidade do componente, afectando o seu desempenho e fiabilidade. A reparação de soldaduras garante que a soldadura cumpre as especificações e normas exigidas, permitindo que o componente desempenhe eficazmente a função pretendida.

Custo-eficácia: A reparação de soldaduras é frequentemente uma solução mais económica em comparação com a substituição de componentes ou estruturas inteiras. A reparação de uma soldadura defeituosa elimina a necessidade de retrabalho ou substituição completa, poupando tempo, recursos e despesas. Também minimiza o tempo de inatividade da produção e os custos associados, tornando-a uma opção prática em muitos cenários.

Conformidade com normas e regulamentos: Os componentes soldados em várias indústrias são regidos por normas e regulamentos específicos para garantir a segurança, fiabilidade e qualidade. A reparação de soldaduras ajuda a fazer com que as juntas soldadas voltem a estar em conformidade com estas normas, garantindo que a soldadura reparada cumpre as especificações exigidas e é adequada para a aplicação pretendida.



Considerações ambientais: A reparação de uma soldadura defeituosa minimiza a produção de material de sucata e de resíduos, contribuindo para práticas sustentáveis. Ao recuperar e reparar componentes soldados, reduz-se a necessidade de matérias-primas e de processos de fabrico intensivos em energia, o que resulta em benefícios ambientais.

Para garantir a eficácia e a fiabilidade da reparação de soldaduras, é fundamental seguir os procedimentos e as directrizes estabelecidos e descritos nas normas relevantes, como a EN ISO 5817 e a EN ISO 15614. Estas normas fornecem especificações para técnicas de reparação de soldaduras, materiais e requisitos de qualificação, garantindo que a soldadura reparada cumpre os critérios de qualidade e desempenho necessários. Além disso, a reparação de soldaduras deve ser efectuada por pessoal qualificado com experiência em técnicas de soldadura e procedimentos de reparação. Após a reparação, devem ser realizadas inspecções e ensaios adequados para verificar a qualidade e a integridade da soldadura reparada. Isto garante que a soldadura reparada cumpre as normas exigidas e pode desempenhar com segurança a função pretendida.

A importância da reparação de soldaduras reside na sua capacidade de restaurar a integridade, a funcionalidade e a conformidade dos componentes soldados. Ao resolver defeitos e descontinuidades, a reparação de soldaduras garante a solidez estrutural, o desempenho funcional e a rentabilidade. Permite a reutilização e a preservação de componentes, reduz o desperdício e contribui para a segurança geral, a fiabilidade e a sustentabilidade das práticas de soldadura.

Avaliação da necessidade de reparação de soldaduras

A avaliação da necessidade de reparação de soldaduras é um passo essencial para manter a qualidade e a integridade dos componentes soldados. Envolve a avaliação da gravidade e do impacto dos defeitos ou descontinuidades presentes nas soldaduras e a determinação da necessidade de reparação. Os seguintes factores são considerados durante o processo de avaliação:

Resultados da inspeção: As juntas soldadas são submetidas a vários métodos de inspeção, como a inspeção visual, os ensaios não destrutivos (NDT) e o exame macroscópico, para identificar quaisquer defeitos ou descontinuidades. Os resultados da inspeção fornecem informações valiosas sobre o tipo, tamanho, localização e extensão dos defeitos. Com base nestes resultados, pode ser avaliada a necessidade de reparação.

Normas e códigos aplicáveis: Os componentes soldados estão sujeitos a normas e códigos específicos que definem os critérios de aceitação da qualidade da soldadura. Estas normas especificam os tamanhos e tipos de defeitos máximos permitidos. Ao comparar os resultados da inspeção com as normas relevantes, é possível determinar se os defeitos excedem os limites aceitáveis e requerem reparação.



Considerações estruturais e funcionais: É avaliada a importância da junta soldada na estrutura ou componente global. Se o defeito ou descontinuidade comprometer a integridade estrutural ou o desempenho funcional, a reparação torna-se necessária. Factores como a capacidade de suporte de carga, a concentração de tensões, a vida à fadiga e as condições de serviço são considerados para avaliar o impacto dos defeitos no desempenho da soldadura.

Segurança e Conformidade Regulamentar: Os componentes soldados são frequentemente utilizados em aplicações de segurança crítica, como nas indústrias aeroespacial, automóvel e de petróleo e gás. A avaliação da necessidade de reparação envolve a consideração das implicações de segurança dos defeitos. As soldaduras que representam um risco para a segurança do pessoal ou que não cumprem os regulamentos da indústria devem ser reparadas para garantir a conformidade e evitar potenciais perigos.

Considerações sobre custos e tempo: O custo e o tempo necessários para a reparação são avaliados em relação à importância dos defeitos e ao valor do componente soldado. Factores como a disponibilidade de recursos de reparação, o impacto da reparação nos programas de produção e a relação custo-eficácia da reparação versus substituição são tidos em consideração.

Com base na avaliação, é tomada a decisão de proceder ou não à reparação da soldadura. Se os defeitos forem considerados significativos e afectarem a integridade ou o desempenho da soldadura, recomenda-se normalmente a reparação. O processo de reparação envolve a preparação da superfície da soldadura, a remoção da parte defeituosa, a aplicação de técnicas de reparação adequadas (como a soldadura ou outros métodos aprovados) e a realização de inspecções e ensaios pós-reparação para verificar a qualidade e a integridade da soldadura reparada. É importante notar que a avaliação da necessidade de reparação da soldadura deve ser efectuada por pessoal qualificado com conhecimentos especializados em tecnologia de soldadura e normas relevantes. Estes indivíduos devem ter um conhecimento profundo dos defeitos de soldadura, das suas implicações e dos métodos de reparação adequados para garantir que a soldadura reparada cumpre os critérios de qualidade e desempenho exigidos. Avaliar a necessidade de reparação de soldaduras implica avaliar os resultados das inspecções, ter em conta as normas e códigos aplicáveis, avaliar as considerações estruturais e funcionais, garantir a segurança e a conformidade regulamentar e considerar os factores custo e tempo. Ao efetuar uma avaliação abrangente, podem ser tomadas decisões informadas relativamente à necessidade e adequação da reparação de soldaduras, garantindo a integridade e o desempenho contínuos dos componentes soldados.

Métodos e técnicas de reparação de soldaduras

Quando se determina que uma soldadura necessita de reparação devido a defeitos ou descontinuidades, podem ser utilizados vários métodos e técnicas para restaurar a sua integridade e



funcionalidade. A escolha do método de reparação depende de factores como o tipo e a gravidade dos defeitos, o material a soldar e os requisitos específicos da aplicação. Seguem-se alguns métodos e técnicas comuns utilizados para a reparação de soldaduras:

Reparação por soldadura: A soldadura é o método mais comum de reparação de defeitos de soldadura. Envolve a adição de metal de solda adicional à área defeituosa para preencher lacunas, corrigir a penetração insuficiente ou fundir discontinuidades. O processo de soldadura utilizado para a reparação depende de factores como o material de base, o tipo de defeito e o equipamento disponível. Os processos de soldadura mais comuns incluem a soldadura por arco de metal blindado (SMAW), a soldadura por arco de tungsténio gasoso (GTAW), a soldadura por arco de metal gasoso (GMAW) e a soldadura por arco com núcleo fluxado (FCAW). Devem ser utilizadas técnicas e parâmetros de soldadura adequados para garantir reparações sólidas e de alta qualidade.

Revestimento de solda: O revestimento de soldadura, também conhecido como cladding, é uma técnica em que uma camada de metal de soldadura é aplicada à superfície do material de base para melhorar as suas propriedades ou protegê-lo da corrosão. É frequentemente utilizada para reparar ou melhorar superfícies desgastadas ou danificadas. O revestimento de soldadura pode ser efectuado utilizando processos como a soldadura GTAW, GMAW ou soldadura por arco com transferência de plasma (PTA). A escolha do material de revestimento depende de factores como as propriedades pretendidas, a compatibilidade com o material de base e as condições ambientais.

Reparação mecânica: Em alguns casos, são utilizados métodos mecânicos para a reparação de soldaduras. Estes métodos envolvem a remoção da parte defeituosa da soldadura ou de toda a soldadura e a sua substituição por uma nova soldadura ou por um método de fixação mecânica. As técnicas de reparação mecânica incluem a trituração, maquinagem, fresagem ou perfuração para remover a soldadura defeituosa e preparar a área para uma nova soldadura ou união. As reparações mecânicas são frequentemente utilizadas para defeitos menores ou quando a soldadura não é viável ou prática.

Brasagem e soldadura: Para determinados tipos de defeitos ou materiais, podem ser utilizadas técnicas de brasagem ou soldadura para reparação. Estes processos envolvem a fusão de um metal de enchimento com um ponto de fusão inferior ao do material de base e a utilização de ação capilar para unir as peças. A brasagem e a soldadura são normalmente utilizadas para reparações em metais não ferrosos, componentes eléctricos e montagens delicadas.

Tratamento térmico: Em alguns casos, são utilizadas técnicas de tratamento térmico como parte do processo de reparação da soldadura. O tratamento térmico pode ajudar a aliviar as tensões residuais, melhorar as propriedades mecânicas ou reduzir o risco de fissuras. Processos como o tratamento térmico pós-soldadura (PWHT) ou o alívio de tensões podem ser aplicados após a



soldadura de reparação para garantir que as propriedades metalúrgicas e mecânicas pretendidas são alcançadas.

Independentemente do método de reparação utilizado, é crucial seguir as normas, especificações e melhores práticas da indústria. As reparações devem ser efectuadas por pessoal qualificado, com experiência em técnicas de soldadura e reparação, para garantir uma execução adequada. A inspeção e os testes pós-reparação são também necessários para verificar a qualidade e a integridade da soldadura reparada. A seleção do método adequado depende de factores como o tipo e a gravidade dos defeitos, o material de base e os requisitos da aplicação. É essencial seguir os procedimentos e orientações estabelecidos para garantir a eficácia e a fiabilidade a longo prazo da soldadura reparada.

Avaliação da eficácia das reparações por soldadura

A avaliação da eficácia das reparações de soldaduras é um passo crucial no processo de soldadura para garantir que a soldadura reparada cumpre as normas de qualidade exigidas e pode suportar as condições de serviço pretendidas. A avaliação envolve a apreciação de vários aspectos da reparação, incluindo a sua integridade estrutural, propriedades mecânicas e precisão dimensional.

Factores-chave a considerar ao avaliar a eficácia das reparações por soldadura:

Inspeção visual: A inspeção visual é o passo inicial para avaliar a eficácia de uma reparação de soldadura. A área reparada deve ser examinada visualmente para garantir que os defeitos foram adequadamente tratados e que o perfil da soldadura, o reforço e o aspeto geral cumprem os requisitos especificados. Quaisquer sinais de fusão incompleta, fissuras, porosidade ou outros defeitos devem ser cuidadosamente examinados para garantir que foram corretamente reparados.

Ensaio não destrutivo (NDT): Os métodos de ensaio não destrutivos desempenham um papel vital na avaliação da qualidade das reparações de soldadura. Técnicas como o ensaio ultrassónico, o ensaio de partículas magnéticas, o ensaio de penetração de corante, o ensaio radiográfico ou o ensaio de correntes de Foucault podem ser utilizadas para detetar defeitos subsuperficiais, descontinuidades ou outras falhas ocultas que possam afetar a integridade da soldadura reparada. O NDT ajuda a verificar a solidez e a fiabilidade da reparação e assegura que quaisquer defeitos residuais são identificados e tratados.

Ensaio mecânicos: Os ensaios mecânicos são frequentemente realizados para avaliar a resistência, a dureza, a ductilidade e outras propriedades mecânicas da soldadura reparada. Podem ser efectuados ensaios de tração, de dureza, de impacto ou de flexão para avaliar o desempenho mecânico da soldadura e compará-lo com os requisitos especificados. Estes testes fornecem dados quantitativos sobre a resistência e integridade da soldadura, ajudando a determinar se a reparação restaurou as propriedades mecânicas da soldadura para um nível aceitável.



Inspeção dimensional: A inspeção dimensional é essencial para garantir que a soldadura reparada está em conformidade com as dimensões especificadas, incluindo o comprimento, a largura, a altura e a espessura da garganta. Podem ser utilizadas ferramentas de medição de precisão, como paquímetros, micrómetros, calibradores ou sistemas de medição ótica, para avaliar a exatidão dimensional da reparação. O alinhamento dimensional e o ajuste correctos são cruciais para garantir a integridade estrutural e a funcionalidade da soldadura reparada.

Documentação pós-reparação: É importante manter uma documentação completa do processo de reparação de soldaduras, incluindo procedimentos de reparação, relatórios de inspeção, resultados de testes e quaisquer outras informações relevantes. Esta documentação serve de referência para futuras inspeções, auditorias ou avaliações de qualidade e fornece um registo da eficácia da reparação e da conformidade com as normas e especificações aplicáveis.

Conformidade com as normas e especificações: A eficácia de uma reparação por soldadura deve ser avaliada com base nas normas, códigos e especificações aplicáveis da indústria. Estes documentos descrevem os critérios de aceitação, os requisitos de qualidade e os procedimentos de inspeção que devem ser seguidos. A soldadura reparada deve cumprir ou exceder as normas especificadas para garantir a sua aptidão para o serviço e fiabilidade a longo prazo.

Ao realizar uma avaliação exaustiva que inclui inspeção visual, ensaios não destrutivos, ensaios mecânicos, inspeção dimensional e conformidade com as normas, a eficácia das reparações de soldaduras pode ser avaliada com precisão. Esta avaliação garante que a soldadura reparada cumpre as normas de qualidade necessárias e proporciona confiança na sua integridade estrutural e desempenho em condições de funcionamento.

Exame pós-soldagem para verificação da qualidade

O exame pós-soldadura é um passo crítico no processo de soldadura que envolve a verificação da qualidade e integridade da junta soldada após a conclusão das operações de soldadura. Este exame tem como objetivo garantir que a soldadura cumpre as normas, especificações e critérios de desempenho exigidos. Ajuda a identificar quaisquer potenciais defeitos, descontinuidades ou imperfeições que possam ter ocorrido durante a soldadura e avalia a qualidade geral da soldadura.

Aspectos fundamentais do exame pós-soldadura para a verificação da qualidade:

Inspeção visual: A inspeção visual é o método mais básico e mais comumente utilizado para o exame pós-soldadura. Envolve um exame visual minucioso da junta soldada para identificar quaisquer defeitos ou imperfeições visíveis. O inspetor avalia a soldadura para detetar problemas como fusão incompleta, falta de penetração, subcotação, porosidade, fissuras, salpicos ou quaisquer



outras irregularidades. A inspeção visual também verifica o perfil geral da soldadura, o reforço e o aspeto, assegurando que estão em conformidade com os requisitos especificados.

Ensaio não destrutivo (NDT): As técnicas de ensaio não destrutivo são utilizadas para avaliar a integridade interna e superficial da soldadura sem causar danos. Podem ser utilizados vários métodos de NDT, como o ensaio por ultra-sons, o ensaio radiográfico, o ensaio por partículas magnéticas, o ensaio por líquido penetrante ou o ensaio por correntes de Foucault, para detetar defeitos subsuperficiais, descontinuidades ou outras falhas ocultas. O NDT ajuda a garantir que a soldadura está isenta de defeitos internos, tais como porosidade, fissuras, falta de fusão ou inclusões, que podem comprometer a sua resistência e desempenho.

Ensaio mecânico: Os ensaios mecânicos são efectuados para avaliar as propriedades mecânicas e a resistência da junta soldada. O ensaio de tração, o ensaio de dureza, o ensaio de impacto ou o ensaio de flexão podem ser realizados em amostras de ensaio extraídas da soldadura para avaliar a sua resistência, ductilidade, tenacidade e outras características mecânicas. Os ensaios mecânicos fornecem dados quantitativos sobre o desempenho da soldadura, permitindo a comparação com os requisitos e normas especificados.

Inspeção dimensional: A inspeção dimensional verifica a precisão dimensional e a conformidade da soldadura com os requisitos especificados. Envolve a medição das principais dimensões da soldadura, tais como o comprimento, a largura, a altura e a espessura da garganta, utilizando ferramentas de medição de precisão. A inspeção dimensional garante que a soldadura está em conformidade com as dimensões exigidas, as tolerâncias de ajuste e os parâmetros geométricos necessários para a aplicação pretendida.

Documentação e manutenção de registos: A documentação e a manutenção de registos adequados são essenciais no exame pós-soldadura. Devem ser mantidos registos detalhados, incluindo relatórios de inspeção, resultados de testes, qualificações do soldador, especificações do procedimento de soldadura e quaisquer outros documentos relevantes. Esta documentação fornece provas de conformidade, permite a rastreabilidade e serve de referência para futuras inspecções, auditorias ou avaliações de qualidade.

Conformidade com as normas e especificações: O exame pós-soldagem deve ser efectuado em conformidade com as normas, códigos e especificações aplicáveis. Estes documentos definem os critérios de aceitação, os requisitos de qualidade e os procedimentos de inspeção que devem ser seguidos. O cumprimento das normas assegura que a soldadura cumpre as normas de qualidade necessárias e garante o seu desempenho e fiabilidade em serviço.

O exame pós-soldadura desempenha um papel vital na verificação da qualidade e integridade das juntas soldadas. Através da realização de uma inspeção visual minuciosa, da utilização de técnicas de

ensaio não destrutivas adequadas, da realização de ensaios mecânicos e dimensionais e da manutenção de uma documentação adequada, a qualidade da soldadura pode ser efetivamente verificada. Este processo de exame garante que a soldadura cumpre as normas exigidas, melhora a sua integridade estrutural e contribui para o sucesso geral e a fiabilidade do componente ou da estrutura soldada.

1.3.6. Métodos de ensaio mecânico de materiais metálicos

Os ensaios mecânicos referem-se a todas as determinações relativas ao comportamento de materiais metálicos sob condições específicas impostas mecanicamente, convencionalmente estabelecidas. Os ensaios mecânicos variam em função do tipo de deformação macroscópica gerada (tração, compressão, flexão, torção, dureza, etc.), do modo de aplicação da carga (estático, dinâmico, variável em magnitude e direção), da temperatura a que o ensaio é realizado (quente, frio, à temperatura ambiente), etc. As abordagens mais comuns envolvem ensaios de tração estática, ensaios de dureza e ensaios de flexão por impacto dinâmico.

a) Ensaios de tração estáticos

Estes ensaios são realizados em provetes sob a forma de barras, fios ou tiras com dimensões normalizadas. A forma mais utilizada e as dimensões primárias do provete de tração são apresentadas na Figura 1.3.30.

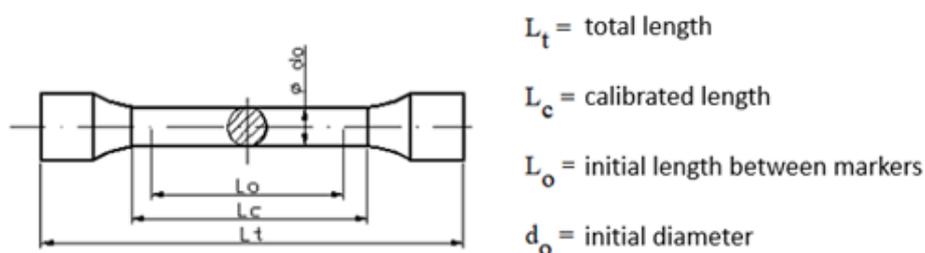


Fig. 1.3.30: Provette de ensaio estático de tração

O comprimento inicial L_0 e o diâmetro inicial d_0 são escolhidos de modo a que o rácio dimensional, denotado como $n = L/d_{00}$, tenha um valor de $n = 5$ ou $n = 10$. O processamento dos provetes é descrito na norma STAS 7324 - 75, enquanto que a forma, as dimensões e as condições de preparação dos provetes são especificadas na norma STAS 200 - 87.

As máquinas utilizadas para os ensaios de tração estão equipadas com um registador que traça a relação entre a força axial F e o alongamento do provete Δl . A Figura 1.3.31 mostra uma curva tensão-deformação de tração para um aço de baixo teor de carbono.

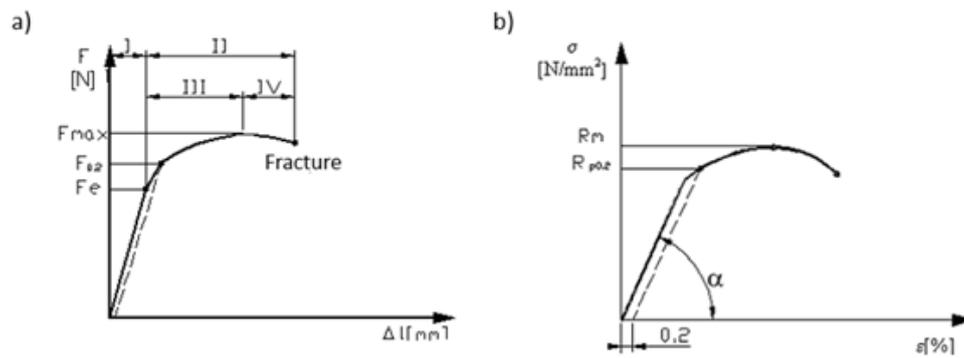


Fig. 1.3.31: a) Curva de tração de um aço de baixo teor de carbono; b) Curva de tração convencional de um aço de baixo teor de carbono.

Distinguimos:

- I - O domínio da deformação elástica.
- II - O domínio da deformação plástica.
- III - Deformação uniforme.
- IV - Deformação não uniforme (necking).

No domínio I, ocorre a deformação elástica do material, seguindo a lei de Hooke: $\epsilon = \sigma/E$.

A curva de tração convencional (Figura 1.3.32) representa a relação entre a tensão mecânica σ , definida como a razão entre a força e a área da secção transversal ($\sigma = F/A$ [N/mm²]), e o alongamento relativo ϵ , definido como a razão entre o alongamento do provete Δl e o seu comprimento inicial L_0 .

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

A partir desta curva, podem ser determinadas as seguintes características:

- Resistência à tração, R_m , definida como a relação entre a carga máxima e a área da secção transversal inicial do provete:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

- A tensão de cedência convencional, $R_{p0.2}$, é obtida como a razão entre a carga que produz uma deformação plástica de 0,2% e a área da secção transversal inicial do provete:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$



- Módulo de elasticidade longitudinal, E , que representa o declive da parte linear da curva de tração convencional: $\alpha_{tg}E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$;
- Alongamento na rutura, A_n , definido como a razão entre o alongamento do provete e o seu comprimento inicial:

$$A_n = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100[\%]$$

em que L_f é o comprimento do provete após a rutura e n é o fator dimensional.

- O corte na rutura, Z , é expresso como a diferença entre as áreas das secções transversais inicial e final do provete em relação à área da secção transversal inicial:

$$Z = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100[\%]$$

em que S_0 é a área da secção transversal inicial do provete e S_f é a área da secção transversal final na zona de rutura.

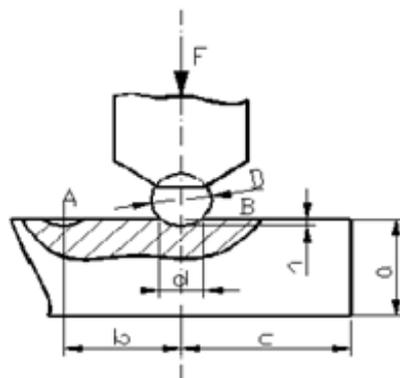
b) Ensaios de dureza

A dureza é definida como a propriedade de um material de resistir à deformação plástica causada por cargas de contacto estáticas ou dinâmicas localizadas na sua superfície. É uma das propriedades mecânicas mais utilizadas para caraterizar materiais metálicos e depende da composição química e do estado estrutural do material.

Existem vários métodos para determinar a dureza com base no tamanho da impressão produzida por um penetrador pressionado com uma força específica sobre a superfície do material. A escolha do método de ensaio de dureza mais adequado tem em conta:

- A natureza do material que está a ser testado.
- A precisão do teste.
- As dimensões da amostra.
- A relação custo-eficácia da determinação.

O método de Brinell consiste em fazer uma indentação na superfície do material com uma esfera de aço de diâmetro D , perpendicular à superfície, como mostra o esquema da Figura 1.3.32.



- D = ball diameter
h = depth of the trace
d = trace diameter
a = thickness of the part
b = distance between two traces
c = distance between the trace and the edge of the part

Fig. 1.3.32: Determinação da dureza Brinell

A dureza é expressa como a relação entre a força aplicada F e a área da calote esférica S da impressão deixada pelo penetrador na superfície a ser testada:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

A duração da carga, a distância mínima entre dois traços (b) e a distância entre o traço e o bordo da amostra (c) dependem da dureza do material.

A espessura mínima das amostras submetidas ao ensaio (a) deve ser 8 vezes a profundidade da impressão, para evitar a influência do suporte do aparelho na dureza.

Na prática, o valor da dureza é derivado de tabelas baseadas no diâmetro do traço, para uma força de carga e um diâmetro de esfera específicos.

Este método é utilizado para ligas macias (metais não ferrosos e aços recozidos).

A dureza é indicada pelo valor medido seguido do símbolo HB e de um grupo de três números que indicam o diâmetro da esfera em mm, a força de carga em N e a duração em segundos.

Exemplo: 270HB5/700/5

O método Rockwell permite a avaliação da dureza através da profundidade da impressão residual do penetrador. O penetrador pode ser um cone de diamante com um ângulo de ponta de 120° ou uma esfera de aço endurecido.

Este método aplica-se tanto a materiais duros e muito duros (aço temperado, ferro fundido branco) como a materiais macios. O ensaio com um cone de diamante (HRC) ou uma esfera (HRB) é efectuado de acordo com o esquema da Figura 1.3.33, sendo o penetrador inicialmente pressionado sobre a superfície de medição com uma força inicial F_0 . O dispositivo de medição da profundidade é colocado em zero e, em seguida, é aplicada a força F_1 . Após um intervalo de 15, 30 ou 60 segundos, a força excessiva F_1 é removida e a dureza HRC é determinada subtraindo a profundidade de penetração real e do tamanho da unidade Rockwell da constante convencional E .

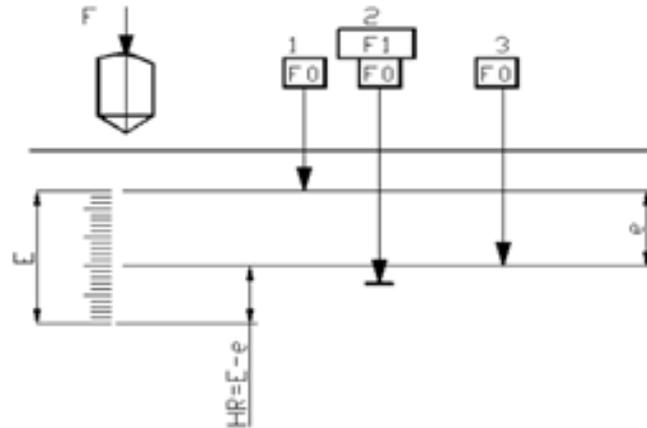


Fig. 1.3.33: Determinação da dureza Rockwell

A notação da dureza utilizando este método é efectuada utilizando o símbolo HRC (ou HRB) seguido do valor da dureza.

Exemplo: 45 HRC

O método Vickers (Figura 1.3.34) é semelhante, em princípio, ao método Brinell, envolvendo a aplicação de um penetrador com a forma de uma pirâmide direita com uma base quadrada e um ângulo de vértice de 136° na superfície de ensaio. A dureza Vickers é designada por HV e é determinada como o rácio entre a força aplicada F e a área lateral da impressão deixada pelo penetrador. Na prática, a área é determinada com base no valor médio da diagonal do traço, de acordo com a fórmula:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Este método é aplicável tanto a materiais macios como a materiais duros. Pode também ser utilizado para medir a microdureza, acoplado um aparelho de ensaio a um microscópio metalográfico ótico. Deste modo, é possível determinar a dureza de componentes estruturais e de estruturas muito finas. Neste caso, a dureza HV é determinada utilizando a fórmula:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{(d + 1,5)^2}$$

Onde d é a diagonal do traço, e 0,25 é um fator de correção.

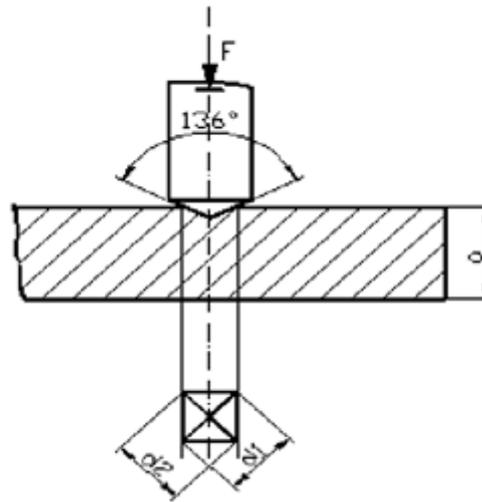


Fig. 1.3.34: Determinação da dureza Vickers

A notação da dureza é efectuada utilizando o símbolo HV, seguido do valor da dureza e de um indicador que representa a carga em daN (se for diferente de 30 daN), seguido da duração da retenção da carga em segundos (se for diferente de 10...15s).

c) Ensaio de flexão por impacto dinâmico (ensaio de resiliência)

Constitui um método para avaliar a tenacidade dos materiais.

A tenacidade representa a resistência do material à propagação abrupta de fissuras.

O aparelho mais utilizado é o martelo pendular Charpy, equipado com um peso G que oscila em torno do centro O (Figura 1.3.35).

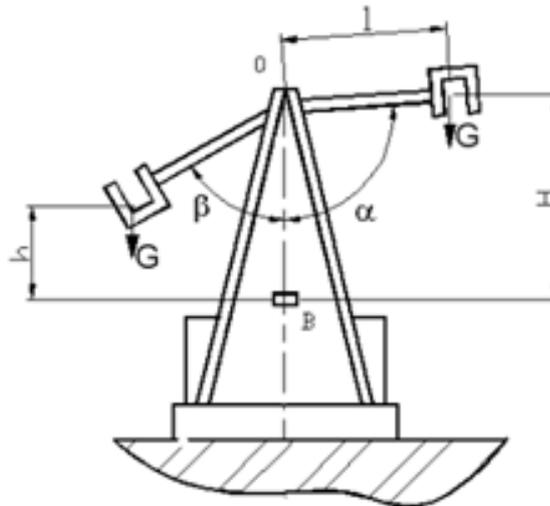


Fig. 1.3.35: Martelo pendular Charpy.

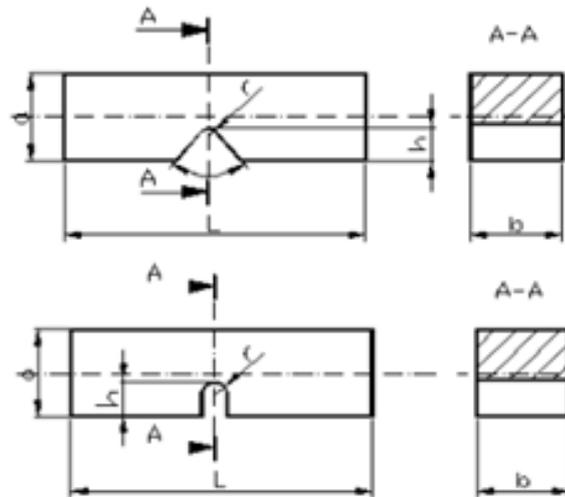


Fig. 1.3.36: Espécimes para o ensaio de flexão por impacto

Os provetes utilizados são tipicamente prismáticos, com dimensões de 10 x 10 x 55 mm e um entalhe em "U" ou "V" (Figura 1.3.36).

Para partir o provete colocado em dois suportes na estrutura, o martelo cai da altura H inicialmente definida e, depois de o provete partir, é elevado à altura h .

A energia consumida para quebrar o espécime é dada pela equação:

$$W = W_0 - W_f = G \cdot (H - h)$$

onde:

W_0 = energia potencial do martelo na posição inicial.

W_f = energia potencial na posição final.

Na prática, o aparelho permite determinar o ângulo α que a haste do martelo de comprimento l faz com a vertical quando na posição inicial, e o ângulo β que a haste do martelo faz com a vertical após a rutura do provete. Expressando as alturas H e h em termos dos ângulos α e β e do comprimento l , a energia consumida no processo de rutura do corpo de prova pode ser escrita como:

$$W = G \cdot l (\cos \beta - \cos \alpha) \text{ [J]}$$

No caso de testar espécimes com um entalhe em "U", a resiliência é definida como a razão entre a energia consumida para quebrar o espécime e a área da secção transversal no entalhe. É simbolizada como KCU e é expressa em J/cm^2 . Assim, a notação $\text{KCU } 150/2/5 = 100 \text{ J/cm}^2$ significa um valor de resiliência de 100 J/cm^2 , determinado com um martelo pendular com uma energia potencial $W_0 = 150 \text{ J}$, em provetes entalhados em "U" com uma profundidade de $h = 2 \text{ mm}$ e uma largura de $b = 5 \text{ mm}$.

No ensaio com espécimes entalhados em "V", a resiliência representa a energia consumida para a rotura. Neste caso, o símbolo é KV, e é expresso em J. A notação KV 300/5 = 70 J representa o valor da energia de rutura (70 J) determinada com um martelo com energia potencial $W_0 = 300 \text{ J}$ num provete entalhado em "V" com uma largura de $b = 5 \text{ mm}$.

Os ensaios de resiliência são mais representativos quando realizados a diferentes temperaturas para determinar a temperatura de transição da fratura dúctil para a fratura frágil, uma vez que os materiais se comportam de forma diferente a várias temperaturas de trabalho.

Pode observar-se que a energia absorvida durante a fratura diminui com a diminuição da temperatura (Figura 1.3.37).

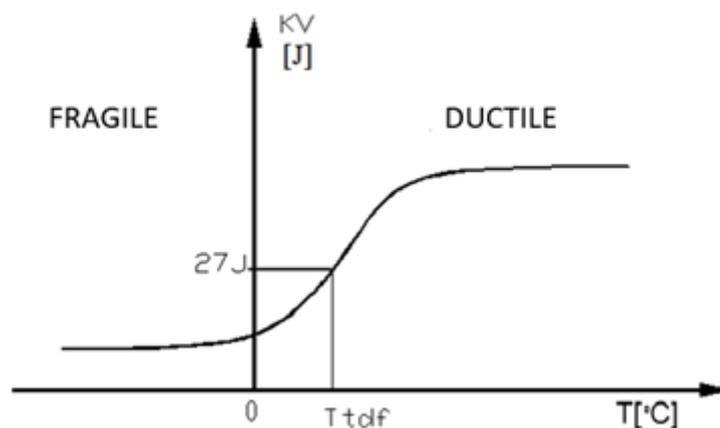


Fig. 1.3.37: Variação da resiliência com a temperatura

Em geral, estima-se que a temperatura na qual ocorre a transição dúctil para frágil (TDBT) é a temperatura na qual o valor da energia de rutura é $KV = 27 \text{ J}$. Em amostras de resiliência, a ductilidade do material pode ser avaliada pela proporção da superfície cristalina em relação à superfície total de fratura.

Conclusões

Em conclusão, o exame macroscópico é uma ferramenta indispensável no domínio da tecnologia de soldadura. Fornece informações valiosas sobre as características, defeitos e qualidade das juntas soldadas, permitindo uma avaliação e apreciação eficazes. Ao longo deste curso eletrónico, explorámos os vários aspectos do exame macroscópico, incluindo a sua definição, objetivo, vantagens e limitações.

Aprendemos que o exame macroscópico é um método fundamental para avaliar a qualidade da soldadura, identificar defeitos e garantir a integridade das juntas soldadas. Permite a inspeção visual dos perfis de soldadura, das dimensões e das irregularidades da superfície, fornecendo informações essenciais sobre a configuração da junta, a penetração, o reforço e o aspeto geral. Ao



analisar as características macroscópicas, como o tamanho, a forma e o reforço da soldadura, podemos obter informações valiosas sobre o processo de soldadura e a integridade da junta.

Além disso, o exame macroscópico complementa outras técnicas de inspeção, incluindo os ensaios não destrutivos e o exame microscópico. Ajuda na deteção e caracterização de defeitos como a porosidade, fissuras, falta de fusão e penetração incompleta. Ao combinar a inspeção visual com outros métodos de ensaio, podemos obter uma compreensão abrangente da qualidade e do desempenho da soldadura.

Ao longo deste curso, salientámos a importância de cumprir as normas e especificações estabelecidas. As normas europeias fornecem directrizes claras para o exame macroscópico e a avaliação da qualidade da soldadura, garantindo consistência e fiabilidade no processo de inspeção. Estas normas definem critérios de aceitação, classificações de defeitos e métodos de avaliação, permitindo um controlo e uma verificação eficazes da qualidade.

Além disso, explorámos a importância do exame pós-soldadura, incluindo a reparação de soldaduras e a verificação pós-reparação. O exame pós-soldadura permite avaliar a eficácia dos procedimentos de reparação, assegurando que a junta reparada cumpre as normas e especificações exigidas.

Em geral, o exame macroscópico desempenha um papel crucial no controlo da qualidade das soldaduras, na identificação de defeitos e na garantia da fiabilidade das juntas soldadas. Permite-nos tomar decisões informadas relativamente à aceitação ou rejeição de soldaduras, avaliar o desempenho e a integridade das juntas e implementar medidas correctivas adequadas. Ao compreender os princípios e as técnicas do exame macroscópico, podemos melhorar a qualidade, a segurança e a durabilidade das estruturas e dos componentes soldados.

Como profissionais no campo da metalografia e da tecnologia de soldadura, é essencial melhorar continuamente os nossos conhecimentos e competências no exame macroscópico. Este curso forneceu uma base sólida para a compreensão do significado, metodologias e aplicações do exame macroscópico. Ao aplicar os conhecimentos adquiridos neste curso, podemos contribuir para o avanço da tecnologia de soldadura, promover a garantia de qualidade e assegurar a implementação bem sucedida de estruturas soldadas em várias indústrias.

Referências

[1.3.1] EN ISO 5817:2014 - Soldadura - Juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas (níveis de qualidade para imperfeições)

[1.3.2] EN ISO 17637:2011 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios visuais de juntas soldadas por fusão

[1.3.3] EN 970:1997 - Exame não destrutivo de juntas soldadas por fusão



- [1.3.4] EN 1290:1997 - Ensaios destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Exame macroscópico de soldaduras
- [1.3.5] GAMMON, Luther M., et al. Metallography and microstructures of titanium and its alloys. ASM handbook, 2004, 9: 899-917.
- [1.3.6] ZIPPERIAN, Donald C. Metallographic handbook. Diretor Técnico da PACE Technologies: Tucson, AR, EUA, 2011.
- [1.3.7] Hadzihafizovic, Dzevad. Imperfeições de Soldadura e Procedimentos e Técnicas de Inspeção de Materiais, 2023.
- [1.3.8] PINTO-LOPERA, Jesús Emilio; ST MOTTA, José Mauricio; ABSI ALFARO, Sadek Crisostomo. Medição em tempo real da largura e altura dos cordões de solda em processos GMAW. Sensores, 2016, 16.9: 1500.
- [1.3.9] EN ISO 17636-2:2013 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios radiográficos - Parte 2
- [1.3.10] EN ISO 17636-3:2013 - Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios radiográficos - Parte 3
- [1.3.11] EN ISO 16810:2004 - Ensaios não destrutivos - Ensaios ultra-sônicos - Técnica de difração por tempo de voo como método de detecção e dimensionamento de descontinuidades
- [1.3.12] EN ISO 23278: Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios de partículas magnéticas
- [1.3.13] EN ISO 3452: Ensaios não destrutivos - Ensaio por Penetrante
- [1.3.14] EN ISO 10042: Soldadura - Juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas - Níveis de qualidade para imperfeições
- [1.3.15] EN ISO 15614-1: Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1
- [1.3.16] EN ISO 14731: Coordenação da soldadura - Tarefas e responsabilidades
- [1.3.17] EN ISO 3834: Requisitos de qualidade para a soldadura por fusão de materiais metálicos
- [1.3.18] EN ISO 17637: Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios visuais de juntas soldadas por fusão
- [1.3.19] EN ISO 5817: Soldadura - Juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas (Níveis de qualidade para imperfeições)
- [1.3.20] EN ISO 13920: Soldadura - Tolerâncias gerais para construções soldadas - Dimensões para comprimentos e ângulos - Forma e posição
- [1.3.21] EN 1290: Soldadura - Determinação do número de ferrite (FN) em metais de solda de aço inoxidável Cr-Ni ferrítico-austenítico austenítico e duplex
- [1.3.22] EN ISO 17635: Ensaios não destrutivos de soldaduras - Regras gerais para materiais metálicos



- [1.3.23] EN ISO 10275: Soldadura - Preparação de juntas - Parte 3: Soldadura de cobre e suas ligas com gás inerte metálico e soldadura de cobre e suas ligas com gás inerte de tungsténio
- [1.3.24] EN ISO 10042: Soldadura - Juntas soldadas por arco em alumínio e suas ligas - Níveis de qualidade para imperfeições
- [1.3.25] BODEA, Marius. Sudare și procedee conexe. UT Press, 2016.
- [1.3.26] Informações sobre: <https://amarineblog.com/2019/09/05/groove-design-bevel-preparation/>
- [1.3.27] Informações sobre: <https://www.boconline.co.uk/en/processes/welding/welding-defects/porosity.html>
- [1.3.28] Informações sobre: <https://www.boconline.co.uk/en/processes/welding/welding-defects/lack-of-fusion.html>
- [1.3.29] Informações sobre: <https://www.slideserve.com/anne-lott/visual-guide-to-weld-defects-discontinuities>
- [1.3.30] Information on: <https://in.pinterest.com/pin/types-of-welding-defects-causes-and-remedies-in-2023--838795499369764806/>
- [1.3.31] Informações sobre: <https://www.boconline.co.uk/en/processes/welding/welding-defects/distortion.html>
- [1.3.32] Soldadura por arco pulsado aplicada à união robotizada de chapas finas de aço para carroçarias - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Imperfections-found-during-visual-inspections-local-spatters-a-b-uneven_fig4_271390435
- [1.3.33] Informações sobre: https://www.linkedin.com/pulse/csa-w59-18-weld-quality-acceptance-criteria-karsten-madsen?utm_source=share&utm_medium=guest_desktop&utm_campaign=copy
- [1.3.34] Informações sobre: <https://www.triquestndt.com/conventional/ultrasonic-testing>
- [1.3.35] Informações sobre: <https://www.matsusada.com/column/words-ndt.html>
- [1.3.36] Informações sobre: <https://wdbgroup.co.uk/blog/what-is-magnetic-particle-inspection-all-you-need-to-know/>
- [1.3.37] Informações sobre: <https://encorus.com/2020/07/17/liquid-penetrant-testing/>
- [1.3.38] Informações sobre: <https://resources.arcmachines.com/how-to-do-a-pipe-welding-visual-inspection-ami/>

1.4. Exame microscópico e sua aplicação na tecnologia de soldadura

O microscópio ótico (de luz) continua a ser o instrumento mais importante para o estudo da microestrutura, apesar da evolução de instrumentos sofisticados de metalografia eletrónica. A



microscopia eletrónica de varrimento (SEM) e a microscopia eletrónica de transmissão (TEM) também são ferramentas valiosas; no entanto, todos os exames da microestrutura devem começar com a utilização de um microscópio ótico, começando com uma ampliação baixa, como 25×, seguida de ampliações progressivamente maiores para avaliar eficazmente as características básicas da microestrutura.

A maioria das microestruturas pode ser observada com o microscópio ótico e identificada com base nas suas características. A identificação de constituintes duvidosos ou desconhecidos pode ser auxiliada pela observação da sua dureza em relação à matriz, pela sua cor natural, pela sua resposta à luz polarizada e pela sua resposta a agentes de corrosão selectivos. Estas observações são comparadas com pormenores conhecidos sobre a metalurgia física do material que está a ser examinado. Se ainda subsistirem dúvidas ou se a estrutura for demasiado fina para ser observada, devem ser implementadas técnicas mais sofisticadas, utilizadas em conjunto com a microscopia ótica e não como substituto.

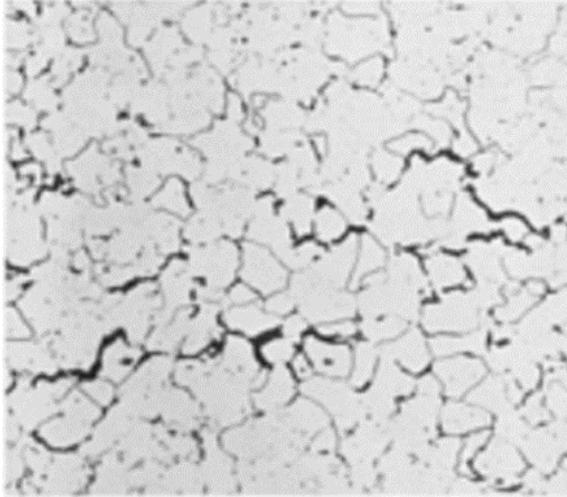
O microscópio eletrónico de varrimento é um dos instrumentos mais versáteis para a investigação da microestrutura de materiais metálicos. Comparado com o microscópio ótico (de luz), aumenta a gama de resolução em mais de uma ordem de grandeza para cerca de 10 nm (100) em instrumentos de rotina, com valores finais inferiores a 3 nm (30). A ampliação útil estende-se assim para além de 10 000 × até 150 000 ×, fechando o fosso entre o microscópio ótico e o microscópio eletrónico de transmissão. Em comparação com a microscopia ótica, a profundidade de focagem, que varia de 1 m a 10 000 × a 2 mm (0,08 pol.) a 10 ×, é superior em mais de duas ordens de grandeza, devido à abertura muito pequena do feixe.

A microscopia eletrónica de varrimento (SEM) oferece possibilidades de formação de imagens que são geralmente fáceis de interpretar e revelam imagens claras de secções transversais polidas e gravadas, bem como de superfícies rugosas. A análise de raios X por dispersão de energia, utilizando equipamento habitualmente ligado ao microscópio eletrónico de varrimento, permite uma análise semiquantitativa e, em casos favoráveis, quantitativa da composição de um pequeno volume com boa resolução lateral. O MEV encontrou uma vasta gama de aplicações na investigação de materiais, desenvolvimento de materiais, análise de falhas e controlo de qualidade.

Utilizando o exame microscópico, podem ser vistos e analisados diferentes aspectos de uma soldadura. Aspectos como as imperfeições ou defeitos (Fig. 1.4.1.), as microestruturas (Fig. 1.4.2.) e o regime térmico do processo de soldadura.



A



B

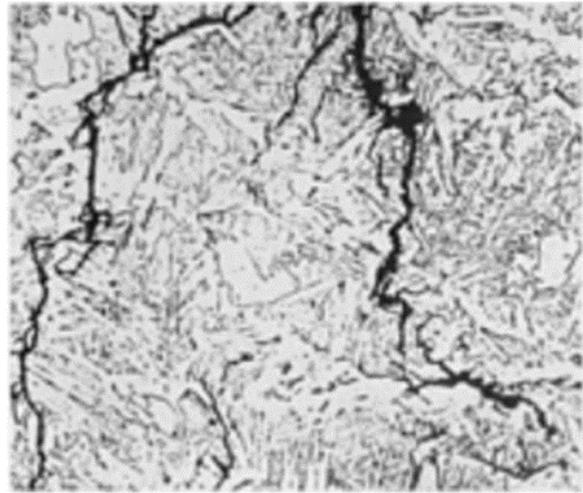


Fig. 1.4.1. A. Fissuras no metal de soldadura em chapa de aço ASTM A285, grau C. As fissuras, que resultaram da fragilização cáustica, são trans granulares e intergranulares. Gravura: Nital. 275x. B. Fissuras, na placa de aço ASTM A285 Grau C que estava em serviço há um ano a 480 °C em um vaso de refinaria, causadas pela penetração de hidrogênio. Ferrite com apenas algumas partículas de carboneto - um resultado da decarbonetação de hidrogênio em serviço. Nital. 275x (Fonte: ASM Handbook Volume 9. Metallography and Microstructures).

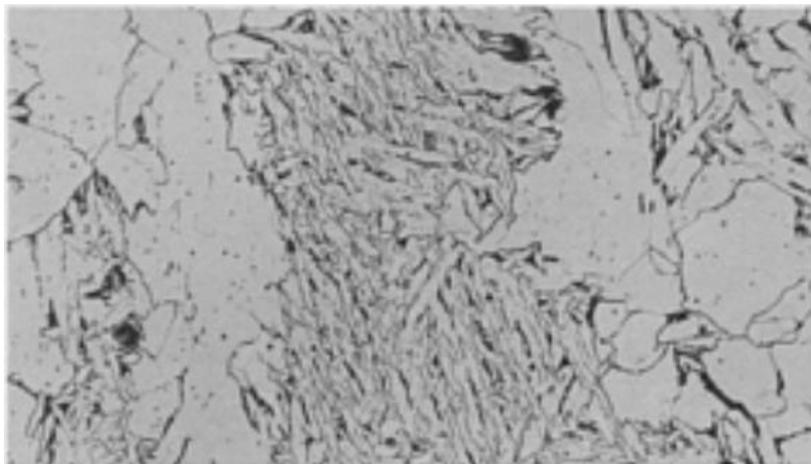


Fig. 1.4.2. Chapa de aço A-36 de 16 mm, soldadura topo a topo monovolume com arco metálico protegido de passagem múltipla. Entrada de calor: 1,3 kJ/mm. Arame de soldadura: AWS E7018. Microestrutura da zona de fusão contendo bainite e agregado de carboneto de ferrite em ferrite de contorno de grão grosseiro. 2% de nital. 500x (Fonte: ASM Handbook Volume 9. Metallography and Microstructures).

1.4.1. Fases de equilíbrio

A fase representa uma parte homogênea de um sistema que tem a mesma composição química e o mesmo estado de agregação em todo o seu volume, sendo separada de outras partes do

sistema por interfaces de fase, como por exemplo as fronteiras de grão. A estrutura da fase depende da forma, do tamanho e da disposição recíproca dos átomos.

Os constituintes microestruturais podem ser constituídos por duas ou mais fases que se separam simultaneamente do líquido à temperatura de solidificação mais baixa do sistema (transformação eutética) ou que surgem como resultado de transformações de fase no estado sólido (transformação eutética). É identificado por microscopia ótica ou eletrónica e pode conter: metal puro, solução sólida, composto definido ou mistura mecânica.

Durante os processos de aquecimento ou resfriamento, ou na mudança do estado de agregação de líquido para sólido, as ligas metálicas sofrem transformações de fase no estado sólido. Os principais tipos de transformações são: as transformações homogêneas, que ocorrem simultaneamente em todo o volume da peça, sem processos de germinação e crescimento e as transformações heterogêneas, que ocorrem por germinação e crescimento (com difusão, sem difusão).

As principais fases de equilíbrio que podem ser encontradas no aço não ligado ou no aço de baixa liga são: **ferrite, perlite e cementite**.

A ferrite alfa é a forma estável do ferro à temperatura ambiente. É macia e ferromagnética a temperaturas inferiores a 727 °C e paramagnética entre 727 e 912 °C. A ferrite alfa é um componente importante do aço macio, mas está presente em todos os compostos de ferro-carbono que foram arrefecidos à temperatura ambiente, coexistindo com outras formas, como a cementite.

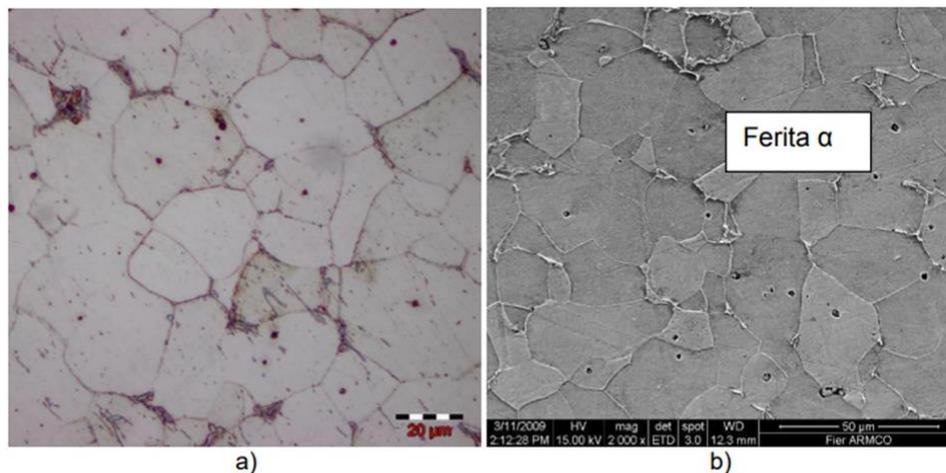


Fig. 1.4.4. ALPHA FERRITE: a) Microscopia ótica (200x); b) SEM (2000x).

A austenite, também conhecida como ferro em fase gama (γ -Fe), é um alótropo metálico e não magnético do ferro ou uma solução sólida de ferro com um elemento de liga. No aço-carbono simples, a austenite existe acima da temperatura eutectoide crítica de 727 °C. Existe à temperatura ambiente em alguns aços inoxidáveis devido à presença de níquel que estabiliza a austenite a temperaturas mais baixas.

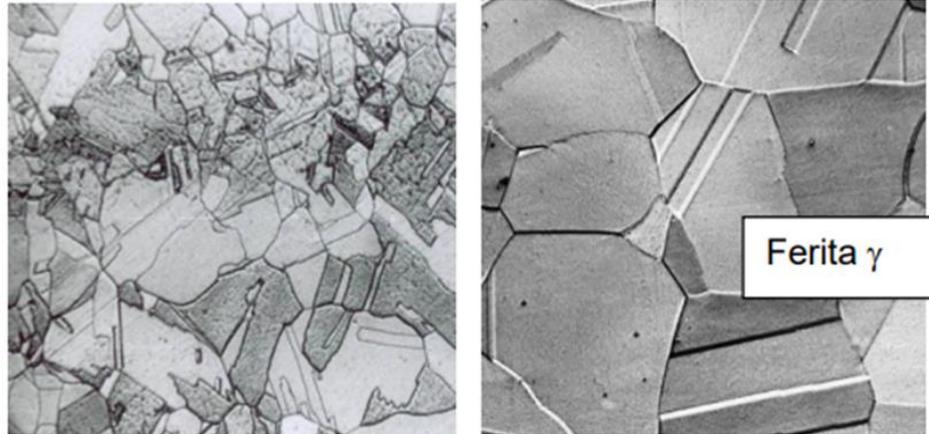


Fig. 1.4.5. AUSTENITA

A **ferrite delta** é uma fase permanente apenas a temperaturas muito elevadas, próximas do ponto de fusão; torna-se estável quando aliada a estabilizadores de ferrite, tais como Cr, Mo, Si, Nb. Assim, a ferrite delta forma-se durante a fase de arrefecimento do fabrico do aço inoxidável. Começa como uma fase de limite de grão de austenite, que depois se transforma numa fase de ferrite delta à medida que arrefece.

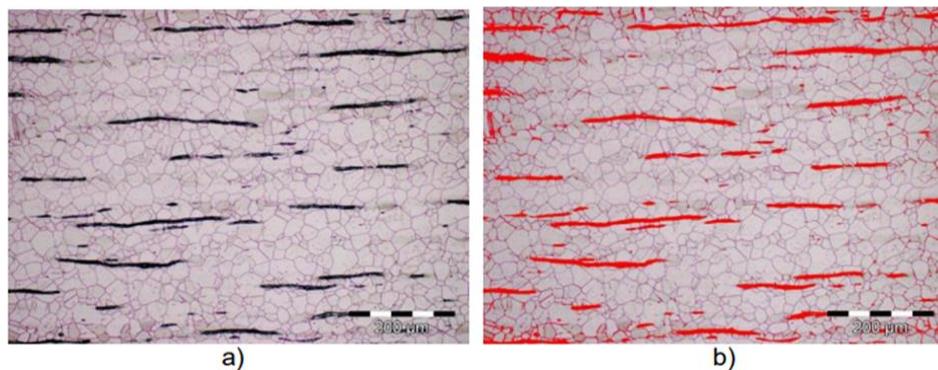


Fig. 1.4.6. Delta ferrite em aço inoxidável (16% Cr, 10% Ni) disposta entre grãos de austenite. a) Microestrutura real; b) Imagem processada utilizando um programa de análise de imagem.

A **perlite** é uma estrutura bifásica, lamelar (em camadas ou em forma de placa) composta por camadas alternadas de alfa-ferrite e cementite que ocorre em alguns aços e ferros fundidos. A perlita só se forma em condições especiais que devem ser controladas para criar esta fase de liga. É formada pela decomposição eutectóide da austenite após arrefecimento por difusão de átomos de C, quando a ferrite e a cementite crescem de forma contígua, precipitando o C como Fe_3C entre feixes de ferrite na interface de avanço, deixando feixes paralelos de Fe e Fe_3C , que é a perlite.

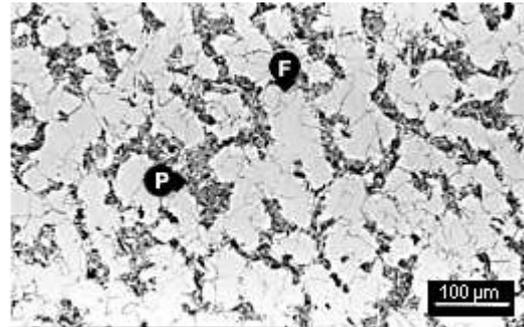


Fig. Alfa-ferrite (F) e Peralite (P). Fonte: TWI ()

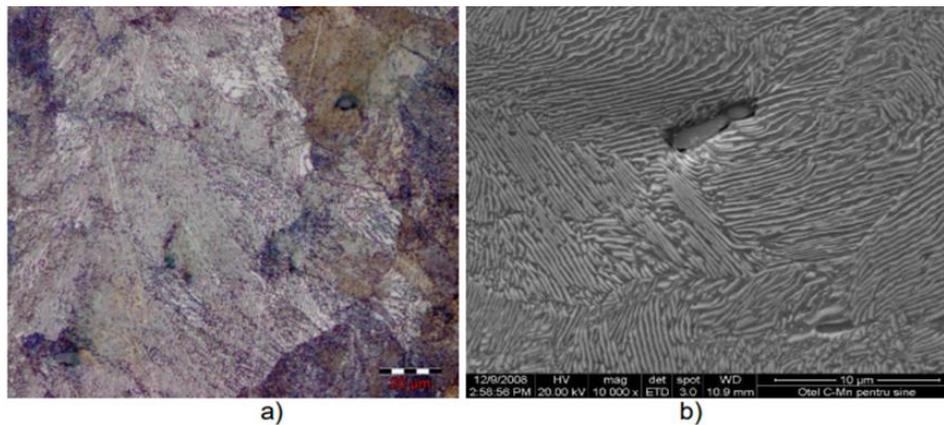


Fig. 1.4.76. Perlita lamelar. Gravura: Nital 2%: a) Microscopia ótica (1000x); b) SEM (10000x)

A cementite (ou carboneto de ferro) é um composto de ferro e carbono, mais precisamente um carboneto de metal de transição intermédio com a fórmula Fe_3C . Em peso, tem 6,67% de carbono e 93,3% de ferro. É uma estrutura dura e quebradiça, com uma dureza Brinell de 700-750HB normalmente. No aço hipereutectoide podem encontrar-se grãos de perlite em redor, enquanto que no ferro fundido apresenta uma estrutura em forma de agulha ou cristais poliédricos.

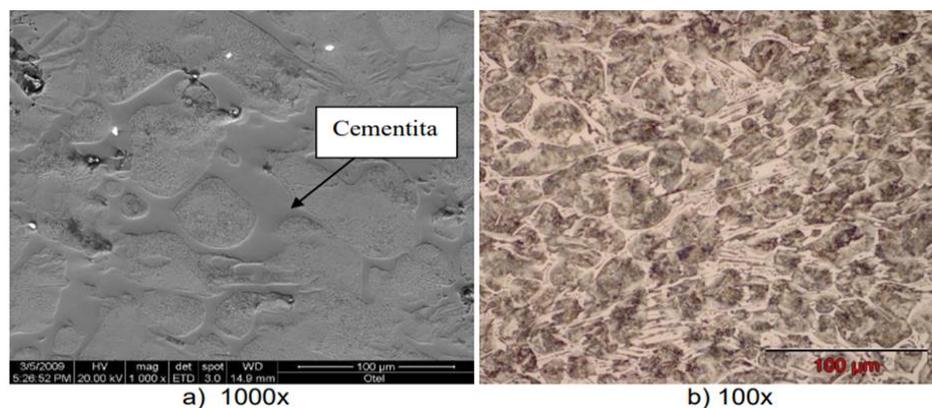


Fig. 1.4.87. Aço hipereutectoide. a) Pearlite e cementite (SEM); b) Microscopia ótica

1.4.2. Tratamentos térmicos

O tratamento térmico é o processo de aquecimento e arrefecimento de metais, utilizando métodos específicos pré-determinados para obter as propriedades desejadas. Em termos simples, o



tratamento térmico é o processo de aquecimento do metal, mantendo-o a essa temperatura, e depois arrefecendo-o novamente. Durante o processo, a peça metálica sofrerá alterações nas suas propriedades mecânicas. Isto deve-se ao facto de a temperatura elevada alterar a microestrutura do metal. E a microestrutura desempenha um papel importante nas propriedades mecânicas de um material.

O resultado final depende de muitos factores diferentes. Estes incluem o tempo de aquecimento, o tempo de manutenção da peça metálica a uma determinada temperatura, a taxa de arrefecimento, as condições envolventes, etc. Os parâmetros dependem do método de tratamento térmico, do tipo de metal e do tamanho da peça. Podem ser efectuados testes de dureza para verificar o sucesso do tratamento térmico realizado.

A normalização é um tratamento térmico cujo principal efeito é a recristalização da fase para reduzir o tamanho do grão, tendo também os efeitos positivos da desidrogenação e do alívio de tensões.

A normalização pode ser completa, se a temperatura de manutenção for escolhida em valores ligeiramente acima do valor do ponto AC_3 : $T_H = AC_3 + (30\div 50) ^\circ C$, que corresponde a um valor de cerca de $950\div 1050^\circ C$. A escolha do valor superior da temperatura deve ser feita com muito cuidado para evitar o sobreaquecimento. O arrefecimento é efectuado em ar ventilado ou em óleo, sendo a velocidade de arrefecimento superior à de equilíbrio segundo o diagrama Fe-C mas inferior à velocidade de têmpera martensítica.

O efeito de refinação do grão é obtido pela dupla transformação de fase aquando do aquecimento (perlite ® austenite) e do arrefecimento (austenite ® ferrite + perlite). Com este processo, de um grão de austenite podem obter-se 3 grãos de ferrite.

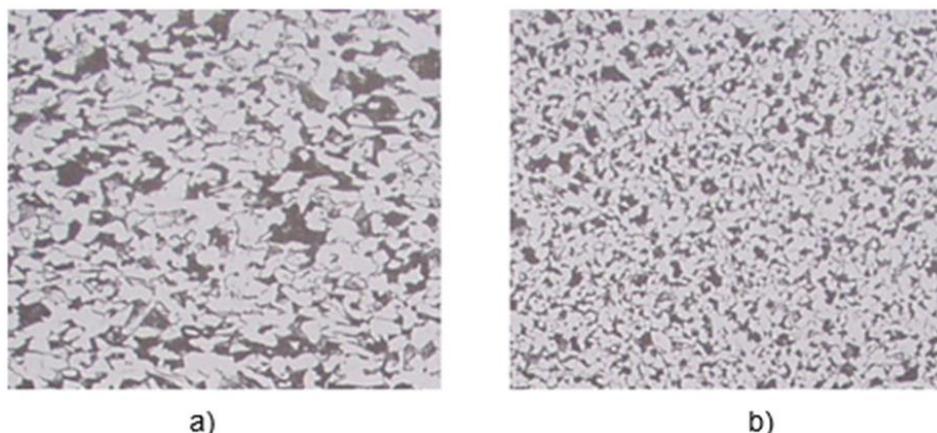


Fig. 1.4.98. Refinação de grão por normalização do aço carbono tipo SA 515 Gr 70 espessura = 30mm: a) antes da normalização; b) após normalização a $900^\circ C/1$ hora.

A têmpera é um tratamento térmico que tem por objetivo levar o material a um estado muito afastado do equilíbrio, aquecendo-o a uma temperatura elevada (superior a AC_3) e

arrefecendo-o em seguida a velocidades suficientemente elevadas para impedir total ou parcialmente a transformação microestrutural que teria ocorrido em condições de equilíbrio. Muitas vezes, o material temperado não satisfaz na medida desejada apenas algumas características, em particular as de resistência mecânica e dureza, afectando, por outro lado, as de plasticidade e tenacidade.

Para obter um efeito ótimo no que diz respeito ao comportamento tecnológico em condições de trabalho, as peças endurecidas são submetidas a um tratamento térmico posterior (têmpera).

A **têmpera** é um tratamento térmico aplicado após o arrefecimento, a fim de melhorar as características que foram enfraquecidas devido ao arrefecimento. As peças são aquecidas a uma temperatura inferior à do AC_1 e depois arrefecidas ao ar.

Nas Fig. 1.4.10a e 1.4.10b é possível observar o aço C45 em condições comerciais. Nesta condição, a microestrutura apresenta estruturas principais do tipo ferrita e perlita. A figura 1.4.10a foi obtida com uma objetiva ótica de 20X e a figura 1.4.10b foi obtida com uma ampliação de 100X. As figuras 1.4.10c e 1.4.10d foram obtidas com ampliação de 50X e 100X respetivamente, condição do material: temperado em água. As figuras mostram uma estrutura longa em forma de agulha. Após arrefecimento, a estrutura resultante é martensite. As figuras 1.4.10e e 1.4.10f foram obtidas com ampliação de 50X e 100X, condição do material: temperado e revenido (Q-T) e a estrutura observada é martensita temperada.

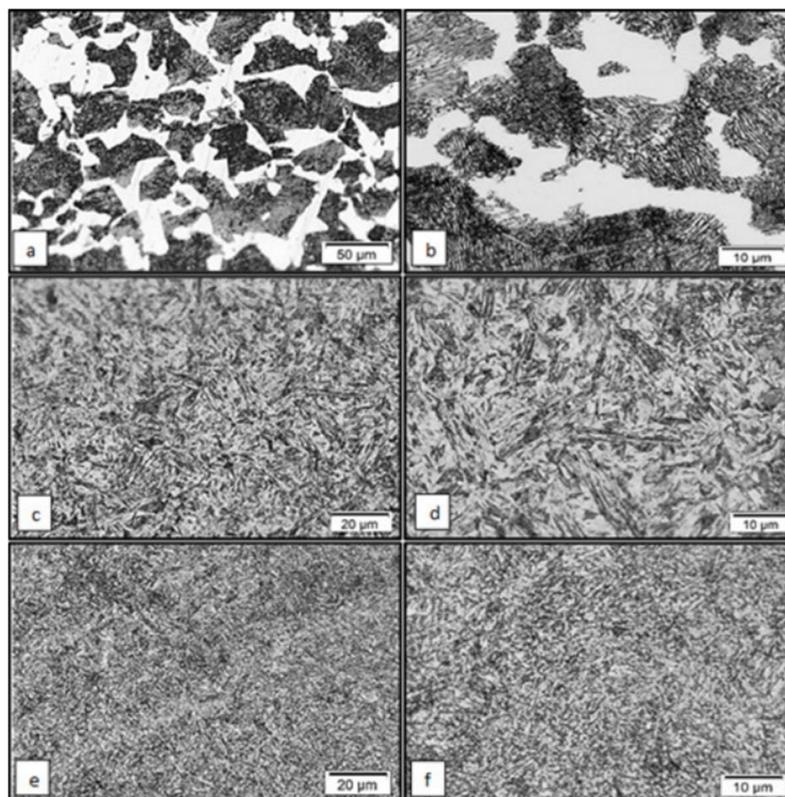
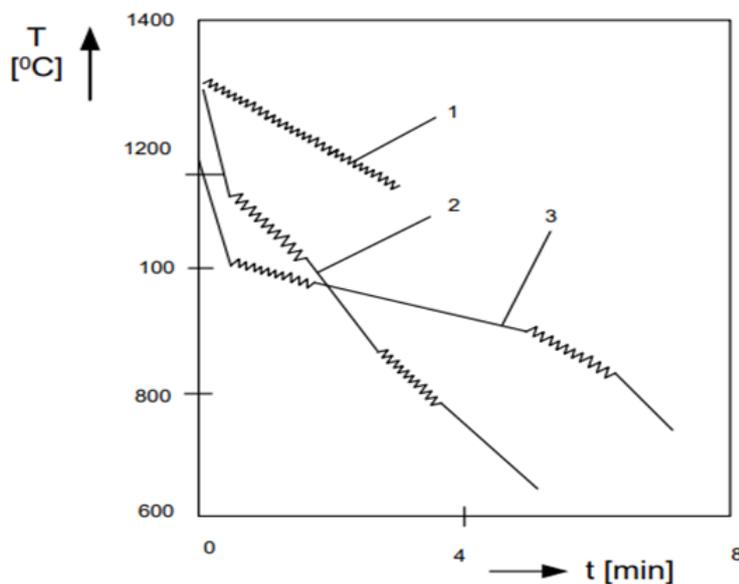


Fig. 1.4.9 Microestruturas ópticas obtidas para o aço C45 temperado em água. a) Condição comercial a 20x. b) Condição comercial a 100x. c) temperado em água a 50x. d) temperado em água a 100x. e) temperado e revenido a 50x. f) temperado e revenido a 100x. (Fonte: <http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp> 146 editor@iaeme.com Jornal Internacional de Engenharia Mecânica e Tecnologia (IJMET) Volume 9, Edição 7, julho de 2018, pp. 146-154, Artigo ID: IJMET_09_07_017)

Os aços **processados termomecanicamente controlados (TMCP)** são obtidos através da combinação da deformação plástica por laminagem com o tratamento térmico (processo de laminagem termomecânica). Trata-se de um processo único porque garante a melhor combinação de resistência e tenacidade em baixos teores de carbono, que não pode ser obtida através de qualquer outro tipo de tratamento térmico.



1 - deformação clássica por laminagem a quente, com temperaturas elevadas ao longo de todo o processo; 2 - laminagem a quente com temperatura controlada; 3 - laminagem a quente combinada com tratamento termomecânico, após um arrefecimento intermédio que é efectuado a uma temperatura mais baixa.

Combinando os efeitos da microligação com a deformação por laminagem a quente a temperaturas cada vez mais baixas, obtém-se uma diminuição de cerca de 8 vezes do tamanho do grão ferrítico, o que provoca um aumento importante do limite de elasticidade e, sobretudo, uma melhoria essencial das características de tenacidade.

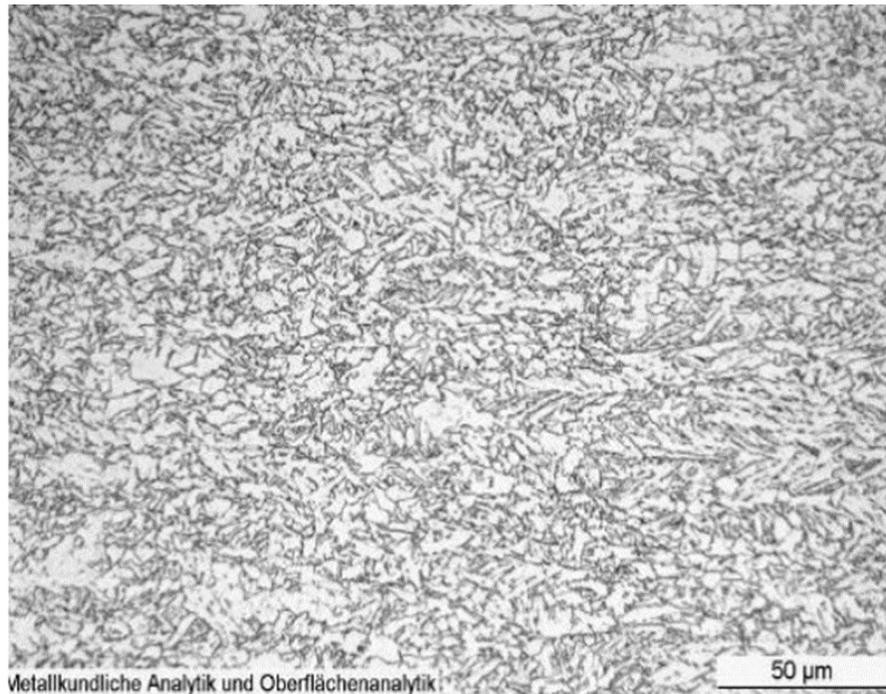
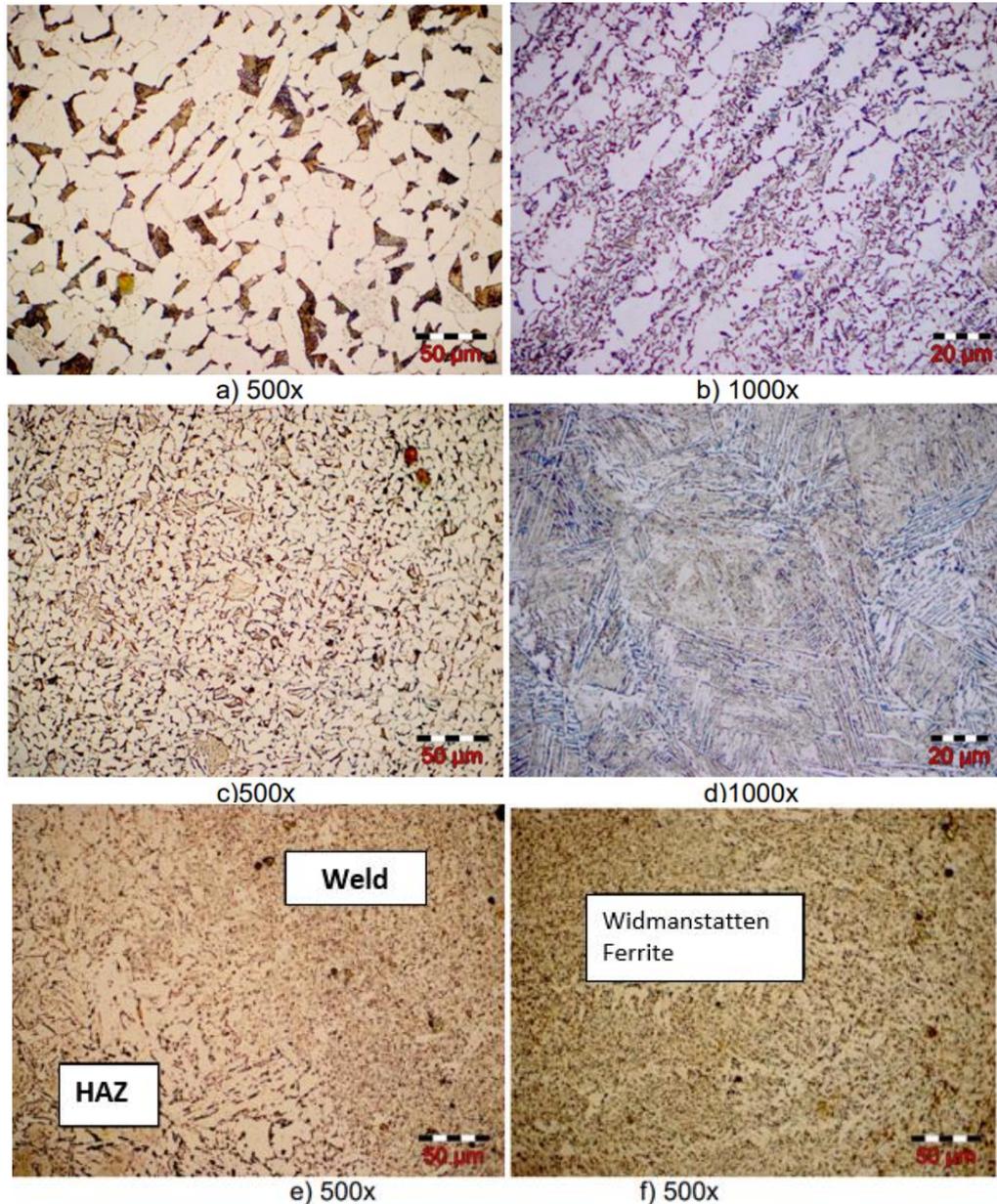


Fig. 1.4.11. Microestrutura do aço TMCP

1.4.3. Aspectos microestruturais de uma soldadura

No conjunto de imagens seguintes, obtidas por microscopia ótica, podem ser observadas diferentes áreas de uma junta soldada de aço-carbono e as suas estruturas específicas, tais como

- a) Material de base: ferrite poligonal (cor branca) e perlite (disposição lamelar, cor castanha-azul clara);
- b) Micro-área de recristalização da ZTA: ferrite e perlite ligeiramente modificadas;
- c) Micro-área de normalização: ferrite fina e perlite recristalizada;
- d) Micro-área sobreaquecida: perlite e ferrite de Widmanstätten;
- e) Linha de fusão: onde se pode ver a diferença de tamanho de grão da ZTA;
- f) Juntas soldadas: precipitados de ferrite fina, ferrite Widmanstätten e carbonetos.



Quando o arrefecimento é efectuado imediatamente abaixo de AC_3 , a ferrite começa a nuclear-se nos limites dos grãos de austenite e os grãos formados aumentam sob a forma de blocos maciços, formando os chamados limites de grãos alotriomórficos.

Com valores de arrefecimento mais elevados, a tendência de crescimento da ferrite começa a manifestar-se sob a forma de estruturas lamelares maciças, designadas por estrutura de Widmanstätten, que se tornam depois refinadas à medida que a taxa de arrefecimento aumenta.

Referências:

[1.4.1] Voiculescu I, Geantă V, Vasile I M, 2016, Aliaje feroase pentru structuri sudate (Ligas ferrosas para estruturas soldadas).



[1.4.2]Jornal Internacional de Engenharia Mecânica e Tecnologia (IJMET). Volume 9, Número 7, julho de 2018, pp. 146-154, Artigo ID: IJMET_09_07_017.

[1.4.3]ASM Handbook Volume 4. Tratamento térmico.

[1.4.4]ASM Handbook Volume 6. Soldadura, brasagem e soldadura.

[1.4.5]ASM Handbook Volume 9. Metalografia e Microestruturas.

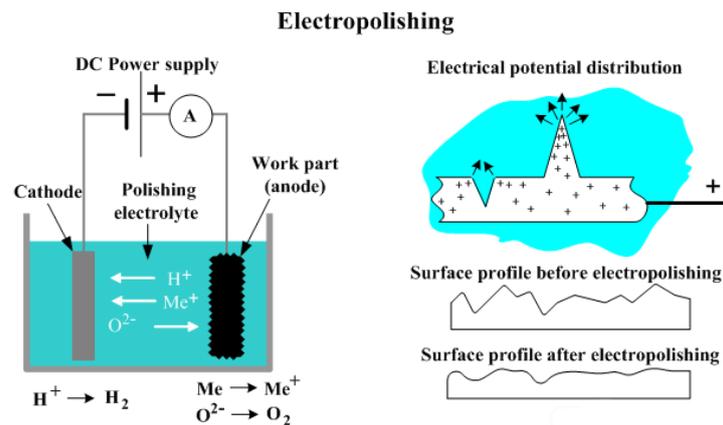
2. CU2: Métodos específicos de preparação de amostras para exames macro e microscópicos

2.1. Polimento eletrolítico, polimento químico, gravação a cores - finalidade e aplicação

Neste capítulo, discutiremos três métodos essenciais utilizados no campo da metalografia: o polimento eletrolítico, o polimento químico e a gravação a cores. Estas técnicas desempenham um papel vital no exame e análise de materiais metálicos, oferecendo uma visão única das suas características microestruturais e superficiais.

2.1.1. Introdução ao polimento eletrolítico Definição, finalidade e funcionamento

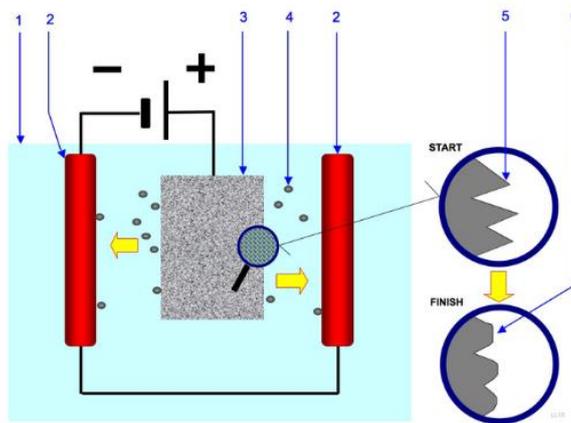
Também conhecido como polimento eletroquímico, polimento anódico ou polimento eletrolítico, o electropolimento é especialmente útil para polir e rebarbar peças frágeis ou com geometrias complexas. O electropolimento melhora o acabamento da superfície, reduzindo a rugosidade da superfície até 50%. O princípio do electropolimento é apresentado na figura 2.1.1.



O objetivo do polimento eletrolítico é duplo: refinamento da superfície e preparação da superfície. Ao submeter o espécime a uma corrente eléctrica na presença de um eletrólito, esta técnica elimina as irregularidades da superfície, tais como riscos, deformações e contaminantes da superfície. O resultado é uma superfície lisa e uniforme que facilita a análise e as observações microestruturais exactas, como se pode ver na figura 2.1.2. O principal objetivo do polimento eletrolítico é criar uma superfície que reflecta com precisão a verdadeira microestrutura do material.



Electropolishing



1. Eletrólito
2. Cátodo
3. Peça a polir (Ânodo)
4. Partículas que se deslocam da peça de trabalho em direção ao cátodo
5. Superfície antes do polimento
6. Superfície após polimento

Figura 2.1.2. Como funciona o electropolimento [2.1.2]

No electropolimento, a peça metálica ou a peça de trabalho serve como ânodo com carga positiva. A peça de trabalho está ligada ao terminal positivo de um retificador de corrente contínua. O cátodo carregado negativamente, geralmente feito de aço inoxidável ou zircónio, é ligado ao terminal negativo do retificador de corrente contínua.

Tanto o ânodo como o cátodo são imersos num banho de solução electrolítica com temperatura controlada. Os produtos químicos de electropolimento para aço inoxidável consistem tipicamente numa mistura de alta viscosidade de ácido sulfúrico e ácido fosfórico.

A corrente eléctrica do retificador é conduzida do ânodo para o cátodo através do eletrólito. A corrente eléctrica faz com que os iões de metal na superfície da peça se oxidem e se dissolvam no eletrólito. Este processo pode dissolver quantidades extremamente pequenas e rigorosamente controladas de metal, resultando na remoção da superfície com uma espessura de nível micrónico, como podemos ver no vídeo da figura 2.1.3.



Fig. 2.1.3 Preparação electrolítica da amostra Polimento [2.1.3]

Parâmetros importantes para um processo de electropolimento bem sucedido



A quantidade de remoção da superfície metálica é controlada pelos seguintes factores:

- Composição química do eletrólito;
- Temperatura do eletrólito (normalmente 76 °C - 82 °C);
- Duração do tempo de exposição à corrente eléctrica;
- Densidade da corrente eléctrica (varia consoante o eletrólito; a gama típica é de 140 - 250 amperes/m²);
- Composição da liga metálica submetida a electropolimento.

No processo de electropolimento, as rebarbas e outros picos de rugosidade da superfície atraem uma maior densidade de corrente eléctrica e são os primeiros a sofrer erosão, num fenómeno conhecido como nivelamento anódico. A remoção preferencial das partes salientes da estrutura da superfície conduz a uma superfície metálica mais lisa.

Fluxo e agitação de electrólitos

A manutenção de um fluxo de eletrólito consistente e controlado é essencial para um polimento eletrolítico eficaz. O fluxo do eletrólito ajuda a remover os detritos e a evitar a acumulação de material dissolvido na superfície da amostra, o que poderia dificultar o processo de polimento. Também promove a uniformidade na remoção de material, garantindo um acabamento de superfície consistente.

As técnicas de mistura, como a agitação mecânica ou a mistura ultra-sónica, podem aumentar ainda mais o fluxo do eletrólito e melhorar os resultados do polimento. A mistura ajuda a desalojar as bolhas de ar/gás, promove a distribuição uniforme do eletrólito e melhora a transferência de massa na superfície da amostra. Isto assegura que toda a superfície é exposta ao eletrólito, evitando efeitos localizados e conseguindo uma remoção mais uniforme do material.

Configuração dos eléctrodos

A configuração e disposição dos eléctrodos no polimento eletrolítico influenciam a distribuição da corrente eléctrica e a remoção de material através da superfície da amostra. Os eléctrodos servem de condutores para a corrente eléctrica e a sua colocação e geometria podem ser ajustadas para controlar o processo de polimento.

Normalmente, são utilizados dois tipos de configurações de eléctrodos: eléctrodo simples e eléctrodo duplo. Numa configuração de eléctrodo único, a própria amostra actua como um eléctrodo, enquanto é utilizado um contra-eléctrodo separado. Numa configuração de eléctrodo duplo, tanto a amostra como um eléctrodo auxiliar separado são imersos na solução electrolítica. A escolha da configuração do eléctrodo depende dos requisitos específicos da amostra e dos resultados de polimento pretendidos. Nas figuras abaixo, são apresentadas unidades de gravação com dois e três eléctrodos.

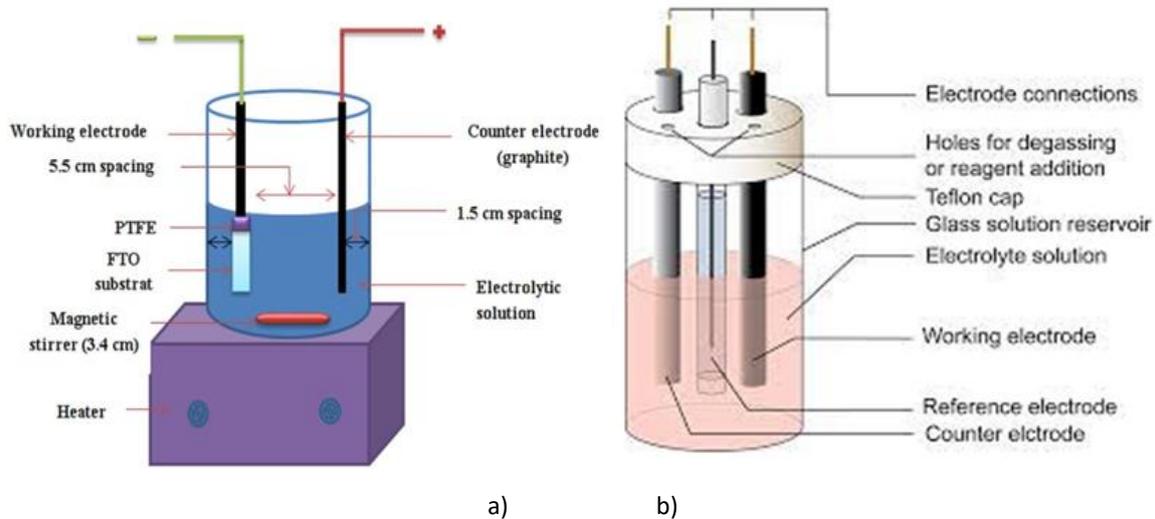


Fig. 2.1.4. Configuração dos eléctrodos com: a) 2 eléctrodos, b) três eléctrodos [2.1.4].

Parâmetros de densidade de corrente e tensão

Os parâmetros de densidade de corrente e de tensão são variáveis críticas que determinam a taxa de remoção de material e o acabamento da superfície durante o polimento eletrolítico. A densidade de corrente refere-se à quantidade de corrente eléctrica aplicada por unidade de área da superfície da amostra. Determina a taxa de remoção de material, sendo que densidades de corrente mais elevadas resultam numa remoção mais rápida e em superfícies potencialmente mais ásperas. A densidade de corrente é controlada através do ajuste da tensão aplicada e da área de superfície do eléctrodo.

A tensão aplicada também influencia o processo de polimento eletrolítico. Determina a força motriz para as reacções electroquímicas e a remoção de material. Ao ajustar a tensão, os investigadores podem controlar a taxa de remoção de material, a rugosidade da superfície e a seleção do processo de polimento. A optimização dos parâmetros de densidade de corrente e tensão requer uma consideração cuidadosa do material da amostra, da composição do eletrólito e das características da superfície pretendida. Frequentemente, envolve testes e ajustes iterativos para alcançar os resultados desejados, evitando a remoção excessiva de material ou danos na superfície.

Que quantidade de material é removida pelo eletropolimento?

A quantidade de material que é removido pelos sistemas de electropolimento é diretamente proporcional ao tempo de execução / tempo de ciclo e aos amperes-minutos que passam pela área de superfície da peça. Todas estas variáveis podem ser controladas para criar um acabamento de superfície consistente e fiável.

A espessura das camadas de material removido é normalmente de 0,0008 mm a 0,0018 mm para a maioria das aplicações de rebarbação e polimento após maquinagem. Com uma monitorização precisa, o electropolimento pode remover apenas 0,00025 mm. Para um processo de

electropolimento com tempo de ciclo e amperes-minutos mais longos, podem ser removidos entre 0,008 mm e 0,0125 mm de material. Quanto mais tempo a corrente eléctrica for aplicada, mais material é removido, mas menos uniforme é o acabamento da superfície resultante. Assim, o processo é melhor aplicado a micro rebarbas, ou àquelas que sobressaem menos de cerca de 0,0038 mm da superfície da peça. Na tabela 2.1.1 são apresentados exemplos de especificações de remoção de material por aplicação.

Tabela 2.1.1. Especificações de remoção de material por aplicação

Liga metálica	Controlo da remoção de material no processo	Mínimo/limpeza	Microacabamento	Microdecapagem	Corrosão resistência
Titânio	0,0254 mm por superfície	0,0254 mm por superfície	0,0635 mm por superfície	0,127 por superfície	N/A
Nitinol	0,0254 mm por superfície	0,0254 mm por superfície	0,0635 mm por superfície	0,127 por superfície	N/A
Latão	0,0635 mm por superfície	0,0635 mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	N/A
Cobre	0,0635 mm por superfície	0,0635 mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	N/A
Aço	0,0635 mm por superfície	0,0635 mm por superfície	0,127 - 0,254 por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	N/A
Aço inoxidável	0,0254 mm por superfície	0,0254 mm por superfície	0,127 por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	0,127 mm por superfície
Alumínio	0,0635 mm por superfície	0,0635mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	0,127 - 0,254 mm por superfície	N/A



O electropolimento é um processo eletroquímico controlado que remove seletivamente material da superfície, normalmente com alguns micrómetros a dezenas de micrómetros de profundidade. A taxa de remoção de material no electropolimento é influenciada por factores como a composição e concentração do eletrólito, a temperatura, a densidade da corrente e a duração do processo. Estes parâmetros podem ser ajustados para obter o acabamento de superfície desejado e para controlar a quantidade de remoção de material. É importante notar que o electropolimento é utilizado principalmente para melhorar o acabamento da superfície, aumentar a limpeza e reduzir os defeitos da superfície, e não para remover quantidades significativas de material. Normalmente, o processo centra-se mais no nivelamento e alisamento da superfície, na remoção de imperfeições e na melhoria da estética da superfície. Para determinar a quantidade exacta de material removido durante o electropolimento para uma aplicação específica, recomenda-se a consulta das especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do equipamento ou a realização de testes experimentais em condições controladas.

Preparação electrolítica

A preparação electrolítica utiliza uma célula de reação electrolítica que contém um eletrólito líquido com dois eléctrodos: um ânodo e um cátodo. A amostra a polir/gravar constitui o ânodo. É aplicada uma corrente que força o metal do ânodo a dissolver-se, a mover-se e a depositar-se no cátodo como um revestimento. Os eléctrodos são ligados a uma fonte de alimentação externa e é aplicada uma tensão para provocar uma reação na célula.

A figura 2.1.5 abaixo mostra a curva característica de uma célula electrolítica. Esta curva depende do eletrólito utilizado e varia para diferentes electrólitos. O controlo da tensão e da densidade da corrente no ânodo, bem como a composição do eletrólito, a temperatura e a mistura são fundamentais para obter as características de polimento/gravação desejadas. O estabelecimento de um controlo adequado destes parâmetros pode ser difícil e, além disso, muitos dos electrólitos são perigosos ou mesmo explosivos. No caso deste último, o controlo da temperatura é fundamental. O polimento ou a gravação electrolítica sem a experiência necessária e sem as medidas de segurança em vigor não devem ser tentados.

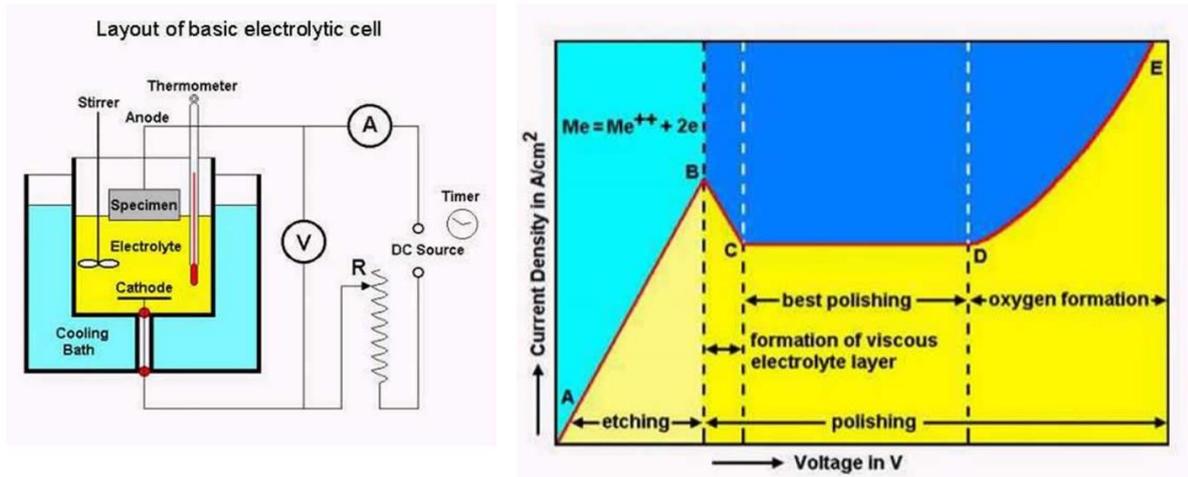


Fig. 2.1.5 Curva característica de uma célula electrolítica [2.1.5]

Os factores que controlam as características da gravação/polimento incluem

- Composição do eletrólito;
- Temperatura do eletrólito;
- Agitação de eletrólitos;
- Área a ser polida/gravada (densidade de corrente);
- Tensão.

Vantagens do electropolimento

Os tubos metálicos são utilizados principalmente para transportar gases e líquidos. Existem aplicações domésticas, de baixo custo e menos sensíveis, como as linhas de abastecimento de água, e aplicações de alto custo, comerciais e altamente sensíveis, como o equipamento médico. As diferentes aplicações requerem normas e qualidades diferentes. Para além das qualidades mecânicas e químicas, por vezes as dimensões têm de ser exactas.

Para ultrapassar este problema, os tubos são fabricados sem costura através de procedimentos de desenho. Os tubos sem costura são dimensionalmente exactos e podem ter menos rugosidade absoluta. Mas quando a aplicação é extremamente sensível e necessita que o interior do tubo seja tão limpo e liso quanto possível, é aplicado o electropolimento. O procedimento é efectuado através de um processo chamado electrólise, em que o produto perde átomo a átomo na superfície e chega a um acabamento polido.

Tabela 2.1.2 Vantagens do electropolimento

Benefício	Descrição
Aspetto decorativo	O acabamento brilhante e lustroso, muitas vezes altamente refletor, é esteticamente agradável e uniforme, sem as linhas finas que ocorrem com o polimento abrasivo.



Suavidade microscópica	Nivela picos e vales e proporciona uma melhoria de até 50% na rugosidade da superfície (Ra). A rugosidade da superfície refere-se à textura ou ao aspeto de uma superfície externa, captando as suas irregularidades e variações microscópicas em altura ou profundidade. Desempenha um papel crucial na determinação da forma como as superfícies interagem umas com as outras, afectando o atrito, o desgaste e as propriedades de vedação. Por outro lado, a rugosidade interna refere-se ao estado de uma superfície dentro de um material ou componente, normalmente associada a imperfeições ou irregularidades que não são visíveis externamente. A rugosidade interna, como falhas ou inconsistências microestruturais, pode afetar a integridade estrutural e as propriedades mecânicas do material, mas é frequentemente mais difícil de detetar ou avaliar do que a rugosidade da superfície, exigindo muitas vezes técnicas especializadas de avaliação. Ao contrário do acabamento mecânico, o electropolimento não mancha, dobra, tensiona ou fratura a superfície cristalina do metal.
Rebarbagem	A um nível microscópico, o electropolimento remove pequenos pedaços de material de superfície deslocado que podem ficar presos e partir.
Acabamento ultra-limpo	Cria uma superfície limpa que é mais fácil de esterilizar. Remove contaminantes incrustados que podem levar à corrosão.
Elimina defeitos de superfície	Aumenta a vida útil através da remoção de fissuras da superfície, eliminando assim os locais onde a corrosão se pode instalar. Ajuda as peças que precisam de ser flexionadas e dobradas a durar mais tempo.
Reduz a fricção	Prolonga a vida útil das peças em movimento constante. Reduz a escoriação em peças roscadas, melhorando a vedação.
Elimina as incrustações de óxido	Elimina a descoloração da soldadura causada pela coloração térmica e pelas incrustações de óxido.
Bom para peças frágeis	Trabalha em peças delicadas que podem ser danificadas num processo de tombamento. Pode substituir algumas técnicas de acabamento mecânico, como a retificação, o polimento, a fresagem e a granalhagem.

Bom para peças complexas	Pode polir áreas inacessíveis por outros métodos de polimento sem causar danos. Trata eficazmente superfícies minúsculas em componentes complexos.
Controlo do tamanho	Pode ser utilizado para reduzir ligeiramente o tamanho das peças, se necessário.

No entanto, o processo também tem as suas desvantagens. Mesmo com este método, a rugosidade absoluta persiste até certo ponto. O tempo necessário para o processo pode ser tolerado, mas é dispendioso, e alguns dos ácidos e outros produtos químicos utilizados podem ter um impacto no produto acabado. Ao remover as camadas superficiais, o processo remove também as impurezas, resultando numa maior resistência à corrosão.

Gravura

As superfícies diretamente polidas podem ser inspeccionadas utilizando a EBSD (difração de retrodispersão de electrões), mas em muitos casos a qualidade do padrão é melhorada pela gravação, como se mostra na figura 2.1.6. Além disso, o ataque químico delinea a estrutura do grão, o que é uma vantagem óbvia. No entanto, a corrosão pode atacar preferencialmente uma segunda fase, ou atacar excessivamente os limites de grão. Deve ter-se cuidado ao escolher e utilizar os agentes de corrosão. Inspeccionar a superfície da amostra utilizando um microscópio de luz antes e depois da gravação para avaliar o efeito. Os materiais que são difíceis de polir podem beneficiar de gravuras repetidas e de um novo polimento. Este método pode expor uma superfície não danificada adequada para EBSD quando o polimento e o ataque químico convencionais não conseguem obter uma superfície adequada. Utilizando panos especiais resistentes a ácidos ou álcalis, também é possível adicionar gravadores diluídos ao pano de polimento durante o polimento. Embora isto possa ser eficaz, pode ser difícil de controlar.

Qualquer agente de corrosão utilizado deve dissolver a superfície da amostra de uma forma uniforme e não deixar para trás óxidos ou camadas de produtos de reação. Tais camadas podem suprimir completamente a difração.

Muitos agentes de corrosão listados nos manuais de metalografia são 'agentes de contraste' que se baseiam na formação de camadas de óxido de diferentes espessuras para gerar cores visíveis utilizando um microscópio de luz. Por conseguinte, estes agentes de corrosão não são geralmente adequados para o EBSD.

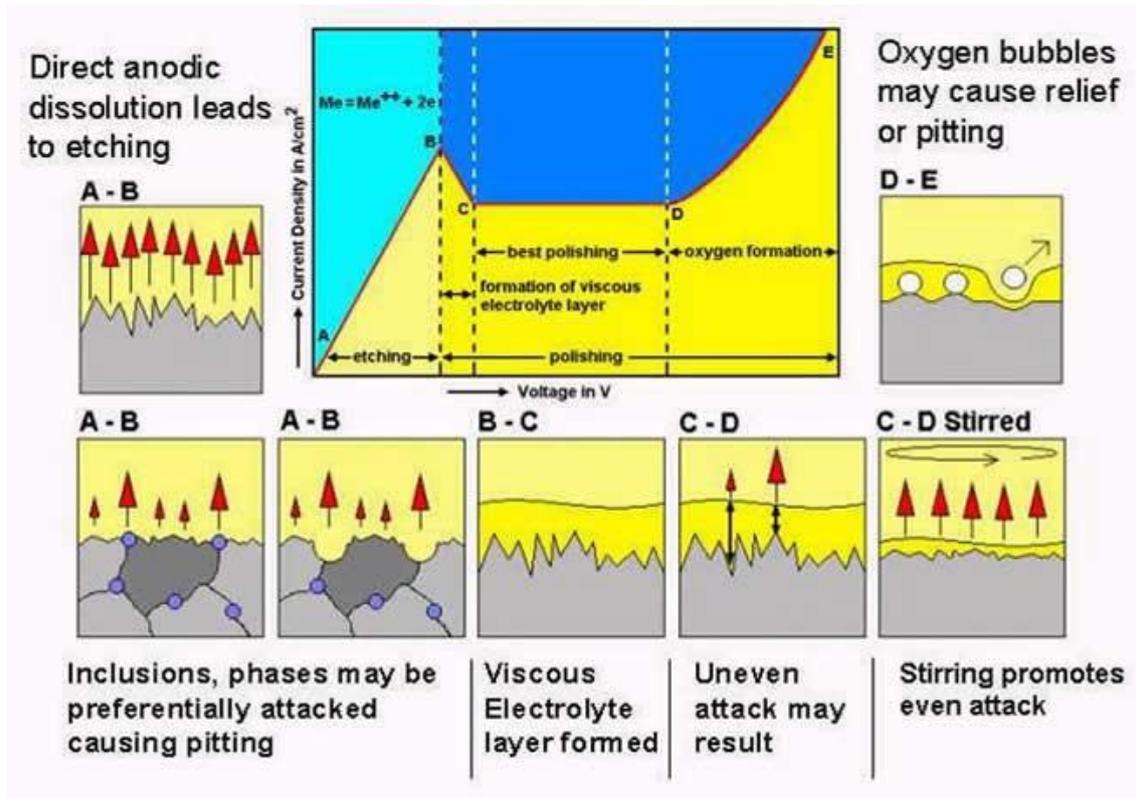


Fig. 2.1.6 Função da superfície de amostragem para tensão e densidade de corrente [2.1.5]

Aplicações comuns para electropolimento

Desde a década de 1950, os cientistas têm utilizado comercialmente a combinação de eletricidade e produtos químicos para melhorar o acabamento superficial dos metais. É um procedimento de acabamento comum numa grande variedade de indústrias, incluindo as seguintes:

- Os cirurgiões e dentistas utilizam o electropolimento para manter as suas ferramentas limpas e a funcionar bem.
- Os processadores de alimentos, bebidas e produtos farmacêuticos beneficiam das características de esterilização do electropolimento.
- Os fabricantes de electrodomésticos utilizam o electropolimento em aparelhos como frigoríficos e máquinas de lavar roupa para fazer com que as peças durem mais tempo e tenham melhor aspeto.
- Os fabricantes do sector aeroespacial utilizam o electropolimento em peças críticas para o voo para reduzir o atrito e garantir um desempenho de topo.
- Os fabricantes de semicondutores utilizam o electropolimento com produtos frágeis e de forma irregular.
- Os fabricantes de automóveis e a indústria de corridas electropolem engrenagens e linhas de combustível para reduzir a fricção, aumentar o desempenho e garantir uma longa vida útil das peças.

Exemplos de peças metálicas normalmente electropolidas:

- Tubagens e condutas
- Fixadores
- Molas
- Estantes de arame
- Lâminas

O polimento eletrolítico tem uma vasta aplicação em indústrias como a aeroespacial, médica, alimentar, automóvel e de investigação de materiais, ajudando a avaliar os limites de grão, os defeitos de superfície e a distribuição de fases.

Que metais funcionam com o electropolimento?

Electropolimento de aço inoxidável: é a utilização mais comum do electropolimento. Como se apresenta na figura 2.1.7. O aço inoxidável electropolido tem um acabamento liso, brilhante e ultra-limpo que resiste à corrosão. Embora quase todos os metais funcionem, os metais mais frequentemente electropolidos são os aços inoxidáveis das séries 300 e 400.

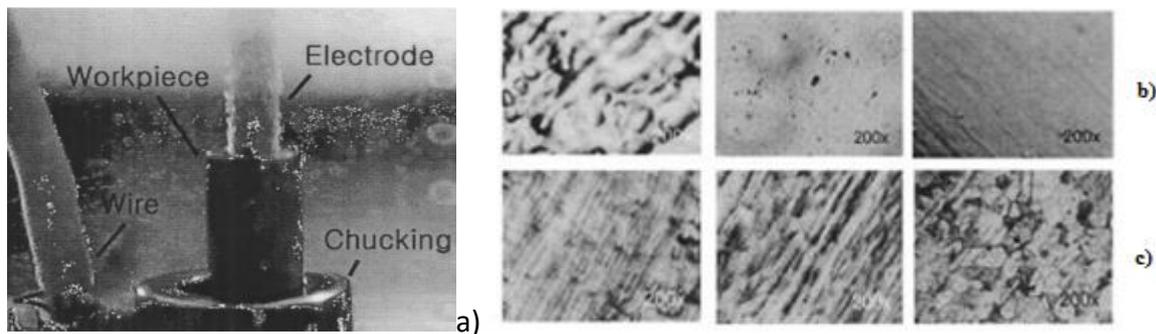


Fig.2.1.7 Electropolimento de um tubo de aço inoxidável (STS316L): a) Instalação experimental, b) micrografias ópticas, c) micrografias metalográficas [2.1.6]

As peças fabricadas em aço inoxidável da série 400 (SS) têm a vantagem de aumentar a dureza e a resistência à custa de uma maior suscetibilidade à corrosão. Através do electropolimento do aço inoxidável, os engenheiros podem utilizar o aço inoxidável da série 400 e ainda assim fornecer proteção contra a corrosão. Se utilizar aço inoxidável da série 400, a passagem para o electropolimento de peças de aço inoxidável pode proporcionar-lhe o melhor de dois mundos - resistência à corrosão, dureza e resistência.

O electropolimento de aço inoxidável após a soldadura pode remover as incrustações de óxido resistentes e a coloração térmica que podem ocorrer no aço inoxidável após a soldadura. O electropolimento instantâneo é uma técnica para remover incrustações ou oxidação da superfície de um metal tratado termicamente. Por exemplo, alguns instrumentos cirúrgicos fabricados em aço inoxidável (SS) 17-4 terão um aspeto castanho após a soldadura e/ou tratamento térmico. Para remover o aspeto castanho, as peças são electropolidas com flash. O "flash" refere-se à rapidez com

que o polimento é efectuado: apenas 10 segundos de electropolimento em comparação com um mínimo de 2 minutos para a maioria das aplicações.

O electropolimento com flash do aço inoxidável é a única forma de remover incrustações sem um processo altamente trabalhoso, e tem a vantagem adicional de obter resultados consistentes. Em contraste, a utilização de jato de areia para remover incrustações num instrumento de aço inoxidável 17-4 demora 4 vezes mais tempo e produz frequentemente resultados inconsistentes e ondulados no acabamento da superfície após a limpeza. Note-se que o electropolimento flash é diferente do "ataque flash", um defeito que pode ocorrer num processo de passivação.

Para além do aço inoxidável, outros metais compatíveis com o electropolimento incluem

- Alumínio;
- Latão;
- Aços ao carbono;
- Cromo-cobalto;
- Ligas de cobre (figura 2.1.8);
- Ligas de níquel;
- Titânio;
- Nitinol.

O sucesso é limitado no caso de metais fundidos, tais como as ligas que contêm quantidades significativas de silício, enxofre ou carbono. O electropolimento de peças fundidas sob pressão de alumínio e zinco não funciona bem, mas a maioria das outras ligas de alumínio produz bons resultados. O titânio e o nitinol também são compatíveis com o electropolimento; no entanto, a solução electrolítica para estes metais é altamente inflamável e requer sistemas de arrefecimento para evitar que o eletrólito entre em combustão à temperatura ambiente.

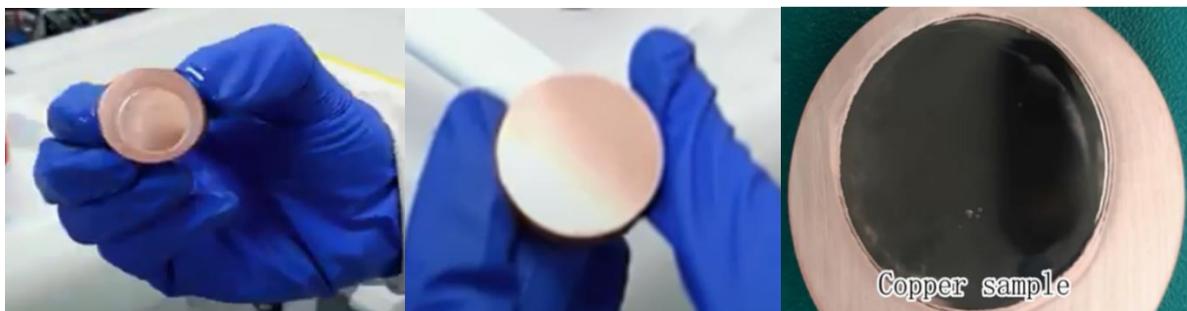


Fig. 2.1.8. Amostra de electropolimento de cobre [2.1.7]

Na tabela 2.1.3 são apresentados os principais parâmetros envolvidos no processo de electropolimento para o aço inoxidável e na tabela 2.1.4 para o cobre.



Tabela 2.1.3 Parâmetros comuns do processo de electropolimento em peças de aço inoxidável:

Eletrólito	Tipo de aço inoxidável	Temperatura	Gama de densidade de corrente	Gama de tensões
Mistura de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol	304	30 a 700 °C	0,5 a 1A/cm ²	Não especificado
Mistura de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol	304	5 a 800 °C	0,5 a 1A/cm ²	Não especificado
Mistura de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol	304	30 a 700 °C	0,5 a 1A/cm ²	Não especificado
Ácido fosfórico, ácido sulfúrico e água	Fe13Cr	25 a 700 °C	0,01 a 0,225 A/cm ²	-0,81 a 1,45 V
Quatro electrólitos (misturas de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e glicerol)	316L	50 a 800 °C	Não especificado	Velocidade de varrimento da tensão 5 mV/s
Misturas de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e água com/sem glicerina	316L	50 a 950 °C	0,5 a 2,5 A/cm ²	Não especificado
Misturas de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e água glicerol	316L	65 a 700 °C	Não especificado	2,5 a 10V

Tabela 2.1.4 Parâmetros comuns do processo de electropolimento em peças de cobre:

Eletrólito	Temperatura	Gama de densidade de corrente	Gama de tensões
Anidro ácido ortofosfórico	250°C	Não especificado	Não especificado
Solução de ácido ortofosfórico (solução não agitada)	-5,60°C a 530°C	0,2 a 1,5 A/dm ²	0,7 a 0,9 V
Solução de ácido ortofosfórico/água	-5,60°C a 530°C	0,2 a 1,5 A/dm ²	Não especificado

(solução agitada)			
Ortofosfórico solução ácido/água	250°C	0,0625 A/cm ²	0,8 a 1,2 V
Solução de ácido fosfórico/água com/sem glicerol, etilenoglicol	170 a 250 °C	2 a 4,2 mA/cm ²	0,25 a 1,5 V
Solução de ácido fosfórico/fosfato de cobre/água	250°C	50 a 1000 mA/cm ²	0,2 a 0,8 V
Solução de ácido ortofosfórico/ácido sulfúrico/água	250°C	0,1 A/cm ²	1,8 a 2,2 V

Observações finais

O electropolimento é um tratamento de superfície metálica distinto, utilizado para remover irregularidades grosseiras das superfícies metálicas. Embora a teoria seja simples, vários parâmetros influenciam a densidade da corrente de superfície da peça de trabalho e os resultados do electropolimento, tais como o tipo de eletrólito, a temperatura, a concentração, a tensão, a distância entre o ânodo e o cátodo, etc. A afinação precisa destes parâmetros é essencial para obter os acabamentos de superfície desejados para peças metálicas de diferentes formas e tamanhos, com especial atenção para o eletrólito de electropolimento.

Ao longo do tempo, os metais que requerem electropolimento evoluíram, com os aços inoxidáveis a representarem atualmente 95% do mercado atual, em comparação com o cobre e as ligas de cobre no passado. As observações empíricas moldaram inicialmente a técnica, mas foram desenvolvidas várias teorias para compreender os mecanismos subjacentes.

Para obter resultados óptimos de electropolimento, as superfícies das peças de trabalho são frequentemente submetidas a processos de pré-tratamento e pós-tratamento. A avaliação dos acabamentos de superfície é efectuada através de várias técnicas microscópicas, dependendo da rugosidade da superfície necessária e da escala de observação.

As vantagens do electropolimento incluem o aumento da suavidade e do aspeto da superfície metálica, a resistência à corrosão, a remoção de contaminantes e o refinamento da camada de oxidação da superfície.

Para além dos fins decorativos, o electropolimento encontrou aplicações mais amplas em várias indústrias, incluindo a alimentar, de bebidas, farmacêutica, biomédica, eletrónica, de



semicondutores, automóvel, aeroespacial e outras. Com o passar do tempo, o electropolimento continuará a desempenhar um papel crucial no processamento de diversos acabamentos de superfícies metálicas.

2.1.2. O princípio do polimento químico

O polimento químico, também conhecido como decapagem química, é um processo de tratamento de superfícies que utiliza reacções químicas para remover seletivamente material de uma superfície metálica. O objetivo do polimento químico é produzir um acabamento espelhado, eliminar defeitos da superfície e melhorar a visibilidade das características microestruturais.

O processamento químico é altamente eficiente para remover uma fina camada de material de toda a superfície imersa de uma peça, resultando numa superfície lisa e sem defeitos, revelando detalhes microestruturais para análise posterior, e fornece uma solução segura e económica através da simples imersão de peças em tanques especiais. Este processo remove eficazmente partículas, poros, detritos, contaminantes e danos estruturais presentes na camada superficial. Em particular, atinge taxas de remoção mais elevadas ao longo dos topos e arestas, removendo eficazmente as rebarbas até um tamanho de cerca de 0,5 mm. A taxa de remoção pode ser ajustada de acordo com a concentração de químicos no tanque, a temperatura da solução e a corrente na superfície da peça. Ao controlar estes parâmetros, é possível garantir a repetibilidade do processamento.

A Figura 2.1.9 ilustra o processo de polimento químico. Quando uma superfície metálica é imersa numa solução de polimento químico, dissolve-se em iões metálicos e estes iões difundem-se na solução de polimento. Em situações em que o metal se dissolve a um ritmo mais rápido do que a difusão dos iões, os iões metálicos acumulam-se nas regiões côncavas. Como ilustrado na Figura 2.1.9 (a), a densidade de catiões, principalmente iões de hidrogénio (H^+), na solução de polimento diminui nas áreas côncavas. Isto resulta numa superfície lisa, uma vez que a taxa de corrosão nas partes convexas é mais elevada do que nas partes côncavas, como se mostra na Figura 2.1.9 (b) e (c).

Além disso, o polimento químico pode efetivamente remover substâncias que não foram eliminadas pela limpeza de precisão, como indicado na Figura 2.1.9 (a) e (b). Estas substâncias persistentes podem incluir impurezas aderentes, como camadas superficiais quimicamente alteradas, como escamas de oxidação formadas durante a soldadura, como representado na Figura 2.1.9 (a) - α , β e γ .

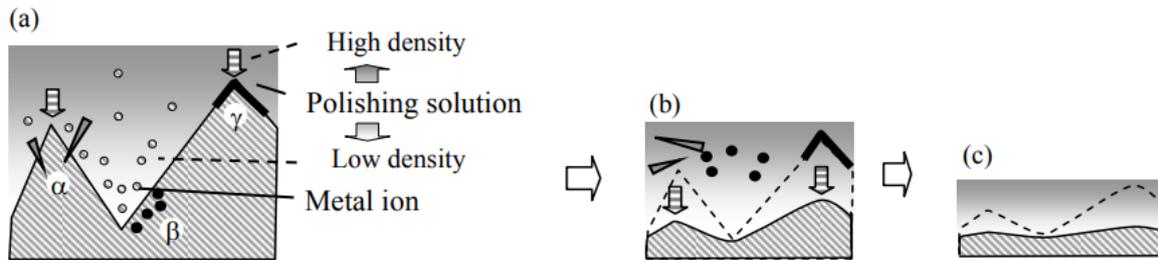


Figura 2.1.9 Representação do princípio do polimento químico [2.1.8]

O polimento químico é normalmente utilizado como um método rápido para obter resultados satisfatórios, em vez de ter como objetivo uma superfície sem defeitos. No entanto, nos casos em que a preparação de uma superfície sem deformações utilizando outras técnicas se revela um desafio, especialmente quando se trata de metais macios ou quando se depara com várias dificuldades, o polimento químico pode oferecer a abordagem mais adequada para a preparação preliminar ou final.

No caso dos metais refractários, o polimento químico é frequentemente realizado após o polimento mecânico para melhorar a resposta à luz polarizada (por exemplo, para Zr, Hf) ou para eliminar pequenas deformações (por exemplo, Nb, Ta, V). A técnica é concebida para produzir uma superfície lisa e plana, dissolvendo ou gravando seletivamente constituintes microestruturais específicos, deixando outros praticamente inalterados.

A obtenção da taxa de remoção de material, da seletividade e da qualidade da superfície pretendidas depende do ajuste da composição específica do condicionador e dos parâmetros do processo. O polimento químico representa um método valioso para refinar superfícies em situações difíceis, garantindo resultados óptimos para várias aplicações. Na figura 2.1.10 é apresentado um sistema elétrico para polimento químico.



Fig. 2.1.10 Sistema de polimento químico [2.1.9]

Os processos químicos de rebarbação e polimento são utilizados nas seguintes aplicações: componentes individuais em tanques de imersão utilizando cestos ou equipamento de suspensão, tubos e furos longos bombeando a solução através dos componentes, peças pequenas, na sua maioria soltas a granel, desde que não se danifiquem umas às outras; fios e tiras por processamento contínuo em equipamento de bobina a bobina ou num feixe solto, grandes recipientes por meio de pulverização ou aspersão.

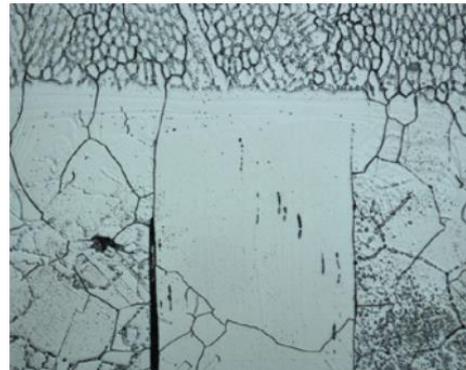


Gravadores à base de ácido

Os agentes de corrosão à base de ácidos são normalmente utilizados no polimento químico devido à sua elevada reatividade e capacidade de dissolver uma vasta gama de materiais metálicos, como na figura 2.1.11. Exemplos de agentes de corrosão à base de ácido incluem o ácido nítrico (HNO_3), o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estes agentes de corrosão são eficazes na remoção de óxidos, incrustações e impurezas superficiais. Os agentes de corrosão à base de ácido são particularmente úteis para materiais como os aços inoxidáveis, as ligas de alumínio e as ligas de titânio. A composição e a concentração dos agentes de corrosão à base de ácido podem ser ajustadas para obter diferentes níveis de seletividade e acabamentos de superfície.



Secção polida mecanicamente e gravada electroliticamente através de soldadura micropulsada com gás inerte de tungsténio na liga Inconel 625. Gravado em ácido oxálico a 10%; 10 Volts durante 10 segundos. Campo brilhante, 2,5x.



O mesmo material. A microestrutura da soldadura consiste numa solução sólida primária e numa fase secundária fina irresolúvel. A secção mostra um acentuado engrossamento do grão do material de base na proximidade da face de fusão. Campo claro, 10x.

Fig. 2.1.11 Liga Inconel 625 antes e depois do ataque químico [2.1.10]

Condicionadores de base alcalina

Os agentes de corrosão de base alcalina são frequentemente utilizados para o polimento químico de metais e ligas. O hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) são os agentes de corrosão alcalinos mais comuns utilizados em metalografia. Os gravadores alcalinos são eficazes na remoção de camadas de óxido e podem proporcionar superfícies lisas e brilhantes. Os agentes de corrosão de base alcalina são adequados para materiais como o aço inoxidável, como na figura 2.1.12, o cobre, o latão e certas ligas de alumínio. A concentração e a temperatura dos agentes de corrosão alcalinos podem ser ajustadas para controlar a taxa de corrosão e a seletividade.



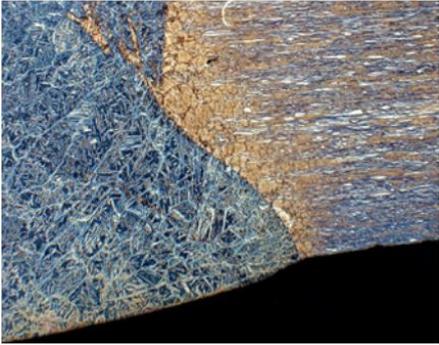
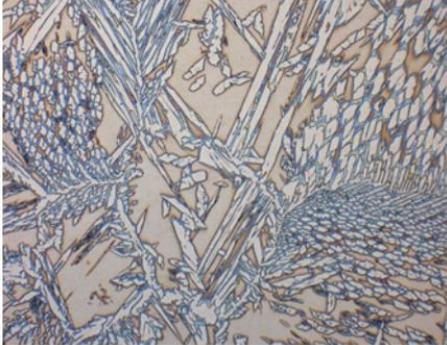
	
Interface solda-metal de base em aço inoxidável Duplex. Preparada mecanicamente; gravada electroliticamente em solução aquosa de hidróxido de sódio a 40%. Campo brilhante, 25x.	O mesmo material. A microestrutura da soldadura consiste principalmente em ferrite delta e austenite. Campo brilhante, 200x.

Fig. 2.1.12 Aço inoxidável duplex antes e depois do ataque químico [2.1.10]

Gravuras mistas

Os agentes de corrosão mistos consistem numa combinação de compostos químicos, oferecendo uma gama mais ampla de capacidades de corrosão em comparação com os agentes de corrosão ácidos ou alcalinos individuais. Os agentes de corrosão mistos podem proporcionar uma melhor seletividade e taxas de remoção de material controladas para constituintes microestruturais específicos, como apresentado na figura 2.1.13. Um exemplo é o reagente de Kroll, que é uma mistura de ácido nítrico e ácido fluorídrico. É normalmente utilizado para o polimento químico de titânio e ligas de titânio, proporcionando um acabamento superficial brilhante e refletor.

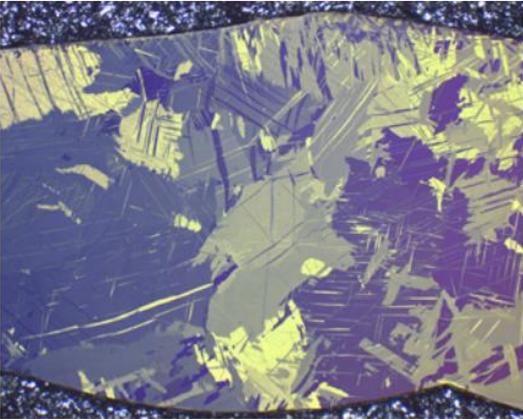
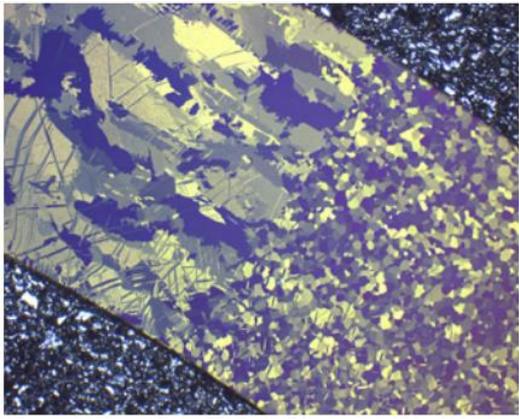
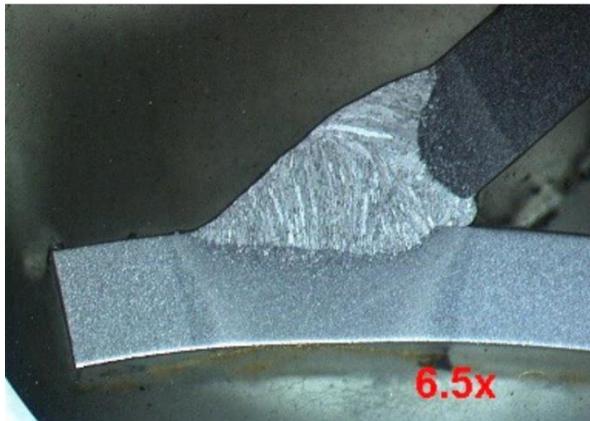
	
Zona de soldadura. Secção de soldadura polida mecanicamente de uma soldadura de penetração total em titânio de grau 1. A microestrutura da soldadura consiste na fase α de Widmanstätten. Luz polarizada com uma placa de coloração sensível (placa $\lambda 1/4$), 50x.	O mesmo material. Interface entre a zona afetada pelo calor e a zona-mãe. Luz polarizada com uma placa de coloração sensível (placa $\lambda 1/4$), 50x.

Fig. 2.1.13 Titânio de grau 1 antes e depois do ataque químico [2.1.10]



Gravadores especiais para ligas específicas

Certas ligas podem exigir gravadores especiais adaptados às suas microestruturas e composições únicas. Estes agentes de corrosão especiais são concebidos para revelar seletivamente características ou fases microestruturais específicas. Exemplos incluem o Nital (figura 2.1.14), que é uma mistura de ácido nítrico e etanol utilizada para revelar limites de grão em aços, e o reagente Beraha, utilizado para revelar limites de grão em cobre e ligas de cobre.



Macrosecção retificada e gravada através de uma solda MIG em aço carbono, gravada com Nital 4%. Campo claro, 6,5x



Micro secção polida e gravada através de aço carbono soldado MAG. A microestrutura consiste em ferrite acicular e primária. Gravada com Nital a 2%. Campo brilhante, 200x

Fig. 2.1.14 Aço-carbono antes e depois do ataque químico [2.1.10]

A temperatura e o tempo desempenham um papel importante no polimento químico. A taxa de corrosão é altamente dependente da temperatura do agente de corrosão. As temperaturas mais elevadas resultam geralmente em taxas de remoção de material mais rápidas, embora as temperaturas excessivamente elevadas possam levar a uma corrosão não controlada e não uniforme. O tempo de corrosão é outro parâmetro crítico que afecta a extensão da remoção de material e o acabamento da superfície. Tempos de corrosão mais longos podem resultar numa maior remoção de material e em superfícies mais lisas. No entanto, o tempo de corrosão deve ser cuidadosamente controlado para evitar o excesso de corrosão e a remoção excessiva das características microestruturais desejadas. A otimização dos parâmetros de temperatura e de tempo de corrosão é crucial para obter o acabamento superficial desejado, a seletividade e a preservação dos detalhes microestruturais.

Em geral, mergulha-se a amostra esmerilada no agente de polimento, ou esfrega-se com a solução, até se obter um polimento, sendo depois gravada ou lavada e seca, conforme o caso. Os reagentes são indicados no quadro 2.1.5 [2.1.11].

Quadro 2.1.5: Reagentes químicos de polimento

Metal	Reagente*	Quantidade	Tempo	Temp. (0C)	Observações
Alumínio e ligas	Ácido sulfúrico (1,84)	25 ml	30 s-2 min	85	Muito útil para o estudo de ligas com compostos intermetálicos, por exemplo, ligas Al-Cu, Al-Fe, Al-Si
	Ácido ortofosfórico	70 ml			
	Ácido nítrico	5 ml			
Berílio	Ácido sulfúrico (1,84)	1 ml	Vários minutos	49-50	A taxa de remoção de metal é de aproximadamente 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. A película passiva formada pode ser removida por imersão durante 15-30 s em ácido sulfúrico a 10 %
	Ácido ortofosfórico (1,75)	14 ml			
	Ácido crómico	20 g			
	Água	100 ml			
Cádmio	Ácido nítrico (1.4)	75 ml	5-10 s	20	Utilizam-se ciclos de imersão durante alguns segundos, seguidos imediatamente de lavagem numa corrente rápida de água, até se obter uma superfície brilhante
	Água	25 ml			
Cobre	Ácido nítrico	33 ml	1-2 min	60-70	O acabamento é melhor quando o óxido de cobre está ausente
	Ácido ortofosfórico	33 ml			
	Ácido acético glacial	33 ml			
Ligas de cobre	Ácido nítrico	30 ml	1-2 min	70-80	O espécime deve ser misturado
	Ácido clorídrico	10 ml			
	Ácido ortofosfórico	10 ml			
	Ácido acético glacial	50 ml			



Ligas de cobre-zinco	Ácido nítrico (1,40)	80 ml	5 s	40	Utilizar períodos de imersão de 5 s seguidos imediatamente de lavagem num fluxo rápido de água. São necessárias ligeiras variações na composição dos latões α - β e β - γ para evitar o ataque diferencial. Nas ligas β - γ , forma-se uma película baça que pode ser removida por imersão numa solução saturada de ácido crómico em ácido nítrico fumegante durante alguns segundos, seguida de lavagem.
	Água	20 ml			
Germânio	Ácido fluorídrico +	15 ml	5-10 s	20	-
	Ácido nítrico	25 ml			
	Ácido acético glacial	15 ml			
Háfnio	Ácido nítrico	45 ml	5-10 s	20	Quanto ao zircónio
	Água	45 ml			
	Ácido fluorídrico +	8-10 ml			
Ferro	Ácido nítrico	3 ml	2-3 min	60-70	Forma-se uma camada viscosa castanha densa na superfície; a camada é solúvel em solução. Os aços de baixo carbono também podem ser polidos, mas a cementita é atacada preferencialmente.
	Ácido fluorídrico (40%)+	7 ml			
	Água	30 ml			
Ferros e aços	Água destilada	80 ml	15 min	35	A solução deve ser preparada de fresco antes de ser utilizada. É necessário efetuar uma
	Ácido oxálico (100 gl-1)	28 ml			
	Peróxido de	4 ml			



	hidrogénio (30%)				lavagem cuidadosa antes do tratamento. Obtém-se uma microestrutura semelhante à produzida por polimento mecânico, seguido de decapagem com nital.
Chumbo	Peróxido de hidrogénio (30%)	80 ml	Períodos de 5-10 s	20	Utilizar o reagente de Russel para verificar se a camada fluida foi removida antes do polimento final com este reagente.
	Ácido acético glacial				
Magnésio	Ácido nítrico fumante	75 ml	Períodos de 3 s	20	A reação atinge uma violência quase explosiva após cerca de um minuto, mas se for deixada continuar, cessa após vários minutos, deixando uma superfície polida pronta para ser examinada.
	Água	25 ml			O espécime deve ser lavado imediatamente após ter sido retirado da solução.
Níquel	Ácido nítrico (1,40)	30 ml	1/2 - 1 min	85-95	Esta solução proporciona um polimento muito bom
	Ácido sulfúrico (1,84)	10 ml			
	Ácido ortofosfórico (1,70)	10 ml			
	Ácido acético glacial	50 ml			
Silício	Ácido nítrico (1,40)	20 ml	5-10 s	20	Mistura 1:1 também utilizada
	Ácido fluorídrico (40%)+	5 ml			
Tântalo	Ácido sulfúrico (1,84)	50 ml	5-10 s	20	A solução é útil para a preparação de superfícies



	Ácido nítrico (1,40)	20 ml			antes da anodização
	Ácido fluorídrico (40%)+	20 ml			
Titânio	Ácido fluorídrico (40%)+	10 ml	30-60 s	-	Esfregar até obter resultados satisfatórios
	Peróxido de hidrogénio (30%)	60 ml			
	Água	30 ml			
	Ácido fluorídrico (40%)+	10 ml			Função de liga de alguns segundos a vários minutos
	Ácido nítrico (1,40)	10 ml			
	Ácido láctico (90%)	30 ml			
Zinco	Ácido nítrico fumante	75 ml	5-10 s	20	Quanto ao cádmio
	Água	10 ml			
	Trióxido de crómio	20 g	3-30 min	20	A solução deve ser substituída frequentemente
	Sulfato de sódio	1.5 g			
	Ácido nítrico (1,40)	5 ml			
	Água	100 ml			
Zircónio (também háfnio)	Fluoreto de amónio ácido	10 g	1/2 -1 min	30-40	A taxa de dissolução varia acentuadamente com a temperatura e é de cerca de 20-60 $\mu\text{m min}^{-1}$ numa determinada gama
	Ácido nítrico (1,40)	40 ml			
	Ácido flouossilícico	20 ml			
	Água	100 ml			
	Ácido nítrico (1,40)	40-45	5-10 ml	-	A reação é vigorosa na interface ar/solução, pelo que a amostra deve ser mantida perto da superfície do líquido. O peróxido de
	Água	40-45 ml			
	Ácido fluorídrico (40%)+	10-15 ml	Repetido		



					hidrogénio (30%) pode ser utilizado em vez de água.
--	--	--	--	--	-----------------------------------------------------

* Os ácidos são concentrados, salvo indicação em contrário.

O ácido fluorídrico provoca lesões ósseas irreversíveis e apresenta uma série de outros perigos. Mesmo as soluções diluídas de ácido fluorídrico devem ser manuseadas com muito cuidado. Note-se que o ácido fluorídrico ataca o material de vidro do laboratório.

A composição química do agente de corrosão determina o tipo de reacções que ocorrem durante o polimento químico. Por exemplo, os gravadores à base de ácido envolvem normalmente a doação de prótons e a formação de sais metálicos solúveis. Por outro lado, os agentes de corrosão de base alcalina baseiam-se em reacções de iões hidróxido para dissolver a superfície. Os mecanismos de passivação e inibição da superfície também podem influenciar o processo de gravação. Estes fenómenos envolvem a formação de camadas de óxido protectoras ou a presença de inibidores que abrandam ou param a reacção de gravação em determinadas regiões. O controlo destes mecanismos é crucial para obter uma remoção uniforme do material e o acabamento superficial desejado.

Mecanismos de polimento químico

Os mecanismos de polimento químico envolvem a dissolução selectiva ou a corrosão de diferentes constituintes microestruturais com base na sua reatividade com o agente de corrosão. Esta seletividade depende de factores como a orientação cristalográfica, a composição química e os defeitos da superfície.

Nalguns casos, o agente de corrosão ataca preferencialmente os limites dos grãos ou outros planos cristalográficos, levando à remoção de material dessas regiões. Outros agentes de corrosão podem visar fases ou constituintes específicos, resultando na sua dissolução preferencial. A seletividade é influenciada pela composição do agente de corrosão, pela temperatura e pelos parâmetros do processo.

a. Exame da microestrutura: O polimento químico é amplamente utilizado para o exame da microestrutura. Ao proporcionar uma superfície lisa e polida, permite uma observação e análise claras das características microestruturais, incluindo os limites dos grãos, as fases, as inclusões e os precipitados. O exame da microestrutura facilitado pelo polimento químico ajuda a compreender a composição do material, o tamanho do grão, a morfologia do grão e a distribuição das fases. É crucial para avaliar os efeitos do processamento, do tratamento térmico e da liga na microestrutura e nas propriedades mecânicas subsequentes.

b. Determinação da granulometria: O polimento químico desempenha um papel importante na determinação da dimensão do grão em materiais metálicos. Ao revelar claramente os limites do



grão, permite uma medição e análise precisas do tamanho do grão utilizando microscopia ótica ou eletrônica. A determinação da dimensão do grão é essencial para avaliar as propriedades mecânicas do material, como a resistência, a dureza e a resistência à fadiga.

c. Análise do relevo da superfície: O polimento químico é utilizado para a análise do relevo superficial, especialmente em materiais com microestruturas complexas. Ao remover seletivamente o material e ao aumentar a visibilidade das características da superfície, permite o exame das variações do relevo da superfície, tais como ondulações da superfície, padrões de deformação e textura. A análise do relevo da superfície facilitada pelo polimento químico ajuda a compreender os mecanismos de deformação da superfície, a eficácia dos tratamentos de superfície e o impacto dos processos mecânicos e térmicos na morfologia da superfície.

d. Detecção de partículas de segunda fase: O polimento químico é valioso para a detecção e análise de partículas de segunda fase em materiais metálicos. Ao dissolver preferencialmente a fase matriz, aumenta a visibilidade e o contraste das partículas de segunda fase, permitindo a sua identificação, medição e caracterização. A detecção de partículas de segunda fase facilitada pelo polimento químico permite compreender a distribuição, o tamanho, a morfologia e a fração de volume das partículas de segunda fase. Fornece informações valiosas sobre a força, tenacidade, resistência ao desgaste e outras propriedades mecânicas do material.

O polimento químico é uma técnica versátil com várias aplicações em metalografia. Permite o exame da microestrutura, a determinação do tamanho do grão, a análise do relevo da superfície e a detecção de partículas de segunda fase. Ao remover seletivamente material e revelar características microestruturais, o polimento químico contribui para a compreensão e caracterização de materiais metálicos.

2.1.3 Gravura a cores. Definição e objetivo

Introdução à gravura a cores

A corrosão colorida, também conhecida como corrosão tintorial ou tingimento, refere-se ao processo de coloração ou coloração de constituintes microestruturais específicos numa amostra de metal, utilizando corrosivos especializados. O objetivo da gravação colorida é aumentar a visibilidade e o contraste de diferentes fases, inclusões, limites de grão e outras características microestruturais. Ao colorir seletivamente estes constituintes, a técnica permite a sua identificação, caracterização e análise.

A corrosão colorida é uma técnica utilizada em metalografia para corar ou colorir seletivamente diferentes constituintes microestruturais de um material metálico. Ao empregar gravadores específicos, a técnica aumenta a visibilidade e o contraste de várias fases, inclusões e limites de grão, como se mostra na figura 2.1.15.

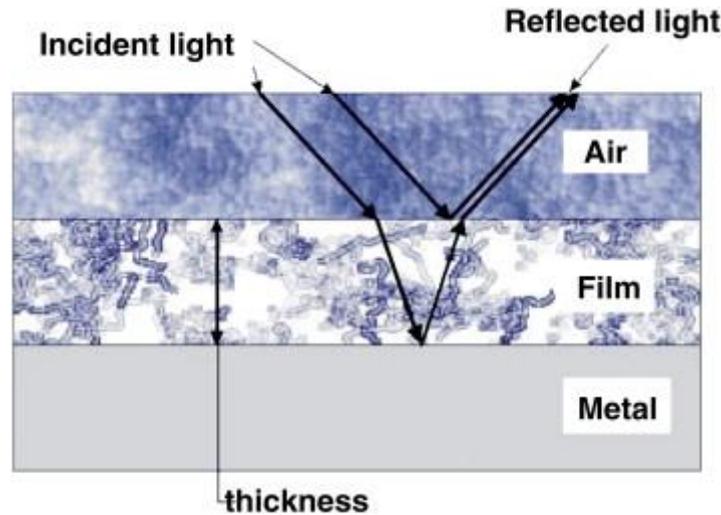


Fig. 2.1.15 Gravura de cor: As soluções de gravura são manipuladas quimicamente para obter uma coloração precisa, formando uma camada estável, normalmente com 0,04-0,5 μm de espessura, na superfície da amostra. Estas películas finas consistem em óxidos, sulfuretos ou compostos complexos de molibdato e exibem uma gama de cores atribuídas a efeitos de interferência [2.1.12]

A gravação colorida desempenha um papel significativo na análise e caracterização de materiais, fornecendo informações valiosas sobre as suas características microestruturais.

Mecanismos de gravura a cores

Interação dos agentes de corrosão com os constituintes microestruturais

Os mecanismos de corrosão colorida envolvem a interação selectiva dos agentes de corrosão com constituintes microestruturais específicos, como se mostra na figura 2.1.16. Diferentes agentes de corrosão exibem afinidades variáveis em relação a diferentes fases, inclusões ou limites de grão, resultando na formação de cores distintas.

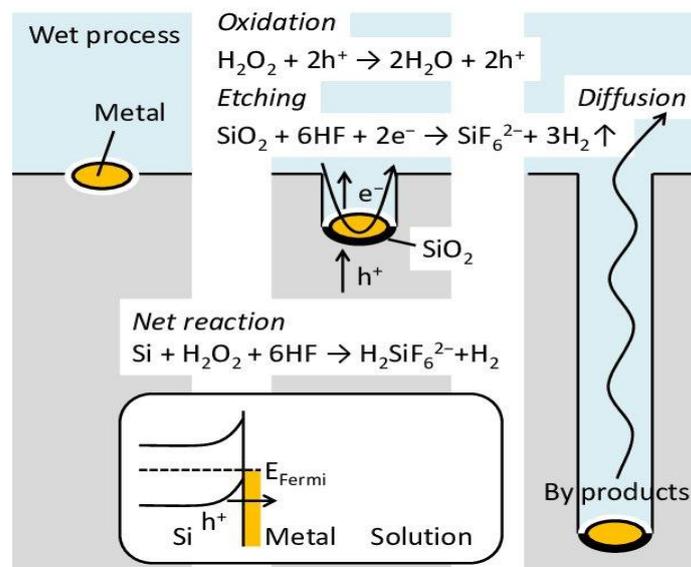


Fig. 2.1.16 Mecanismo simplificado para o ataque químico assistido por metais (MaCE) do silício em solução mista de HF e H_2O_2 [2.1.13].



Os agentes de corrosão podem reagir de forma diferente com os constituintes devido a factores como a composição química, a orientação cristalográfica e o estado da superfície. Estas interacções podem levar à formação de compostos ou complexos coloridos na superfície das características microestruturais, tornando-as mais visíveis e distinguíveis.

Princípios da formação da cor

A cor surge devido à absorção, reflexão ou interferência de comprimentos de onda específicos da luz pelos compostos ou complexos coloridos formados na superfície, como mostram as figuras 2.1.17 (esquerda) e 2.1.18 (direita).

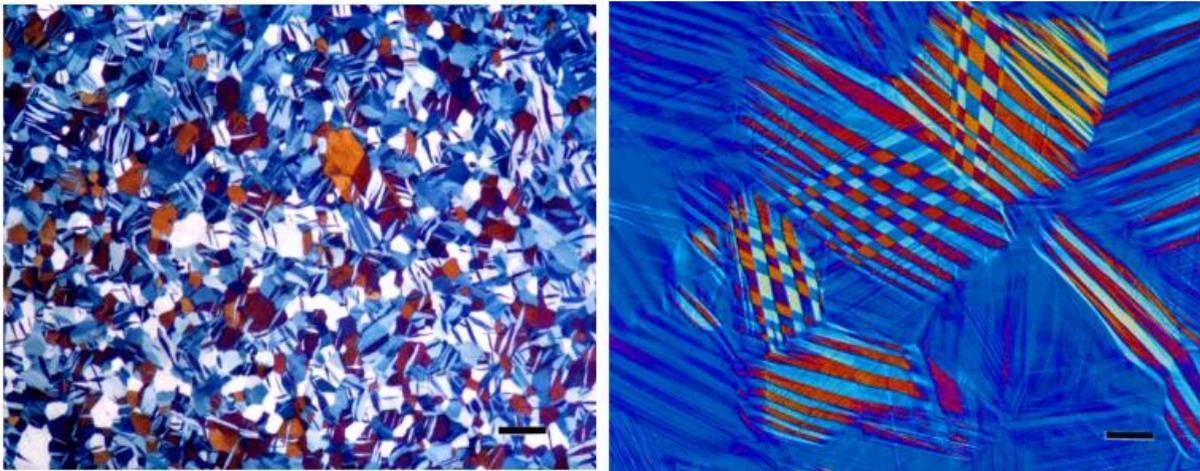


Fig. 2.1.17 (esquerda) e 2.1.18 (direita): Estrutura de grãos em Zr de alta pureza (à esquerda) que foi trabalhado a quente e estirado a frio (note-se os gêmeos mecânicos) e visto em luz polarizada e em Spangold (Au - 19Cu-5Al) que foi polido e submetido ao efeito de memória de forma para produzir martensite e a iluminação de interferência diferencial Nomarski foi utilizada para obter imagens da agitação da superfície devido à reação de cisalhamento na superfície livre. As barras de ampliação são de 100 e 50 μm , respetivamente [2.1.14].

As cores produzidas pelos corantes são visíveis sob iluminação de campo claro e, em muitos casos, é possível obter uma melhoria adicional utilizando luz polarizada. As cores são desenvolvidas por interferência da mesma forma que na coloração térmica ou na deposição em vácuo. Tal como referido, a cor é determinada pela espessura da película, normalmente na sequência de amarelo, vermelho, violeta, azul e verde quando observada com luz branca. Nos sistemas anódicos, a película forma-se apenas sobre a fase anódica, mas a sua espessura pode variar consoante a orientação cristalográfica da fase. Nos sistemas catódicos, como a espessura da película sobre a fase catódica é geralmente constante, é produzida apenas uma cor, que varia à medida que a película cresce durante a gravação. Por conseguinte, para obter sempre a mesma cor, a duração da gravação deve ser constante. Isto pode ser conseguido cronometrando a corrosão e observando a cor macroscópica da amostra durante a coloração.



Factores que afectam o desenvolvimento da cor

Vários factores podem influenciar o desenvolvimento da cor no condicionamento ácido colorido. Estes incluem a composição e a concentração do agente de corrosão, a temperatura, o tempo de corrosão e a preparação da superfície da amostra, como nas figuras 2.1.19 e 2.1.20. Além disso, a presença de elementos de liga, impurezas ou orientações cristalográficas específicas pode afetar a intensidade e o contraste da cor.

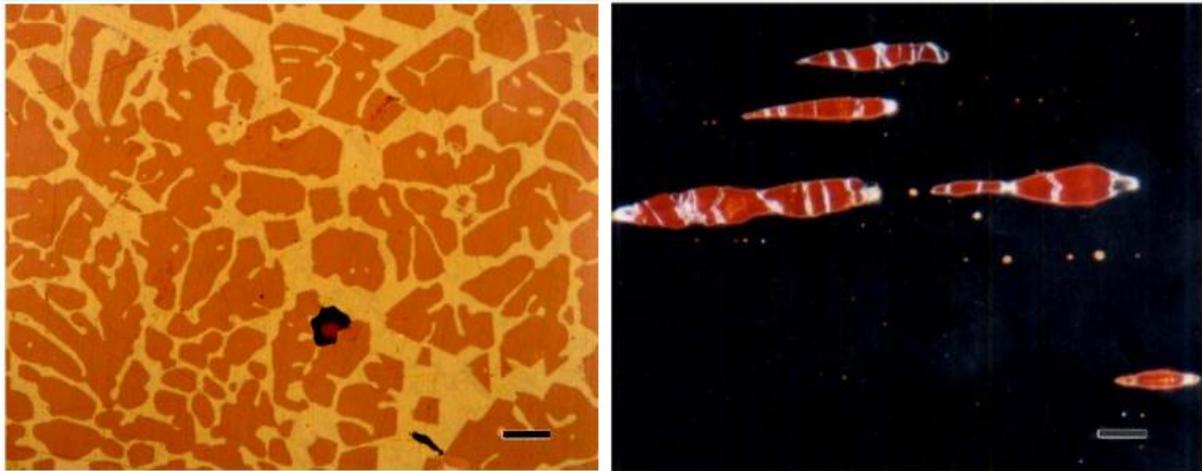


Fig. 2.1.19 (esquerda) e 2.1.20 (direita) mostrando a cor natural púrpura-avermelhada do intermetálico AuAl₂ (esquerda) em campo claro e a cor vermelho-rubi característica do óxido cuproso em iluminação de campo escuro (espécime de cobre arsenical de passo duro). As barras de ampliação são de 50 e 10 μ m, respetivamente [2.1.14].

A compreensão destes factores é crucial para conseguir um desenvolvimento de cor e um contraste óptimos na gravação a cores. É necessário um controlo cuidadoso e a otimização dos parâmetros de gravação para obter resultados fiáveis e reprodutíveis.

A gravação colorida é particularmente útil quando as características microestruturais de interesse não são claramente distinguíveis na amostra não gravada. Permite uma melhor observação e exame sob microscopia ótica ou eletrónica, facilitando uma melhor compreensão da composição, estrutura e propriedades do material.

Muitos metais gravados com reagentes padrão para revelar os contornos de grão produzem frequentemente apenas uma elevada percentagem dos contornos, em vez de todos os contornos. Os corantes, no entanto, revelam completamente a estrutura do grão. No caso de metais com gémeos de recozimento, pode ser muito difícil avaliar o tamanho do grão quando um condicionador padrão revela uma parte dos limites do grão e dos gémeos. De facto, pode ser bastante difícil fazer uma medição precisa do tamanho do grão, mesmo manualmente, com um espécime deste tipo, uma vez que não é simples distinguir entre os limites de grão e os limites de gémeos (estes últimos devem ser ignorados na medição). No entanto, com uma microestrutura gravada a cores, é

relativamente fácil separar o grão das fronteiras gémeas, pelo menos manualmente. Além disso, as películas crescem em função da orientação dos cristais. Por conseguinte, é possível detetar qualquer orientação cristalográfica preferida pela estreiteza da gama de cores presente. Na figura 2.1.21 está presente uma vasta gama de cores num padrão aleatório.



Fig. 2.1.21 A orientação do cristal anodizado de alumínio superpuro é realçada com o reagente Barker (30 Vdc, 2 minutos). A barra de ampliação tem 200 μm de comprimento [2.1.14]

A orientação dos cristais do alumínio anodizado superpuro é aleatória. Se estiver presente uma gama estreita de cores nos grãos, então é realçada uma orientação preferida. No final do capítulo são apresentadas as composições de tintas para gravação. A preparação das amostras deve ser melhor quando se utilizam métodos a cores do que quando se utilizam métodos a preto e branco, porque as películas crescidas epitaxialmente são sensíveis a danos residuais induzidos pela preparação que não foram removidos. Este nível de preparação é necessário no trabalho de análise de imagem e pode ser facilmente obtido por um metalógrafo experiente com o equipamento adequado. O polimento eletrolítico não é necessário para obter superfícies sem danos. Os corantes mais comuns são aqueles que depositam uma película de interferência à base de sulfureto na amostra, como se mostra nas Figuras 2.1.22 e 2.1.23. Estes são os corantes mais conhecidos e normalmente os mais fáceis de utilizar.

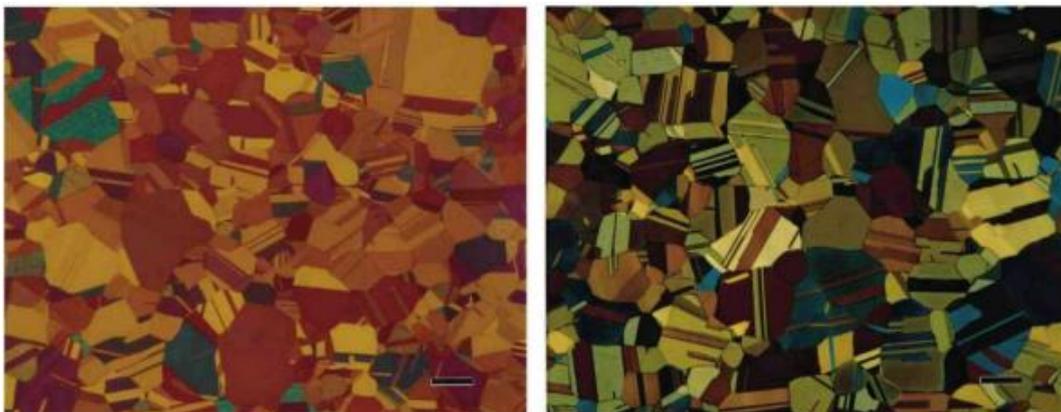




Fig. 2.1.22 e 2.1.23: Estrutura de grão geminada FCC de latão de cartucho, Cu - 30% Zn, após redução a frio e recozimento total, tingida com os reagentes Klemm's I (esquerda) e Klemm's III (direita) e vista com luz polarizada mais tingimento sensível. As barras de ampliação têm 200 μm de comprimento [2.1.14]

Klemm e Beraha desenvolveram os corantes à base de sulfureto mais utilizados, utilizando tiosulfato de sódio, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, e metabissulfito de potássio, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$. Os reagentes Klemm's I, II, III (Figuras 2.1.22 e 2.1.23) e um dos reagentes Berahas utilizam ambos os ingredientes (Figura 2.1.24), enquanto Beraha recomenda uma gama de concentrações de HCl utilizadas com metabissulfito de potássio (Figura 2.1.25) para gravar uma variedade de ligas à base de ferro.



Fig. 2.1.24 e 2.1.25: Estrutura fina do grão de octaedrite do meteorito Gibeon (esquerda) revelada com o reagente Berahas (100 mL de água, 10g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ e 3g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) e ferrite em placa de aço inoxidável duplex 7 Mo PLUS revelada com o reagente Berahas (85 mL de água, 15 mL HCl, 1 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$). As barras de ampliação têm 500 e 50 μm de comprimento, respetivamente [2.1.14].

Estes agentes de corrosão podem ser utilizados para colorir a ferrite e a martensite do ferro fundido, do carbono e dos aços de baixa liga. Os reagentes à base de HCl variam muito em concentração e podem ser utilizados para corar as estruturas de grão dos aços inoxidáveis (Figura 2.1.26), das ligas à base de Ni e das ligas à base de Co. O metabissulfito de sódio tem sido utilizado em várias concentrações, de cerca de 1 a 20 g por 100 mL de água, e é um corante seguro, fiável e útil para ferros e aços (Figura 2.1.27).

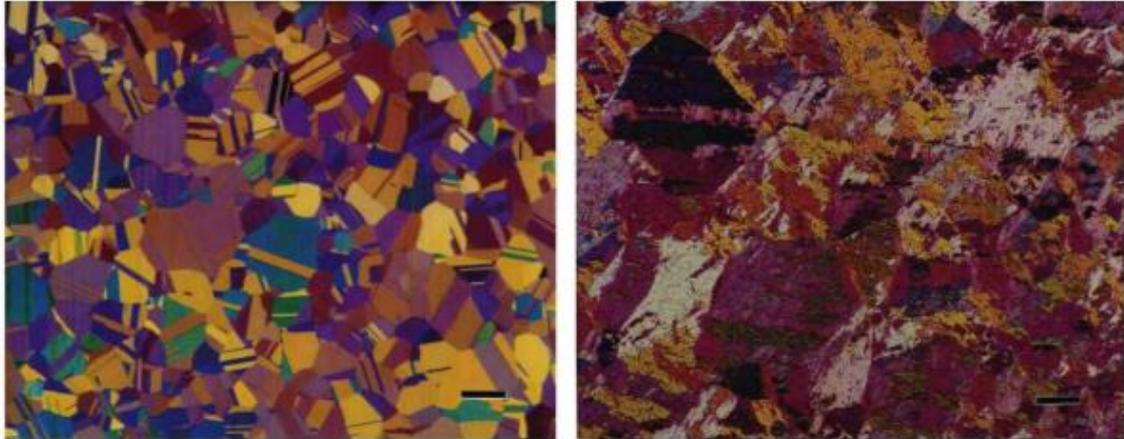


Fig. 2.1.26 e 2.1.27: Estrutura de grão geminada FCC do aço inoxidável Custom Flo 302 de qualidade de topo revelada usando o reagente Berahas BI e estrutura de grão de martensite em ripas do aço de ultra-alta resistência AerMet 100 sobre-austenitizado (1093 °C) revelada usando metabissulfito de sódio a 10%. Ambos visualizados com luz polarizada e tonalidade sensível. As barras de ampliação têm 100 µm de comprimento [2.1.14]

Beraha também desenvolveu agentes de corrosão à base de ácido sulfâmico, um ácido orgânico fraco, que não tem sido muito utilizado, embora seja bastante útil, fiável e fácil de empregar. Os reagentes à base de ácido sulfâmico são aplicáveis ao ferro fundido, aos aços de baixo carbono e de liga, aos aços para ferramentas e aos aços inoxidáveis martensíticos (Figura 2.1.27).

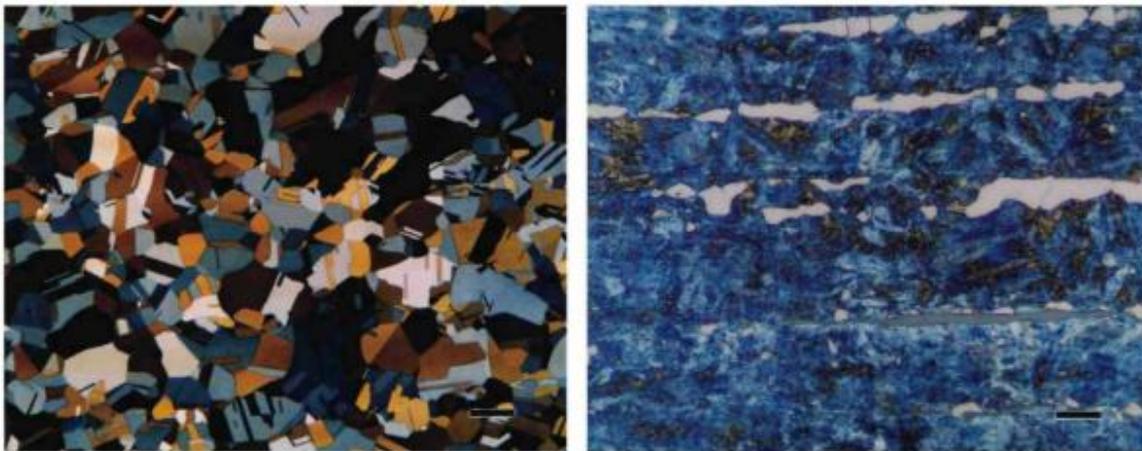


Fig. 2.1.27 e 2.1.28: Estrutura de grão de FCC geminada em Fe-39% Ni revelada pelo reagente de ácido sulfâmico de Beraha (esquerda) e estrutura de grão de martensite temperada do aço inoxidável martensítico Carpenter Project 70 tipo 416 revelada com o reagente de CdS de Beraha (direita). Os grãos brancos são ferrite delta e as inclusões cinzentas são sulfuretos. Visto com luz polarizada e tonalidade sensível. As barras de ampliação têm 100 e 200 µm de comprimento, respetivamente. [2.1.14]

A Beraha também desenvolveu dois corantes bastante especializados que depositam películas de sulfureto de cádmio (Figura 2.1.28) ou de sulfureto de chumbo (Figura 2.1.29) nas



superfícies dos aços e das ligas à base de cobre. Estes dois agentes de corrosão são bastante úteis, embora de fabrico fastidioso.

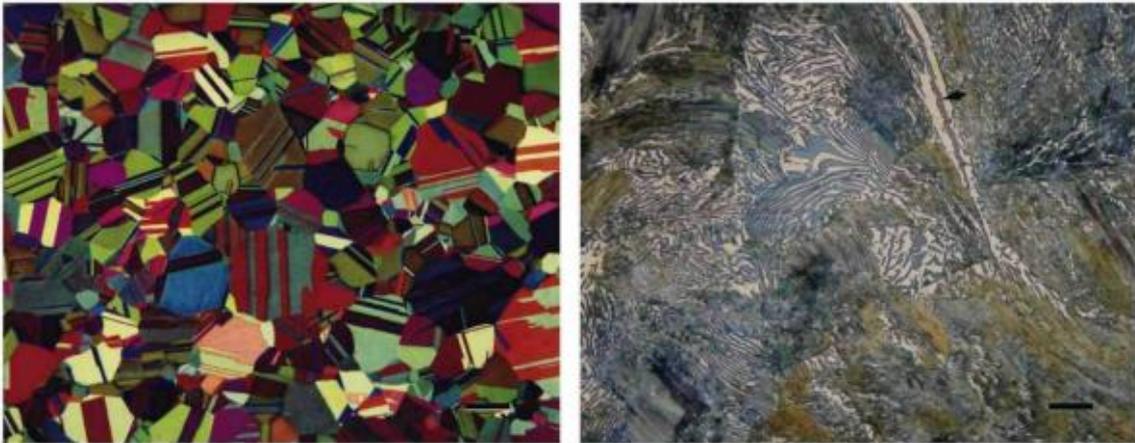


Fig. 2.1.29 e 2.1.30: Micrografia do latão do cartucho mostrado nas Figuras 2.1.22 e 2.1.23, corado com o reagente PbS de Beraha (esquerda) e cementite numa liga binária Fe-1% C laminada a quente, corada com o reagente molibdato de sódio de Beraha (direita). As barras de ampliação têm 200 e 20 μ m de comprimento, respetivamente [2.1.14].

O seu reagente CdS é útil para aços-carbono e ligas, aços para ferramentas e aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação, enquanto o reagente PbS faz um excelente trabalho em ligas à base de cobre e pode ser utilizado para colorir de branco sulfuretos em aços (a amostra é pré-gravada com nital e a gravação colore a matriz escurecida, de modo a que os sulfuretos brancos sejam visíveis). Beraha também desenvolveu dois corantes que utilizam iões de molibdato em ácido nítrico. Estes coram a cementite nos aços (Figura 2.1.30).



Fig. 2.1.31 e 2.1.32: Cementite na superfície fundida a frio de ferro cinzento gravada com o reagente de ácido selénico de Beraha para ferro fundido (esquerda) e fase alfa e fase beta geminadas de FCC (mosqueadas e delineadas) em Cu-40% Zn reveladas usando o reagente de ácido selénico de Beraha para ligas de cobre. As barras de ampliação têm 50 e 20 μ m de comprimento, respetivamente [2.1.14].



Desenvolveu também tint etchants que depositam selênio elementar na superfície de aços (Figura 2.1.31), ligas à base de níquel e ligas à base de cobre (Figura 2.1.32). Há uma série de outros corantes que foram desenvolvidos por uma variedade de metalógrafos. Lichtenegger e Bloch, por exemplo, desenvolveram um reagente invulgar que irá colorir a austenite (Figura 2.1.33) nos aços inoxidáveis duplex, em vez da ferrite (como quase todos os outros fazem).

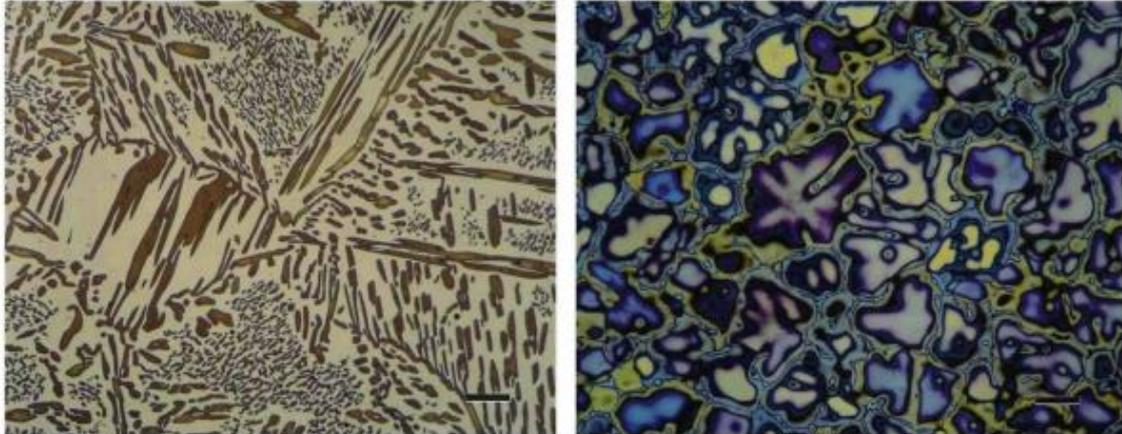


Fig. 2.1.33 e 2.1.34: Austenite corada no aço inoxidável duplex fundido ASTM890 Grau 5A com o reagente LBI (esquerda) e a estrutura de grão fundido do alumínio 206 revelada utilizando o reagente de Week para ligas de Al (direita). As barras de ampliação têm 100 e 50 μm de comprimento, respectivamente [2.1.14].

A Week desenvolveu uma série de corantes, tendo utilizado muitos deles na investigação. Vários foram desenvolvidos para colorir alumínio (Figura 2.1.34) ou ligas de titânio (Figura 2.1.35).

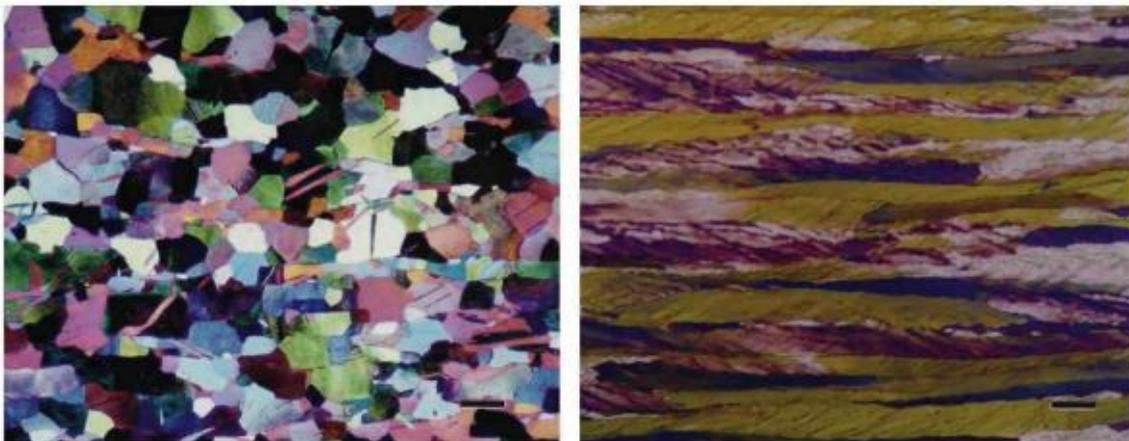


Fig. 2.1.35 e 2.1.36: Estrutura do grão de Ti CP (ASTM F67, Grau 2) laminado a frio contendo gêmeos mecânicos (à esquerda) corado com o reagente de Week modificado e molibdênio puro laminado a frio (à direita) corado com o reagente desenvolvido pelo Oak Ridge National Laboratory. As barras de ampliação têm 100 e 20 μm de comprimento, respectivamente [2.1.14]

Em todos os casos, é mais fácil desenvolver uma boa cor com as ligas fundidas do que com as ligas forjadas. Dois agentes de corrosão foram considerados úteis para colorir a fase teta, AlCu_2 ,



em ligas Al-Cu; Lienard desenvolveu um dos mais fáceis de utilizar. Foram desenvolvidos vários agentes corantes para o molibdénio (figura 2.1.36) e para o tungsténio [2.1.15].

Aplicações da gravura colorida

No contexto da metalurgia e das juntas soldadas, a gravura colorida é uma técnica valiosa que pode ser utilizada para aplicações específicas:

Análise de defeitos de soldadura: A gravação a cores pode ser utilizada para revelar e realçar defeitos em juntas soldadas, tais como porosidade, fissuras, inclusões e falta de fusão. Ao utilizar gravadores específicos, podem ser realçadas diferentes características da soldadura, ajudando na avaliação da qualidade e integridade da soldadura.

Exame microestrutural: A gravação a cores permite o exame da microestrutura da soldadura e da zona afetada pelo calor (HAZ). Diferentes constituintes microestruturais podem reagir de forma diferente a vários agentes de corrosão, permitindo aos investigadores e inspectores distinguir entre fases e identificar potenciais problemas relacionados com a estrutura e distribuição do grão.

Identificação de fases: Em certos casos, as soldaduras podem ser constituídas por várias fases ou ligas. A gravação a cores pode ajudar a diferenciar estas fases, revelando seletivamente as suas características microestruturais únicas. Esta informação é crucial para compreender a composição e as propriedades da junta soldada.

Deteção de compostos intermetálicos: A soldadura pode levar à formação de compostos intermetálicos, que podem ter efeitos significativos nas propriedades mecânicas da soldadura. A gravação a cores pode ajudar a identificar e caracterizar estes compostos, ajudando a avaliar o seu potencial impacto no desempenho da soldadura.

Análise de tensões residuais: A gravação a cores combinada com técnicas específicas, tais como métodos de remoção de camadas, pode ser utilizada para analisar e visualizar a distribuição de tensões residuais em juntas soldadas. Esta informação é vital para avaliar a integridade estrutural e o potencial de falha relacionada com as tensões.

Exame dos limites de grão: A gravação colorida pode revelar os limites de grão no metal de solda e na ZTA. A caracterização dos limites de grão é essencial para avaliar a suscetibilidade à corrosão intergranular e para determinar as propriedades mecânicas gerais da soldadura.

É de salientar que a seleção de agentes de corrosão e métodos de preparação adequados é fundamental na gravação a cores para aplicações metalúrgicas. Diferentes ligas e processos de soldadura podem exigir soluções e condições de gravação específicas para obter resultados precisos e significativos. Além disso, na metalurgia moderna, outras técnicas não destrutivas e quantitativas, como a microscopia, a microscopia eletrónica e a difração de raios X, são frequentemente utilizadas em conjunto com a gravação a cores para uma análise abrangente das juntas soldadas.

Conclusões

Os exemplos apresentados demonstraram o grande valor da gravação a cores e de matizes para o exame das microestruturas dos metais. Existem soluções para desenvolver a cor com a maioria dos sistemas de ligas comerciais. Os exemplos demonstram claramente o valor destes reagentes na revelação completa da estrutura do grão, mesmo para as amostras mais difíceis de gravar. Além disso, têm uma natureza selectiva que pode ser bastante útil para estudos metalográficos quantitativos. Os corantes tintados revelam a segregação de forma muito clara e tanto o EDS como o WDS podem ser efectuados numa superfície gravada com corantes sem quaisquer problemas devido à interferência da camada superficial.

Composições de gravura

As tabelas 2.1.6 e 2.1.7 apresentam receitas para reagentes coloridos comuns [2.1.15].

Quadro 2.1.6

Reagentes coloridos	Receitas de reagentes
I de Klemm	50 ml de solução-mãe, 1 g de K_2SO_4 (a solução-mãe é água saturada com Na_2SO_4) ²²³
Klemm's III	5 mL de solução de reserva, 45 mL de água, 20 g de K_2SO_4 (solução de reserva como para Klemm's I)
Reagente 10/3 de Beraha	10g Na_2SO_4 , 3g K_2SO_4 e 100 mL de água
BI de Beraha	100 mL de solução de reserva (1000 mL de água, 200 mL de HCl, 24 g de NH_4FHF) mais 0,1 - 0,2 g de K_2SO_4 para aço inoxidável martensítico e 0,3 - 0,6 g de K_2SO_4 para aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.
Reagente do ácido sulfâmico n.º III de Beraha	100 mL de água, 3 g de K_2SO_4 , 2 g de NH_2SO_3H (foram publicadas duas outras composições semelhantes) para aços-carbono e aços-liga.
Reagente do ácido sulfâmico de Beraha n.º IV	100 mL de água, 3 g de K_2SO_4 , 1 g de NH_2SO_3H , 0,5 - 1 g de NH_4FHF para aços para ferramentas com elevado teor de Cr e aços inoxidáveis martensíticos.
Reagentes de CdS e PbS de Beraha	Solução de reserva de CdS: 1000 mL de água, 240 g de $Na_2SO_4 \cdot 5H_2O$, 20-25 g de cloreto de cádmio (ou acetato de cádmio), 30 g de ácido cítrico; solução de reserva de PbS: 1000 mL de água, 240 g de $Na_2SO_4 \cdot 5H_2O$, 30 g de ácido cítrico, 24 g de acetato de chumbo.

*Misturar cada solução pela ordem exacta indicada.

Quadro 2.1.7

Reagentes coloridos	Receitas de reagentes
Reagente de molibdato de sódio de Beraha	Solução de reserva: 1000 mL de água, 10 g de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Verter cerca de 100 mL da solução de reserva e adicionar HNO_3 para levar o pH a 2,5 - 3,0. Para aços, adicionar pequenas quantidades de NH_4FHF para controlar a coloração (nenhuma para ferro fundido). Colora a cementita.
Reagente de ácido selénico de Beraha para ferro fundido	100 mL de etanol, 2 mL de HCl, 1 mL de ácido selénico
Reagente de ácido selénico de Beraha para ligas de Cu	300 mL de etanol, 2 mL de HCl, 0,5-1 mL de ácido selénico
Reagente LB1 de Lichtenegger e Blösch	20 g de bifluoreto de amónio, NH_4FHF , e 0,5 g de metabissulfito de potássio, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$, dissolvidos em 100 mL de água (utilizar água quente). Gravar a 25-30 °C.
Reagente de Weck para Al	100 mL de água, 4 g de KMnO_4 e 1 g de NaOH
Reagente de Weck modificado para Ti	100 mL de água, 25 mL de etanol e 2 g de bifluoreto de amónio. A fórmula original especificava 50 mL de etanol, mas isso produz artefactos de corrosão.

2.1.4 Diferenças entre polimento eletrolítico, polimento químico, decapagem colorida

O Polimento eletrolítico, o Polimento químico e a Gravura colorida são três técnicas diferentes de tratamento de superfície utilizadas para metais, cada uma com princípios e aplicações distintos, nomeadamente:

Deteção e avaliação de defeitos de superfície

A deteção e avaliação de defeitos de superfície são cruciais na análise de materiais para avaliar a qualidade e integridade da superfície. Cada uma das técnicas de tratamento de superfície - polimento eletrolítico, polimento químico e gravação a cores - oferece vantagens e considerações específicas para a deteção e avaliação de defeitos de superfície:

a. Deteção e avaliação de defeitos da superfície após polimento eletrolítico: O polimento eletrolítico produz geralmente superfícies lisas e sem defeitos devido à remoção das irregularidades da superfície durante o processo. É menos provável que sejam introduzidos defeitos na superfície,

como riscos, buracos e fissuras, durante o polimento eletrolítico, o que o torna adequado para análises sensíveis a defeitos.

Após o polimento eletrolítico, como mostra a figura 2.1.37, a superfície pode ser inspeccionada visualmente ou observada ao microscópio para detetar quaisquer defeitos remanescentes. Para uma avaliação mais pormenorizada dos defeitos, podem ser utilizadas técnicas avançadas, como a microscopia eletrónica de varrimento (SEM), para examinar a superfície polida com maiores ampliações.



Fig. 2.1.37 Detecção de defeitos de superfície antes e depois do polimento eletrolítico do cobre 101 [2.1.16]

b. Detecção e avaliação de defeitos de superfície após polimento químico: O polimento químico pode introduzir defeitos de superfície, especialmente se o processo não for cuidadosamente controlado. Durante o polimento químico, podem ser introduzidos defeitos de superfície, tais como poços de corrosão, rugosidade da superfície e outras irregularidades, que podem afetar a avaliação dos defeitos. Deve ser dada especial atenção para evitar interpretar incorretamente os defeitos resultantes do próprio processo de polimento químico e não as falhas inerentes ao material, como ilustrado na figura 2.1.38. Podem ser utilizadas técnicas avançadas, como a perfilometria ótica ou a microscopia de força atómica (AFM), para avaliar quantitativamente a rugosidade da superfície e detetar defeitos introduzidos durante o polimento químico.

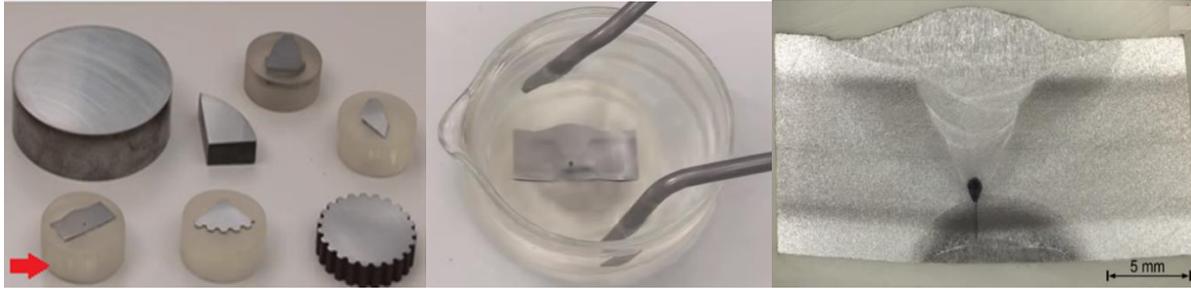


Fig. 2.1.38 Deteção de defeitos de superfície antes e depois do polimento químico para aço inoxidável [2.1.17]

c. Deteção e avaliação de defeitos na superfície após gravura colorida: A gravura colorida pode ajudar a realçar e revelar defeitos na superfície metálica devido às cores ou tonalidades contrastantes produzidas por gravuras específicas, como apresentado na figura 2.1.39. Defeitos como fissuras, inclusões e porosidade podem ser mais facilmente identificados e avaliados após o ataque ácido colorido. A técnica é particularmente útil para a análise sensível a defeitos de juntas soldadas e outros componentes críticos. No entanto, é essencial assegurar que o corante colorido não mascare ou interfira com a deteção de certos tipos de defeitos.

Em todos os casos, a escolha da técnica de tratamento de superfície depende dos requisitos específicos da deteção e avaliação de defeitos. É importante considerar o potencial impacto do próprio tratamento de superfície na introdução de defeitos e garantir a existência de controlos adequados durante o processo de preparação da amostra. Além disso, podem ser utilizadas técnicas complementares, tais como métodos de ensaios não destrutivos (NDT), como o ensaio ultrassónico, o ensaio de penetração de corantes e a inspeção por raios X, em conjunto com o tratamento de superfície, para fornecer uma avaliação abrangente dos defeitos da superfície e da qualidade do material.

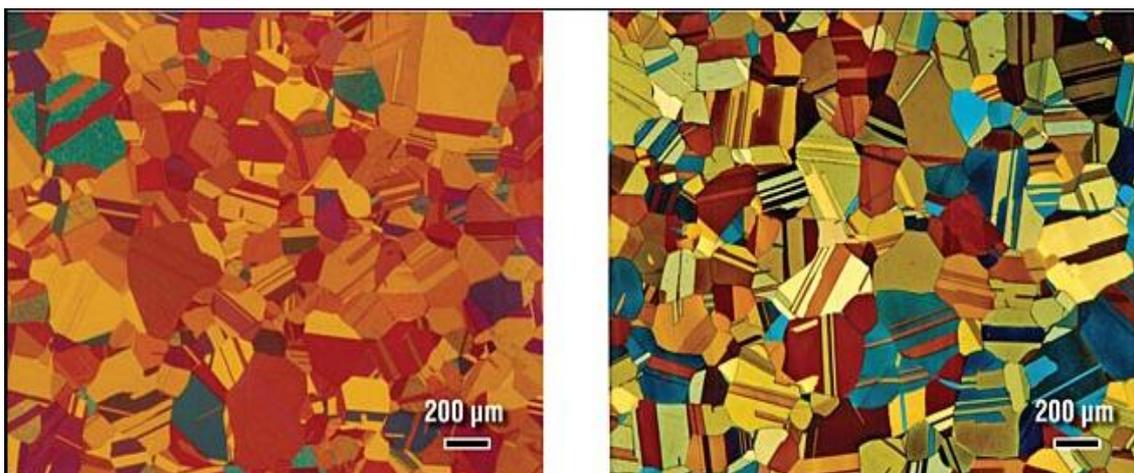


Fig. 2.1.39 Observar a microestrutura do espécime, o condicionamento com solução de Berahal (3 g $K_2S_2O_5$, 10 g $Na_2S_2O_3$ em 100 mL de água destilada) foi realizado após uma técnica tradicional de preparação do espécime [2.1.14]

Avaliação dos limites de grão

A avaliação dos limites de grão é um aspeto importante da análise microestrutural, especialmente na metalurgia e na ciência dos materiais. Cada uma das técnicas de tratamento de superfície - polimento eletrolítico, polimento químico e gravação a cores - tem as suas vantagens e considerações para a avaliação dos limites de grão:

a. Avaliação dos limites de grão após polimento eletrolítico: Os limites de grão são geralmente bem preservados e claramente visíveis após o polimento eletrolítico, tornando-o adequado para a análise dos limites de grão, como apresentado na figura 2.1.40.

A microscopia ótica de alta qualidade pode ser utilizada para observar e analisar os limites de grão, permitindo a identificação do tamanho, forma e distribuição do grão. A difração de retrodispersão de electrões (EBSD) é frequentemente utilizada para obter informações detalhadas sobre a orientação cristalográfica e o carácter dos limites de grão após o polimento eletrolítico.

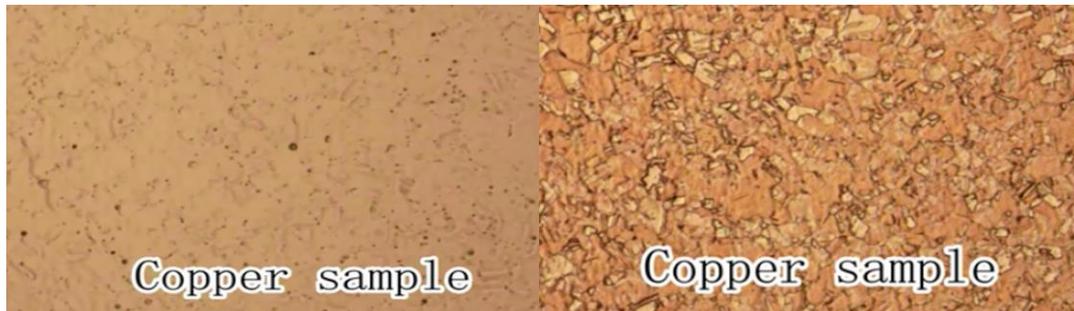


Fig. 2.1.40 Avaliação da fronteira de grão após polimento eletrolítico para cobre 101

[2.1.7]

b. Avaliação dos limites de grão após polimento químico: Deve ter-se o cuidado de assegurar que o processo de polimento químico não altera significativamente os limites de grão. Poderão ser necessárias técnicas de microscopia de alta resolução, como o MEV e o TEM, para avaliar os limites de grão após o polimento químico, como se mostra na Figura 2.1.41. A análise dos limites de grão pode ser um desafio em certos materiais devido ao potencial de gravação preferencial ao longo dos limites de grão.



Fig. 2.1.41 Avaliação da fronteira de grão após polimento químico para aço inoxidável [2.1.17]



c. Avaliação dos limites de grão após gravação a cores: A gravação a cores pode ser vantajosa para a avaliação dos limites de grão, uma vez que realça os limites de grão com cores ou tonalidades contrastantes. A técnica permite a visualização e identificação dos limites de grão, facilitando a análise do tamanho e da distribuição do grão. A gravação a cores pode ser particularmente útil para avaliar o comportamento dos limites de grão em soldaduras e outros materiais multifásicos. No entanto, deve ter-se o cuidado de assegurar que o corante colorido não obscurece ou distorce os limites de grão, como se mostra na figura 2.1.42.

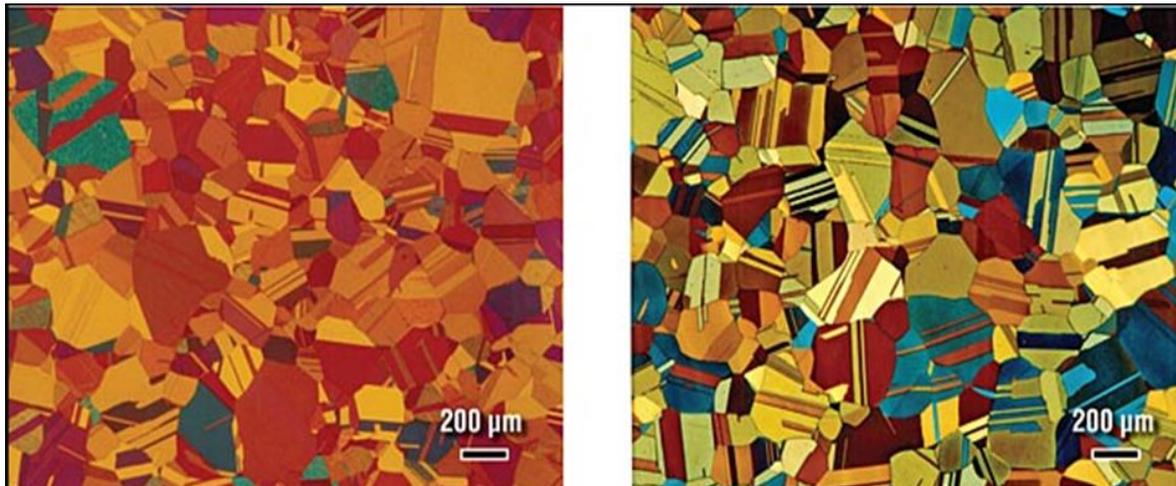
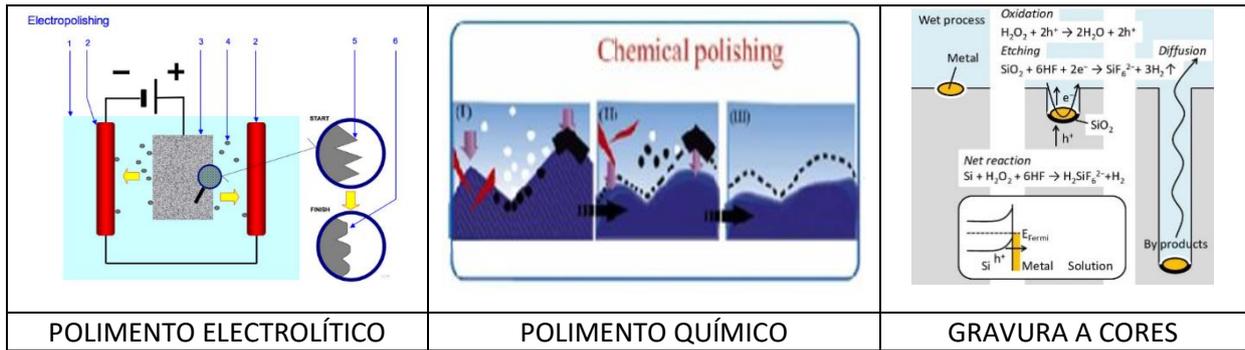


Fig. 2.1.42 Estrutura de grãos geminados FCC do latão de cartucho, Cu-30% Zn, após redução a frio de 50% e recozimento total, tingido com os reagentes Klemm I (esquerda) e Klemm III (direita) e visualizado com luz polarizada e tingimento sensível. As barras de ampliação têm 200 µm de comprimento. [2.1.14].

Em geral, as três técnicas de tratamento de superfície podem ser utilizadas para a avaliação dos limites de grão, mas é necessária uma análise cuidadosa para escolher o método mais adequado, dependendo do tipo de material, dos objectivos da análise e do potencial impacto do próprio tratamento de superfície. As técnicas avançadas de microscopia como SEM, TEM e EBSD são frequentemente utilizadas para obter informações detalhadas sobre os limites de grão, a orientação cristalográfica e o carácter dos limites de grão após o tratamento de superfície. Além disso, é crucial utilizar procedimentos padronizados e técnicas validadas para garantir uma análise fiável e precisa dos limites de grão.

Diferenças entre processos

Além disso, apresentaremos uma comparação entre o polimento eletrolítico, o polimento químico e os processos de gravação a cores:



Princípio

Polimento eletrolítico: Processo eletroquímico que utiliza uma corrente eléctrica para alisar a superfície metálica através da dissolução controlada das irregularidades da superfície.

Polimento químico: Processo químico que envolve a dissolução selectiva de uma fina camada de metal através de uma reação química para obter uma superfície polida e brilhante.

Gravura colorida: Técnica metalográfica que utiliza gravuras específicas para revelar e realçar diferentes características microestruturais com cores ou tonalidades contrastantes.

Acabamento da superfície

Polimento eletrolítico: Produz uma superfície lisa e espelhada com uma deformação mecânica mínima.

Polimento químico: Cria uma aparência polida e brilhante, mas a superfície pode ser afetada por artefactos ou irregularidades introduzidas.

Gravura colorida: Proporciona uma superfície com cores ou tonalidades contrastantes, realçando as características microestruturais sem alterar significativamente o acabamento da superfície.

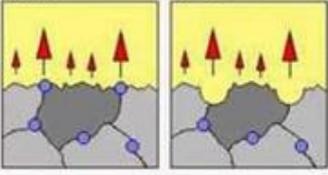
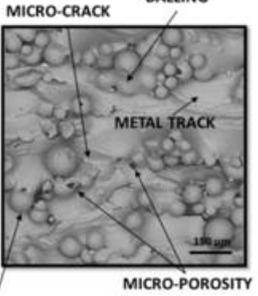


Introdução de defeitos

Polimento eletrolítico: Minimiza a introdução de defeitos na superfície devido à sua natureza não mecânica.

Polimento químico: Pode introduzir defeitos na superfície ou padrões de corrosão, dependendo do controlo da reação química.

Gravura colorida: Normalmente, não introduz defeitos, mas é necessário ter cuidado para garantir que a gravura colorida não obscurece certos defeitos.

 <p>Inclusions, phases may be preferentially attacked causing pitting</p>		
POLIMENTO ELECTROLÍTICO	POLIMENTO QUÍMICO	GRAVURA A CORES

Avaliação dos limites de grão

Polimento eletrolítico: Adequado para a análise dos limites de grão, proporcionando limites de grão bem preservados e visíveis, como na figura 2.1.43.

Polimento químico: É um desafio para a avaliação dos limites de grão devido a potenciais artefactos introduzidos durante o processo de gravura química.

Gravura colorida: Útil para realçar os limites do grão com cores contrastantes, ajudando a avaliar os limites do grão.

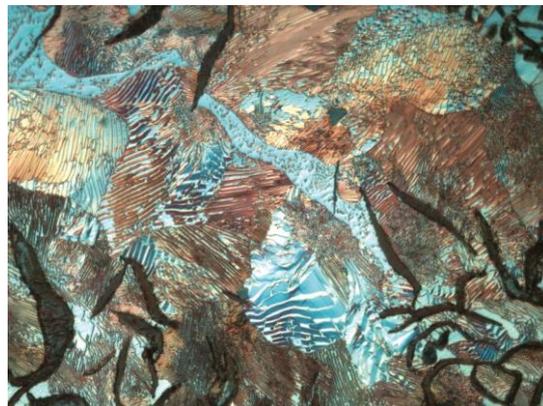


Fig. 2.1.43 Espaçamento interlamelar da perlite num ferro fundido cinzento [2.1.18]

Deteção de defeitos de superfície

Polimento eletrolítico: Permite a deteção eficaz de defeitos em superfícies lisas com o mínimo de artefactos.

Polimento químico: Pode introduzir defeitos na superfície, tornando a avaliação dos defeitos mais complexa.

Gravura colorida: Facilita a identificação de defeitos através de cores contrastantes, como se pode ver na figura 2.1.44, particularmente útil para detetar defeitos em componentes críticos.

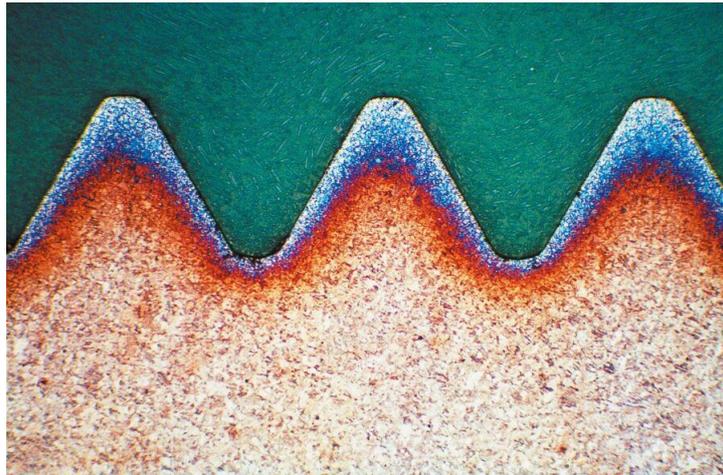


Fig. 2.1.44 Endurecimento superficial de aços [2.1.18]

Análise da microestrutura

Polimento eletrolítico: Permite um exame microestrutural preciso com o mínimo de interferência.

Polimento químico: Requer um controlo cuidadoso para evitar interpretar mal os defeitos introduzidos durante o processo.

Gravura colorida: Valiosa para a análise microestrutural, particularmente em soldaduras e materiais multifásicos, como se pode ver na figura 2.1.45, realçando os constituintes microestruturais.

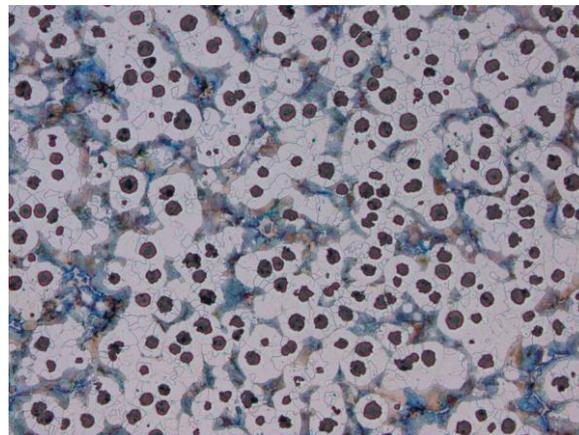


Fig. 2.1.45 Ferro fundido dúctil com grafite esferoidal (objetiva HC PL Fluotar 10x, campo claro). [2.1.18]

Aplicações

Polimento eletrolítico: Utilizado principalmente em metalografia para preparar amostras para microscopia e análise microestrutural.

Polimento químico: Aplicado nas indústrias eletrónica, ótica, joalharia e aeroespacial para obter acabamentos de superfície de alta qualidade.

Gravura colorida: Extensivamente utilizada na metalurgia e na ciência dos materiais para o exame microestrutural de vários componentes metálicos, como se mostra na figura 2.1.46.



Fig. 2.1.46 Electropolimento de superfícies: teoria e aplicações [2.1.19]

Em resumo, cada processo tem os seus pontos fortes e fracos, e a escolha da técnica depende dos requisitos específicos da análise, do tipo de material e do nível desejado de acabamento e precisão da superfície.

Observações finais

Este capítulo apresentou uma exploração aprofundada do polimento eletrolítico, do polimento químico e da gravação a cores, centrando-se nas suas definições, objectivos, mecanismos e aplicações na ciência e engenharia dos materiais. As reacções electroquímicas controladas do polimento eletrolítico oferecem conhecimentos valiosos para a análise da microestrutura, deteção de defeitos superficiais, avaliação dos limites de grão e preparação de revestimentos superficiais, apoiando o desenvolvimento de materiais metálicos avançados.

O polimento químico provou ser eficaz na caracterização da microestrutura, na melhoria do acabamento da superfície, na identificação de fases e na avaliação de materiais, com a sua capacidade de remover seletivamente o material, aumentando a visibilidade das características microestruturais e das características dos defeitos.

A gravação colorida, através da interação com os constituintes microestruturais, é uma técnica valiosa para a identificação de fases, deteção de inclusões e análise do tamanho do grão, proporcionando um meio de visualizar e diferenciar várias características microestruturais com base na cor.

Estas técnicas oferecem abordagens complementares ao estudo de materiais metálicos, com aplicações que vão desde a investigação de materiais à análise de falhas e à otimização de processos.

Referências

[2.1.1] <https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electropolishing>

[2.1.2]

[2.1.13] Kenji Ishikawa, Kazuhiro Karahashi, Tatsuo Ishijima, Keizo Kinoshita, &co. Progressos nos processos secos à nanoescala para o fabrico de elementos de elevada relação de aspeto: Como podemos controlar a uniformidade da dimensão crítica na parte inferior, junho de 2018, Japanese Journal of Applied Physics 57(6S2):06JA01, DOI: 10.7567/JJAP.57.06JA01

[2.1.14] <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>

[2.1.15] G. F. Vander Voort, Metallography: Principles and Practice, McGraw-Hill Book Co., NY, 1984 e ASM International, Materials Park, Ohio, 1999

[2.1.16] https://www.youtube.com/watch?v=yOScziqA4_8

[2.1.17] <https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw>

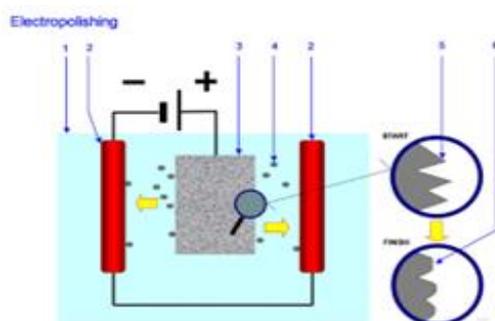
[2.1.18] <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/applied/metallography-an-introduction>

[2.1.19] <https://www.tandfonline.com>

2.2 Demonstração do polimento eletrolítico e da gravação a cores

2.2.1 Polimento eletrolítico - objetivo, aplicação e demonstração

O polimento eletrolítico é uma técnica especializada utilizada para remover material de uma superfície metálica através de reacções electroquímicas controladas. Este processo é normalmente utilizado para preparar amostras para microscopia, metalografia e outras aplicações em que é necessário um acabamento superficial de alta qualidade. É utilizado para melhorar a qualidade da superfície de amostras metálicas para exame microscópico. Envolve a aplicação controlada de corrente eléctrica e uma solução electrolítica para remover seletivamente material da superfície da amostra, resultando num acabamento superficial polido e limpo.



1. Eletrólito
2. Cátodo
3. Peça a polir (Ânodo)
4. Partículas que se deslocam da peça de trabalho em direção ao cátodo
5. Superfície antes do polimento
6. Superfície após polimento

Figura 2.2.1. Como funciona o electropolimento (fonte: Best Technology)

No electropolimento, a peça metálica ou a peça de trabalho serve como ânodo com carga positiva. A peça de trabalho está ligada ao terminal positivo de um retificador de corrente contínua.

O cátodo carregado negativamente, geralmente feito de aço inoxidável ou zircónio, é ligado ao terminal negativo do retificador de corrente contínua.

Tanto o ânodo como o cátodo estão imersos num banho de solução electrolítica com temperatura controlada. A corrente eléctrica do retificador é conduzida do ânodo para o cátodo através do eletrólito. A corrente eléctrica provoca a oxidação de iões metálicos na superfície da peça e a sua dissolução no eletrólito. Este processo pode dissolver quantidades extremamente pequenas e rigorosamente controladas de metal, resultando na remoção da superfície com uma espessura de microns

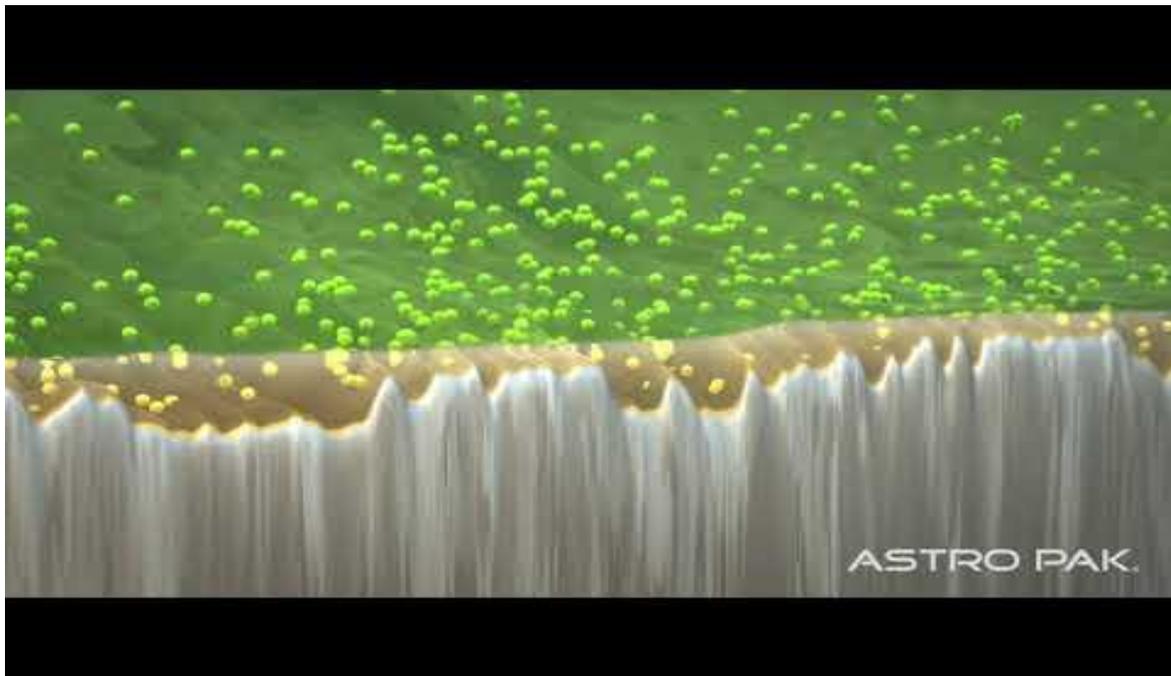


Figura 2.2.2. O que é eletropolimento? | Como funciona o eletropolimento? (fonte: AstroPaK)

A quantidade de remoção da superfície metálica é controlada pelos seguintes factores: composição química do eletrólito, temperatura do eletrólito (tipicamente 76 °C - 82 °C), tempo de exposição à corrente eléctrica, densidade da corrente eléctrica (varia consoante o eletrólito; composição da liga metálica sujeita a eletropolimento. As ligas metálicas suportadas para eletropolimento são o alumínio, o aço-carbono, o aço inoxidável, as ligas de cobre, o nitinol, o titânio, o aço para ferramentas e as ligas especiais/exóticas. Os produtos químicos de eletropolimento para o aço inoxidável consistem normalmente numa mistura de alta viscosidade de ácido sulfúrico e ácido fosfórico.



2.2.2 Prática de polimento eletrolítico

É normalmente realizado em laboratório ou em ambientes industriais com o objetivo de melhorar o acabamento da superfície de amostras de metal. O polimento eletrolítico é uma técnica especializada utilizada para remover material de uma superfície metálica através de reacções electroquímicas controladas. Este processo é normalmente utilizado para preparar amostras para microscopia, metalografia e outras aplicações em que é necessário um acabamento superficial de alta qualidade.

Antes de iniciarmos o processo, certifique-se de que segue todas as precauções de segurança. Isto inclui a utilização de equipamento de proteção pessoal adequado, o trabalho numa área bem ventilada e o cumprimento de todas as directrizes de segurança fornecidas pela sua instituição ou local de trabalho.

Materiais e equipamentos utilizados no polimento eletrolítico

- Amostras de metal para polir



Figura 2.2.3. Amostras prontas para electropolimento (fonte: Kemet International Ltd)

- Equipamento de polimento eletrolítico, incluindo uma fonte de alimentação, solução electrolítica e eléctrodos



Figura 2.2.4. Equipamento de polimento eletrolítico com a célula electrolítica a descoberto (fonte: American Buehler Instrument Co., Ltd.)



Figura 2.2.5. Equipamento de polimento eletrolítico com a célula electrolítica sobreposta (fonte: Kemet International Ltd)

- Óculos de proteção, luvas e bata de laboratório
- Recipientes de vidro para solução electrolítica



Figura 2.2.6. Soluções de electrólitos (fonte: Micro Lit)

- Panos ou discos de polimento
- Água destilada
- Medidores de tensão e de amperagem



Figura 2.2.7. Medidores de tensão e de amperagem (fonte: Pulsivo USA)

- Equipamento de polimento (por exemplo, rebarbadora ou lixa) para a preparação inicial da amostra



Figura 2.2.8. Equipamento de polimento (fonte: AzOm)

- Escova de esfregar

Procedimento de trabalho de polimento eletrolítico

Preparação da amostra:

1. O operador deve começar com uma amostra de metal que necessite de polimento e certificar-se de que está limpa e livre de quaisquer contaminantes.
2. Se a amostra apresentar imperfeições superficiais significativas, o operador poderá ter de efetuar um polimento mecânico inicial utilizando uma rebarbadora ou uma lixa para eliminar os principais defeitos.
3. Em seguida, a amostra deve ser cuidadosamente lavada com água destilada para eliminar quaisquer detritos e contaminantes.

As normas mais utilizadas na indústria de electropolimento são a ASTM B912 e a [ASTM E1558-09](#). A norma fornece orientações sobre o modo de electropolimento do aço inoxidável.

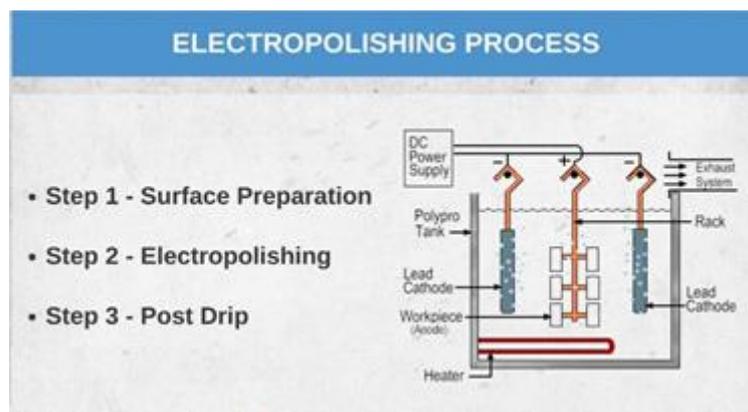


Figura 2.2.9. Etapas do processo de electropolimento (fonte: Best Technology Ltd.)

Nesta fase de preparação, o operador deve remover contaminantes como óleo e gordura que interferem com a uniformidade quando a corrente eléctrica é aplicada. Após a limpeza, tenha cuidado para que as peças de aço inoxidável não entrem em contacto com as mãos ou com o equipamento. A limpeza incorrecta é uma causa comum de rejeição de peças.



Preparação da solução electrolítica

1. Deve ser preparada uma solução de eletrólito apropriada para o metal e a aplicação específicos. A composição do eletrólito varia de acordo com o material a ser polido.
2. O operador deve verter a solução de eletrólito para um recipiente de vidro.

Tabela 2.2.1 Tipos de soluções electrolíticas (fonte: Quora)

Aço inoxidável	10g de ácido oxálico, 100ml de água
	5 ml de ácido sulfúrico, 100 ml de água
Para os aços austenítico-ferríticos (duplex)	Solução aquosa de hidróxido de sódio a 20-40
Para medições automáticas de tamanho de grão de aços austeníticos	60 % de água destilada 40 % de ácido nítrico

Por exemplo, os passos reais para o electropolimento do aço inoxidável são executados nesta fase para alisar, dar brilho e rebarbar o metal.

- Electropolimento de peças de aço inoxidável - Os tempos de tratamento podem variar de 10 segundos a 20 minutos.
- Ebulição/Enxaguamento por pulverização ou Enxaguamento morto - Este depósito capta a solução de eletrólito usada.



Figura 2.2.10. (a) Diferentes tipos de electrólitos adequados para aplicações específicas de SCs e (b) impacto do eletrólito no desempenho das SCs electroquímicas. (fonte: Tiwari, Santosh & Thakur, Anukul & De Adhikari, Amrita & Zhu, Yanqiu & Wang, Nannan. (2020). Pesquisa atual de nanocompósitos à base de grafeno e sua aplicação para supercapacitores. 10. 2046. 10.3390/nano10102046.)

Configuração da célula electrolítica

1. O elétrodo positivo (ânodo) e o elétrodo negativo (cátodo) devem ser ligados à fonte de alimentação.
2. O operador tem de submergir a amostra de metal na solução electrolítica e ligá-la ao cátodo.
3. O ânodo deve ser feito de um material que não se dissolva no eletrólito. As escolhas mais comuns incluem platina ou grafite.

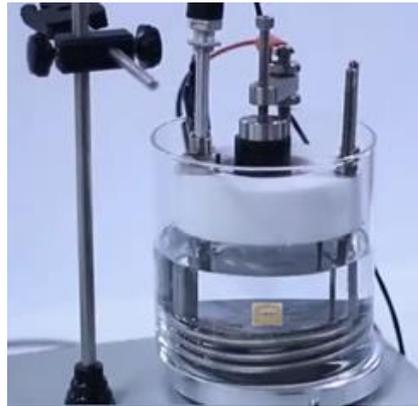


Figura 2.2.11. Célula unitária especial para electropolimento (fonte: American Buehler Instrument Co., Ltd.)

Polimento electrolítico

1. O operador precisa de ligar a fonte de alimentação e definir a tensão e a amperagem para os valores desejados para a sua aplicação. Os parâmetros específicos dependerão do metal e do grau de polimento necessário.
2. O operador observará a remoção do material da amostra de metal. O metal dissolve-se no ânodo e deposita-se no cátodo. O processo deve ser cuidadosamente monitorizado para se obter o acabamento desejado.
3. O operador deve manter a tensão e a amperagem dentro do intervalo recomendado para evitar o sobreaquecimento ou a danificação da amostra.



Figura 2.2.12. Máquina de polimento e gravação electrolítica DPF-2 (fonte: Micro Lit)

Enxaguamento e limpeza final

1. Uma vez atingido o polimento pretendido, o operador tem de desligar a alimentação eléctrica.
2. O operador deve retirar cuidadosamente a amostra da solução electrolítica.
3. O operador deve enxaguar a amostra com água destilada para remover qualquer electrólito residual.
4. O operador deve utilizar um pano ou uma almofada de polimento para dar um polimento final à amostra e remover quaisquer imperfeições remanescentes.



Inspeção final

O operador precisa de examinar a amostra polida ao microscópio ou para outros fins de controlo de qualidade para garantir que o acabamento desejado foi alcançado.

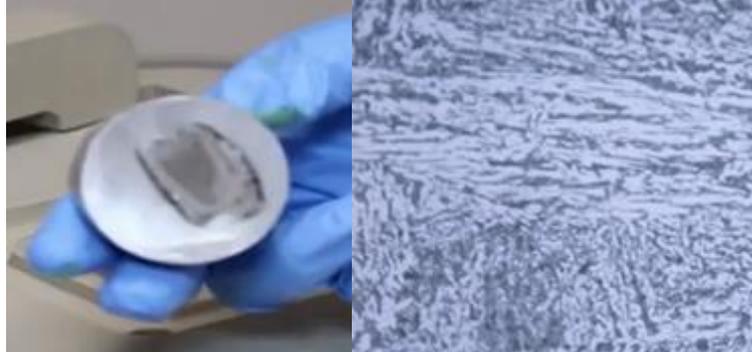


Figura 2.2.13. A estrutura microscópica da amostra de aço inoxidável depois de ter sido electropolida (fonte: Kemet International Ltd)

2.2.3 Problemas comuns e solução quando se utiliza a técnica de electropolimento para a preparação de amostras metalográficas

O polimento eletrolítico é um processo eletroquímico preciso utilizado para obter um acabamento superficial de alta qualidade em amostras de metal, no entanto, pode encontrar vários problemas comuns que podem afetar a qualidade dos resultados:

Polimento irregular

Questão: A amostra de metal pode sofrer um polimento irregular, resultando num acabamento de superfície irregular.



Figura 2.2.14. Polimento irregular numa chapa de aço inoxidável (fonte: AzOm)

Solução: O operador deve assegurar que a amostra está devidamente fixada e posicionada na solução electrolítica, agitar a solução para manter a uniformidade e ajustar os parâmetros eléctricos (tensão e corrente) para proporcionar um polimento consistente em toda a amostra.

Polimento excessivo

Problema: O polimento excessivo ocorre quando a amostra é polida durante demasiado tempo, levando a uma remoção excessiva de material e a potenciais danos na amostra.



Figura 2.2.15. Graepels/Graepels de aço inoxidável (fonte: Perforators & Weavers Ltd/Graepel Perforators Ltd)

Solução: O operador deve monitorizar de perto o processo de polimento e cumprir os tempos de polimento recomendados, ajustando as definições de tensão e corrente para controlar a taxa de remoção de material. Deve ser implementado um temporizador para evitar o polimento excessivo.

Pitting e Dimpling

Questão: A corrosão localizada durante o polimento eletrolítico provoca depressões irregulares na superfície da amostra.

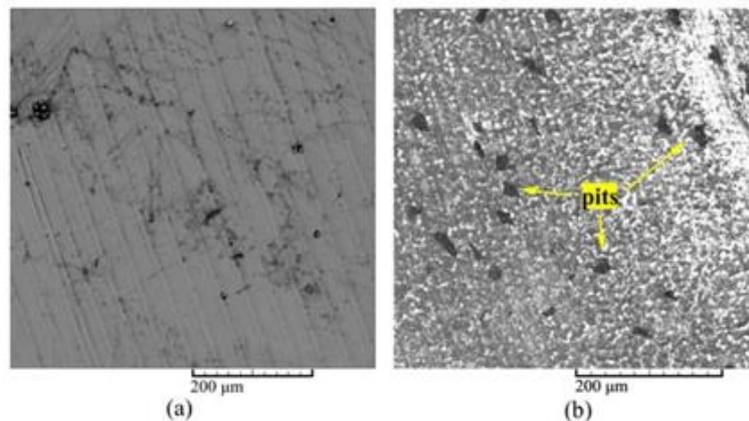


Figura 2.2.16. Imagem SEM de (a) uma superfície de disco de aço retificado e (b) uma superfície de disco de aço eletropolido. (Fonte: Mašović, R.; Miler, D.; Čular, I.; Jakovljević, S.; Šercer, M.; Žeželj, D. O Efeito do Electropolimento do Aço no Comportamento Tribológico de um Par Aço-Bronze nos Regimes de Lubrificação Mista e Limite. *Lubricants* **2023**, *11*, 325. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080325>)

Solução: O operador deve verificar a composição e a temperatura da solução electrolítica, bem como a distância ânodo-cátodo e assegurar que o eletrólito está bem misturado. Limpar e preparar corretamente a amostra antes do polimento para remover quaisquer contaminantes.

Superfície rugosa ou riscada

Questão: Se a superfície da amostra parecer áspera ou riscada após o polimento eletrolítico, pode dever-se a uma preparação mecânica inadequada ou a um equipamento de polimento sujo.

Solução: O operador deve assegurar que a amostra é corretamente preparada com o polimento mecânico inicial e utilizar equipamento de polimento limpo e em bom estado de conservação, bem como verificar a qualidade do pano ou almofada de polimento para detetar quaisquer partículas abrasivas que possam riscar a superfície.

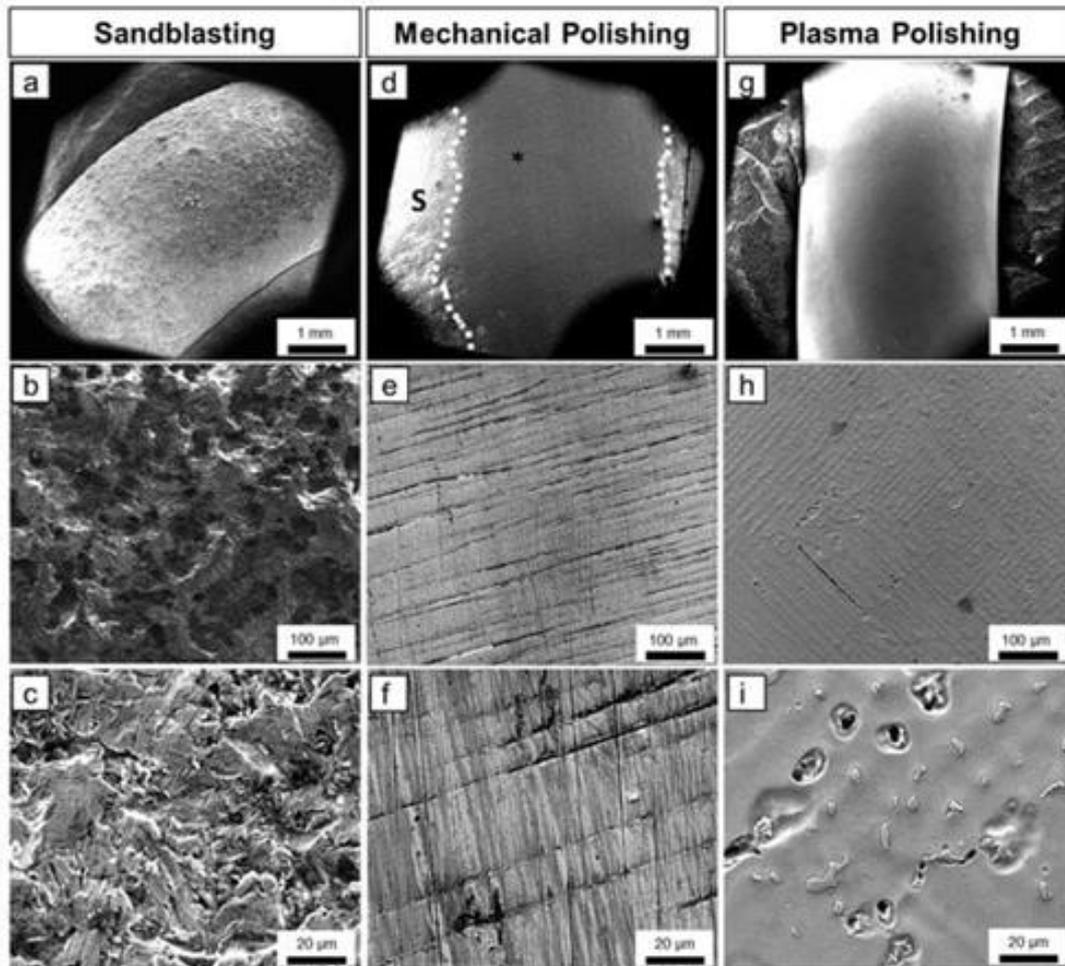


Figura 2.2.17. Micrografias SEM que revelam a comparação de ligas de Co-Cr polidas com jato de areia, polidas mecanicamente e polidas electroliticamente com plasma. (a) Vista geral do jato de areia representando uma morfologia de superfície rugosa. (b) Vista de perto do jato de areia mostrando uma superfície rugosa e fissurada. (c) A grande ampliação revela uma superfície irregular com sulcos, arestas e porosidades mais profundas. (d) Vista geral da amostra polida mecanicamente, mostrando uma fronteira clara entre a área polida mecanicamente (*) e a área jacteada (S). (e,f) A grande ampliação da amostra polida mecanicamente revela uma superfície lisa com numerosas marcas de polimento. (g) Vista geral da amostra polida electroliticamente com plasma, revelando uma superfície totalmente lisa. (h) Grande plano da amostra polida electroliticamente com plasma, mostrando uma superfície lisa com numerosas inhomogeneidades. (i) A grande ampliação da amostra polida electroliticamente com plasma revela uma superfície lisa com estruturas insulares intercaladas. (fonte: Witzke, Katharina & Kensbock, Renko & Willsch, Caroline & Fricke, Katja &

Bekeschus, Sander & Metelmann, Hans-Robert. (2023). Polimento mecânico e eletrolítico por plasma de ligas dentárias. *Materiais*. 16. 6222. 10.3390/ma16186222.)

Bolhas de gás e crescimento dendrítico

Questão: A formação de bolhas de gás ou o crescimento dendrítico na superfície da amostra pode ocorrer durante o polimento eletrolítico.

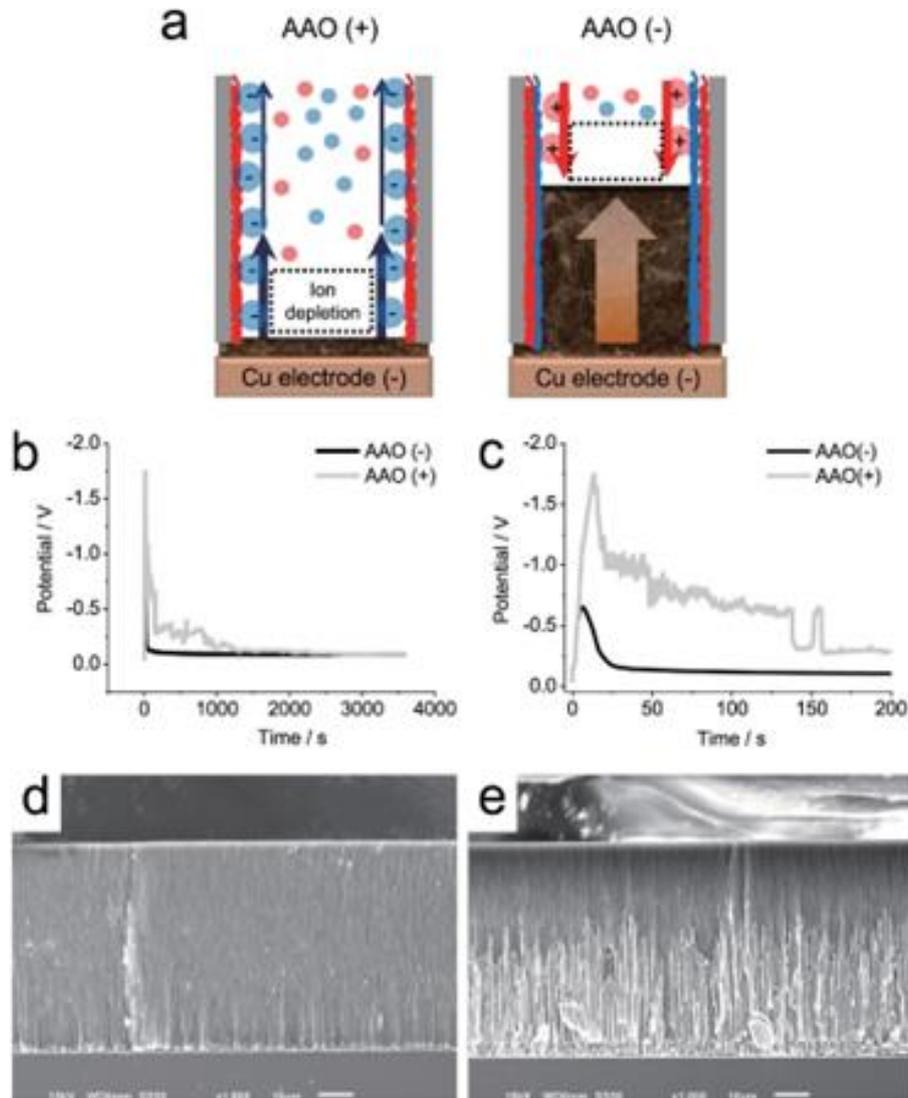


Figura 2.2.18. (a) Efeito do SC na eletrodeposição em nanoporos carregados durante o OLC. (b) Curvas V-t de AAO(+) e AAO(-) para uma corrente aplicada de -6 mA. (c) Ampliação dos dados de (b) para os primeiros 200 s. Imagens SEM de nanofios de Cu electrodepositados em (d) AAO(+) e (e) AAO(-). (fonte: Han, Ji-Hyung & Khoo, Edwin & Bai, Peng & Bazant, Martin. (2014). Corrente super-limitada e controle do crescimento dendrítico por condução de superfície em nanoporos. *Relatórios científicos*. 4. 10.1038/srep07056).

Solução: O operador deve certificar-se de que a amostra está livre de ar preso ou de bolhas de gás antes de iniciar o processo de polimento e, em seguida, ajustar a agitação e a temperatura do eletrólito para evitar a formação de bolhas.

Padrões ou estrias de gravura



Problema: Podem aparecer padrões ou estrias de gravura indesejados na superfície polida, muitas vezes devido a condições de polimento inconsistentes.



Figura 2.2.19. [Estrias na SS304 maquinada após electropolimento](#) (fonte: Global Spec)

Solução: O operador deve manter os parâmetros eléctricos estáveis e controlar o fluxo de eletrólito para garantir uma distribuição uniforme. Limpar e preparar corretamente a amostra para evitar variações na composição da superfície.

Brilho ou luminosidade inadequados

Problema: Se a superfície polida não tiver o brilho ou a luminosidade desejados, isso pode resultar de uma composição ou de condições de eletrólito subóptimas.

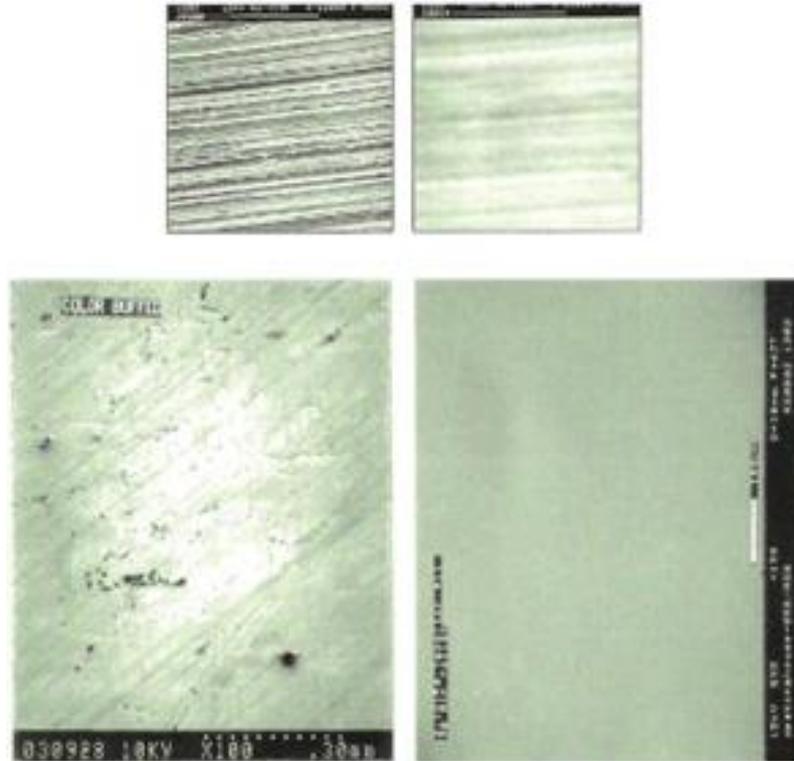


Figura 2.2.20. Fotomicrografias ópticas (em cima) e SEM (em baixo) mostrando a transformação da superfície rugosa polida mecanicamente à esquerda em acabamento liso após electropolimento (fonte: Global Spec)

Solução: O operador deve ajustar a composição da solução electrolítica para melhorar o resultado do polimento. Experimente diferentes parâmetros, como a temperatura, a tensão e a corrente, para obter o acabamento pretendido.

Preocupações com a segurança

Questão: Podem surgir problemas de segurança se não forem seguidas as precauções de segurança adequadas ao trabalhar com produtos químicos e equipamento eléctrico.



Figura 2.2.21. Equipamento de proteção (fonte: Micro Lit)



Solução: O operador deve seguir sempre as directrizes de segurança e usar o equipamento de proteção individual adequado, trabalhar numa área bem ventilada e receber formação sobre o manuseamento correto dos produtos químicos e do equipamento.

2.2.3 Manuseamento e eliminação de electrólitos provenientes do polimento eletrolítico

Um operador ou especialista em metalografia deve seguir procedimentos específicos para o manuseamento e eliminação seguros dos electrólitos utilizados no polimento eletrolítico.



Figura 2.2.22. Soluções de electrólitos (fonte: Micro Lit)

Manuseamento de electrólitos do polimento eletrolítico

O operador ou especialista deve efetuar o manuseamento dos electrólitos numa área bem ventilada, como uma hotte ou um espaço com boa ventilação, para minimizar a exposição a fumos ou vapores. Os recipientes que contêm electrólitos devem ser claramente rotulados com os seus nomes, composições, perigos e quaisquer precauções de manuseamento necessárias. Devem ser utilizados rótulos específicos e devem ser mantidos registos. É importante armazenar os electrólitos em recipientes resistentes a produtos químicos, concebidos para este fim. Os recipientes de vidro ou de plástico são escolhas comuns.



Figura 2.2.23. Eletrólito C+ (fonte: Micro Lit)

Os operadores ou especialistas devem evitar o contacto direto da pele com o eletrólito. Em caso de contacto, é essencial enxaguar imediatamente a área afetada com água abundante. Ao manusear

electrólitos, o operador deve abster-se de comer, beber ou fumar para evitar a ingestão acidental. Ao transferir ou misturar electrólitos, deve ter-se o cuidado de evitar salpicos ou acidentes. É aconselhável adicionar ácidos à água e não o contrário. O operador ou o especialista deve certificar-se de que os materiais utilizados para a manipulação dos electrólitos (recipientes, agitadores, etc.) são compatíveis com o eletrólito específico e não reagem com ele.

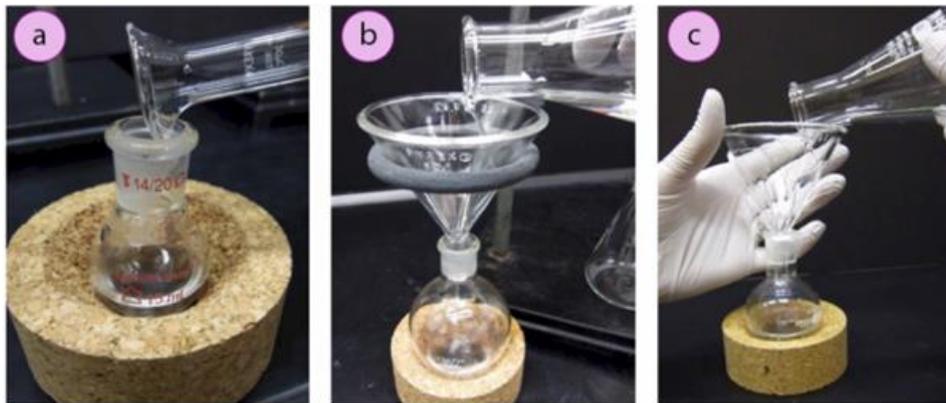


Figura 2.2.24. Verter líquido, b) Verter para um funil com uma pinça de anel, c) Verter para um funil com a mão. (fonte: Micro Lit)

Todo o pessoal que trabalha com electrólitos provenientes do polimento eletrolítico deve ser informado sobre os riscos e os procedimentos de segurança. A formação contínua e a consciencialização são cruciais.

Conformidade regulamentar com a eliminação de electrólitos provenientes do polimento eletrolítico

Os operadores ou especialistas em metalografia devem cumprir os regulamentos locais, estatais e federais que regem a eliminação de resíduos perigosos. Estes regulamentos podem variar consoante o local. Os diferentes electrólitos devem ser mantidos separados e deve ser evitada a mistura durante a eliminação. Nos casos em que a neutralização é necessária, o indivíduo deve seguir as directrizes de compatibilidade química para uma neutralização segura. Em caso de dúvida sobre os métodos de eliminação adequados, os operadores ou especialistas devem consultar um químico qualificado, um perito em eliminação de resíduos ou o departamento de saúde e segurança ambiental da sua organização. Os contentores de resíduos devem ser claramente rotulados com o seu conteúdo e quaisquer perigos para garantir um manuseamento seguro durante a eliminação.

É crucial garantir que os contentores de resíduos estão bem fechados para evitar fugas ou derrames. Os operadores ou especialistas devem providenciar a recolha e eliminação de resíduos perigosos através de serviços ou instalações de eliminação de resíduos licenciados e autorizados. Não se recomenda a tentativa de eliminação de resíduos perigosos de forma autónoma.

A manutenção de registos do processo de eliminação, incluindo datas, métodos de eliminação e fichas de dados de segurança (FDS) relevantes, é essencial para referência e conformidade. Os operadores ou especialistas devem estar preparados para emergências e ter kits de resposta a derrames, chuveiros de segurança e estações de lavagem de olhos disponíveis na área onde os electrólitos do polimento eletrolítico são manuseados.

2.2.4 Resolução de problemas e sugestões para o polimento eletrolítico de amostras metalográficas

O polimento eletrolítico de amostras metalográficas é um passo crucial na preparação de materiais para exame microscópico. No entanto, podem surgir problemas durante o processo (ver secção anterior), pelo que nesta secção iremos mencionar a contaminação da amostra, um problema comum que ocorre nos laboratórios metalográficos. O problema são os contaminantes na amostra que podem interferir com o processo de polimento. Para obter um processo bem sucedido, o operador deve assegurar que a amostra está livre de contaminantes, limpar todo o equipamento e utilizar soluções de electrólitos limpas. Outros defeitos de superfície, como riscos, fissuras e buracos, podem afetar significativamente o desempenho e a fiabilidade dos materiais metálicos. O polimento eletrolítico desempenha um papel vital na deteção de defeitos de superfície, proporcionando uma superfície limpa e lisa que facilita a sua visibilidade e caracterização.

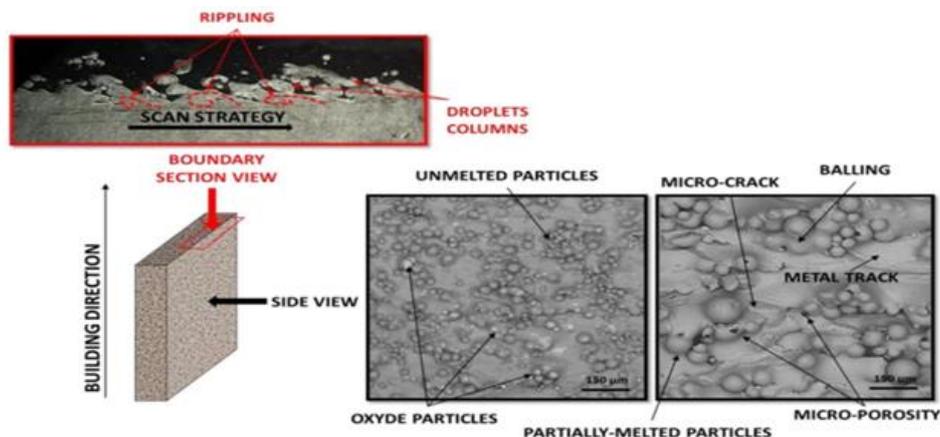


Figura 2.2.25. Representação de defeitos superficiais de objectos fabricados aditivamente (fonte: Acquesta, Annalisa & Monetta, Tullio. (2023). Abordagem verde para tratamentos de superfície de electropolimento de peças fabricadas por aditivos: Uma revisão abrangente. Metais. 13. 874. 10.3390/met13050874.)

Ao remover as irregularidades e os contaminantes da superfície, o polimento eletrolítico melhora o contraste entre os defeitos e o material circundante. Isto permite uma identificação, medição e avaliação precisas das falhas da superfície.

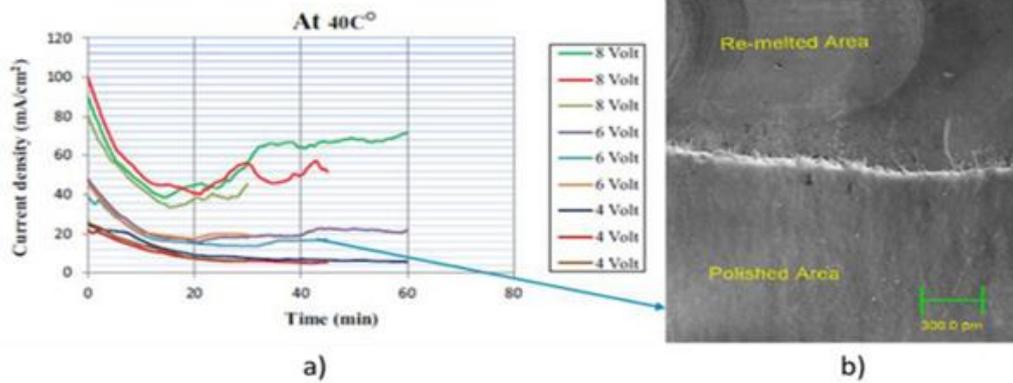


Figura 2.2.26. Curvas crono - amperométricas obtidas realizando o tratamento EP a 6 V a 40 °C durante um tempo de duração entre 30 e 60 min. (b) Imagem SEM da amostra electropolida aplicando uma tensão de 6 V a uma temperatura de 40 °C durante 45 min. (fonte: Acquesta, A.; Monetta, T. Green Approach for Electropolishing Surface Treatments of Additive Manufactured Parts: A Comprehensive Review. *Metals* 2023, 13, 874. <https://doi.org/10.3390/met13050874>)

A capacidade de detetar e caraterizar defeitos de superfície é crucial para avaliar a qualidade, durabilidade e adequação do material a aplicações específicas.

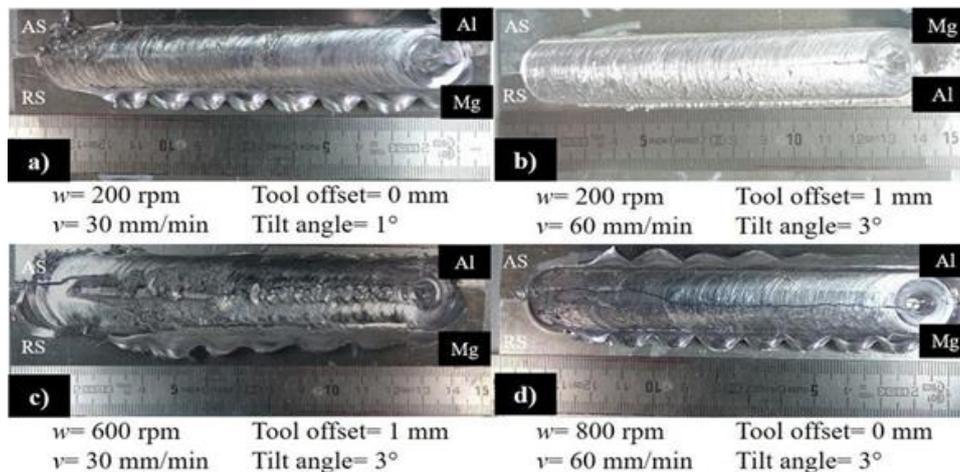


Figura 2.2.27. Defeitos das soldaduras, a) excesso de flashing, b) fissura, c) falta de preenchimento da superfície e excesso de flashing e d) fissura e excesso de flashing. (Lado de avanço: AS e lado de recuo: RS) (fonte: Hernández-García, D. & Saldaña Garcés, Rocio & Vázquez, F.J. & Gutiérrez-Castañeda, E.J. & Deaquino-Lara, R. & Verdura, David. (2017). Soldadura por fricção de ligas dissimilares AA7075-T6 a AZ31B-H24. *MRS Advances*. 2. 1-9. 10.1557/adv.2017.609.)

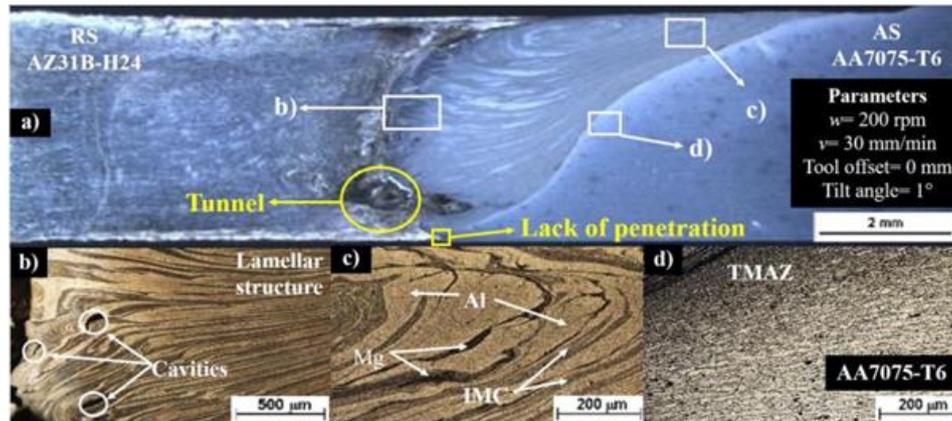


Figura 2.2.28. Micrografias da secção transversal de junta dissimilar AA7075-T6 a AZ31B-H24 por FSW, com defeitos internos como tunelamento, falta de penetração (a) e cavidades (b), em (c) mostra a dispersão entre o Mg e o Al na SZ; e em (d) é possível observar uma diminuição de aproximadamente 70% no tamanho de grão da zona termomecanicamente afetada (TMAZ) (fonte: Hernández-García, D. & Saldaña Garcés, Rocio & Vázquez, F.J. & Gutiérrez-Castañeda, E.J. & Deaquino-Lara, R. & Verdera, David. (2017). Soldadura por fricção de ligas dissimilares AA7075-T6 a AZ31B-H24. MRS Advances. 2. 1-9. 10.1557/adv.2017.609.)

Dicas gerais

- ✓ O operador deve preparar corretamente a amostra, removendo quaisquer contaminantes da superfície e efectuando um polimento mecânico inicial para eliminar os principais defeitos.
- ✓ O operador deve adaptar a composição do eletrólito ao metal específico que está a ser polido; metais diferentes podem exigir eletrólitos diferentes.
- ✓ O operador deve assegurar uma distribuição uniforme do eletrólito, agitando-o para evitar a estagnação ou a formação de bolhas de gás.
- ✓ O operador deve monitorizar continuamente o processo de polimento para obter o acabamento desejado e utilizar temporizadores, se necessário, para evitar o polimento excessivo.
- ✓ O operador deve seguir as directrizes de segurança, usar equipamento de proteção individual adequado e trabalhar numa área bem ventilada ao manusear produtos químicos e equipamento eléctrico.
- ✓ O operador deve experimentar as definições de tensão, corrente e temperatura para encontrar as condições ideais para os seus requisitos específicos de metal e acabamento.
- ✓ O operador deve manter registos detalhados do processo de polimento, incluindo parâmetros, composição do eletrólito e quaisquer problemas encontrados, para ajudar na resolução de problemas e na melhoria do processo.
- ✓ A manutenção deve manter e limpar regularmente o equipamento de polimento, incluindo os eléctrodos e a fonte de alimentação, para garantir um desempenho consistente.

2.2.5 Exemplos reais de polimento eletrolítico e gravação a cores

O polimento eletrolítico é normalmente utilizado em várias aplicações do mundo real para obter um acabamento superficial de alta qualidade em amostras de metal. Nos laboratórios metalúrgicos, o polimento eletrolítico é utilizado para preparar amostras metalográficas para exame microscópico. Esta técnica permite aos metalúrgicos estudar a microestrutura dos metais, como por exemplo examinar os limites dos grãos, as fases e as inclusões, o que é essencial para o controlo de qualidade e a análise de materiais. As indústrias aeroespacial e automóvel utilizam o polimento eletrolítico para preparar amostras de metal para ensaios não destrutivos (NDT). Isto inclui a inspeção da integridade de materiais, soldaduras e componentes através de técnicas como o teste de penetração de corante e a inspeção de partículas magnéticas. O polimento eletrolítico é utilizado no fabrico de semicondutores para preparar películas metálicas finas ou bolachas para inspeção, microscopia eletrónica e difração de electrões. Assegura que os componentes semicondutores têm uma superfície lisa e sem defeitos.



Figura 2.2.29. Sistema de polimento eletrolítico e de gravação (fonte: Metkton USA)

O polimento eletrolítico é utilizado na indústria eletrónica para criar uma superfície lisa e sem defeitos em componentes metálicos, incluindo conectores e PCB. Isto é importante para garantir ligações eléctricas fiáveis e reduzir a interferência de sinais. Na produção de painéis solares e componentes de turbinas eólicas, o polimento eletrolítico é utilizado para preparar superfícies

metálicas, como o alumínio ou o cobre, para melhorar a eficiência energética e a resistência à corrosão.

O polimento eletrolítico é utilizado para preparar componentes metálicos para sistemas ópticos e instrumentos astronômicos. As superfícies lisas e reflectoras são vitais para que os telescópios, espelhos e lentes obtenham observações e imagens precisas.



Figura 2.2.30. Demonstração de polimento e gravação ElectroMet 4 (fonte: BuehlerMaterials)

Os fabricantes de implantes e dispositivos médicos utilizam o polimento eletrolítico para melhorar o acabamento da superfície dos componentes metálicos. Isto é crucial para reduzir o risco de adesão bacteriana e garantir a biocompatibilidade dos materiais. No campo da medicina dentária, o polimento eletrolítico é utilizado para refinar a superfície de próteses dentárias como coroas, pontes e implantes dentários. Uma superfície lisa e polida ajuda a reduzir o risco de acumulação de placa bacteriana e aumenta o conforto do paciente.

2.2.6 Gravura a cores - objetivo, aplicação e demonstração

A gravação colorida é uma técnica utilizada em metalografia para corar ou colorir seletivamente diferentes constituintes microestruturais de um material metálico. Ao empregar gravadores específicos, a técnica melhora a visibilidade e o contraste de várias fases, inclusões e limites de grão.



Figura 2.2.30. Técnicas macroscópicas (fonte: MaterialScience2000)

A gravação a cores desempenha um papel crucial na metalografia, fornecendo um meio para diferenciar e realçar vários constituintes microestruturais. Ajuda na identificação de fases, inclusões, limites de grão e outras características que podem ser difíceis de distinguir em amostras não ligadas. Esta visibilidade melhorada permite uma análise e compreensão mais abrangentes da estrutura e propriedades do material. Para além da identificação de fases, a gravação a cores permite a caracterização do tamanho do grão, dos limites do grão, das partículas de segunda fase e de outros parâmetros microestruturais. Facilita a avaliação da homogeneidade microestrutural, a deteção de segregação ou de fases intermetálicas e a análise de defeitos ou anomalias do material. Permite uma melhor observação e exame sob microscopia ótica ou eletrónica, facilitando uma melhor compreensão da composição, estrutura e propriedades do material.

Princípios da formação da cor

Os agentes de corrosão podem reagir de forma diferente com os constituintes devido a factores como a composição química, a orientação cristalográfica e o estado da superfície. Estas interacções podem levar à formação de compostos ou complexos coloridos na superfície das características microestruturais, tornando-as mais visíveis e distinguíveis.

Os princípios de formação da cor no ataque químico colorido baseiam-se na interação entre o agente de ataque e os constituintes microestruturais. A cor surge devido à absorção, reflexão ou interferência de comprimentos de onda específicos da luz pelos compostos ou complexos coloridos formados na superfície.

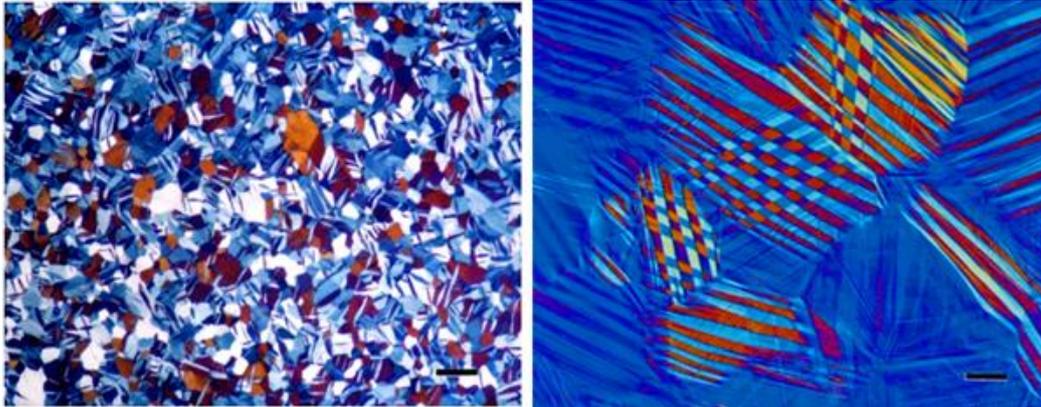


Figura 2.2.31. (esquerda) e Figura 2.2.32. (direita): Estrutura de grãos em Zr de alta pureza (à esquerda) que foi trabalhado a quente e estirado a frio (note-se os gémeos mecânicos) e visto em luz polarizada e de Au - 19Cu-5Al que foi polido e submetido ao efeito de memória de forma para produzir martensite e a iluminação de interferência diferencial Nomarski foi utilizada para obter imagens da agitação da superfície devido à reação de cisalhamento na superfície livre. As barras de ampliação são de 100 e 50 μm , respetivamente (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

As cores produzidas pelos corantes são visíveis sob iluminação de campo claro e, em muitos casos, é possível obter uma melhoria adicional utilizando luz polarizada. As cores são desenvolvidas por interferência da mesma forma que na coloração térmica ou na deposição em vácuo. Tal como referido, a cor é determinada pela espessura da película, normalmente na sequência de amarelo, vermelho, violeta, azul e verde quando observada com luz branca. Nos sistemas anódicos, a película forma-se apenas sobre a fase anódica, mas a sua espessura pode variar consoante a orientação cristalográfica da fase. Nos sistemas catódicos, como a espessura da película sobre a fase catódica é geralmente constante, é produzida apenas uma cor, que varia à medida que a película cresce durante a gravação. Por conseguinte, para obter sempre a mesma cor, a duração da gravação deve ser constante. Isto pode ser conseguido cronometrando a corrosão e observando a cor macroscópica da amostra durante a coloração.

Gravura colorida Preparação da amostra

Os passos de preparação metalográfica são os mesmos que no processo anterior, seguidos de gravação metalográfica.



Figura 2.2.33. Preparação da amostra para gravação a cores (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

O ataque metalográfico é efectuado na superfície polida por ataque com reagentes adequados aos materiais da amostra soldada que dissolvem ou colorem seletivamente os constituintes presentes, tornando-os distinguíveis uns dos outros. A gravação é efectuada através da passagem de um pedaço de algodão embebido nos reagentes sobre a superfície do provete. O objetivo da operação é revelar a estrutura cristalina.

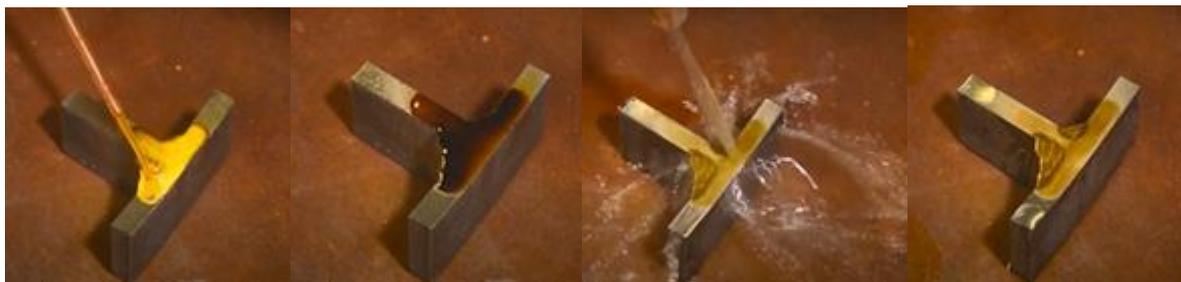


Figura 2.2.34. Gravura colorida de soldadura (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

2.2.6 Prática com gravura a cores

Materiais e equipamento utilizados na gravação a cores de amostras metalográficas:

- ✓ amostras metalográficas (normalmente amostras de metal preparadas, montadas e polidas);

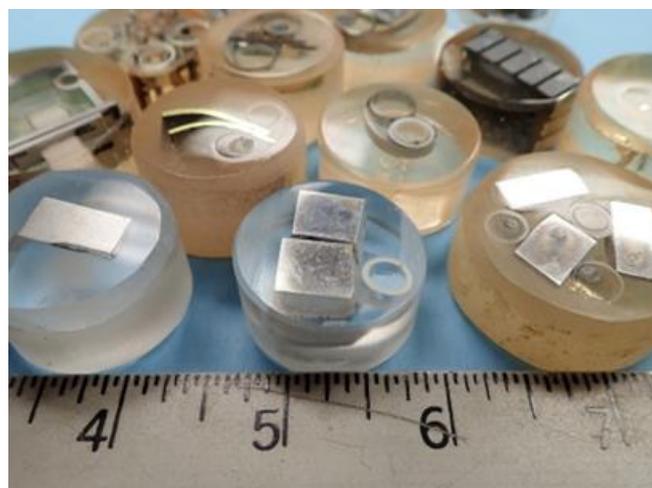


Figura 2.2.35. Amostras metalográficas (fonte: Metallurgical Engineering Services, Inc.)



- ✓ reagentes químicos especificamente formulados para reagir com diferentes fases ou constituintes do metal para produzir cores;

Name	Chemical Composition
Nital	4% solution of nitric acid in ethanol
Pikral	4% solution of picric acid in ethanol
Klemm	50 ml ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ w H_2O) + 1g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$
LePera reagent	1:1 – pikral + 1% solution $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ w H_2O
Sodium metabisulfite	10% water solution $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



Figura 2.2.36. Reagentes químicos (fonte: Micro Lit)

- ✓ máquinas ou equipamentos para retificar e polir, papéis abrasivos e panos ou discos de polimento,



Figura 2.2.37. Máquinas ou equipamentos de retificação e polimento, papéis abrasivos (fonte: Kemet International Ltd)

- ✓ equipamento de proteção individual (EPI), como óculos de segurança, luvas e uma bata de laboratório,
- ✓ microscópio para examinar as amostras gravadas,



Figura 2.2.38. Microscópio metalográfico (fonte: Olympus)



- ✓ material de vidro de laboratório para armazenamento e manuseamento de agentes de corrosão,



Figura 2.2.39. Material de vidro de laboratório (fonte: Kemet International Ltd)

- ✓ água destilada para enxaguar as amostras,



Figura 2.2.40. Água destilada (fonte: Micro Lit)

- ✓ temporizador ou relógio para garantir tempos de gravação exactos,
- ✓ materiais resistentes a produtos químicos, tais como recipientes de polietileno ou polipropileno para o manuseamento do ácido,



Figura 2.2.41. Garrafas de plástico PET com ataque ácido Frasco de armazenamento de plástico de 13 g com tampa de rosca em PP (fonte: Micro Lit)

- ✓ espaço de trabalho ventilado para minimizar a exposição aos fumos e assegurar a eliminação adequada dos produtos químicos,

Procedimento para a gravação a cores

Preparação da amostra:

- O especialista deve começar com amostras metalográficas bem preparadas que tenham sido montadas e polidas com um elevado nível de acabamento.
- O especialista deve certificar-se de que as amostras estão limpas e isentas de quaisquer contaminantes ou resíduos.



Figura 2.2.42. Preparação da amostra e exemplo de amostra (fonte: Kemet International Ltd)



Seleção de gravador de cor:

- O especialista deve escolher o condicionador colorido adequado com base no metal específico e nas características que pretende revelar.
- O especialista deve consultar as directrizes do fabricante ou os recursos publicados para obter informações sobre os agentes de corrosão adequados para a sua aplicação.

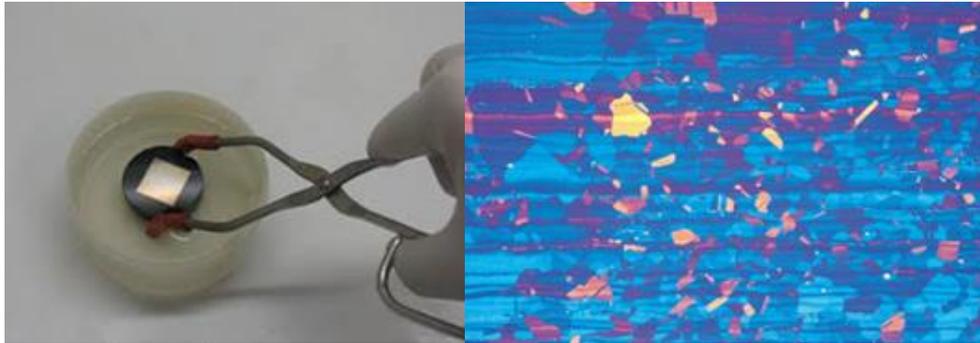


Figura 2.2.43. Amostra de gravura (direita) e aço de alta liga (esquerda) gravado com corantes (Beraha, Lichtenegger), com V2A-lye ou Adler-etchant contendo ácido clorídrico (fonte: Struers)

Preparação do gravador:

- O especialista deve seguir cuidadosamente as instruções do fabricante para a preparação do corante colorido.
- Alguns agentes de corrosão podem ter de ser misturados com um solvente específico ou preparados numa determinada concentração.

Tipos comuns de gravadores de cor (ver anexo)

Muitos metais gravados com reagentes padrão para revelar os contornos de grão produzem frequentemente apenas uma elevada percentagem dos contornos, em vez de todos os contornos. Os corantes, no entanto, revelam completamente a estrutura do grão. No caso de metais com gémeos de recozimento, pode ser muito difícil avaliar o tamanho do grão quando um condicionador padrão revela uma parte dos limites do grão e dos gémeos. De facto, pode ser bastante difícil fazer uma medição precisa do tamanho do grão, mesmo manualmente, com um espécime deste tipo, uma vez que é necessário distinguir entre os limites de grão e os limites de gémeos (estes últimos devem ser ignorados na medição). No entanto, com uma microestrutura gravada a cores é relativamente fácil separar o grão das fronteiras gémeas, pelo menos manualmente.

Além disso, as películas crescem em função da orientação dos cristais. Por conseguinte, é possível detetar qualquer orientação cristalográfica preferencial pela estreiteza da gama de cores presente. Se estiver presente uma vasta gama de cores num padrão aleatório, a orientação cristalina é aleatória. Se estiver presente uma gama estreita de cores nos grãos, então está presente uma orientação preferencial.



A preparação dos espécimes deve ser melhor quando se utilizam métodos a cores do que para os métodos a preto e branco, uma vez que as películas de crescimento epitaxial são sensíveis a danos residuais induzidos pela preparação que não foram removidos. Este nível de preparação é necessário no trabalho de análise de imagem e pode ser facilmente obtido por um perito em metalografia com o equipamento adequado. O polimento eletrolítico não é necessário para obter superfícies sem danos.

Os corantes mais comuns são aqueles que depositam uma película de interferência à base de sulfureto na amostra. Estes são os corantes mais conhecidos e normalmente os mais fáceis de utilizar. Klemm e Beraha desenvolveram os corantes à base de sulfureto mais utilizados, usando tiosulfato de sódio, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, e metabissulfito de potássio, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$.

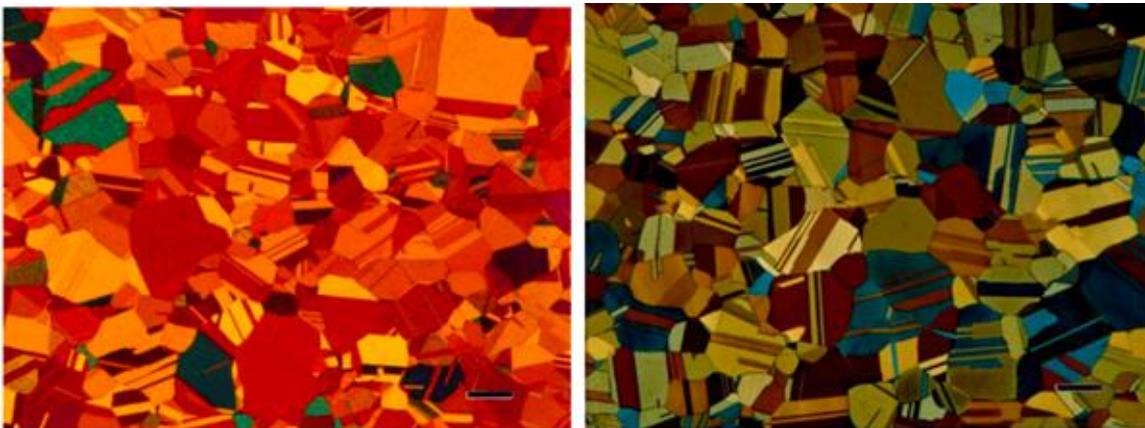


Figura 2.2.44. e Figura 2.2.45. Estrutura de grão geminada FCC do latão de cartucho, Cu - 30% Zn, após redução a frio de 50% e recozimento total, tingida com os reagentes Klemm's I (esquerda) e Klemm's III (direita) e vista com luz polarizada mais tinta sensível. As barras de ampliação têm 200- μm de comprimento, respetivamente (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

Klemm's I, II, III (Figuras 2.2.12 e 2.2.13) e um dos reagentes de Beraha utilizam ambos os ingredientes (Figura 2.2.13), enquanto Beraha recomenda uma gama de concentrações de HCl utilizadas com metabissulfito de potássio (Figura 2.2.14) para gravar uma variedade de ligas à base de ferro.

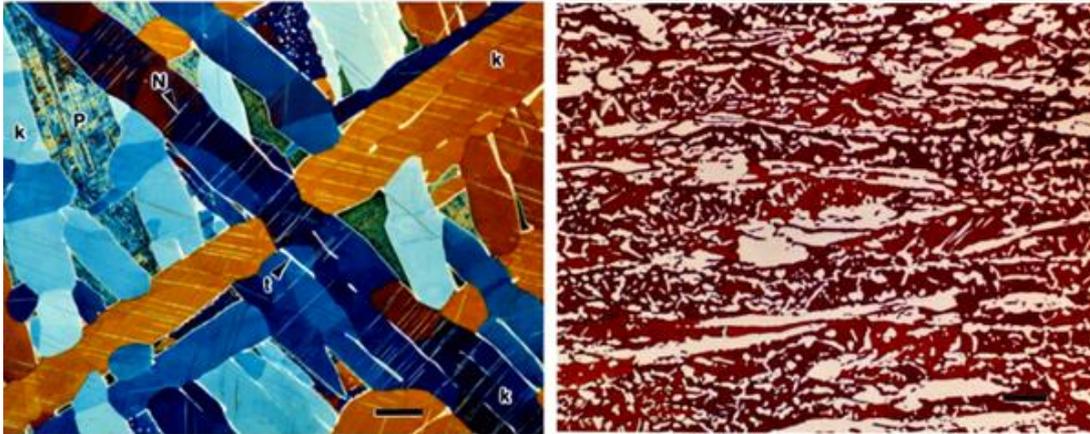


Figura 2.2.46. e Figura 2.2.47.: Estrutura fina do grão de octaedrite do meteorito de Gibeon (esquerda) revelada com o reagente de Beraha (100 mL de água, 10 g Na S O₂₂₃ e 3 g K S O₂₂₅) e ferrite em placa de aço inoxidável duplex 7 Mo PLUS revelada com o reagente de Beraha (85 mL de água, 15 mL HCl, 1 g K S O₂₂₅). As barras de ampliação têm 500 e 50 µm de comprimento, respectivamente [2.2.10].

Estes corantes podem ser utilizados para corar a ferrite e a martensite do ferro fundido, do carbono e dos aços de baixa liga. Os reagentes à base de HCl variam muito em concentração e podem ser utilizados para corar as estruturas dos grãos dos aços inoxidáveis (2.2.15), das ligas à base de Ni e das ligas à base de Co. O metabissulfito de sódio tem sido utilizado em várias concentrações, de cerca de 1 a 20 g por 100 ml de água, e é um corante seguro, fiável e útil para ferros e aços. (fonte: Vac Aero Coloured Metallography).

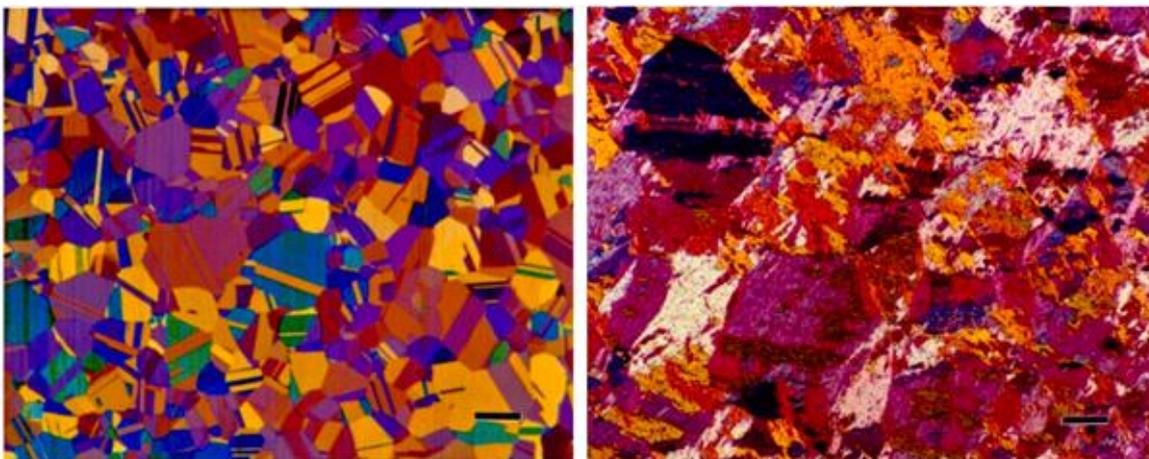


Figura 2.2.48. e 2.2.49: Estrutura de grão geminada FCC do aço inoxidável Custom Flo 302 de qualidade de topo revelada utilizando o reagente B1 de Beraha e estrutura de grão de martensite em ripas do aço de ultra-alta resistência AerMet 100 sobre-austenitizado (1093 °C) revelada utilizando metabissulfito de sódio a 10%. Ambos visualizados com luz polarizada e cor sensível. As barras de ampliação têm 100 µm de comprimento (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

Beraha também desenvolveu agentes de corrosão à base de ácido sulfâmico, um ácido orgânico de baixa concentração, que não tem sido muito utilizado, embora seja bastante útil, fiável e



fácil de usar. Os reagentes à base de ácido sulfâmico são aplicáveis ao ferro fundido, aços de baixo carbono e ligas, aços para ferramentas e aços inoxidáveis martensíticos (Figura 2.2.17). A Beraha também desenvolveu dois corantes bastante especializados que depositam películas de sulfureto de cádmio (Figura 2.2.18) ou de sulfureto de chumbo (Figura 2.2.19) nas superfícies dos aços e das ligas à base de cobre. Estes dois agentes de corrosão são bastante úteis, embora sejam tóxicos para trabalhar. O seu reagente CdS é útil para aços-carbono e ligas, aços-ferramenta e aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação, enquanto o reagente PbS faz um excelente trabalho em ligas à base de cobre e pode ser utilizado para colorir sulfuretos em aços, de branco (a amostra é pré-gravada com nital e a gravação colore a matriz escurecida, de modo a que os sulfuretos brancos sejam visíveis).

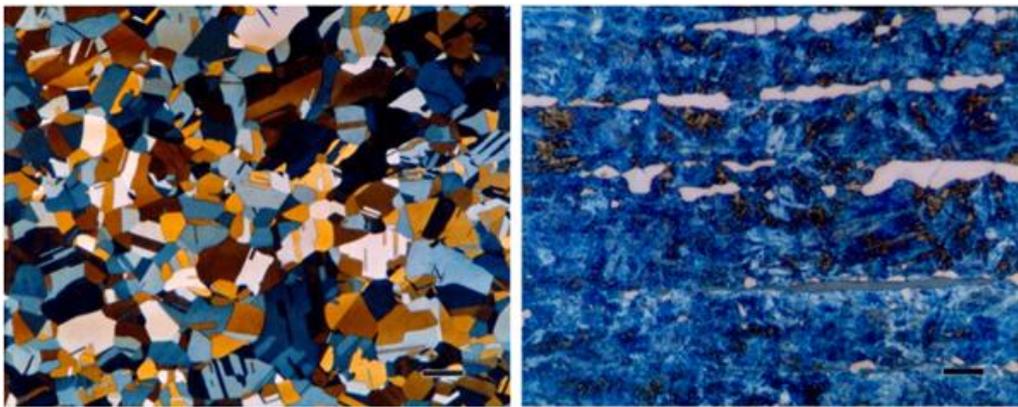


Figura 2.2.50. e 2.2.51: Estrutura de grão de FCC geminada em Fe-39% Ni revelada pelo reagente de ácido sulfâmico de Beraha (esquerda) e estrutura de grão de martensite temperada de aço inoxidável martensítico 416 revelada com o reagente de CdS de Beraha (direita). Os grãos brancos são ferrite delta e as inclusões cinzentas são sulfuretos. Observado com luz polarizada e tonalidade sensível. As barras de ampliação têm 100 e 200 μm de comprimento, respetivamente (fonte: Struers)



Figuras 2.2.52 e 2.2.53: Micrografia do latão do cartucho apresentado nas Figuras 2.2.11 e 2.2.12, corado com o reagente PbS de Beraha (esquerda) e cementite numa liga binária Fe-1% C laminada a quente, corada com o reagente molibdato de sódio de Beraha (direita). As barras de ampliação são de 200 e 20 μm , respetivamente, (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)



Beraha também desenvolveu dois corantes que utilizam iões molibdato em ácido nítrico. Estes coram a cementite nos aços (Figura 2.2.52). Beraha também desenvolveu corantes que depositam selénio elementar na superfície dos aços (Figura 2.2.53), das ligas à base de níquel e das ligas à base de cobre (Figura 2.2.54).

Há uma série de outros corantes que foram desenvolvidos por uma variedade de metalografias. Lichtenegger e Blöch, por exemplo, desenvolveram um reagente invulgar que irá colorir a austenite (Figura 2.2.56) nos aços inoxidáveis duplex, em vez da ferrite (como quase todos os outros fazem).

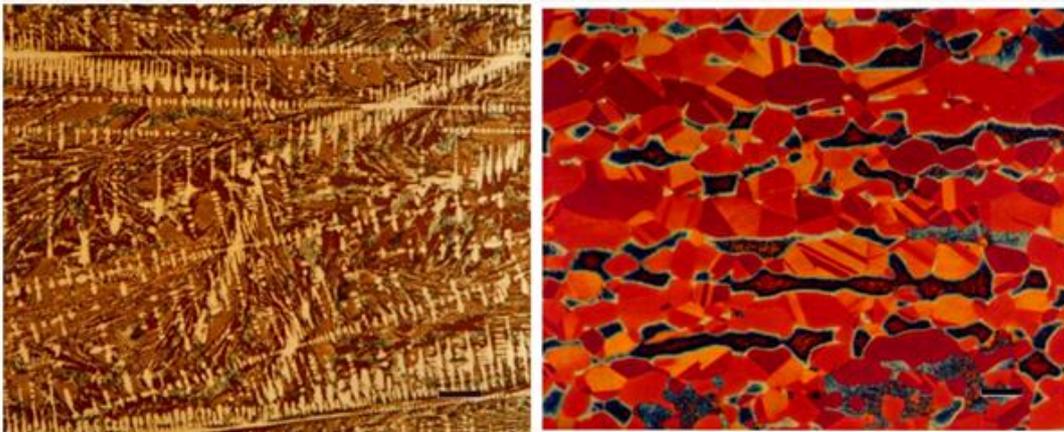


Figura 2.2.54. e 2.2.55: Cementite na superfície de fundição a frio de ferro cinzento gravada com o reagente de ácido selénico de Beraha para ferro fundido (esquerda) e fase alfa e fase beta geminadas de FCC (mosqueadas e delineadas) em Cu-40% Zn reveladas usando o reagente de ácido selénico de Beraha para ligas de cobre. As barras de ampliação têm 50 e 20 μm de comprimento, respetivamente (fonte: Struers)

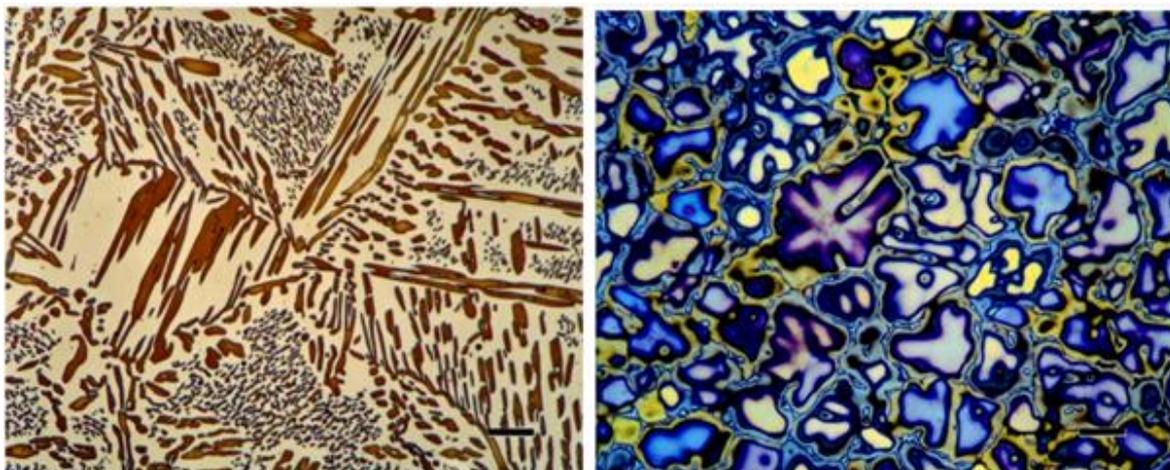


Figura 2.2.56. e 2.2.57: Austenite corada no aço inoxidável duplex fundido ASTM A890 Grau 5A com o reagente LB1 (esquerda) e a estrutura de grão fundido do alumínio 206 revelada utilizando o reagente de Weck para ligas de Al (direita). As barras de ampliação têm 100 e 50 μm de comprimento, respetivamente, (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)



Weck desenvolveu uma série de corantes, utilizando muitos deles na sua investigação. Vários foram desenvolvidos para colorir alumínio (Figura 2.2.57) ou ligas de titânio (Figura 2.2.58). Em cada caso, é mais fácil desenvolver uma boa cor com as ligas fundidas do que com as ligas forjadas. Dois condicionadores foram considerados úteis para colorir a fase teta, $AlCu_2$, em ligas Al-Cu; Lienard desenvolveu um dos mais fáceis de usar. Foram desenvolvidos vários agentes corantes para o molibdénio (Figura 2.2.59) e para o tungsténio.

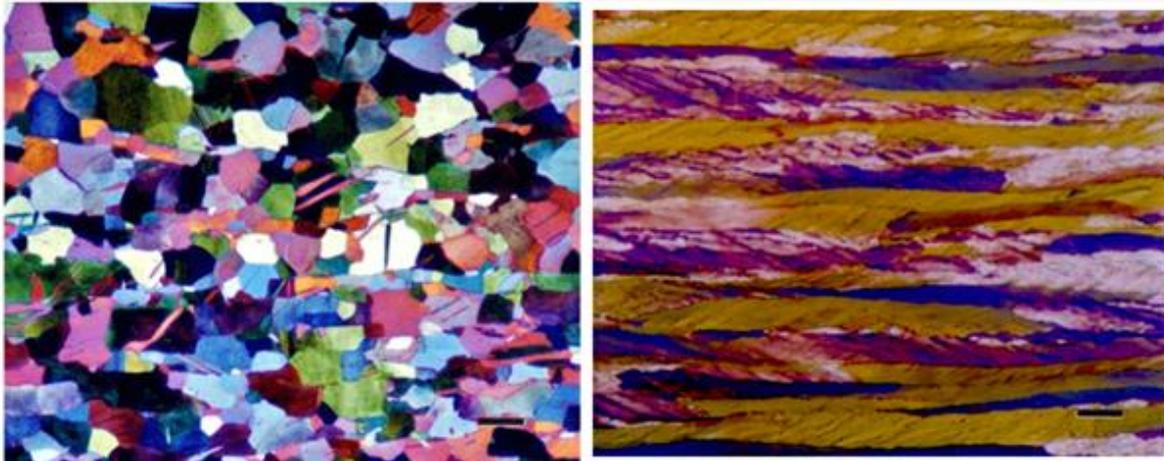


Figura 2.2.58. e 2.2.59: Estrutura dos grãos de Ti CP (ASTM F67, Grau 2) laminado a frio contendo gémeos mecânicos (à esquerda) corados com o reagente de Weck modificado e molibdénio puro laminado a frio (à direita) corado com o reagente desenvolvido pelo Oak Ridge National Laboratory. As barras de ampliação têm 100 e 20 μm de comprimento, respetivamente (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

Processo de gravura:

- O especialista deve mergulhar a amostra metalográfica polida na solução corante.
- O especialista deve monitorizar cuidadosamente o processo de gravação, pois o tempo necessário para a gravação varia consoante o metal e o agente de gravação específico utilizado.
- O especialista deve utilizar um temporizador para garantir que o tempo de gravação é exato.
- O especialista deve retirar a amostra do condicionador no final do tempo de condicionamento pré-determinado.

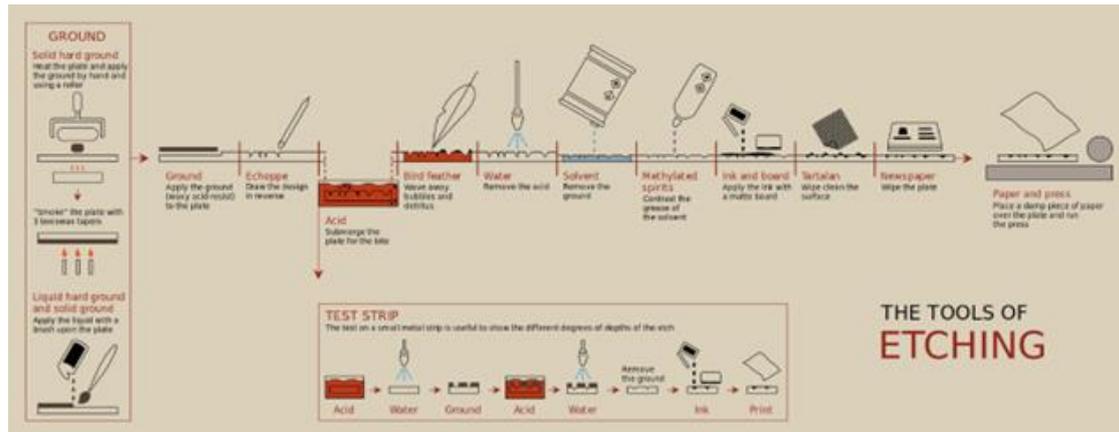


Figura 2.2.60. As ferramentas da técnica moderna da gravura (fonte: Wikipedia)

Enxaguamento e limpeza:

- O especialista deve enxaguar bem a amostra gravada com água destilada para remover qualquer resíduo de corrosão.
- O especialista deve utilizar uma escova macia ou um esfregão para limpar suavemente a superfície, se necessário.



Figura 2.2.61. Água destilada para enxaguamento de amostras (fonte: Mirco Lit)

Exame microscópico:

- O especialista deve deixar a amostra secar ou utilizar ar comprimido para remover o excesso de humidade.
- O especialista deve examinar a amostra gravada ao microscópio para observar as características microestruturais coloridas.
- O especialista deve documentar e fotografar os resultados para análise e registo.



Figura 2.2.62. Microscópios metalúrgicos (fonte: Nikon)

Repetibilidade e otimização:

Se necessário, o especialista deve repetir o processo com variações no tempo de condicionamento ou na concentração do condicionador para otimizar os resultados e melhorar o contraste.

A preparação adequada das amostras e o cumprimento das precauções de segurança são essenciais para obter resultados exactos e significativos.

2.2.7 Problemas comuns e solução quando se utiliza a gravação a cores para a preparação de amostras metalográficas

Quando se utiliza a gravação a cores para a preparação de amostras metalográficas, é essencial controlar cuidadosamente as condições de gravação, compreender a química do agente de gravação e manter uma preparação meticulosa da amostra para obter os resultados desejados e uma análise microestrutural precisa. A experimentação e a prática são frequentemente necessárias para otimizar o processo de gravação para materiais e microestruturas específicos.

Problemas comuns

Contraste ou desenvolvimento de cor inadequados

Questão: A amostra gravada não apresenta o contraste ou as cores esperadas.

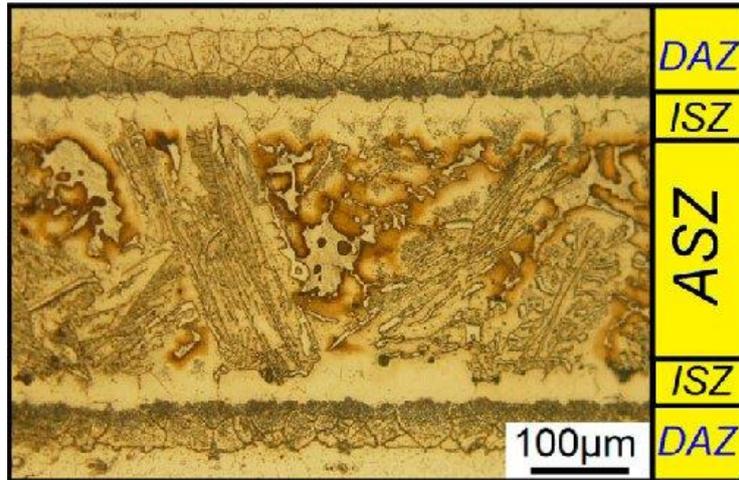


Figura 2.2.63. Micrografia ótica mostrando o gradiente da microestrutura na junta soldada HX/Ni-13Cr-4.5Si-4.2Fe-2.8B/HX. (fonte: Ghasemi, Ali & Pouranvari, Majid. (2018). Formação de fase intermetálica durante a brasagem de uma liga de níquel usando uma liga de enchimento quinária Ni-Cr-Si-Fe-B. Ciência e tecnologia da soldadura e união. 24. 1-10. 10.1080/13621718.2018.1553280.)

Solução: O especialista verifica a compatibilidade do agente de corrosão com o metal e a microestrutura específicos e tem de garantir que a concentração do agente de corrosão e o tempo de corrosão são adequados para a amostra. Considerar a possibilidade de utilizar agentes de corrosão alternativos que possam proporcionar melhores resultados.

Sobre-impressão

Questão: A sobrecondensação ocorre quando a amostra apresenta um desenvolvimento excessivo da cor, tornando difícil discernir as características microestruturais.

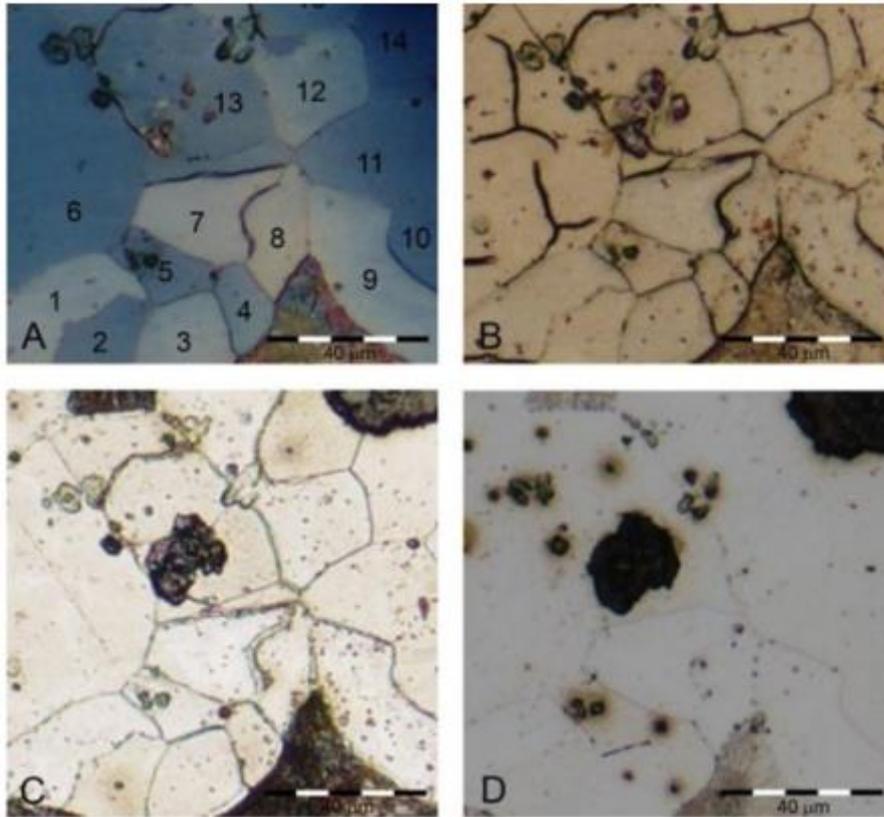


Figura 2.2.64. Micrografias ópticas do espécime (A) após ataque colorido com a solução de Beraha-I, (B) após sobre ataque com a solução de Beraha-I, (C) após remoção da camada interferente com ácido sulfúrico a 1% e (D) após ataque com Nital. (fonte: Ghasemi, Ali & Pouranvari, Majid. (2018). Formação de fase intermetálica durante a brasagem de uma liga de níquel usando uma liga de enchimento quinária Ni-Cr-Si-Fe-B. Ciência e tecnologia da soldadura e união. 24. 1-10. 10.1080/13621718.2018.1553280.)

Solução: O especialista deve reduzir o tempo ou a concentração de corrosão para evitar o excesso de corrosão e monitorizar de perto a amostra durante a corrosão para evitar o desenvolvimento excessivo da cor.

Sub-impressão

Problema: A amostra não apresenta o nível de cor ou contraste pretendido.

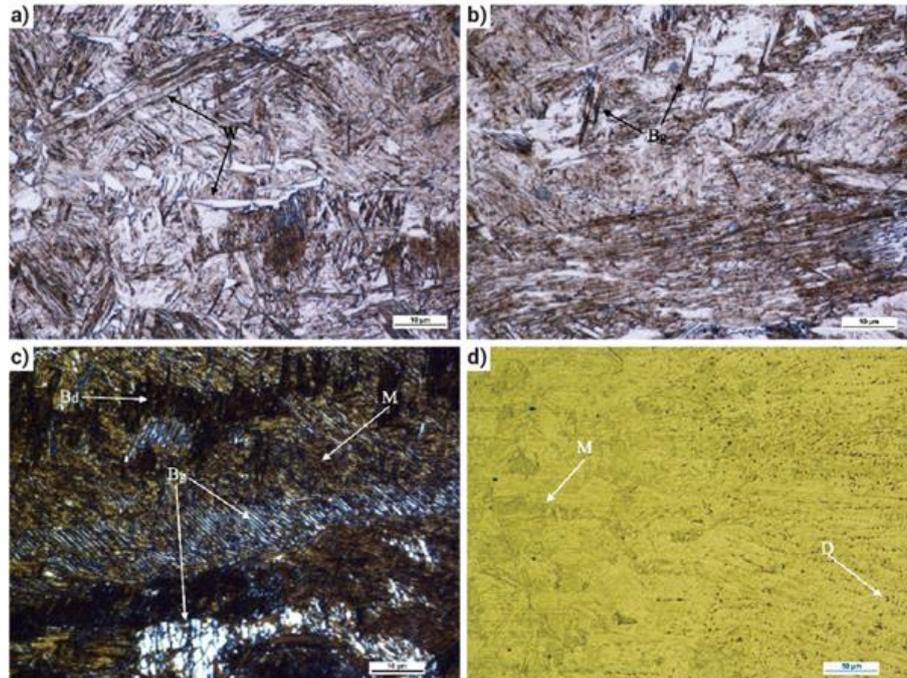


Figura 2.2.65. Microestrutura do aço TRIP, LOM: a) ZTA, Nital etched, b) Zona de fusão, Nital etched, c) Zona de fusão, Nital + reagente Klemm etched, d) Zona de fusão e ZTA, Pikral etched (fonte: Dobras, Daniel & Rutkowska-Gorczyca, Małgorzata. (2018). Aplicação de gravura a cores para estudar a microestrutura do aço TRIP após a refusão a laser. Revisão da tecnologia de soldadura. 90. 10.26628/wtr.v90i12.984.)

Solução: O especialista deve aumentar o tempo de gravação ou a concentração para obter o contraste desejado. Deve assegurar-se de que a superfície da amostra está devidamente limpa e isenta de contaminantes antes da gravação.

Distribuição desigual da cor

Problema: As cores não estão distribuídas uniformemente na amostra, resultando em variações no contraste.



Figura 2.2.66. Gravura a cores de várias zonas de grão ou de mistura de cristais e camadas de sulfato de diferentes espessuras - Ligação por soldadura a laser de vários fios de aço austenítico (B) (fonte: Leica Microsystems)



Solução: O especialista deve melhorar a preparação da amostra, garantindo um acabamento consistente antes da gravação e agitar a solução de gravação durante o processo para manter uma distribuição uniforme da cor.

Manchas ou descoloração

Problema: A amostra pode apresentar uma coloração ou descoloração indesejada durante o processo de gravação.



Figura 2.2.67. Diferenças de concentração num fio de bronze (K) (fonte: Leica Microsystems)

Solução: O especialista deve analisar a compatibilidade do agente de corrosão com o metal e a microestrutura e garantir que a amostra é devidamente limpa antes da gravação para evitar contaminantes que possam causar manchas.

Contaminação

Questão: Os contaminantes na superfície da amostra podem interferir com o processo de gravação.

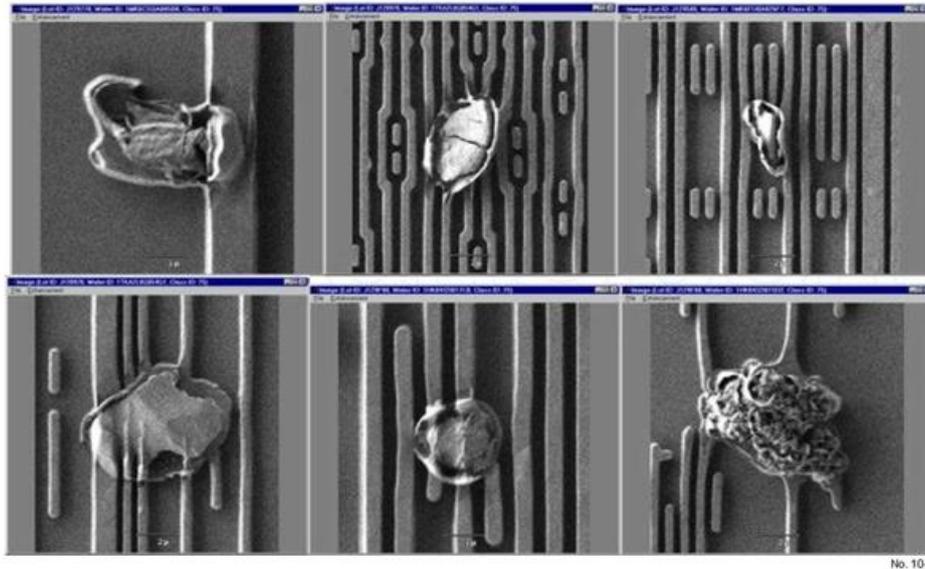


Figura 2.2.68. Defeitos assassinos gerados em processos de gravação de metais de alumínio. (fonte: Steel Data)

Solução: O especialista deve limpar e desengordurar cuidadosamente a amostra antes da gravação para remover os contaminantes. Utilizar equipamento de laboratório limpo, como recipientes e escovas, para minimizar o risco de contaminação.

Precauções de segurança

Questão: Precauções de segurança inadequadas podem levar à exposição pessoal a agentes de corrosão perigosos.



Figura 2.2.69. Equipamento de proteção individual (EPI) (fonte: MicroLit)

Solução: O técnico deve aderir a protocolos de segurança adequados e utilizar equipamento de proteção individual (EPI), incluindo óculos de segurança, luvas e uma bata de laboratório, e trabalhar numa área bem ventilada ou sob uma hotte para reduzir a exposição a fumos.

Resultados inconsistentes

Questão: A obtenção de resultados consistentes em diferentes amostras pode ser um desafio.



Solução: O técnico deve manter um controlo preciso da concentração do condicionador, do tempo de condicionamento e das técnicas de preparação de amostras para obter repetibilidade e documentar e normalizar o processo de condicionamento para obter resultados consistentes.

Manutenção inadequada de registos

Problema: A documentação deficiente dificulta a análise e a reprodução dos resultados.

Solução: O técnico deve manter registos detalhados do processo de gravação, incluindo a composição, a concentração, o tempo de gravação e as características da amostra, para facilitar a análise futura e a resolução de problemas.

2.2.8 Manuseamento e eliminação de reagentes da Gravura a Cores

O manuseamento e a eliminação dos reagentes utilizados na gravação a cores são aspectos críticos das práticas laboratoriais seguras e ambientalmente responsáveis. Os reagentes de gravação a cores contêm frequentemente produtos químicos que podem ser perigosos, pelo que é essencial seguir os procedimentos adequados para o manuseamento e eliminação destes materiais. O manuseamento e a eliminação adequados dos reagentes utilizados na gravação a cores são essenciais para manter um laboratório seguro e ambientalmente responsável. Dê sempre prioridade à segurança e ao cumprimento dos regulamentos locais quando trabalhar com materiais perigosos.

Manuseamento de reagentes para gravura a cores

Equipamento de proteção individual (EPI): O especialista deve usar equipamento de proteção individual adequado, incluindo óculos de segurança, luvas, uma bata de laboratório ou vestuário de proteção e, possivelmente, uma proteção facial para proteger contra salpicos ou contacto com reagentes.

Ventilação: O especialista deve efetuar o manuseamento dos reagentes numa área bem ventilada, como uma hotte ou um espaço com boa ventilação, para minimizar a exposição a fumos ou vapores.

Rotulagem: O especialista deve assegurar que os recipientes que contêm os reagentes estejam claramente rotulados, com os seus nomes, composições, perigos e quaisquer precauções de manuseamento necessárias. É obrigatória a utilização de rótulos específicos e a manutenção de registos.

Utilizar recipientes adequados: O especialista deve armazenar os reagentes em recipientes resistentes a produtos químicos, concebidos para o efeito; os recipientes de vidro ou de plástico são escolhas comuns.

Minimizar o contacto com a pele: O especialista deve evitar o contacto direto da pele com o reagente; se ocorrer contacto, lavar imediatamente a área afetada com água em abundância.

Não comer ou beber: O especialista deve certificar-se de que não come, bebe ou fuma enquanto manuseia os reagentes para evitar a ingestão acidental.



Manusear com cuidado: O especialista deve ter cuidado ao transferir ou misturar reagentes para evitar salpicos ou acidentes.

Verificar a compatibilidade: O especialista deve certificar-se de que os materiais utilizados para manusear os reagentes (recipientes, agitadores, etc.) são compatíveis com o reagente específico e não reagem com ele.

Educação e formação: Todo o pessoal que trabalha com reagentes utilizados na gravação a cores tem de ser instruído sobre os riscos e os procedimentos de segurança; a formação contínua e a sensibilização são cruciais.

Eliminação de reagentes da gravação a cores

Conformidade regulamentar: O laboratório tem de cumprir os regulamentos locais, estatais e federais que regem a eliminação de resíduos perigosos, podendo estes regulamentos variar consoante o local. O especialista tem de manter os diferentes reagentes separados e não os misturar durante a eliminação. Em alguns casos, o especialista pode precisar de neutralizar o reagente antes da eliminação, devendo seguir as directrizes de compatibilidade química para uma neutralização segura.

Consultar especialistas: Se o especialista não tiver a certeza sobre os métodos de eliminação adequados, consulte um químico qualificado, um especialista em eliminação de resíduos ou o departamento de saúde e segurança ambiental da sua organização.

Rotular os contentores de resíduos: O especialista deve rotular claramente os contentores de resíduos com o seu conteúdo e eventuais perigos para garantir um manuseamento seguro durante a eliminação, devendo garantir que os contentores de resíduos estão bem fechados para evitar fugas ou derrames.

Serviços de eliminação de resíduos: O laboratório deve providenciar a recolha e eliminação de resíduos perigosos através de serviços ou instalações de eliminação de resíduos licenciados e autorizados, não devendo tentar eliminar os resíduos perigosos por si próprio. O laboratório tem de manter registos do processo de eliminação, incluindo datas, métodos de eliminação e quaisquer folhas de dados de segurança (SDS) relevantes para referência. Os laboratórios devem estar preparados para emergências e ter kits de resposta a derrames, chuveiros de segurança e estações de lavagem de olhos disponíveis na área onde são manuseados os reagentes da gravação a cores.

2.2.9 Resolução de problemas e dicas em amostras metalográficas gravadas a cores

Vários factores podem influenciar o desenvolvimento da cor na gravação a cores. Estes incluem a composição e a concentração do agente de corrosão, a temperatura, o tempo de corrosão e a preparação da superfície da amostra. Além disso, a presença de elementos de liga, impurezas ou orientações cristalográficas específicas pode afetar a intensidade e o contraste da cor.

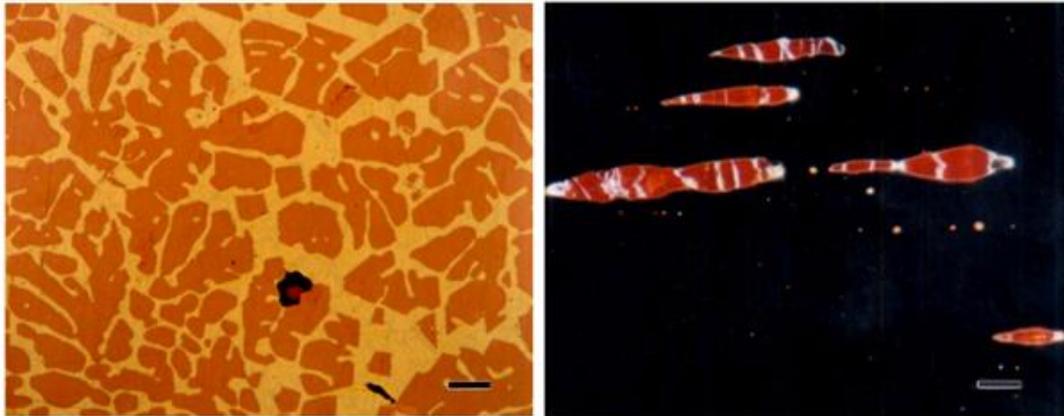


Figura 2.2.70. (esquerda) e 2.2.71 (direita) mostrando a cor natural púrpura-avermelhada do intermetálico $AuAl_2$ (esquerda) em campo claro e a cor vermelha rubi característica do óxido cuproso em iluminação de campo escuro (amostra de cobre eletrolítico). As barras de ampliação são de 50 e 10 μm respetivamente (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

A compreensão destes factores é crucial para conseguir um desenvolvimento de cor e contraste óptimos na gravação a cores. É necessário um controlo cuidadoso e a otimização dos parâmetros de gravação para obter resultados fiáveis e reproduzíveis.

2.2.10 Exemplos reais de gravura a cores

A gravação a cores é uma técnica utilizada no domínio da metalografia para revelar e realçar características microestruturais específicas em materiais metálicos. Nas indústrias automóvel e aeroespacial, a gravação a cores é frequentemente utilizada para inspecionar soldaduras em materiais como o alumínio e o aço. Esta técnica ajuda a revelar a integridade da soldadura, a presença de defeitos e a qualidade do cordão de soldadura e da zona afetada pelo calor. A gravação a cores é uma ferramenta importante na engenharia forense e na análise de falhas. Ajuda a identificar as causas das falhas dos componentes, tais como a presença de fissuras, vazios ou inclusões num material. Nos sectores da construção e da engenharia civil, a gravação a cores é utilizada para inspecionar componentes estruturais de aço. Ajuda a avaliar a qualidade do aço e a presença de quaisquer inclusões, segregações ou defeitos que possam comprometer a integridade estrutural. A gravação a cores é utilizada para examinar componentes de motores, como pistões e cambotas. Ajuda a avaliar a qualidade do material e a detetar quaisquer defeitos ou irregularidades que possam afetar o desempenho.

Os fabricantes de aeronaves e as instalações de manutenção utilizam a gravação a cores para inspecionar componentes críticos como as pás das turbinas e os trens de aterragem. Esta técnica ajuda a identificar problemas microestruturais que podem levar à falha do componente. No fabrico de implantes e dispositivos médicos, a gravação a cores é utilizada para avaliar a qualidade e

a integridade de materiais como o aço inoxidável, o titânio e as ligas de cobalto-crómio. Ajuda a garantir que os dispositivos médicos cumprem as rigorosas normas de segurança e desempenho.

Na indústria dos semicondutores, a gravação a cores é utilizada para inspecionar a qualidade das bolachas de silício. A técnica pode revelar defeitos cristalográficos, limites de grão e outras características que podem afetar o desempenho dos dispositivos semicondutores. A gravação a cores é utilizada em ensaios não destrutivos de materiais utilizados no sector do petróleo e do gás. Ajuda a identificar falhas ou pontos fracos em componentes como condutas, vasos de pressão e soldaduras, garantindo a sua fiabilidade e segurança.

Os investigadores e engenheiros utilizam a gravura colorida para estudar a microestrutura de vários materiais, incluindo metais e ligas. É utilizada para identificar os limites dos grãos, as fases e as inclusões, que são essenciais para compreender as propriedades e o comportamento dos materiais. Na metalurgia e na ciência dos materiais, utiliza-se a gravura colorida para investigar a microestrutura e a composição de fases de vários metais e ligas. Esta informação é crucial para a conceção e melhoria de materiais para aplicações específicas.

Apêndice

Composições de gravura

I de Klemm	50 mL de solução-mãe, 1 g de K ₂ S ₂ O ₅ (a solução-mãe é água saturada com Na ₂ S ₂ O ₃)
Klemm's III	5 mL de solução de reserva, 45 mL de água, 20 g de K ₂ S ₂ O ₅ (solução de reserva como para Klemm's I)
Reagente 10/3 de Beraha	10g de Na ₂ S ₂ O ₃ , 3g de K ₂ S ₂ O ₅ e 100 mL de água
BI de Beraha	100 mL de solução de reserva (1000 mL de água, 200 mL de HCl, 24 g de NH ₄ FHF) mais 0,1 - 0,2 g de K ₂ S ₂ O ₅ para aço inoxidável martensítico
BI de Beraha	100 mL de solução-mãe (1000 mL de água, 200 mL de HCl, 24 g de NH ₄ FHF) mais 0,3 - 0,6 g de K ₂ S ₂ O ₅ para aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.
Reagente do ácido sulfâmico n.º III de Beraha	100 mL de água, 3 g de K ₂ S ₂ O ₅ , 2 g de NH ₂ SO ₃ H (foram publicadas duas outras composições semelhantes) para aços-carbono e aços-liga.
Reagente do ácido sulfâmico de Beraha n.º IV	100 mL de água, 3 g de K ₂ S ₂ O ₅ , 1 g de NH ₂ SO ₃ H, 0,5 - 1 g de NH ₄ FHF para aços ferramenta de alto teor de Cr e aços inoxidáveis martensíticos.

Reagentes de CdS e PbS de Beraha	Solução de reserva de CdS: 1000 mL de água, 240 g de Na ₂ S ₂ O ₃ - 5H ₂ O, 20-25 g de cloreto de cádmio (ou acetato de cádmio), 30 g de ácido cítrico; solução de reserva de PbS: 1000 mL de água, 240 g de Na ₂ S ₂ O ₃ - 5H ₂ O, 30 g de ácido cítrico, 24 g de acetato de chumbo
Reagente de ácido selénico de Beraha para ferro fundido	100 etanol, 2 mL de HCl, 1 mL de ácido selénico

2.2.11 Compreender e descrever as diferenças em termos dos seus efeitos no acabamento da superfície e na microestrutura da amostra

Análise da microestrutura e exame de amostras preparadas através da técnica de gravura colorida

A análise e o exame da microestrutura são passos essenciais no estudo dos materiais para compreender a sua estrutura interna, limites de grão, fases, defeitos e outras características microestruturais.

Cada uma das técnicas de tratamento de superfície - polimento eletrolítico, gravura colorida - oferece vantagens e considerações únicas para a análise da microestrutura:

Análise da microestrutura após polimento eletrolítico:	Análise da microestrutura após gravura colorida:
<p>O polimento eletrolítico produz superfícies lisas e espelhadas em amostras de metal sem introduzir deformação mecânica.</p> <p>As microestruturas reveladas após o polimento eletrolítico são menos susceptíveis de serem alteradas por artefactos de superfície em comparação com outras técnicas.</p> <p>Após o polimento eletrolítico, a amostra de metal pode ser observada diretamente num microscópio ótico ou eletrónico para análise microestrutural.</p> <p>Os limites de grão, os limites de fase e as inclusões podem ser claramente identificados e analisados.</p>	<p>A gravura colorida utiliza gravuras específicas para revelar e realçar diferentes características microestruturais nas superfícies metálicas, proporcionando um contraste de cores ou tonalidades.</p> <p>A gravação colorida é particularmente útil para distinguir diferentes fases, limites de grão e compostos intermetálicos na microestrutura.</p> <p>O contraste proporcionado pela gravação a cores facilita a identificação e a caracterização dos constituintes microestruturais.</p> <p>Deve ter-se o cuidado de utilizar agentes de corrosão adequados e procedimentos normalizados para garantir resultados fiáveis e precisos.</p>



De um modo geral, as duas técnicas - polimento eletrolítico e gravação a cores - desempenham papéis importantes na análise da microestrutura. A escolha da técnica depende dos requisitos específicos da análise, do material em estudo e do nível desejado de acabamento e precisão da superfície. Nalguns casos, podem ser combinadas várias técnicas para obter uma compreensão abrangente da microestrutura do material. Além disso, deve ter-se o cuidado de evitar a introdução de artefactos que possam induzir em erro a análise microestrutural. As técnicas avançadas de microscopia, como a microscopia eletrónica de varrimento (SEM) e a microscopia eletrónica de transmissão (TEM), são frequentemente utilizadas para obter um exame de alta resolução da microestrutura após o tratamento de superfície.

Referências

1. <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/how-does-electropolishing-work/>
2. <https://www.kemet-international.com/ca/products/metallography>
3. <http://www.ral.neu.edu.cn/RAL/2012/1001/c4716a91534/pagem.htm>
4. <http://www.ral.neu.edu.cn/RAL/2012/1001/c4716a91534/pagem.htm>;
5. <https://www.steeldata.info/ms/demo/semi/help/defects/10.html>
6. <https://www.microlit.com/a-beginners-guide-to-understanding-liquid-handling/>
7. <https://www.plusivo.com/>
8. <https://www.pbo.co.uk/expert-advice/how-to-polish-stainless-steel-in-the-workshop-at-home-64115>
9. <https://cr4.globalspec.com/thread/49091/Streaks-on-Machined-SS304-after-Electropolishing>
10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Etching>
11. <https://www.quora.com/What-are-the-different-types-of-electrolytes>
12. <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>
13. <https://www.kemel.com>;
14. <https://www.valencesurfacetech.com/the-news/electropolishing-for-aerospace>;
15. <https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw>;
16. <https://www.buehler.com/products/grinding-and-polishing/>;
17. <https://www.youtube.com/watch?v=NI06GygDpSA>;
18. <https://www.struers.com/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#etching>;
19. https://www.youtube.com/watch?v=LihfJ8uyh_w;
20. <https://www.youtube.com/watch?v=9VpOldhTBXA>;



21. <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>;
22. G. F. Vander Voort, *Metallography: Principles and Practice*, McGraw-Hill Book Co., NY, 1984 e ASM International, Materials Park, Ohio, 1999;
23. <https://www.youtube.com/watch?v=Qfgf35wPWgo&t=11s>;
24. https://www.keyence.eu/landing/lpc/1807-vh-metallurgical-micro-scope.jsp?aw=KIB01kw0_11629853&gclid=CjwKCAjw2K6IBhBXEiwA5RjtCdtbWTwPZtL6jzu6Ayh0c9LwKbVysrfp7MCHirLbaR1t_ntJveeSBxoCCWkQAvD_BwE;
25. Yang, G., Wang, B., Tawfiq, K., Wei, H., Zhou, S., & Chen, G. (2016). Electropolimento de superfícies: teoria e aplicações. *Engenharia de Superfícies*, 33(2), 149-166;
26. [Acquesta, A.; Monetta, T. Green Approach for Electropolishing Surface Treatments of Additive Manufactured Parts: A Comprehensive Review. *Metals* 2023, 13, 874. <https://doi.org/10.3390/met13050874>;
27. Alrbaey, K.; Wimpenny, D.I.; Al-Barzinjy, A.A.; Moroz, A. Electropolishing of Re-melted SLM Stain-less Steel 316L Parts Using Deep Eutectic Solvents: 3 × 3 Full Fatorial Design. *J. Mater. Eng. Per-form.* 2016, 25, 2836-2846;
28. Hernández-García, D. Saldaña Garcés, R. Vázquez, Friction Stir Welding of Dissimilar AA7075-T6 to AZ31B-H24 Alloys, *MRS Advances*, (2017), 2. 1-9. [10.1557/adv.2017.609](https://doi.org/10.1557/adv.2017.609).

2.3A análise de imagens como ferramenta no exame metalográfico

Os metalurgistas têm confiado, em geral, em descrições qualitativas de microestruturas, para algumas amostras a precisão de tal classificação, embora limitada, é adequada para o objetivo pretendido, mas em muitos casos, é muito importante obter informações quantitativas; hoje em dia, o software moderno de análise de imagem ligado a microscópios de luz permite a formação de um resultado quantitativo, como medidas lineares ou de área ou percentagens de fases ou porosidade.

Em metalografia, a análise de imagens refere-se mais frequentemente à avaliação quantitativa digital de uma imagem da microestrutura. Os sistemas modernos de análise de imagem tornaram-se uma ferramenta importante para medições quantitativas de aspectos microestruturais; as medições quantitativas são tipicamente de comprimento, largura e área, e são utilizadas para a avaliação de características metalográficas, tais como tamanho de grão, inclusões, camadas, fases ou outros constituintes.

No passado, as medições tinham de ser efectuadas em projectores de imagem, com uma ampliação igual à das objectivas, ou em fotomicrografias, para as quais o conceito de ampliação real era importante. Atualmente, os programas modernos permitem associar a imagem visualizada à



objetiva e efetuar medições directas no ecrã do monitor. Isto permite efetuar análises quantitativas imediatas, evitando a utilização de parâmetros de correção.

Em geral, devem ser tomadas as seguintes precauções para obter resultados fiáveis e repetíveis.

2.3.1 Amostragem e preparação de amostras

As amostras devem ser seleccionadas e preparadas adequadamente. A amostragem aleatória é frequentemente utilizada para obter dados estatisticamente significativos, porque isto implica que todas as regiões e orientações de um item metálico têm a mesma oportunidade de serem cortadas e testadas. No entanto, muitas vezes isso não é possível e a amostragem deve ser efectuada com base na avaliação do componente investigado (por exemplo, junta de soldadura).

É difícil estabelecer regras rígidas relativamente ao número e à localização das amostras de ensaio.

Depois de as amostras serem cortadas e identificadas, devem ser preparadas para o exame. A preparação das amostras (polimento e gravação) deve ser efectuada cuidadosamente para evitar artefactos como distorções, gravações, arestas arredondadas, etc.

Recomenda-se a utilização de dispositivos automáticos de retificação e polimento para obter a planicidade e a repetibilidade dos resultados.

2.3.2 Seleção do campo

Para muitos tipos de medição, o técnico/operador tem de decidir quantos campos devem ser medidos, como espaçar os campos e qual a melhor ampliação; para outros tipos, é indicado nos métodos normalizados ou na especificação do produto (por exemplo, ASTM E562).

Em geral, à medida que se aumenta a ampliação, a área do campo diminui; se a ampliação for aumentada de 100X para 200X, devem ser medidos quatro vezes mais campos para cobrir a mesma área.

A área de medição necessária para obter uma determinada precisão de medição depende da homogeneidade da estrutura. O número de campos observados influencia a exatidão das medições; em geral, para reduzir a exatidão observada para metade do valor obtido após um número x de medições, devem ser efectuadas quatro vezes x medições adicionais.

2.3.3 Medições 2D

Os principais resultados quantitativos que podem ser solicitados na análise metalográfica são as medições lineares ou de área. Normalmente, todos os programas de aquisição de imagens permitem efetuar medições directas em tempo real no monitor, associando a ampliação correcta em função do objeto utilizado.



Normalmente, são necessárias medições lineares, tais como medições de comprimento, espessura ou área por linhas fechadas ou elaboração de imagens (por contraste).

Estas medições devem ser consideradas sujeitas a um erro estatístico que pode ser calculado com base em procedimentos de controlo periódico com micrómetros certificados e dados fornecidos pelo fabricante do microscópio.

Os principais casos em que pode ser necessário são indicados a seguir.

- Medidas características das juntas de soldadura (garganta de soldadura a, lados de soldadura Z, comprimento das imperfeições)
- Profundidade de descarbonetação.
- Profundidade dos tratamentos térmicos de superfície (endurecimento superficial, cementação, nitruração, cianetação, etc.).
- Espessura do revestimento (revestimento metálico, revestimento orgânico, revestimento cerâmico, projeção térmica).
- Profundidade de corrosão (após serviço ou ensaio de corrosão).

Devem ser efectuadas várias medições a intervalos espaçados para se obter uma estimativa estatística da profundidade real.

2.3.3.1 Descarburização

Normalmente, a profundidade da descarbonetação é medida por microscópio ótico, a fim de aumentar a precisão da medição, podendo também ser efectuada uma análise da microdureza ou do carbono.

Muitas vezes a espessura da camada de descarbonetação não é uniforme, por exemplo, os cantos das secções rectangulares apresentam maior profundidade de descarbonetação do que as faces, pelo que são seleccionadas várias amostras de diferentes locais de ensaio.

Antes do polimento, a amostra deve ser montada em baquelite ou noutra resina dura para evitar o arredondamento dos bordos.

A microestrutura é revelada utilizando "Nital" ou "Picral" ou outros reagentes, conforme necessário.

A profundidade da descarbonetação é medida utilizando o software de aquisição do microscópio, depois de se verificar devidamente se a ampliação no ecrã está correcta.

A ampliação é escolhida com base na estrutura observada e o técnico/operador deve efectuar pelo menos cinco medições, em locais aleatórios ao longo da superfície de cada amostra, podendo depois calcular a média e o desvio padrão.

Se estiver presente uma camada de ferrite livre, a medição da espessura é mais fácil porque existe um bom contraste entre esta zona e a camada adjacente parcialmente descarbonizada.



Numa amostra de aço perlítico de ferrite hipoeutectoide, o operador procura a profundidade em que a quantidade de perlite e ferrite parece tornar-se constante.

Embora a avaliação seja mais difícil numa amostra em que a camada parcialmente descarbonetada é constituída por martensite e/ou bainite, não se observa uma diferença clara.

2.3.3.2 Profundidade dos tratamentos térmicos de superfície

Os tratamentos de cementação, nitretação, cianetação e endurecimento por chama ou indução podem ser medidos com o mesmo método que a descarbonetação. A precisão do método microscópico depende das microestruturas da superfície e do núcleo. Por exemplo, a carburação é mais fácil de avaliar no aço não endurecido, enquanto a nitretação pode ser difícil de estimar.

Muitas vezes, é preferível determinar a profundidade através de medições de microdureza ou de análises químicas.

2.3.3.3 Espessura do revestimento

Existem vários tipos de revestimento, podemos ter revestimentos metálicos, tais como zincagem, cromagem, niquelagem, revestimentos orgânicos, revestimentos cerâmicos, e obtidos com diferentes processos, tais como a aspersão térmica.

Em geral, a eficácia do revestimento é determinada pela sua espessura e a medição deve ser efectuada em vários campos, com especial atenção para as arestas e os cantos.

2.3.3.4 Profundidade de corrosão

O comportamento à corrosão de uma liga metálica é frequentemente estimado em penetração por unidade de tempo (mm/ano). Por esta razão, a medição da profundidade de corrosão é frequentemente necessária, acima dos testes de serviço ou de corrosão destinados a prever o comportamento de uma liga específica.

Se quisermos estimar a corrosão geral, é necessário conhecer a espessura inicial. A medição de uma corrosão não uniforme ou de uma corrosão localizada é mais fácil do que a de uma corrosão geral.

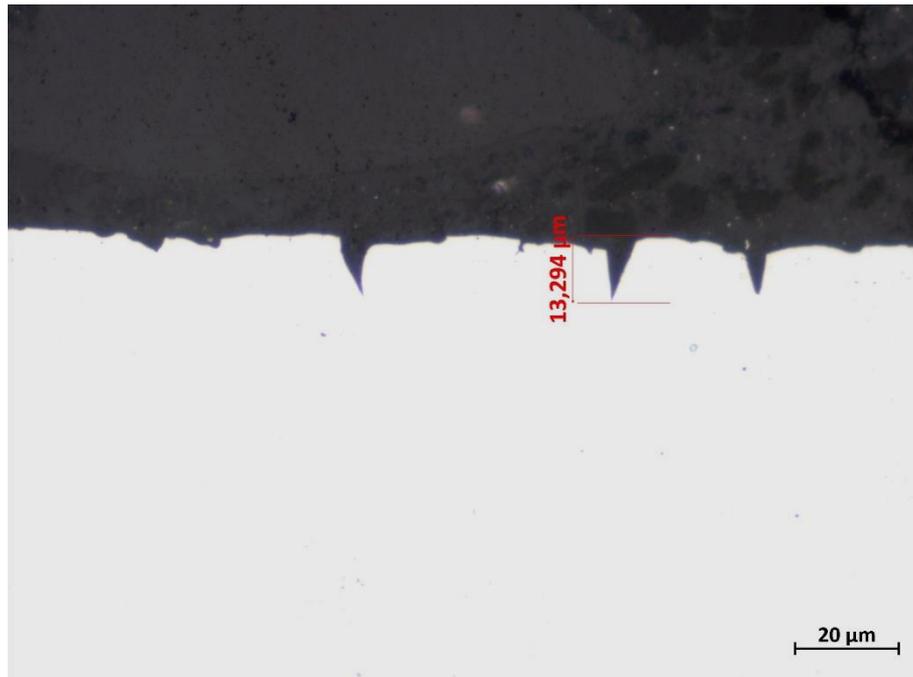


Fig. 2.3.1- Medição da profundidade de corrosão localizada num provete após ensaios de corrosão em laboratório. Fonte: Laboratório IIS

2.3.4 Determinação da fração volumétrica

A determinação da fração volumétrica de uma fase, constituinte e porosidade numa microestrutura é a utilização mais importante e mais comum da análise de imagem.

Normalmente, esta estimativa pode ser efectuada por dois métodos principais:

- Determinação da fração volumétrica pelo método de contagem de pontos (ASTM E562).
- Determinação da fração volumétrica por análise de imagem (ASTM E1245).

A determinação é uma estimativa da fração de área e está sujeita a erros.

2.3.4.1 Contagem de pontos

O método de contagem de pontos para a determinação da fração volumétrica é descrito na norma ASTM E562. Foi proposto por três cientistas diferentes de forma independente (Thomson em 1933, Glasgolev em 1933 e Chalkley em 1943).

Uma grelha de pontos bidimensional (ou unidimensional) é colocada por cima da imagem, sendo depois contados quantos pontos da grelha se encontram na fase a determinar. Atualmente, a grelha é aplicada utilizando os programas de aquisição de imagens.

A ampliação deve ser suficientemente elevada para que a localização dos pontos de ensaio em relação aos elementos possa ser claramente discernida; é importante escolher um compromisso entre a resolução e o tamanho do campo.

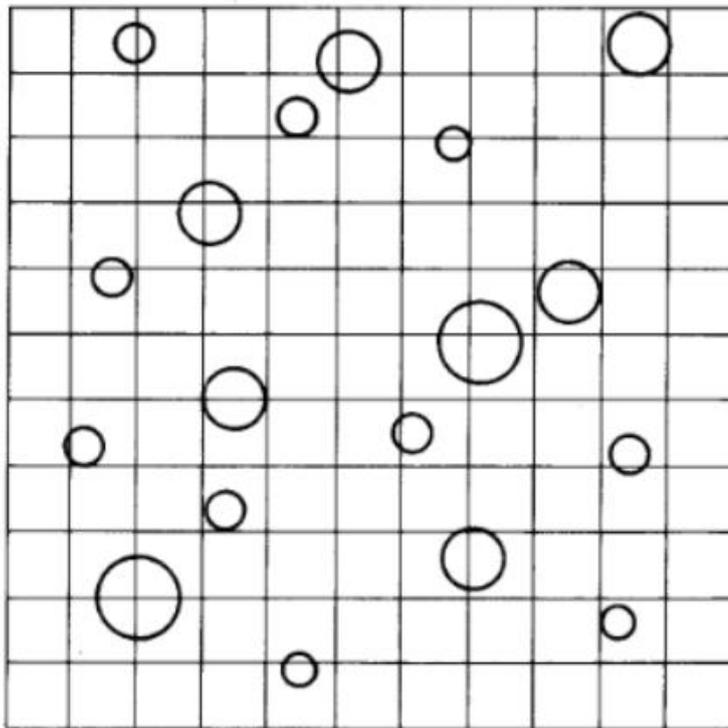
A grelha de pontos deve ser aplicada a um campo selecionado aleatoriamente; os pontos situados na fase de interesse P_a (por exemplo, ferrite delta) são contados, os pontos situados na

partícula ou no limite da fase são contados como metade. A fração de pontos é calculada como se indica a seguir.

$$P_P = \frac{\Sigma P_\alpha}{P_T} = \frac{\Sigma P_\alpha}{nP_0}$$

Onde n é o número de campos, P₀ é o número de pontos da grelha.

São normalmente utilizadas grelhas de pontos de 16, 25, 49, 64 ou 100 pontos; para medir uma fase igual a cerca de 50%, pode ser utilizada uma grelha de 16 pontos. Se a fração de fase diminuir, deve ser utilizada uma grelha de pontos maior (ver tab. 5.1).



Areal analysis

$$V_{V\alpha} = \frac{\Sigma A_\alpha}{A_T} = \frac{\text{areas of circles}}{\text{frame area}} = \frac{884,75}{12,100} = 0.073$$

Lineal analysis

$$L_{L\alpha} = \frac{\Sigma L_\alpha}{L_T} = \frac{\Sigma \text{intercept lengths}}{\text{total line length}} = \frac{152,3}{2200} = 0.069$$

Point count

$$P_{Pa} = \frac{\Sigma P_\alpha}{P_T} = \frac{\Sigma \text{points in } \alpha}{\text{total points}} = \frac{5 + 2 \left(\frac{1}{2}\right)^*}{100} = 0.06$$

*Tangents to particles counted as $\frac{1}{2}$

Fig. 2.3.2- Exemplo que ilustra três métodos para estimar o VV utilizando uma microestrutura idealizada de forma esférica intersectada por um plano de corte. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 - Métodos de ensaio normalizados para a determinação da fração volúmica por contagem manual sistemática de pontos.



<i>Estimativa da fração da área visual Expressa em percentagem</i>	<i>Tamanho da grelha (número de pontos, P)_T</i>
2 a 5 %	100
5 a 10 %	49
10 a 20 %	25
>20 %	16

Tab. 2.3.1 - Orientação para a seleção do tamanho da grelha. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 - Métodos de ensaio normalizados para a determinação da fração volumétrica por contagem manual sistemática de pontos.

Este método pode ser utilizado para determinar a fração de uma fase metálica, um precipitado, inclusões não metálicas ou porosidade.

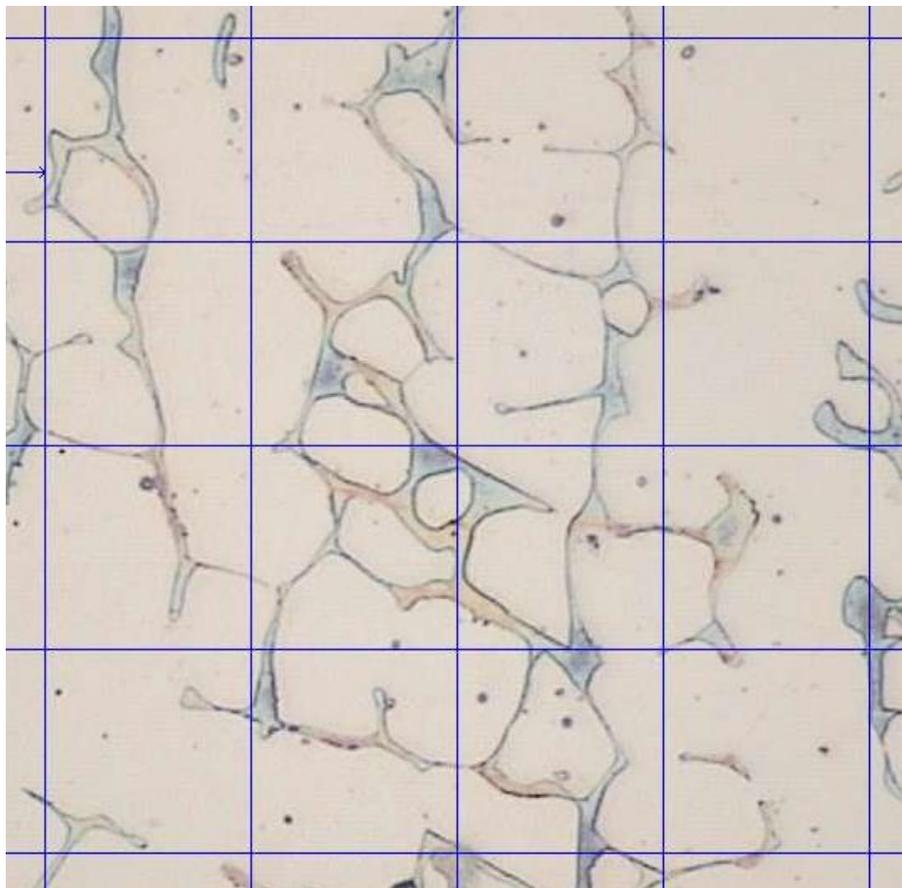


Fig. 2.3.3- Exemplo de determinação da fração volumétrica de ferrite delta por uma grelha de 25 pontos. Fonte: Laboratório do IIS.

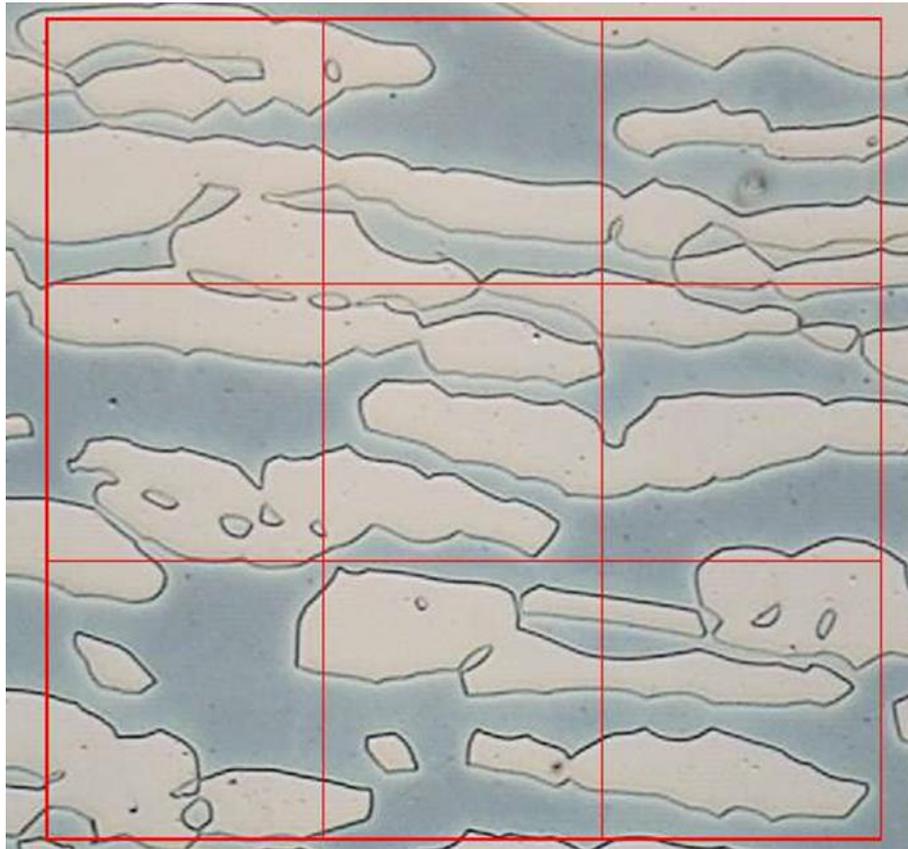


Fig. 2.3.4- Exemplo de determinação da fração volumétrica de ferrite delta por uma grelha de 16 pontos. Fonte: Laboratório do IIS.

2.3.4.2 Determinação da fração de volume por análise de imagem

Como alternativa ao método de contagem de pontos, pode ser utilizado um analisador automático de imagens; este método é descrito na norma ASTM E1245.

A imagem é detectada utilizando um tubo de scanner do tipo televisão e apresentada num monitor de vídeo de alta resolução. As inclusões, as fases e a porosidade são detectadas e realçadas com base nas suas diferenças de intensidade de nível de cinzento em comparação umas com as outras e com a matriz não gravada.

As medições são efectuadas com base na natureza dos elementos de pontos de imagem discriminados na imagem. Estas medições são efectuadas em cada campo de visão selecionado. Avaliação estatística ou variabilidade característica a característica das medições.

Este procedimento não é adequado para avaliar as inclusões exógenas nos aços e noutros metais. Devido à natureza esporádica e imprevisível da distribuição das inclusões exógenas, devem ser utilizados outros métodos que envolvam uma inspeção completa, por exemplo, ultra-sónica, para localizar a sua presença.

Em geral, a orientação do provete de ensaio deve ser paralela ao eixo de trabalho a quente e, mais frequentemente, tomada na localização do quarto de espessura. Podem também ser



recolhidas amostras noutras locais de ensaio, por exemplo, na subsuperfície e no centro, conforme desejado ou necessário.

A superfície a polir deve ser suficientemente grande para permitir a medição de pelo menos 100 campos com a ampliação necessária. É preferível uma superfície mínima de 160 mm².

A preparação dos provetes para metalografia deve ser cuidadosamente controlada para produzir uma superfície de qualidade aceitável para a análise de imagens. O procedimento de polimento não deve alterar o verdadeiro aspeto dos constituintes no plano de polimento, produzindo um relevo excessivo, picadas, fissuras ou arrancamento. Pequenos riscos finos, tais como os provocados por um abrasivo de diamante de 1 µm, não interferem normalmente com a deteção de inclusões, mas os riscos mais pesados devem ser evitados. É necessário efetuar uma limpeza adequada do espécime. Recomenda-se a utilização de um dispositivo automático de lixagem e polimento.

A fonte de luz do microscópio deve ser verificada quanto ao alinhamento correto e a intensidade da iluminação deve ser ajustada ao nível requerido pelo monitor.

Ajuste do sistema de ampliação para proporcionar uma resolução adequada dos constituintes/fases com a maior dimensão de campo possível. A escolha da ampliação óptima é um compromisso entre a resolução e a variabilidade da medição campo a campo. As objectivas de maior ampliação têm uma maior abertura numérica e proporcionam uma melhor resolução. No entanto, à medida que a ampliação aumenta, aumenta a variabilidade das medições campo a campo, o que aumenta o desvio padrão da medição. Além disso, à medida que a ampliação aumenta, a área do campo diminui. Por exemplo, se a ampliação for o dobro, devem ser medidos quatro vezes mais campos para cobrir a mesma área de teste.

Evitar a utilização de objectivas de menor ampliação que não permitam a deteção dos constituintes mais pequenos.

As definições do limiar do nível de cinzento são seleccionadas para permitir a deteção independente de uma fase secundária discreta específica, utilizando um "método de cintilação" ao alternar entre a imagem de inclusão e a imagem do limiar. A definição do limiar pode exigir um pequeno compromisso entre a deteção dos constituintes mais pequenos e a sobredeteção dos maiores. As definições de limiar escolhidas devem ser experimentadas em constituintes de vários campos antes de iniciar a análise. Por exemplo, o intervalo de limiar para os óxidos está próximo da extremidade negra da escala de reflectância, enquanto o intervalo para os sulfuretos é um pouco mais elevado. Uma abordagem alternativa para estabelecer as definições de limiar consiste em desenvolver um histograma de reflectância ao nível dos cinzentos dos tipos de inclusão ou de constituintes presentes, bem como da matriz (normalmente no estado polido). O histograma é

utilizado para identificar o início (cinzento mais escuro) e o fim (cinzento mais claro) da gama para cada tipo de inclusão, no nível de cinzento de intersecção para duas inclusões ou tipos de constituintes com gamas de nível de cinzento sobrepostas. Verificar estas definições utilizando o método de cintilação para vários campos seleccionados aleatoriamente.

O número de campos medidos deve basear-se na precisão relativa das medições, tal como definido no capítulo seguinte, ou por acordo entre o fabricante e o utilizador final.

O programa de computador desenvolvido para o controlo do analisador de imagem de entrada de dados, a medição e a análise de dados é lido na unidade central de processamento para iniciar a análise. São introduzidos os dados relativos à identificação da amostra, ao requerente dos dados, à constante de calibração, à data, ao número de campos, ao espaçamento entre campos, etc.

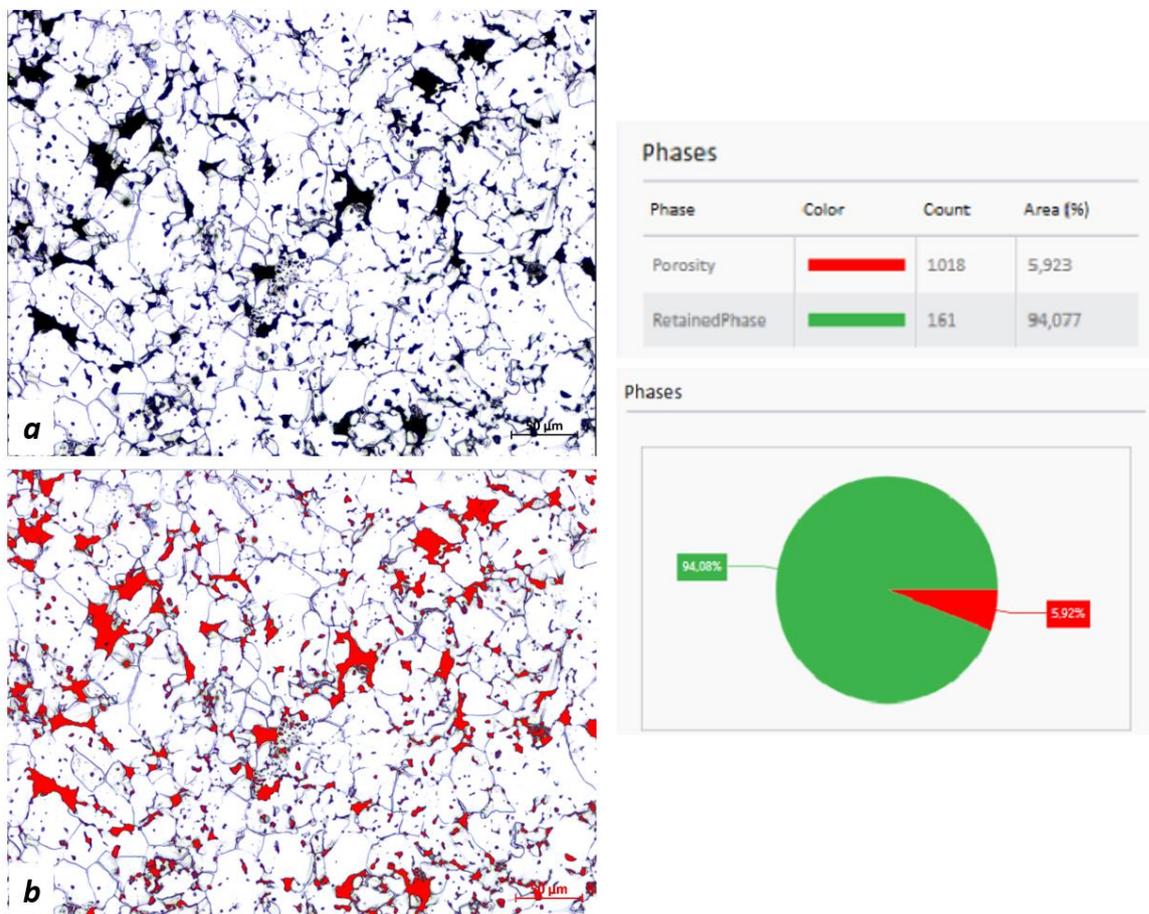


Fig. 2.3.5- Determinação da percentagem de porosidade num aço sinterizado por análise de imagem.

Pormenor da microestrutura antes (a) e depois (b) da elaboração da imagem. Fonte: Laboratório IIS

2.3.4.3 Análise estatística

Os erros de análise podem ser introduzidos a partir de numerosas fontes; algumas delas são referidas a seguir:

- A amostra seleccionada não podia ser representativa de toda a microestrutura.
- Preparação incorrecta da amostra.

- Competências e aptidões do operador (por exemplo, capacidade inadequada para identificar microestruturas).
- A homogeneidade da amostra, a ampliação e o número de campos medidos afectam a dispersão e a repetibilidade dos dados.

A variabilidade microestrutural não é uma medida dos erros, mas influencia os resultados dos ensaios; à medida que a variabilidade aumenta, aumenta o esforço necessário para obter uma estimativa estatística fiável dos parâmetros estruturais.

O cálculo da estimativa da percentagem de volume e a percentagem de exatidão relativa são indicados a seguir. O valor do multiplicador t pode ser encontrado na tabela seguinte, extraída da norma ASTM E562.

N.º de campos n	t	N.º de campos n	t
5	2,776	19	2,101
6	2,571	20	2,093
7	2,447	21	2,086
8	2,365	22	2,080
9	2,306	23	2,074
10	2,262	24	2,069
11	2,228	25	2,064
12	2,201	26	2,060
13	2,179	27	2,056
14	2,160	28	2,052
15	2,145	29	2,048
16	2,131	30	2,020
17	2,120	40	2,000
18	2,110	60	1,960

Tab. 2.3.2 - Multiplicadores do intervalo de confiança a 95%. [3] ASTM E562:2011 - *Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 - *Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*.

A média \bar{P}_p o estimador do desvio-padrão S , o intervalo de confiança a 95% IC95%, devem ser calculados e registados para cada conjunto de campos; as equações utilizadas para calcular estes valores são apresentadas a seguir.



$$\bar{P}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_p(i)$$

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [P_p(i) - \bar{P}_p]^2 \right]^{1/2}$$

$$95\% \text{ CI} = t \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

A estimativa da percentagem de volume é dada como:

$$V_v = \bar{P}_p \pm 95\% \text{ CI}$$

Uma estimativa da percentagem de exatidão relativa associada à estimativa pode ser obtida como:

$$\% \text{ RA} = \frac{95\% \text{ CI}}{\bar{P}_p} \times 100$$

As estimativas do número de campos necessários para obter uma percentagem de exatidão relativa de 10, 20 ou 33 % com diferentes percentagens de volume e dimensões de grelha são apresentadas no quadro seguinte, retirado da norma ASTM E562. Estes valores foram calculados partindo do princípio de que as características têm uma distribuição aleatória na secção metalográfica.

	33 % Precisão relativa				20 % Precisão relativa				10 % Precisão relativa			
	Número de campos n para uma grelha de P_T				Número de campos n para uma grelha de P_T				Número de campos n para uma grelha de P_T			
Quantidade da fração volumétrica V_v em percentagem	16 pontos	25 pontos	49 pontos	100 pontos	16 pontos	25 pontos	49 pontos	100 pontos	16 pontos	25 pontos	49 pontos	100 pontos
2	110	75	35	(20)	310	200	105	50	1250	800	410	200
5	50	30	(15)	(8)	125	80	40	(20)	500	320	165	80
10	(25)	(15)	(10)	(4)	65	40	(20)	(10)	160	160	85	40
20	(15)	(5)	(5)	(4)	30	(20)	(10)	(5)	80	80	40	(20)

Tab. 2.3.3 - Previsão do número de campos (n) a observar em função da precisão relativa desejada e da magnitude estimada da fração volumétrica do constituinte. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 - Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count (Métodos de ensaio padrão para determinação da fração volumétrica por contagem manual sistemática de pontos).



A percentagem de exatidão relativa comunicada deve ser sempre calculada a partir dos dados da amostra e não deve ser retirada do quadro anterior.

2.3.5 Tamanho do grão

As propriedades e o comportamento de uma liga metálica são diretamente influenciados pelo tamanho do grão. De facto, a medição do tamanho do grão num metal policristalino é um dos factores mais importantes a determinar, especialmente durante a produção e o controlo de qualidade.

Normalmente, com a mesma análise química, um aço de grão fino tem características de tração e resistência ao impacto superiores às de um aço de grão grosso. Em contrapartida, um aço de grão grosseiro pode ter um melhor comportamento no regime de fluência do que um aço de grão fino.

As dimensões dos grãos observadas numa secção transversal através da estrutura são utilizadas para determinar o tamanho do grão plano. Várias medições diferentes podem ser usadas para expressar o tamanho do grão:

- Diâmetro médio
- Área média
- Número de grãos por unidade de superfície
- Comprimento médio de intersecção número de grãos por unidade de volume
- Diâmetro médio baseado no volume médio de grãos

Para determinar o tamanho do grão, as secções devem ser preparadas através de um esmerilamento e polimento cuidadosos, de modo a revelar os limites dos grãos através de gravura metalográfica. A seguir são descritos exemplos de procedimentos:

- Os grãos ferríticos devem ser revelados por decapagem com "Nital" ou com um reagente adequado.
- Para os aços com uma estrutura austenítica monofásica ou bifásica (grãos de ferrite delta numa matriz austenítica) à temperatura ambiente, o grão deve ser revelado com glicerina, "reagente de Kalling", "reagente de Marble", ou ácido oxálico aquoso eletrolítico a 10%
- No caso dos aços com uma estrutura martensítica ou bainítica, é por vezes possível detetar o grão pré-austenítico. Este deve ser revelado com o seguinte método descrito na norma UNI EN ISO 643:
 - Método "Bechet-Beaujard" por ataque com solução aquosa saturada de ácido pícrico.
 - Método "Kohn" por oxidação controlada.
 - Método "McQuaid-Ehn" por cementação.

A descrição dos métodos mencionados no ponto anterior não é abrangida pelo presente capítulo. Para mais informações, consultar a norma UNI EN ISO 643.

Ambas as normas UNI EN ISO 643 e ASTM E112 apresentam três métodos para determinar a granulometria média. Estes métodos são referidos nos pontos seguintes e descritos a seguir:

- Procedimento de comparação.
- Procedimento planimétrico (ou de Jeffries).
- Procedimento de interceção - procedimento de interceção linear (Heyn) e procedimento de interceção circular.

A norma ASTM E112 define a dimensão do grão através de um índice G, conhecido como dimensão do grão ASTM, como indicado no quadro 5.4; o índice de dimensão do grão ASTM G é também utilizado pela norma europeia UNI EN ISO 643.

Granulometria N.º G	Grãos/unidade de superfície		Área média de grãos		Diâmetro médio		Interceção média		N _L
	Não/em ² a 100x	N.º /mm ² a 1x	mm ²	µm ²	mm	µm	mm	µm	N.º /mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	454.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.71
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	99.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1884.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	364.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0



10.5	724.08	11.223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Tab. 2.3.4 - Relação entre tamanho de grão Computado para grãos uniformes, orientados aleatoriamente e equiaxiais. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size

2.3.5.1 Procedimento de comparação

A imagem examinada no ecrã é comparada com uma série de cartas-padrão. As cartas-padrão, com uma ampliação de 100 x, são numeradas de - 07 a 17, de modo a que seja igual ao índice G. O procedimento de comparação deve ser aplicado a materiais completamente recristalizados ou fundidos com grãos equiaxiais.

Quando as estimativas da granulometria são feitas pelo método de comparação mais conveniente, verificações repetidas por especialistas e/ou testes interlaboratoriais mostraram que, a menos que a aparência do padrão reflecta a da amostra, pode ocorrer um erro. A norma ASTM E 112 apresenta quatro tipos de gráficos de comparação que minimizam esses erros.

É muito importante verificar se a ampliação que estamos a comparar é a mesma. O software atual contém aplicações com gráficos carregados que permitem uma comparação direta.

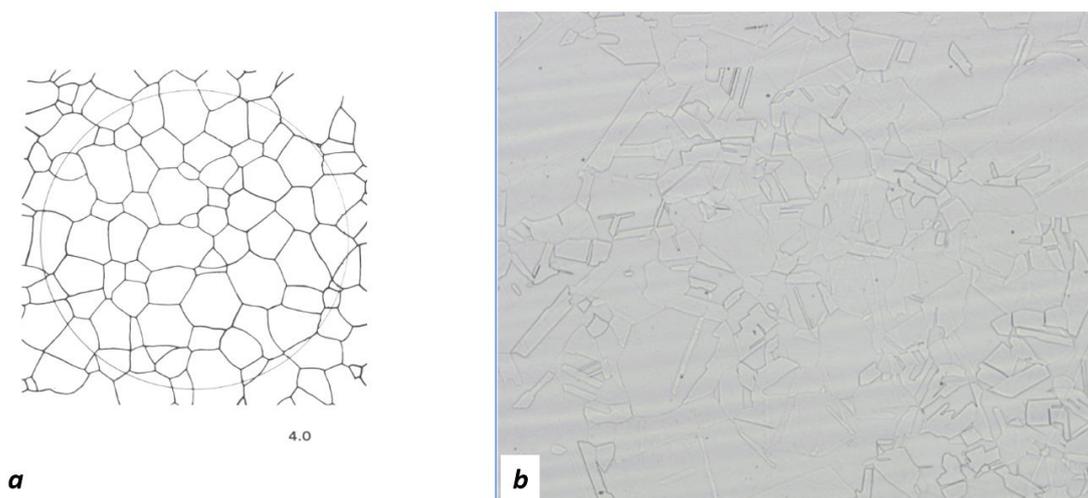


Fig. 2.3.6 - Exemplo do método de comparação. Imagem de um gráfico de comparação (a) e pormenor de um aço austenítico obtido por OM. Fonte: Laboratório do IIS

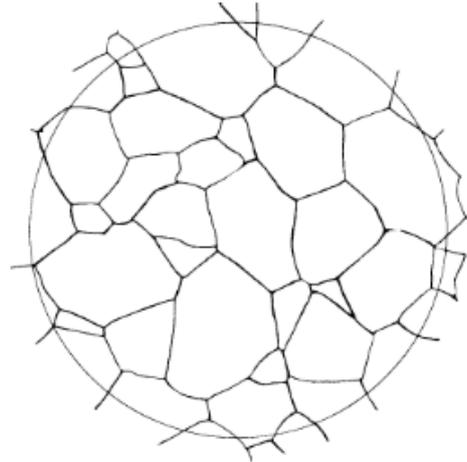


Fig. 2.3.7- Exemplo de grãos não entrelaçados (Flat Etchs) da placa I - Tamanho de grão nº 3 a 100X - imagem retirada da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size

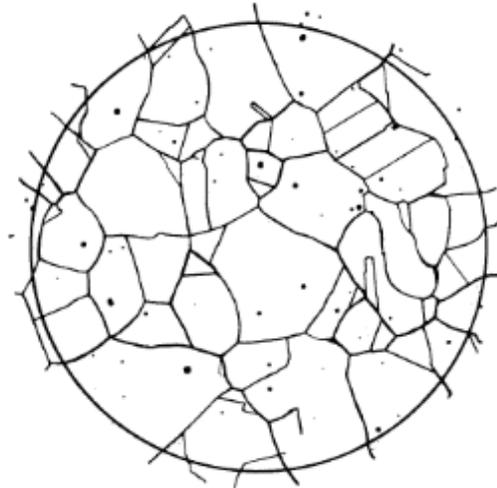


Fig. 2.3.8- Exemplo de grãos gémeos (Flat Etchs) da placa II - Tamanho de grão nº 3 a 100X - imagem retirada da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size



Fig. 2.3.9 - Exemplo de grãos gémeos (Etchs de contraste) da placa III - Tamanho de grão 4 a 75X - imagem retirada da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size

2.3.5.2 Procedimento de intercepção

Para este procedimento, o número de grãos interceptados, N , ou o número de intersecções de limites de grãos, P , deve ser contado utilizando uma linha de ensaio de comprimento conhecido num monitor de computador ou numa fotomicrografia de um representante de um provete com uma ampliação conhecida.

O procedimento de intercepção é recomendado para todas as estruturas que se afastam da forma equiaxial uniforme. Para estruturas anisotrópicas, estão disponíveis procedimentos para fazer estimativas de dimensão separadas em cada uma das três direcções principais para estimar a dimensão média.

A linha de medição pode ser reta ou circular. A grelha deve ser aplicada aleatoriamente a um número adequado de campos para se obter um resultado estatístico.

Não existe uma relação matemática direta entre o número de granulometria ASTM, G , e a intercepção linear média, ao contrário da relação exacta entre a intercepção linear média, l , e a área média dos grãos, que é exacta para os círculos, mas não é totalmente exacta para uma estrutura equiaxial uniforme.

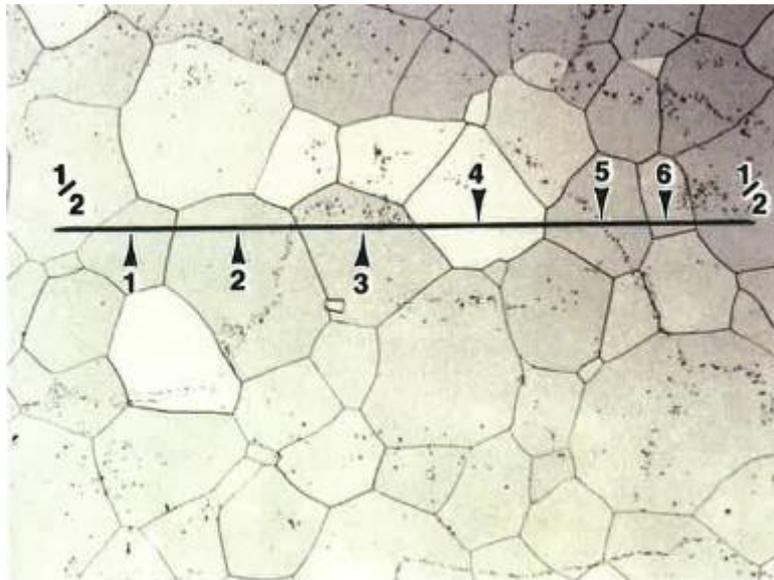


Fig. 2.3.10 - Exemplo de intercepção N (intercepções). [2.3.7]

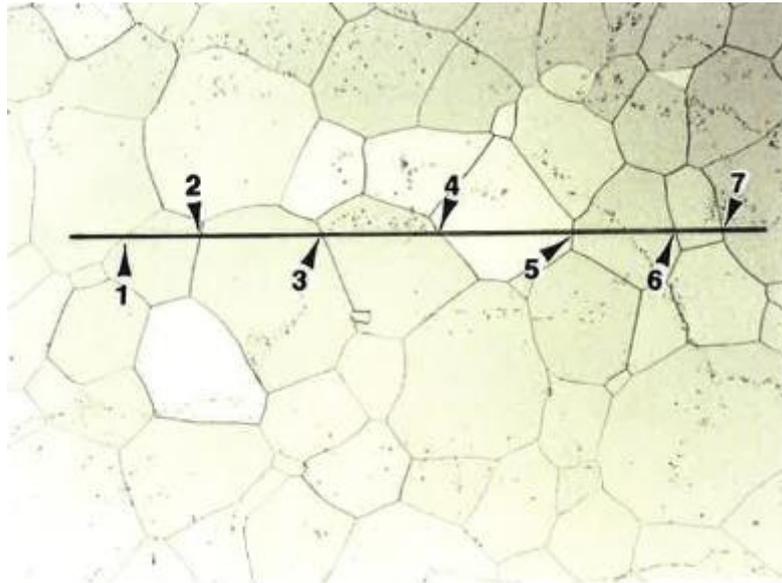


Fig. 2.3.11 - Exemplo de intersecção P. Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 - Aços - Determinação micrográfica da granulometria aparente

Método dos segmentos de intercepção linear:

Para estimar a granulometria média, recomenda-se a contagem do número de grãos interceptados, através de uma ou mais linhas rectas suficientemente longas para produzir pelo menos 50 intercepções. É desejável selecionar uma combinação de comprimento da linha de ensaio e de ampliação tal que um único campo produza o número necessário de intercepções.

A precisão das estimativas granulométricas pelo método da intercepção é função do número de intercepções de grãos contadas.

Uma intercepção é um segmento de linha de ensaio que se sobrepõe a um grão. Uma intersecção é um ponto onde uma linha de ensaio é cortada por limites de grão. Pode também ser contada com os mesmos resultados no metal monofásico.

Os efeitos de um desvio moderado de uma estrutura equiaxial podem ser eliminados fazendo contagens de intercepção, numa matriz de linhas, contando as linhas com quatro ou mais orientações.

Método de intercepção circular:

A linha de medição é constituída por três círculos concêntricos. A ampliação ou o diâmetro do círculo deve ser selecionado de modo a que haja 40 a 50 intercepções quando a grelha de medição ultrapassar o campo a examinar.

O método do segmento interceptado circular tende a dar valores de segmento interceptado ligeiramente mais elevados e, por conseguinte, um número ligeiramente inferior de intercepções. Para minimizar este facto, as intersecções causadas por um ponto triplo devem ser contadas como duas intersecções em vez de 1,5, como é o caso com o método do segmento linear interceptado.



Resultados:

O valor médio do número de intercepções \bar{N} ou intersecção, \bar{P} é calculado com a seguinte fórmula:

$$\bar{N}_L = \bar{N}/LT \text{ e } \bar{P}_L = \bar{P}/LT$$

Para os limites de grão não equiaxiais, podem ser utilizadas três linhas orientadas paralelamente às três linhas dos planos principais de ensaio (longitudinal, transversal e plana). O número médio de intercepções, ou o número médio de intersecções, é determinado a partir da raiz cúbica do produto de três medições, de acordo com

$$\bar{N}_L = (\bar{N}/LT_x \times \bar{N}/LT_y \times \bar{N}/LT_z)^{1/3} \text{ e } \bar{P}_L = (\bar{P}/LT_x \times \bar{P}/LT_y \times \bar{P}/LT_z)^{1/3}$$

Os métodos modernos de medição da granulometria, como a análise automática de imagens, podem ser utilizados para medir a granulometria dos materiais aplicáveis, desde que a exatidão dos métodos tenha sido previamente comprovada por uma extensa correlação cruzada.

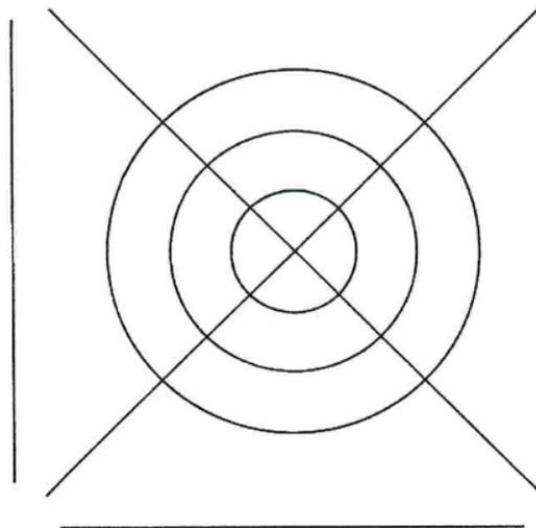


Fig. 2.3.12- Grelha de medição recomendada para o procedimento do segmento de intercepção. Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 - Aços - Determinação micrográfica da granulometria aparente.



Fig. 2.3.13- exemplos de uma medição de intersecção efectuada num aço ao carbono. Fonte: Laboratório do IIS.

2.3.5.3 Métodos planimétricos

O método planimétrico é o menos utilizado, historicamente um círculo com 79,8 mm de diâmetro foi sobreposto a uma imagem real e a ampliação real é mostrada no ecrã do equipamento. A ampliação deve ser ajustada de modo a que a área circular contenha pelo menos 50 grãos.

São efectuadas duas contagens:

- n_1 é o número de grãos completamente dentro do círculo de ensaio
- n_2 é o número de grãos intersectados pelo círculo de ensaio.

O número total era equivalente a:

$$N_{100} = n_1 + 0,5n_2$$

O número de grãos, m , para mm^2 na superfície do provete é calculado a partir de

$$m = 2n_{100}$$

ou, no caso de qualquer ampliação, g :

$$m = (g^2 / 5000)n_g$$

em que 5000 é a área do círculo de ensaio em mm^2 .

Esta abordagem assume que, em média, metade dos grãos intersectados pelo círculo de teste estão dentro do círculo, enquanto a restante metade está fora do círculo. Esta hipótese é válida para uma linha reta através da estrutura do grão, mas não para uma linha curva. O desvio criado por esta suposição aumenta à medida que o número de grãos dentro do círculo de teste

diminui. Se o número de grãos dentro do círculo de ensaio for pelo menos 50, o desvio é de cerca de 2%.

Uma forma simples de evitar este problema consiste em imaginar um quadrado ou retângulo, considerando que os grãos que intersectam cada um dos quatro cantos estão um quarto dentro da figura e três quartos fora dela. O conjunto destes quatro grãos de canto representa um grão dentro da caixa de ensaio. Ignorando os grãos dos quatro cantos, conta-se n_1 - os grãos completamente dentro da caixa; e n_2 - os grãos intersectados pelos quatro lados da caixa. A equação passa a ser:

$$N_{100} = n_1 + 0,5n_2 + 1$$

O número de grãos, m , para mm^2 na superfície do provete é calculado a partir de

$$m = (g^2 / A_f) n_g$$

em que A_f é a área aparente da figura de ensaio utilizada para a contagem de grãos em mm^2 .

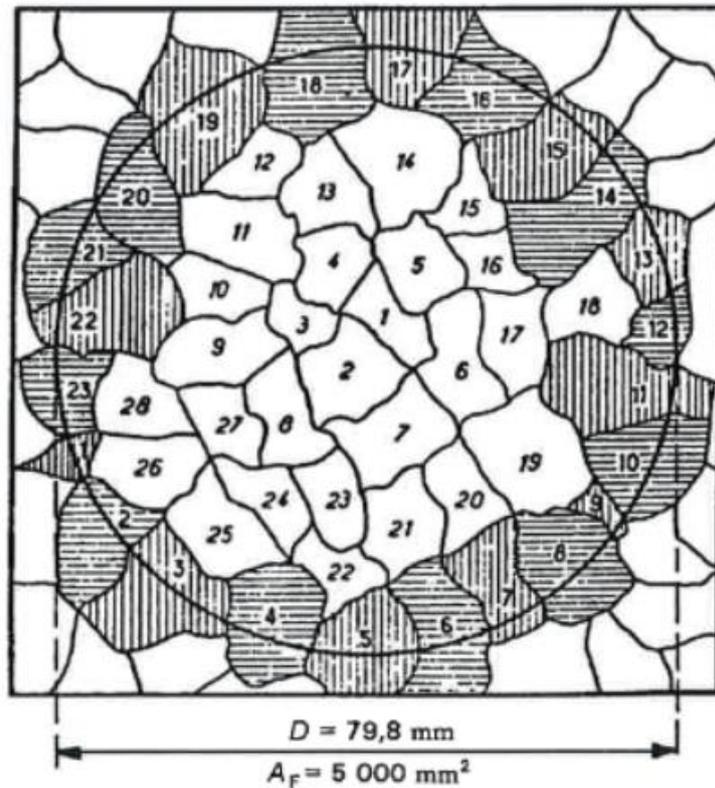


Fig. 2.3.14- Avaliação do número de grãos numa área delimitada por um círculo. Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 - Aços - Determinação micrográfica da granulometria aparente

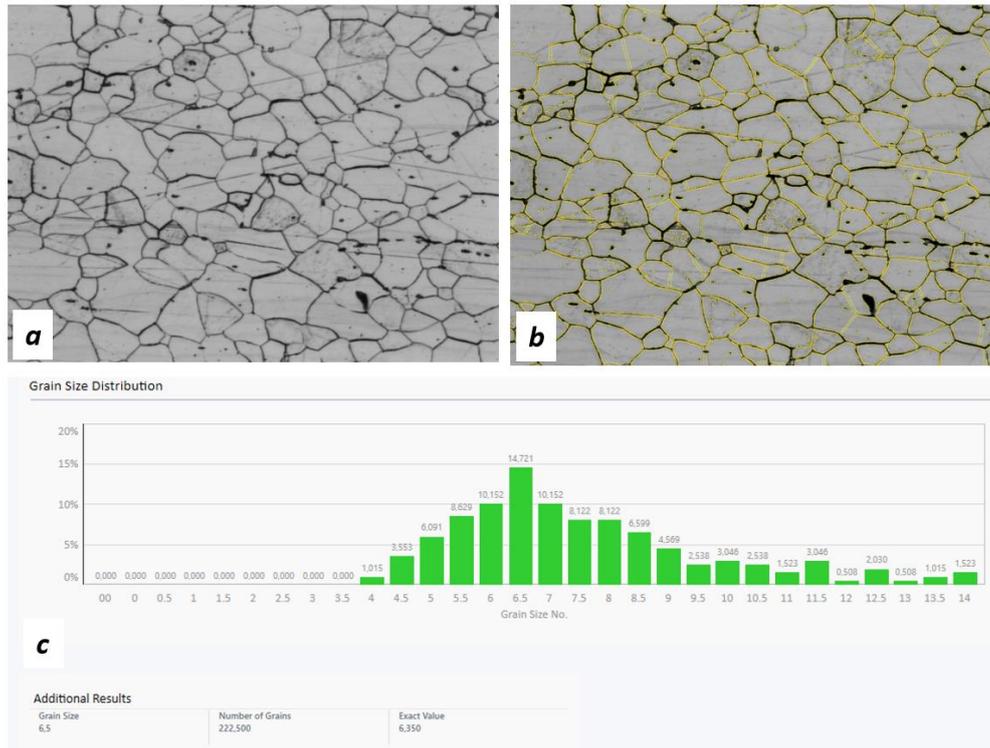


Fig. 2.3.15- Exemplos de uma medição planimétrica. Pormenor da estrutura micrográfica antes (a) e depois (b) da elaboração da imagem por software e o histograma de distribuição granulométrica obtido (c). Fonte:

Laboratório do IIS

Referências:

[2.3.1] ASM HANBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas.

[2.3.2] Metalografia - Princípios e prática - George F. Vander Voort - Directores, Investigação e Tecnologia Buehler, Ltd. Lake Bluff, Illinois.

[2.3.3] ASTM E562:2011 - Métodos de ensaio normalizados para a determinação da fração volumétrica por contagem manual sistemática de pontos.

[2.3.4] ASTM E1245:2003 - Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis (Prática normalizada para a determinação do teor de inclusão ou de constituintes da segunda fase dos metais por análise automática de imagens)

[2.3.5] Guia do Metalógrafo - Práticas e procedimentos para ferro e aço - Bruce L. Bramfitt, Arlan O. Benscoter.

[2.3.6] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size (Métodos de ensaio normalizados para a determinação da granulometria média).

[2.3.7] UNI EN ISO 643 - Aços - Determinação micrográfica da granulometria aparente.



2.4 Demonstração das capacidades do programa para análise de imagens

Neste capítulo, iremos explorar os principais conceitos e ferramentas utilizados para efetuar a análise de imagens metalográficas, delineando o processo desde a aquisição de imagens até ao seu processamento e interpretação dos resultados obtidos.

Serão ilustradas as várias fases envolvidas na preparação de amostras metalográficas, essenciais para a obtenção de imagens claras e pormenorizadas. Posteriormente, examinaremos a importância dos microscópios na captura de imagens e discutiremos as várias técnicas de iluminação que ajudam a destacar características microestruturais específicas. Finalmente, mergulharemos no ambiente digital, explorando software especializado que permite a análise quantitativa de imagens metalográficas, proporcionando uma interpretação exacta e aprofundada das estruturas observadas.

2.4.1.1 Preparação das amostras

A fim de obter uma boa qualidade da superfície analisada, deve ser efectuado um polimento mecânico, uma vez que outros processos de polimento (por exemplo, polimento eletroquímico) podem envolver arestas arredondadas e artefactos.

As últimas etapas de polimento podem ser efectuadas com suspensões de diamante de 3 μm ou menos; é aconselhável terminar a última etapa de polimento com suspensões à base de sílica coloidal (diâmetro das partículas de abrasão inferior a 0,1 μm). O procedimento de retificação e polimento deve ser escolhido com base no tipo de liga a ser preparada.

Um procedimento típico para os aços-carbono ou os aços de baixa liga é apresentado no ponto seguinte:

- Primeiro passo: lixar com lixas de SiC (grão 220) ou disco de lixa equivalente durante alguns minutos com água, de modo a obter a planicidade correcta das amostras.
- Segunda etapa: moagem com disco de moagem com suspensão de diamante com partículas de diâmetro de 9 μm .
- Terceiro passo: polimento utilizando roupas de polimento com suspensão de diamante com partículas de diâmetro de 3 μm .
- Quarta etapa: polimento utilizando panos de polimento com suspensão de sílica coloidal contendo partículas com diâmetro inferior a 0,1 μm .

Se disponíveis, os sistemas automáticos são preferíveis para obter as superfícies espelhadas finais correctas da amostra metálica.

Para algumas análises, tais como amostras caracterizadas por elevada fragilidade e deterioração, podem ser adoptadas outras precauções. As precauções típicas incluem as medições de espessura de camadas de óxido (por exemplo, magnetite no tubo da caldeira) ou a avaliação da porosidade aquando do revestimento por pulverização térmica, em que as etapas de trituração e



polimento podem quebrar a camada, gerando erros de medição. Nesses casos, pode ser necessário um passo de corte mais preciso (por exemplo, máquina de corte automática) e um duplo embutimento (depois e antes do corte).

Os riscos na secção micrográfica podem ser detectados como áreas escuras utilizando software de análise de imagem e causam uma sobrestimação da fase medida. Este tipo de defeitos exige uma supervisão constante do processo de análise de imagem por parte do operador/técnico.

2.4.1.2 Demonstração de alguns casos práticos de determinação do Delta Ferrite

As aplicações mais comuns do método para determinar a fração de volume são as seguintes

- Determinação de uma percentagem de ferrite Delta no metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos.
- Determinação de uma percentagem de ferrite Delta num aço inoxidável Duplex.
- Avaliação do teor de inclusões num aço ou noutras ligas.
- Avaliação da percentagem de porosidade na fundição, soldadura, brasagem e revestimento.

A quantidade de ferrite delta esperada nas juntas soldadas de aço inoxidável austenítico situa-se num intervalo de 5-15%. Uma pequena quantidade de ferrite Delta reduz a sensibilidade à fissuração a quente da junta soldada; no entanto, uma quantidade superior reduz a tenacidade a baixas temperaturas e a resistência à corrosão.

A observação das secções micrográficas é efectuada com um microscópio ótico, geralmente com objectivas de 100x, 200x ou 500x.

Após uma primeira avaliação qualitativa da quantidade de ferrite Delta, pode ser utilizada uma grelha de 25 ou 49 pontos, conforme indicado na norma ASTM E562. Por vezes, pode ser efectuada uma medição preliminar com o ferriteoscópio, a fim de seleccionar a grelha correcta.

Um exemplo de medições Delta Ferrite pelo método de contagem de pontos através de software é mostrado abaixo.

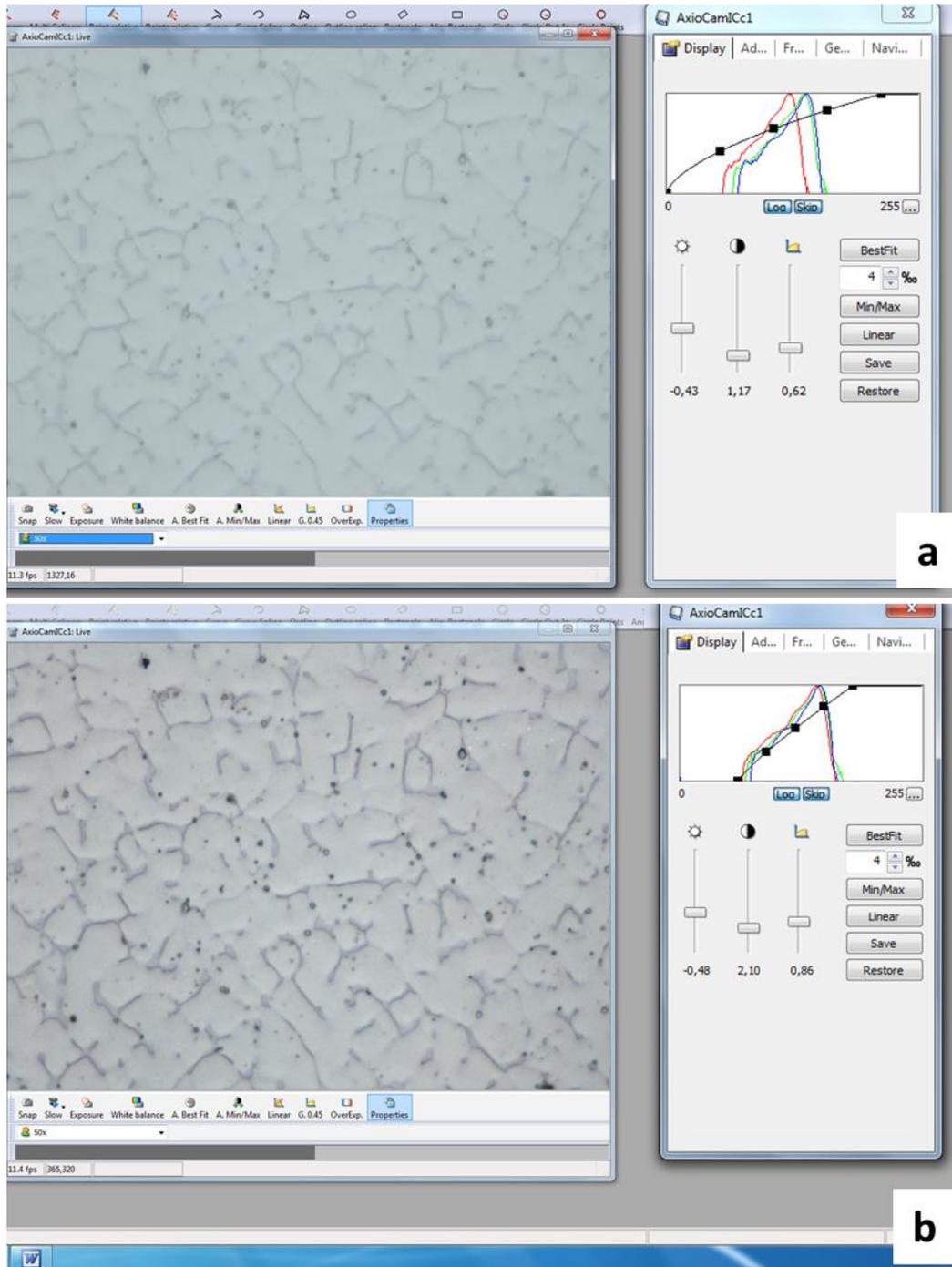


Fig. 2.4.1- Detalhes da zona soldada de um aço inoxidável austenítico tipo 316L. As figuras mostram antes (a) e depois (b) da otimização da tabela de pesquisa (LUT). Fonte: Laboratório do IIS.

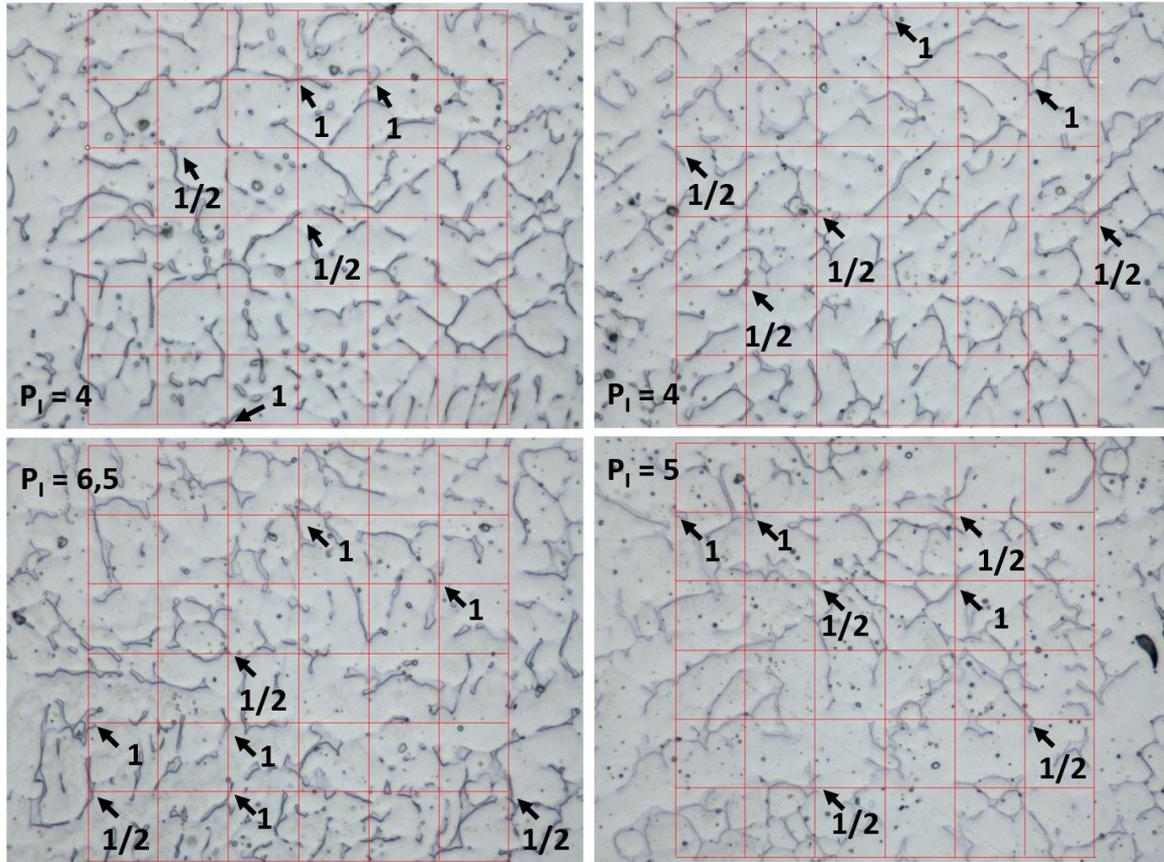


Fig. 2.4.2- Exemplos de alguns campos analisados pelo método de contagem de pontos com uma grelha de 49 pontos. Fonte: Laboratório IIS.

$P_T = 49$			
<i>Número de campos contados n</i>	10	20	85
<i>Percentagem de pontos de grelha P_p</i>	10,41	10,31	10,17
<i>Intervalo de confiança de 95%</i>	1,52	1,02	0,57
<i>Precisão relativa % Ra</i>	14,56	9,94	5,65
<i>Desvio padrão</i>	2,40	2,29	2,59

Tabela 2.4.1- A percentagem de ferrite medida por contagem de pontos corresponde a P_p . A tabela mostra como a precisão da medição aumenta à medida que o número de campos medidos aumenta. Fonte: Laboratório IIS.



2.4.1.3 Demonstração de alguns casos práticos de avaliação da percentagem de porosidade

A análise de imagem encontra outra aplicação importante, não só na determinação das fases, mas também na avaliação da porosidade e/ou descontinuidade dentro de uma matriz. A porosidade pode estar presente na soldadura, na brasagem ou em algum tipo de revestimento (por exemplo, revestimento por aspersão térmica).

Nas juntas de soldadura ou de brasagem, a porosidade é uma imperfeição (n.º 200 na norma UNI EN ISO 6520-1) e, por conseguinte, deve ser avaliada através de critérios de aceitabilidade seleccionados com base no componente.

A avaliação da percentagem de porosidade deve ser efectuada sobre a área projectada também avaliada por exame radiográfico (ver ISO 5817); no entanto, a avaliação por exame micrográfico pode ser efectuada e é complementar.

Os programas de análise de imagem permitem obter medições lineares do diâmetro máximo e das áreas dos poros e cavidades.

O procedimento para medir a porosidade pode ser resumido nos seguintes passos:

- Aquisição de imagens: Obter imagens de alta resolução da área de interesse utilizando um microscópio ótico ou eletrónico. Assegurar que as imagens são nítidas e bem focadas.
- Preparação da imagem: carregar a imagem adquirida num software de processamento de imagem (por exemplo, ImageJ ou outro software específico) e aplicar um filtro para reduzir o ruído da imagem, como um filtro gaussiano ou mediano.
- Binarização: Aplicar um algoritmo de binarização para separar as áreas porosas das outras partes da imagem e escolher um limiar adequado para distinguir entre poros e matriz.
- Medição da porosidade: calcular a relação entre a área total de poros e a área total da zona de brasagem, expressando a porosidade em percentagem.
- Validação e correção: rever manualmente os resultados obtidos para corrigir eventuais erros de segmentação ou de medição.
- Relatório e Interpretação: gerar um relatório que inclua as imagens processadas, a porosidade calculada e quaisquer outras informações relevantes.

Este procedimento fornece um quadro geral para analisar a porosidade em juntas de soldadura ou brasagem ou outros detalhes utilizando o processamento de imagens. No entanto, é importante adaptar este procedimento aos requisitos específicos de um caso concreto e ao equipamento disponível.

Um exemplo de análise aplicada à porosidade presente numa junta soldada numa liga de cobre é mostrado nas imagens seguintes.

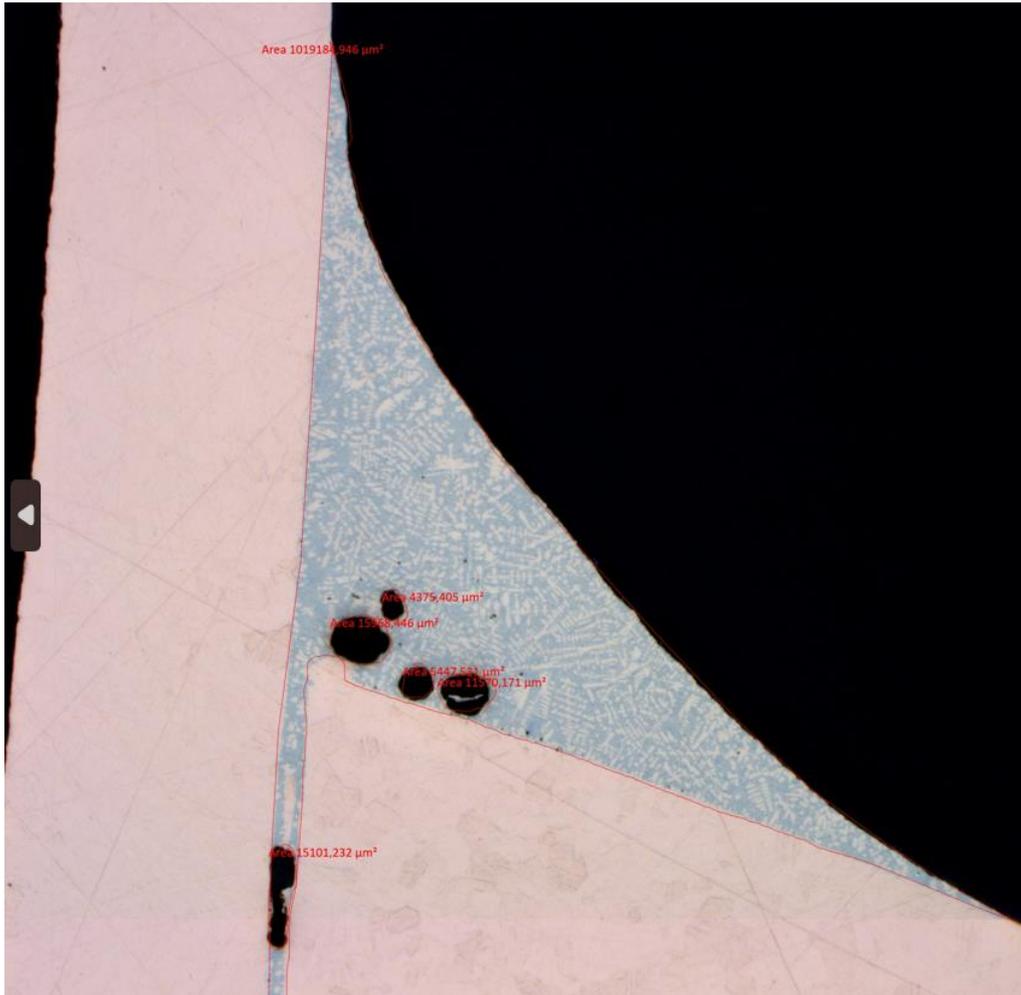


Fig. 2.4.6- Pormenor de uma junta de brasagem num componente de liga de cobre. Áreas de porosidade medidas por programa de análise de imagem. Fonte: Laboratório IIS

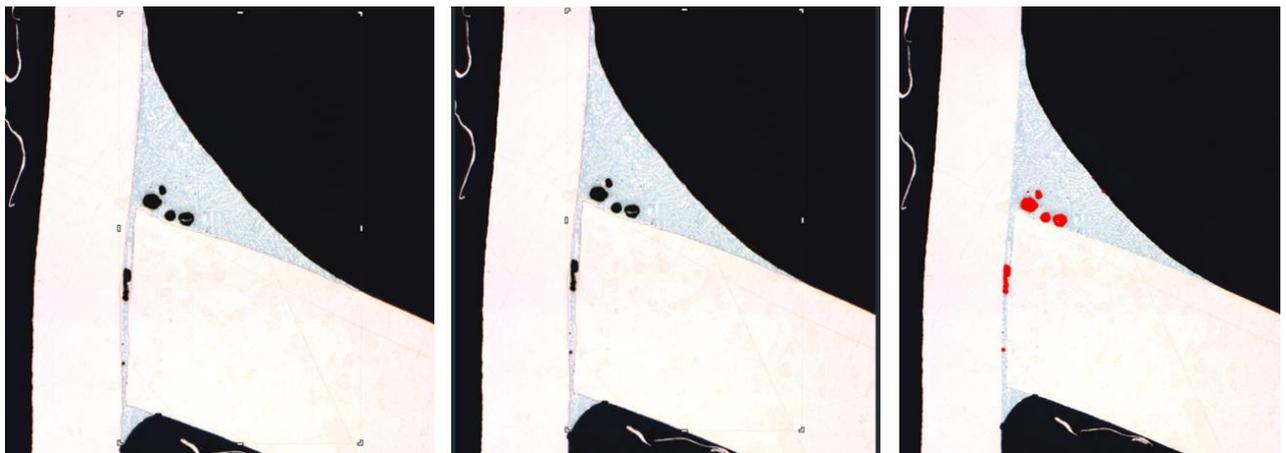


Fig. 2.4.7- Pormenor de uma junta de brasagem num componente de liga de cobre. Percentagem de porosidade medida por programa de análise de imagem. Fonte: Laboratório IIS

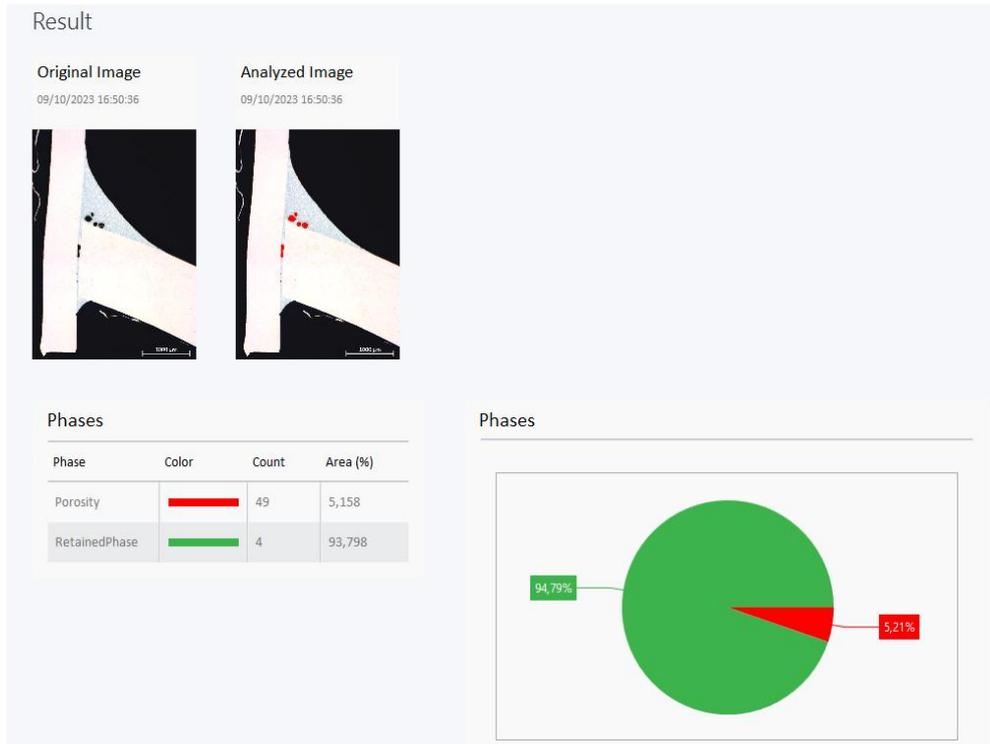


Fig. 2.4.8- Pormenor de um relatório obtido por um programa de análise de imagem. A percentagem de porosidade na junta de brasagem é de cerca de 5,2 %. Fonte: Laboratório IIS

A análise da porosidade apresentada num revestimento obtido com o método de aspersão térmica, observada em secção, é mostrada abaixo.

A avaliação da porosidade num revestimento produzido pelo processo de aspersão térmica é fundamental para garantir a qualidade, a durabilidade e o desempenho ideais do revestimento. Isto contribui para preservar a integridade e a eficácia do objeto revestido no seu contexto operacional.

A porosidade e a descontinuidade influenciam as seguintes características:

- Dureza e resistência;
- Adesão e Coesão;
- Resistência à corrosão.

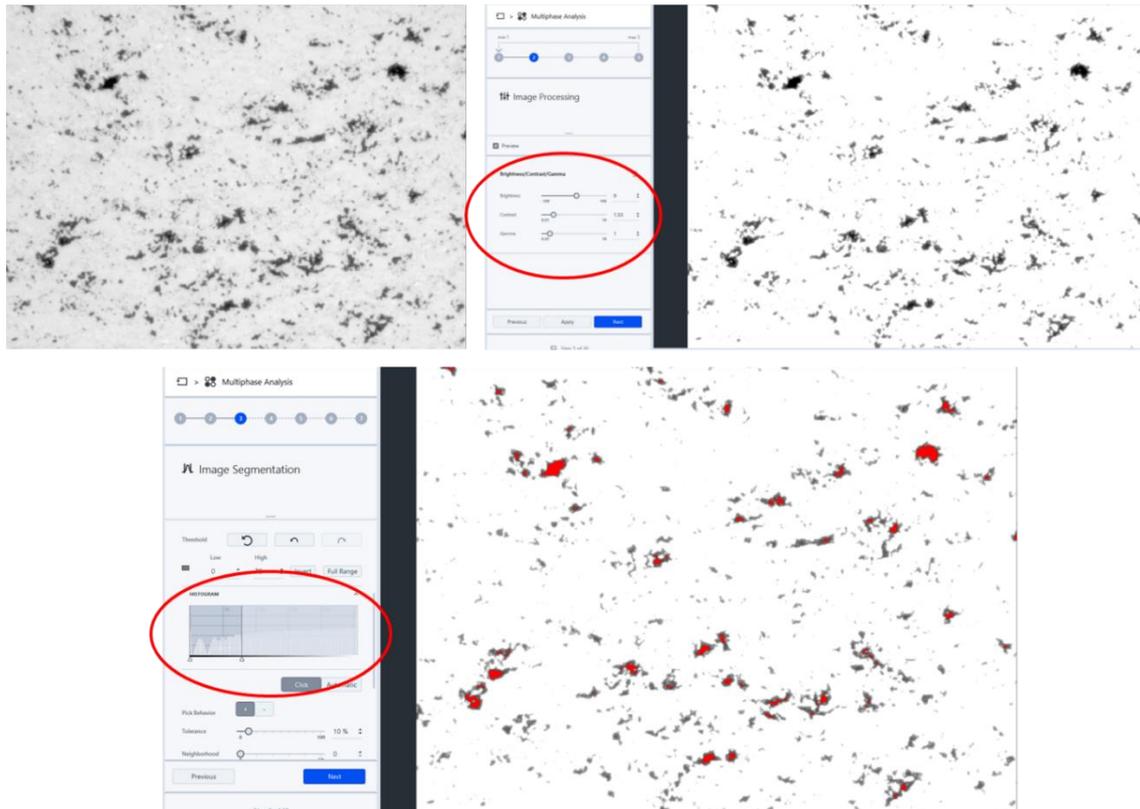


Fig. 2.4.9- Pormenor de uma camada de pulverização térmica. Percentagem de porosidade medida pelo programa de análise de imagem. As figuras mostram os vários passos para otimizar a imagem. Fonte: Laboratório IIS

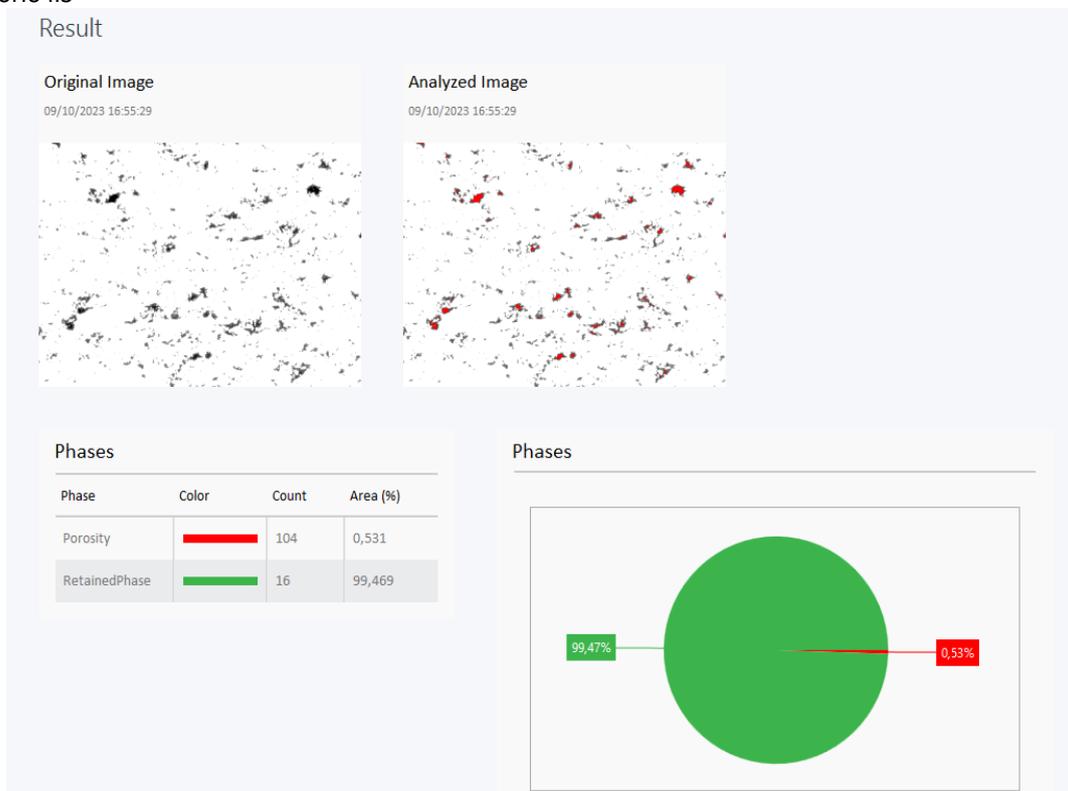


Fig. 2.4.10- Pormenor de um relatório obtido por um programa de análise de imagem. A percentagem de porosidade no revestimento por projeção térmica é de cerca de 0,53%. Fonte: Laboratório IIS.

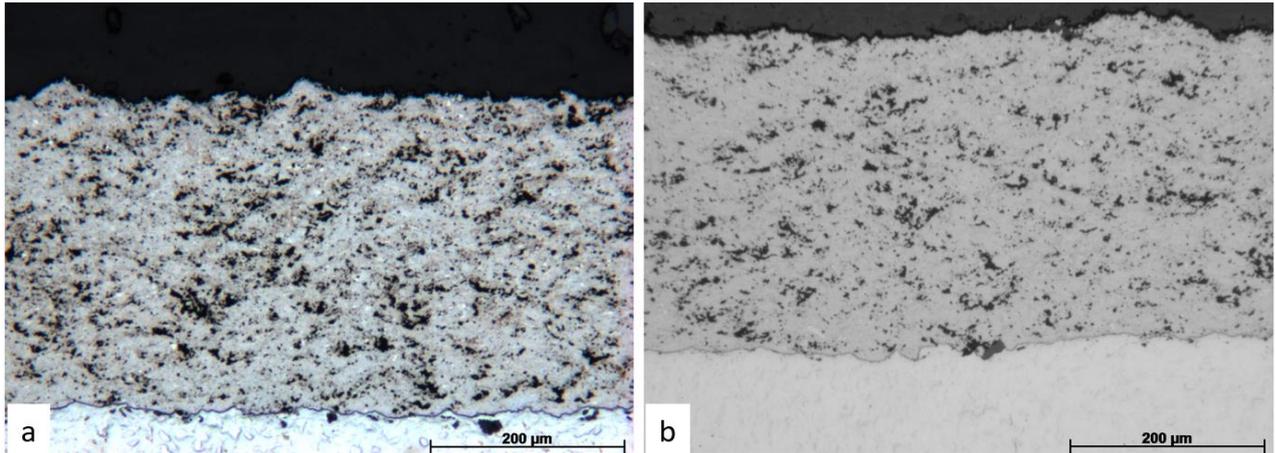


Fig. 2.4.11- Comparação entre duas secções micrográficas retiradas do mesmo revestimento de aspersão térmica com uma preparação metalográfica convencional (a) e com uma preparação metalográfica mais precisa (b), como a utilização de sistemas de corte automáticos, montagem e polimento com pressão reduzida, etc. Fonte: Laboratório IIS.

2.4.1.4 Demonstração de alguns casos práticos de medições de tamanho de grão

A medição do tamanho dos grãos na indústria é um processo fundamental por várias razões:

- Permite o controlo de qualidade durante a produção para garantir que o material cumpre as normas e especificações exigidas.
- Otimização das propriedades mecânicas e físicas dos materiais, uma vez que a dimensão e a distribuição do grão podem influenciar factores-chave como a dureza, a força, a ductilidade e a resistência à fadiga.
- Desenvolvimento de métodos adequados de processamento e tratamento térmico através da determinação de parâmetros óptimos para obter uma microestrutura desejada e melhorar o desempenho do material.
- Previsão do comportamento a longo prazo do material em diferentes condições de funcionamento e ambientes.
- Investigação e desenvolvimento de novos materiais e otimização dos existentes, permitindo a conceção de materiais com desempenho superior para aplicações específicas.

Em resumo, a medição do grão metalográfico é crucial para compreender a estrutura microscópica dos materiais metálicos e otimizar as propriedades dos materiais, melhorando assim a qualidade, a eficiência do processo de produção e os avanços na metalurgia e nas aplicações industriais.

A granulometria pode ser um requisito específico para algumas normas europeias ou americanas, como os exemplos seguintes:



- Os aços de cementação têm frequentemente especificações relativas à dimensão do grão para garantir uma estrutura controlada e uniforme após o tratamento térmico de cementação (EN 10084).
- Os aços ligados ao cromo-molibdênio requerem frequentemente um controlo da dimensão do grão para garantir uma melhor trabalhabilidade e um melhor desempenho mecânico (ASTM A519).
- As especificações para os aços que têm de ser submetidos a tratamento térmico podem incluir requisitos para a dimensão do grão, a fim de garantir a microestrutura correcta após o tratamento (ASTM A304).
- Os aços utilizados na produção de molas de alta resistência requerem frequentemente um controlo rigoroso do tamanho do grão para garantir um desempenho consistente e fiável (EN 10270).

Muitas vezes, o tamanho do grão pode ser especificado como um requisito nas especificações do produto com base no know-how da empresa.

As imagens seguintes mostram alguns exemplos de medição de grãos com os vários métodos descritos no parágrafo anterior.

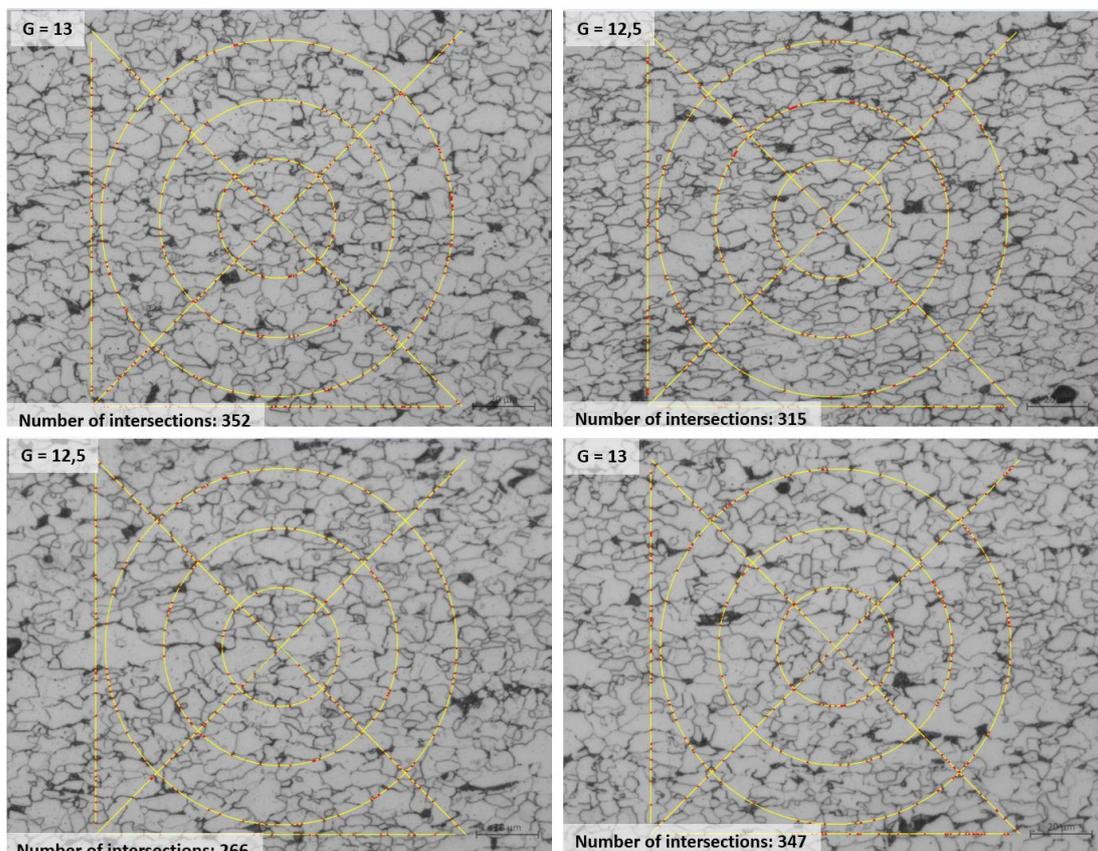


Fig. 2.4.12- Detalhes de alguns campos analisados pelo método de interseção num aço-carbono de grão fino, segundo a norma UNI EN ISO 643. Fonte: Laboratório IIS.

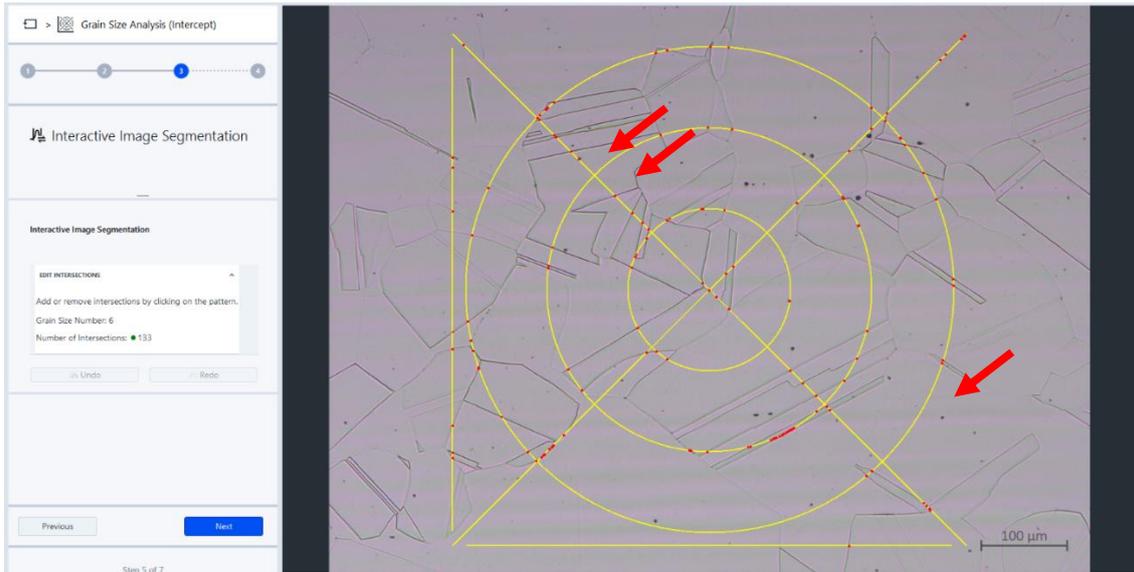


Fig. 2.4.12- Detalhes da medição do tamanho de grão pelo método de intercepção num aço inoxidável super austenítico (tipo AISI 310LMO), de acordo com a norma *UNI EN ISO 643*. A figura mostra um erro de medição da análise de imagem devido à incapacidade de distinguir os limites de grão dos gémeos de grão. Fonte: Laboratório IIS.

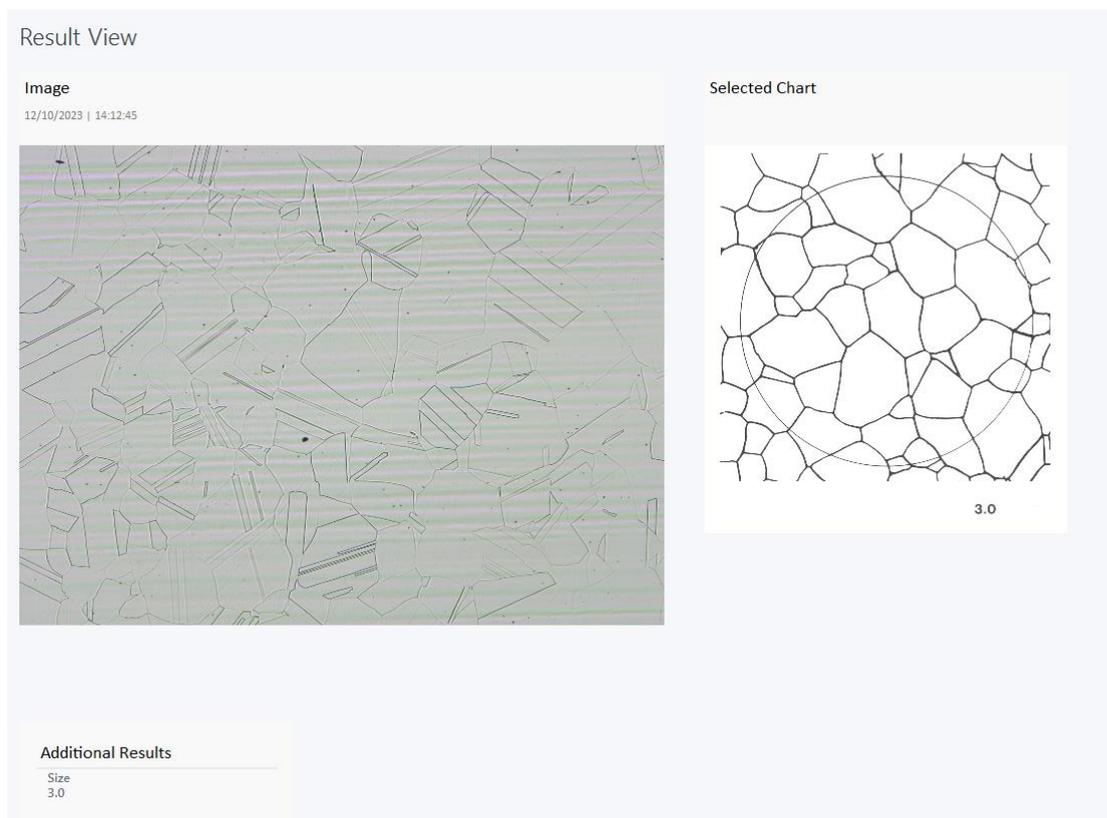


Fig. 2.4.13- Pormenores da medição do tamanho de grão pelo método comparativo num aço inoxidável super austenítico (Tipo AISI 310LMO), de acordo com a norma *UNI EN ISO 643*. Grãos não geminados (Flat Etchs). Fonte: Laboratório IIS.

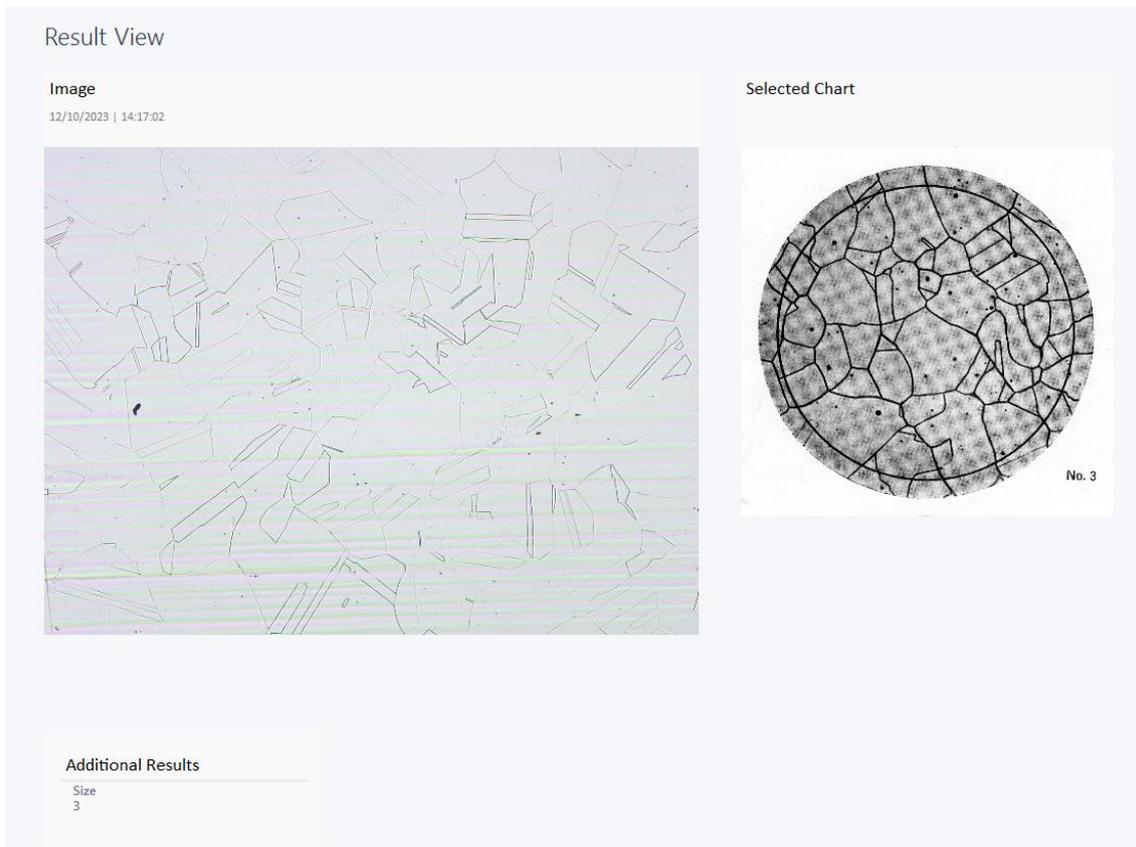


Fig. 2.4.14- Detalhes da medição do tamanho de grão pelo método comparativo num aço inoxidável super austenítico (Tipo AISI 310LMO), de acordo com a norma ASTM E112. Foi utilizada uma chapa de grão duplo. Fonte: Laboratório IIS.

Referências:

- [2.4.1] Metalurgia da Soldadura e Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis - John C. Lippold e Damian J. Kotecki.
- [2.4.2] WRC-1992 Diagrama de Constituição para metais de soldadura de aço inoxidável
- [2.4.3] ASTM E562:2011 - Métodos de ensaio normalizados para a determinação da fração volumétrica por contagem manual sistemática de pontos.
- [2.4.4] ASTM E1245:2003 - Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis (Prática normalizada para a determinação do teor de inclusão ou de constituintes da segunda fase dos metais por análise automática de imagens).
- [2.4.5] ASTM E112 - Standard Test methods for Determining Average Grain size (Métodos de ensaio normalizados para a determinação da granulometria média).
- [2.4.6] UNI EN ISO 643 - Aços - Determinação micrográfica da granulometria aparente.
- [2.4.7] UNI EN 10084 - Aços de cementação - Condições técnicas de fornecimento.



[2.4.8] ASTM A519 - Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing (especificação padrão para tubos mecânicos de aço carbono e ligas sem costura).

[2.4.9] ASTM A304 - Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Bars Subject to Endureability Requirements.

[2.4.10] UNI EN 10270 - Fio de aço para molas mecânicas - fio de aço para molas patenteado, trefilado a frio, não ligado.

2.5 Introdução à microscopia de varrimento

O Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM) permite a observação e caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos heterogêneos numa escala nanométrica a micrométrica. O MEV é utilizado para observar e caracterizar as características da superfície em grandes (ou pequenas) áreas da amostra. Na metalografia, o MEV fornece informações sobre as microestruturas, caracterização de fases secundárias/intermetálicas, mecanismos de falha, etc.

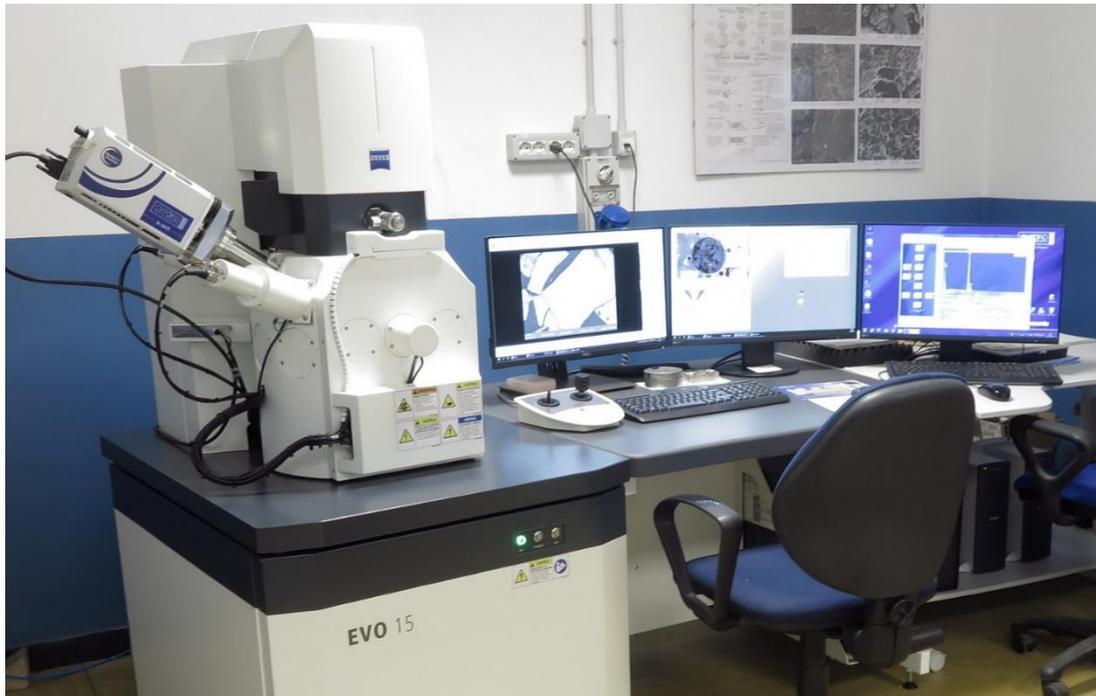


Fig. 2.5.1- Vista geral de um Microscópio Eletrónico de Varrimento. Fonte: Laboratório IIS

O MEV produz imagens de uma amostra através do varrimento da superfície com um feixe focalizado de electrões. O feixe de electrões é gerado a partir de um cátodo e é acelerado até à amostra por uma tensão elevada (de 1000 a 30000 V); o cátodo pode ser um cátodo quente que emite electrões por efeito termiônico (filamento de tungsténio, hexaboreto de lantânio LaB6) ou um cátodo frio que emite por um campo eletrostático (pistola de emissão de campo FEG).

Quando os electrões (electrões primários) atingem a superfície metálica da amostra, são gerados os seguintes sinais:



- Os electrões secundários (SE), gerados pelas interações inelásticas entre o feixe de electrões e a amostra, afectam apenas as camadas superficiais ou subsuperficiais. Permitem a formação de uma imagem morfológica e topográfica da superfície da amostra.
- Os electrões retrodifundidos (BSD), gerados por colisões elásticas entre electrões e átomos, induzem alterações na trajetória dos electrões; os átomos grandes dispersam mais electrões do que os pequenos, dando um sinal maior à medida que o número atómico (Z) aumenta. Este princípio permite obter imagens com informação qualitativa das composições químicas.
- Fótons de raios X gerados pela interação de electrões com átomos. Cada fóton de raios X é caracterizado por uma frequência (ν) e um comprimento de onda (λ) que são característicos do átomo do elemento a partir do qual foi gerado.

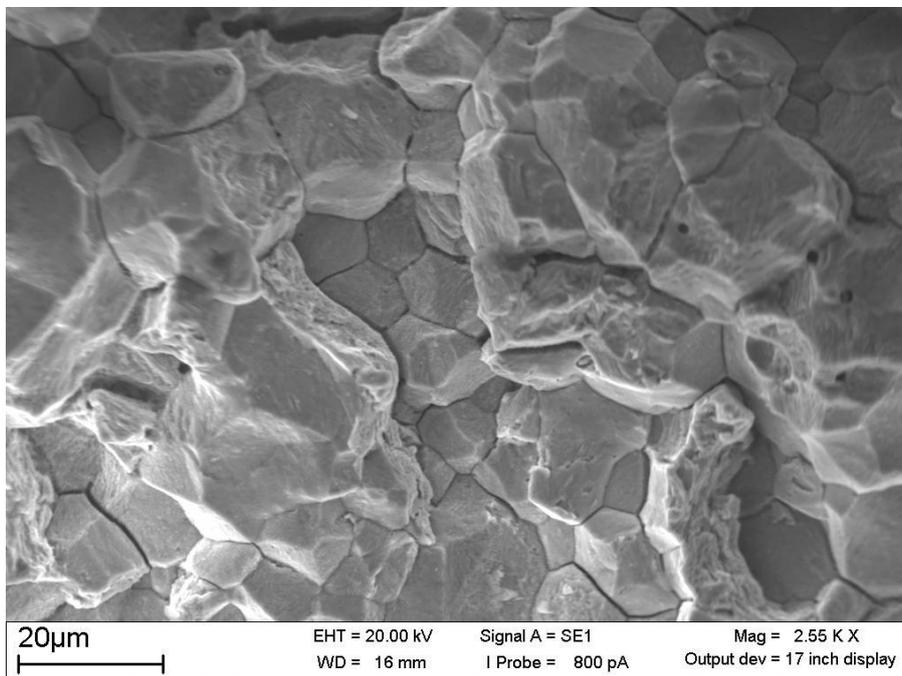


Fig. 2.5.2- Detalhe de uma fratura intergranular obtida por SEM com electrões secundários (SE). Fonte: Laboratório do IIS.

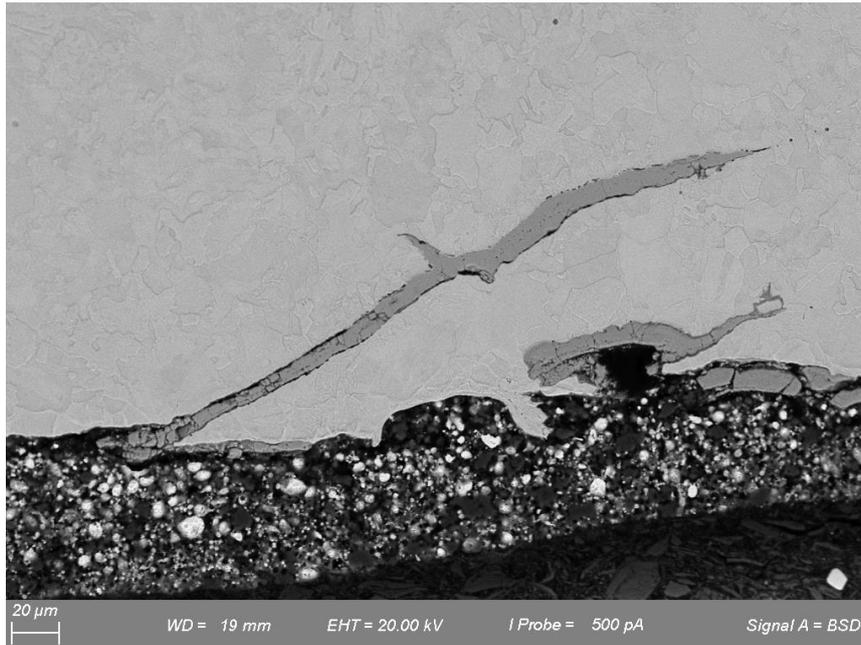


Fig. 2.5.3- detalhe de uma secção micrográfica obtida por SEM com electrões retrodifundidos (BSD). Fonte: Laboratório do IIS.

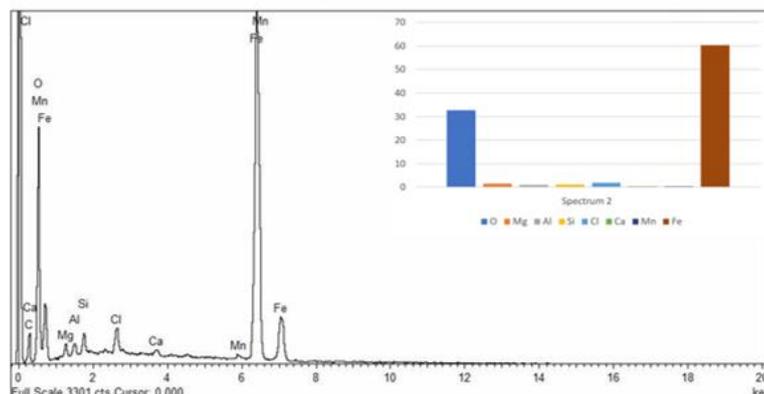
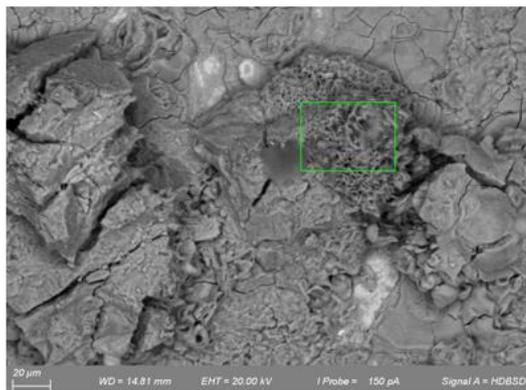


Fig. 2.5.4- Exemplo de análise EDS de depósitos. Fonte: Laboratório do IIS.

As sondas do SEM captam o sinal e enviam os dados para o sistema de aquisição (consola de controlo) onde são processados para obter imagens tridimensionais e informações sobre a composição.



As vantagens do MEV em comparação com a microscopia ótica (MO) são apresentadas nos pontos seguintes:

- Elevada profundidade de campo (DOF) - Imagens 3D com informação topográfica.
- Ampliações muito elevadas (> 150000x).
- Imagens de alta resolução (3-10 nm).

Além disso, a instrumentação SEM está frequentemente equipada com um sistema EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) que permite a análise da composição química das características que são observadas no monitor.

O SEM pode ser equipado com outros tipos de sondas, tais como:

- EBSD (Difração por retrodifusão de electrões)
- SAN (Nanossondas Auger de Varrimento)
- WDS (Espectroscopia de raios X dispersiva em comprimento de onda).

2.5.1 Modos de funcionamento

Os dois componentes principais de um SEM são a coluna de electrões e a consola de controlo. A coluna de electrões é constituída por um canhão de electrões e por lentes de electrões, que influenciam as trajectórias dos electrões que se deslocam na coluna de vácuo. A base da coluna é normalmente ocupada por bombas de vácuo que produzem um vácuo de cerca de 10^{-4} Pa. A consola de controlo é constituída por um tubo de raios catódicos (CRT), um ecrã de visualização, botões e um teclado de computador que controla o feixe de electrões.

O canhão de electrões gera electrões e acelera-os a uma voltagem de aceleração na gama de 1000-30000 V. O tamanho do ponto de um canhão de filamento de tungsténio é demasiado grande para produzir uma imagem nítida, a não ser que se utilizem lentes de electrões para diminuir a ampliação, o que criará um ponto de electrões focado muito mais pequeno na amostra.

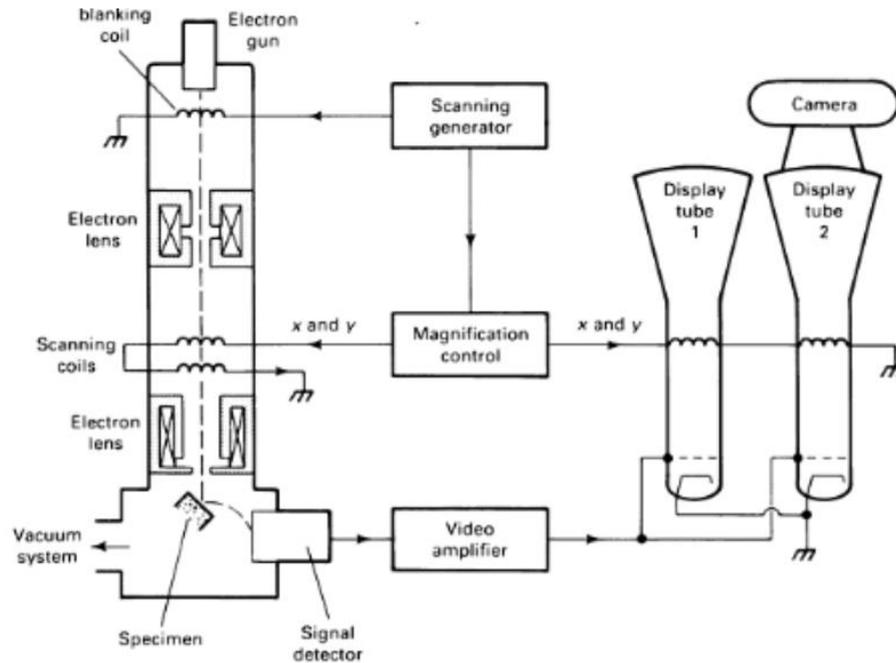


Fig. 2.5.5- Desenho típico do Microscópio Eletrónico de Varrimento. Fonte: [2.5.1] ASM HANBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas

A imagem digitalizada é formada ponto a ponto. O sistema de deflexão faz com que o feixe se desloque para uma série de localizações discretas ao longo de uma linha, depois ao longo de outra linha que se encontra abaixo da primeira, e assim sucessivamente, até ser gerado um "raster" retangular na amostra.

Ao mesmo tempo, o mesmo gerador de digitalização cria uma imagem rasterizada semelhante no ecrã de visualização.

São utilizados dois pares de bobinas de deflexão electromagnética para varrer o feixe através do espécime.

O primeiro par de bobinas desvia o feixe para fora do eixo ótico do microscópio e o segundo par dobra o feixe de volta para o eixo no ponto de rotação do varrimento. A ampliação M da imagem é a relação entre o comprimento do traçado no ecrã de visualização e o comprimento correspondente do traçado na amostra. Por exemplo, uma varredura de $100\ \mu\text{m}$ de largura no espécime apresentada num ecrã de $10\ \text{cm}$ de largura gera uma imagem com uma ampliação de $10000\times$.

Quando o operador necessita de aumentar a ampliação da imagem, as bobinas de varrimento são menos excitadas e o feixe desvia-se ao longo de uma distância menor na amostra.

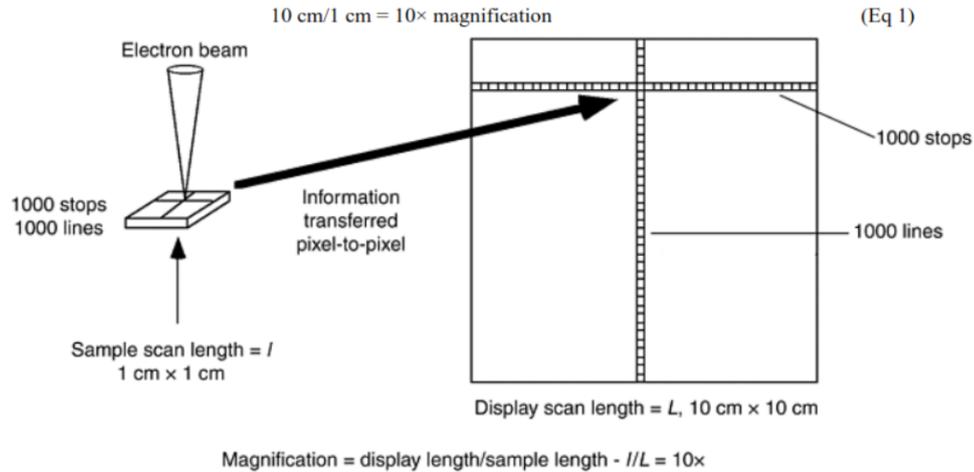


Fig. 2.5.5 - Ilustração de como a informação obtida a partir de um raster quadrado na amostra é transferida para o ecrã de visualização para produzir a ampliação. [2.5.2] Scanning electron microscopy and X-Ray microanalysis - Third edition - Joseph Goldstein. Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.

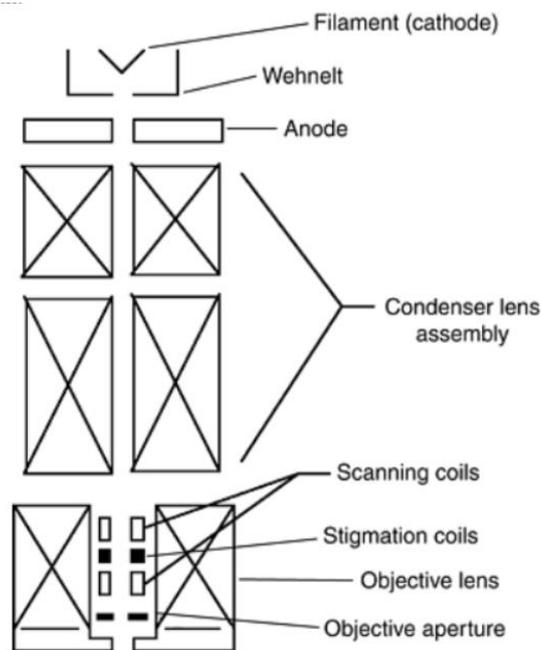


Fig. 2.5.6 - Esboço de um microscópio eletrónico de varrimento típico. Fonte: [2.5.3] ASM HANBOOK - Volume 11 - Análise e prevenção de falhas

Os dois sinais mais utilizados para produzir imagens SEM são os electrões secundários (SE) e os electrões retrodifundidos (BSE); ambos os sinais são recolhidos quando é aplicada uma tensão positiva a um ecrã coletor em frente do detetor. Os electrões captados pelo cintilador/fotomultiplicador são depois amplificados para visualização.

Quando os electrões do feixe atingem a amostra, interagem como partículas de carga negativa com o campo elétrico dos átomos da amostra. A carga positiva dos prótons está



concentrada no núcleo, enquanto a carga negativa dos electrões atómicos está muito mais dispersa numa estrutura de concha de electrões do feixe. A interação entre o feixe de electrões e os átomos pode desviar os electrões do feixe ao longo de uma nova trajetória ("dispersão elástica" sem perda de energia cinética), a dispersão elástica pode deixar a amostra (retrodispersão); a probabilidade de dispersão elástica aumenta em correlação com o número atómico (Z). Os átomos mais pesados têm uma carga positiva muito mais forte, a energia do eletrão aumenta à medida que o número atómico (Z) diminui, aproximadamente como $1/E^2$.

Simultaneamente à dispersão elástica, os electrões do feixe perdem energia e transferem-na de várias formas para os átomos do espécime (dispersão inelástica), gerando sinais de imagem úteis, como os electrões secundários, e sinais de análise, como os raios X.

Os electrões retrodispersos são os electrões que são dispersos a partir dos espécimes e que podem ser recolhidos à medida que o feixe primário percorre a superfície do espécime. A imagem dos electrões retrodispersos recolhidos da superfície do espécime é apresentada num tubo de raios catódicos (CRT) e pode ser captada. Existe alguma perda de energia dos electrões durante o processo de retrodifusão. Quanto maior for o número atómico dos elementos na amostra, maior será o grau de retrodifusão (menor perda de energia). Isto significa que os elementos com números atómicos mais elevados, como o ferro ($Z = 26$), aparecerão mais brilhantes na imagem de electrões retroespalhados do CRT do que os elementos com números atómicos mais baixos, como o oxigénio ($Z = 8$). A figura 2.5.5 apresenta um exemplo de uma imagem de electrões retrodifundidos da penetração de uma escala de óxido. O aço aparece como um constituinte cinzento claro, e o óxido aparece como dois constituintes cinzentos mais escuros.

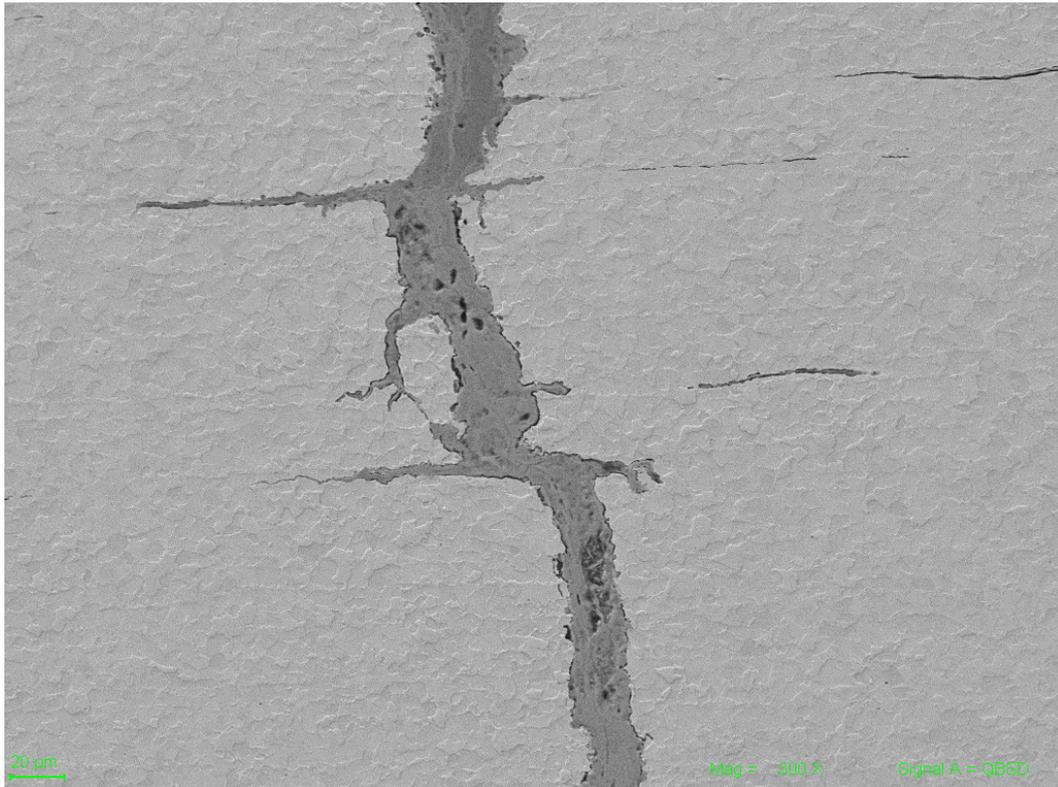


Fig. 2.5.7- Detalhe de uma fissura obtida por Microscópio Eletrónico de Varrimento com sinal BSE. Fonte: Laboratório do IIS.

Os electrões secundários, por outro lado, são o resultado da interação dos electrões primários (do feixe) com os electrões contidos nos átomos da amostra. Os electrões primários podem deslocar os electrões orbitais soltos dos átomos. Estes electrões deslocados são designados por electrões secundários. Os SE têm uma energia muito mais baixa do que os electrões retrodifundidos, descritos anteriormente. Isto significa que os electrões secundários só são detectados nas regiões superficiais e próximas da superfície da amostra, porque os das regiões mais profundas são facilmente absorvidos pela amostra. Assim, os electrões secundários produzem uma imagem de electrões secundários no tubo de raios catódicos que revela a topografia da superfície e produz uma imagem com maior profundidade de campo.

Nesta micrografia, as inclusões podem ser vistas em muitos dos vazios na superfície fissurada.

Também são emitidos raios X da amostra, devido à interação dos electrões primários e retrodifundidos com os electrões da camada interna dos átomos da amostra. Os electrões primários/retrodifundidos têm energia cinética suficiente para deslocar os electrões da camada interna para fora da órbita. Quando um electrão é deslocado de uma determinada camada interna de electrões, é emitido um fóton de raios X quando um electrão se desloca para o seu lugar. Estes raios X têm uma energia característica (e comprimentos de onda) para determinados átomos. Por este

motivo, são designados por raios X característicos. Isto significa que cada raio X que é recolhido tem uma energia e um comprimento de onda que é único para o elemento específico presente na amostra. A importância da recolha destes raios X reside no facto de se poder obter informação sobre a composição.

Geralmente, num SEM, apenas a energia dos raios X é analisada. A técnica é designada por espectroscopia de dispersão de energia, ou EDS. A intensidade é representada no eixo vertical e a energia dos raios X é representada no eixo horizontal. Esta análise indica os elementos presentes, mas não revela a distribuição dos elementos. Alguns SEMs podem fornecer um mapa de raios X EDS dos elementos contidos na superfície da amostra.

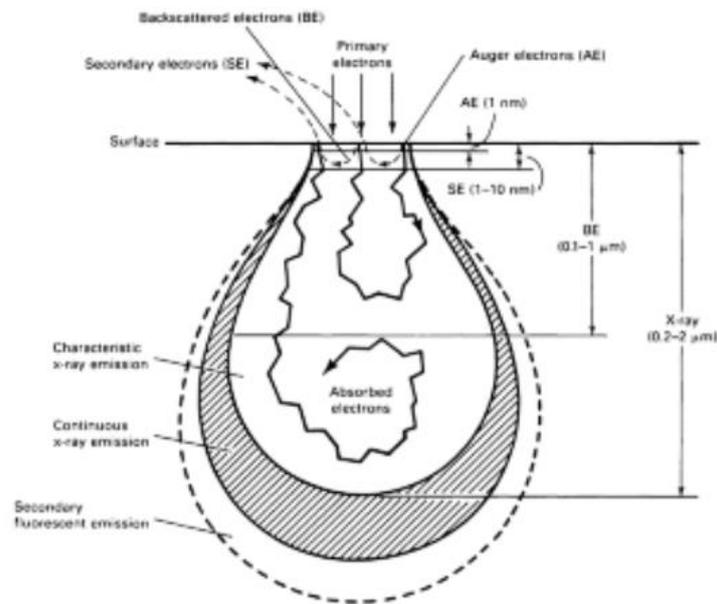


Fig. 2.5.8 - Tipos de radiação e de electrões emitidos por feixes de electrões utilizados no MEV. Fonte: [2.5.1] ASM HANBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas

2.5.2 Formas de contraste

2.5.2.1 Contraste topográfico

Os efeitos de contraste topográfico mais pronunciados resultam da dependência do rendimento dos electrões secundários e do coeficiente de retrodifusão em relação ao ângulo entre o elemento de superfície e o feixe de electrões primários. O contraste resultante é análogo a uma imagem ótica em que a luz é gerada a partir do detetor e a direção de observação é a do feixe de electrões incidente. A impressão estereoscópica é reforçada por sombras em regiões escondidas do detetor.

2.5.2.2 Contraste de materiais

O contraste do material, ou contraste do número atómico, afecta os resultados da interação anelástica entre o electrão retrodifundido e os átomos da amostra.



O contraste material é útil para a identificação qualitativa de fases e é especialmente adequado para a avaliação quantitativa da geometria microestrutural através da análise de imagens. O contraste do número atómico é normalmente obscurecido pelo contraste topológico e, para os electrões secundários, é suficientemente forte apenas em casos favoráveis, como superfícies idealmente planas.

O contraste topográfico para os electrões retrodispersos é muito menos pronunciado do que para os electrões secundários e pode ser significativamente reduzido utilizando detectores em forma de anel, mesmo que a superfície seja rugosa. Os efeitos de borda podem continuar a ser um problema e, idealmente, é necessário um polimento plano para amostras metalográficas em que as fases têm uma composição química semelhante.

Uma diferença no número atómico médio inferior a 1 é suficiente para um ligeiro contraste material, pelo menos na gama inferior de números atómicos onde o contraste é mais pronunciado.

2.5.2.3 Padrões de canalização de electrões

Os electrões primários penetram na rede cristalina a uma profundidade que depende da densidade de empacotamento atómico ao longo das diferentes direcções cristalográficas. Se os electrões seguirem os canais entre as filas de átomos, a probabilidade de escaparem diminui. Muitas condições de Bragg são satisfeitas com pequenas variações angulares. A oscilação do feixe de electrões primários em torno de um ponto da amostra cria linhas de difração a partir de uma pequena área ($< 10 \mu\text{m}$). Estes padrões de canalização de electrões em áreas seleccionadas são semelhantes aos padrões Kikuchi obtidos por TEM.

As informações sobre a orientação do cristal, os limites do grão, os gémeos e outras características do cristal são obtidas a partir de uma camada superficial com menos de 50 nm de espessura.

2.5.2.4 Contraste dos bordos

Nas arestas, a região de fuga de electrões é deformada e mais electrões secundários e electrões retrodifundidos podem sair da amostra nas arestas positivas através da área mais elevada da superfície truncada; nas arestas negativas, o rendimento de electrões é reduzido por absorção adicional. Este efeito desfoca a forma exacta dos bordos e pode ser atenuado reduzindo a energia dos electrões primários. No entanto, o contraste dos bordos é por vezes vantajoso. As arestas podem ser detectadas entre facetas e fases de brilho idêntico e partículas pequenas. Os limites dos grãos aparecem como linhas escuras após a gravação. O contraste entre fases de dureza diferente pode ser obtido através da produção de vários graus de microrrugosidade por polimento.



2.5.3 Melhoria da resolução e do contraste

Cada elemento do MEV tem as suas próprias características em termos de resolução e ruído, que determinam a qualidade da imagem. O operador de MEV deve conhecer os detalhes para otimizar a qualidade da imagem para uma amostra específica e para o objetivo da investigação.

Por exemplo, a relação sinal/ruído dos electrões secundários aumenta juntamente com a intensidade do feixe de electrões primários, o que leva a um aumento do rendimento dos electrões e do tempo de varrimento.

A corrente das lentes do condensador que controlam o tamanho do ponto, a tensão de aceleração, a distância de trabalho e o tempo de varrimento podem ser definidos pelo operador.

2.5.3.1 *Imagiologia de electrões secundários*

A resolução em profundidade das imagens produzidas em modo SE deve-se ao pequeno volume a partir do qual os electrões secundários são excitados. A resolução de uma imagem SE obtida por um microscópio de varrimento depende da largura da distribuição de energia dos electrões primários que controlam a aberração cromática, a aberração da lente, a precisão do sistema de varrimento, a eficiência dos detectores e a qualidade dos amplificadores. Outros factores, como a vibração do chão ou do sistema de bombagem, podem deteriorar a qualidade da imagem.

Os factores a serem optimizados pelo operador incluem a intensidade (I) e a tensão de aceleração (EHT) do feixe primário, o tamanho da abertura final e a sua distância à superfície da amostra (WD), a velocidade de varrimento e a inclinação da superfície da amostra. Para uma grande profundidade de focagem, que é normalmente necessária para superfícies fracturadas com baixa ampliação, selecciona-se uma pequena abertura e uma grande distância de trabalho. Para uma ampliação mais elevada, deve ser utilizada uma distância de trabalho curta e uma corrente de lente elevada para minimizar o tamanho do ponto.

Uma pequena dimensão do ponto resulta na emissão de uma pequena corrente de electrões a partir da superfície da amostra, o que reduz a relação sinal/ruído.

A escolha óptima da tensão de aceleração do feixe primário depende do tipo de amostra. Com tensões de aceleração baixas, o feixe torna-se sensível à contaminação e à aberração do campo de bandeja. No entanto, a energia elevada do feixe é menos adequada para produzir contraste topográfico em alta resolução.



Normalmente, é necessário reduzir a tensão de aceleração para observar espécimes não condutores ou para melhorar a resolução topográfica.

2.5.3.2 *Imagiologia por electrões retrodifundidos*

A resolução do modo retrodifundido é muito inferior à resolução do modo secundário devido à maior largura e profundidade de fuga dos electrões. A profundidade da informação depende fortemente da tensão de aceleração e diminui com o número ou a densidade atómica.

Podem ser obtidas imagens BE de alta resolução reduzindo a tensão de aceleração; contudo, a profundidade da informação das superfícies metálicas utilizando BE é pelo menos uma ordem de grandeza superior à do electrão secundário a 5 KeV e a energia de aceleração deve ser reduzida ainda mais. Isto requer detectores de alta eficiência.

2.5.4 Requisitos dos espécimes

Normalmente, não são necessárias técnicas especiais na preparação da amostra para SEM. As amostras de fratura têm de ser cortadas num tamanho que caiba na câmara de amostras do microscópio, sem contaminar a superfície.

O espécime pode ser colado a um tubo metálico que se encaixa na câmara do espécime. Normalmente, mais de um espécime pode ser colocado na câmara.

Os espécimes metalográficos montados são também utilizados no MEV, sendo utilizados corantes condutores especialmente preparados para fazer a "ponte" entre o espécime metálico e o suporte metálico do espécime, de modo a ligar eletricamente o espécime à terra. Se não for eletricamente ligado à terra, as cargas eléctricas acumulam-se na superfície do espécime e causam problemas de imagem. De facto, em certas amostras, como o ouro, devido à sua excelente condutividade eléctrica, é depositado na superfície por pulverização catódica para drenar o excesso de electrões e melhorar a imagem secundária. A pulverização catódica condutora é essencial para superfícies não condutoras.

Se a análise EDS for necessária para analisar qualitativamente a composição de inclusões não metálicas, é importante não polir a amostra com compostos de polimento de alumina ou sílica, porque podem contaminar a amostra. Os compostos de polimento de diamante são geralmente mais adequados, a menos que se esteja a analisar carbonetos.

2.5.5 Análise EDS

A EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy), também conhecida como análise de raios X por dispersão de energia, é uma técnica analítica utilizada em microscópios electrónicos de varrimento (SEM) para determinar a composição química de amostras. Esta técnica é particularmente útil para obter informações sobre a distribuição dos elementos numa amostra e para identificar os elementos presentes.



Quando os electrões de um feixe de electrões de alta energia atingem a amostra, podem remover electrões das órbitas dos átomos da amostra. Esta interação cria espaços vazios nas camadas atómicas.

Os electrões em falta nas camadas atómicas são substituídos por electrões de camadas superiores. Quando isto acontece, é libertada energia sob a forma de raios X, que são característicos dos elementos envolvidos. Os electrões que caem para preencher as órbitas internas vazias libertam raios X com energias específicas para cada elemento.

Os espectros de raios X, constituídos por picos de energia específica, são detectados por um detetor de dispersão de energia. Este detetor mede a energia dos raios X emitidos pela amostra após interação com o feixe de electrões.

Cada elemento tem um espectro de raios X único com picos de energia distintos (o seu próprio pico de identificação). Os picos de energia medidos no detetor permitem a identificação dos elementos presentes na amostra.

Os raios X analisados no SEM têm normalmente energias entre 0,1 e 20 KeV.

O eletrão do feixe incidente deixa o átomo tendo perdido pelo menos E_K , em que E_K é a energia de ligação do eletrão à camada K. Os electrões orbitais ejectados deixam o átomo com uma energia cinética de alguns eV a vários KeV, dependendo da interação. O próprio átomo fica num estado excitado com um eletrão da camada interna em falta. O átomo regressa ao seu estado fundamental (energia mais baixa) em cerca de 1 ps através de um conjunto limitado de transições permitidas de electrões da camada exterior que preenchem a lacuna da camada interior. As energias dos electrões nas camadas (níveis de energia atómica) são nitidamente definidas com valores característicos de um elemento específico. A diferença de energia entre as camadas de electrões é um valor específico ou característico de cada elemento.

O excesso de energia pode ser libertado do átomo durante a relaxação de uma de duas formas. No processo Auger, a diferença de energias das camadas pode ser transmitida a outro eletrão da camada exterior, ejectando-o do átomo como um eletrão com uma energia cinética específica. No processo de raios X característico, a diferença de energia é expressa como um fóton de radiação electromagnética que tem uma energia bem definida.

Os electrões de um átomo ocupam camadas de electrões à volta do átomo que têm uma energia específica. Por ordem crescente de distância do núcleo atómico, estas camadas são designadas por K, L, M, etc.

As linhas características de raios X resultam de transições entre subcamadas.

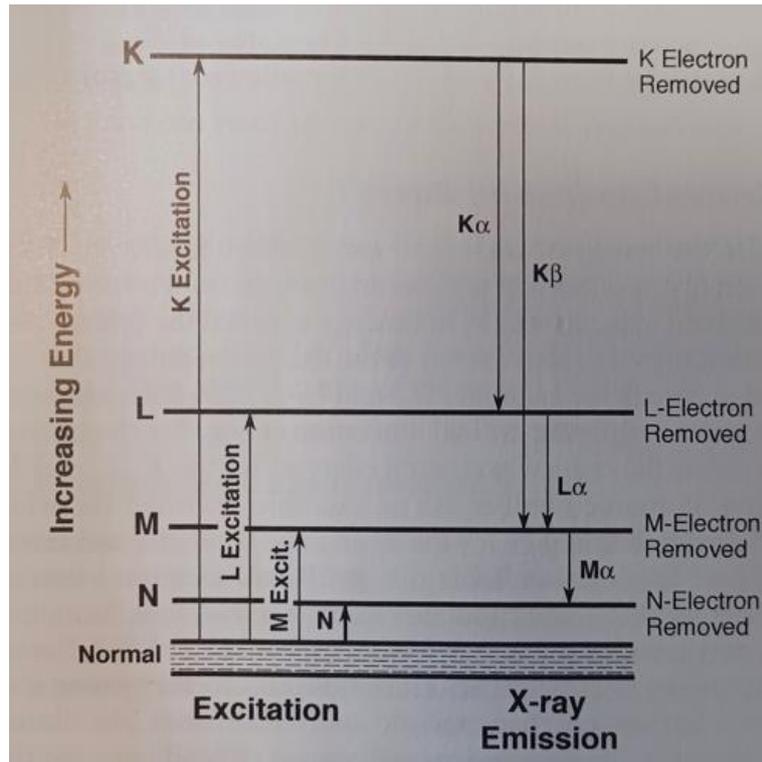


Fig. 2.5.9 - Diagrama de níveis de energia de um átomo. A energia do átomo aumenta com a ionização da camada K, L, M ou N (excitação). Fonte: [2.5.2] Microscopia eletrônica de varrimento e microanálise de raios X - Terceira edição - Joseph Goldstein, Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.

Para além de identificar elementos, o EDS pode ser utilizado para mapear a distribuição espacial dos elementos na amostra. Isto fornece informações sobre a composição química em diferentes partes da amostra. Além disso, o EDS pode fornecer informações quantitativas sobre a percentagem de cada elemento presente na amostra.

Em resumo, o EDS num microscópio eletrónico de varrimento permite a identificação dos elementos químicos presentes numa amostra através da análise dos espectros de raios X emitidos durante a interação do feixe de electrões com a amostra. Esta técnica é valiosa em metalografia, fractografia e outro tipo de análises em que é importante compreender a composição química das amostras a um nível microscópico.

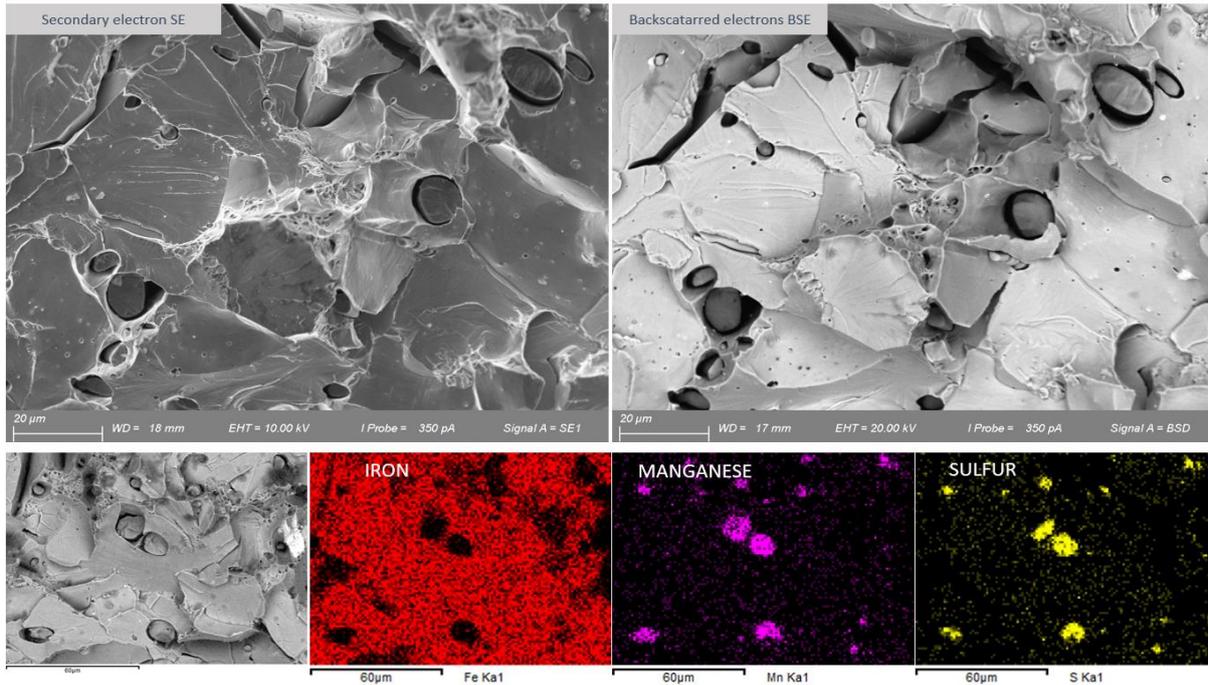


Fig. 2.5.9 - Exemplo de um mapeamento de elementos obtidos por EDS. Fonte: Laboratório IIS

Referências:

[2.5.1] ASM HANBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas

[2.5.2] Microscopia eletrônica de varrimento e microanálise de raios X - Terceira edição - Joseph Goldstein, Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer, e Joseph Michael.

[2.5.3] ASM HANBOOK - Volume 11 - Análise e prevenção de avarias

2.6 Demonstração das capacidades do microscópio de varrimento

2.6.1 Exame das superfícies de fratura

A microscopia eletrônica de varrimento encontra na fractografia uma das suas principais utilizações. As superfícies de fratura são caracterizadas por uma morfologia recortada e, normalmente, devem ser observadas por electrões secundários (SE) para obter informações sobre a morfologia e a topografia.

Uma fratura pode ser dúctil, frágil, intergranular ou propagada devido a fenómenos de fadiga mecânica. As fracturas dúcteis são caracterizadas pelo rasgamento do metal após deformação plástica e acumulação de energia interna. As fracturas dúcteis de tração na maioria dos materiais têm um aspeto fibroso e são classificadas à escala macroscópica como planas (perpendiculares à tensão máxima de tração) ou de cisalhamento (a cerca de 45° da tensão máxima de tração). As fracturas dúcteis ocorrem por formação e coalescência de micro-vazios. Na literatura técnica, estes micro-vazios são designados por "cavinhas".

O exame SEM das superfícies de fratura dúctil revela informações sobre o tipo de tensão, a direção de propagação da fenda e a ductilidade relativa do material. A forma das covinhas é determinada pelo tipo de carga que o componente sofreu durante a fratura. A orientação das covinhas revela a direção da propagação da fenda. As ondulações equiaxiais têm a forma de taça e formam-se em condições de deformação plástica uniforme na tensão uniaxial (por exemplo, ensaio de tração). Em comparação, as covinhas alongadas em forma de parábolas resultam de condições de deformação plástica não uniforme (por exemplo, flexão ou sobrecarga de cisalhamento).

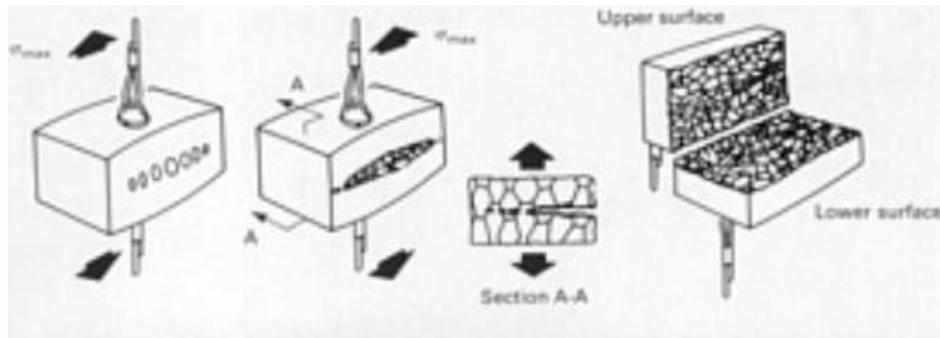


Fig. 2.6.1 - Mecanismo de fratura dúctil. Formação de covinhas.

Fonte: [2.6.2] ASM HANDBOOK - Volume 12 - Fractografia

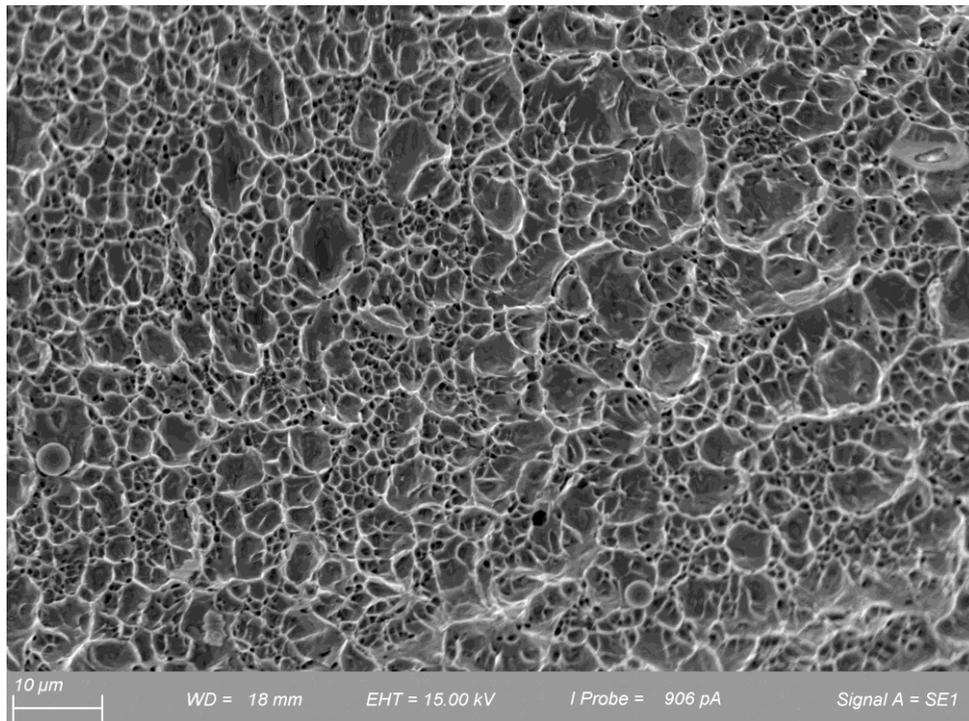


Fig. 2.6.2 - Exemplo de uma superfície de fratura dúctil observada por SEM (electrões secundários). Fonte: Laboratório do IIS.

As fracturas frágeis são caracterizadas por uma rápida propagação da fenda com menor utilização de energia do que nas fracturas dúcteis e sem deformação plástica. As fracturas frágeis têm um aspeto brilhante e granular e podem não apresentar necking; tipicamente, têm um percurso



plano e são perpendiculares à direção da tensão de tração máxima. Pode estar presente um padrão em chevron na superfície da fratura, apontando para a origem da fissura, especialmente em fracturas frágeis de componentes planos semelhantes a placas. Em grande ampliação, a observação da fratura frágil por SEM revela superfícies muito planas conhecidas como planos de clivagem.

A clivagem é uma fratura de baixa energia que se propaga ao longo de planos cristalográficos de baixo índice bem definidos, conhecidos como planos de clivagem. Uma fratura por clivagem deve ter faces perfeitamente maquinadas e deve ser completamente plana e sem características. No entanto, as ligas metálicas são policristalinas e contêm limites de grão e outras imperfeições que alteram a orientação da rede cristalina, como a possível incompatibilidade dos planos de baixo índice entre os grãos. Estas ligas produzem planos de clivagem distintos.

Os padrões de rio representam passos entre diferentes facetas de clivagem locais em alturas ligeiramente diferentes, mas ao longo do mesmo plano de clivagem geral. Uma vez que a estrutura cristalográfica local pode modificar a direção local da propagação da fenda, a direção geral só é atribuída depois de se confirmar a orientação dos padrões de rio em várias áreas da superfície da fratura.

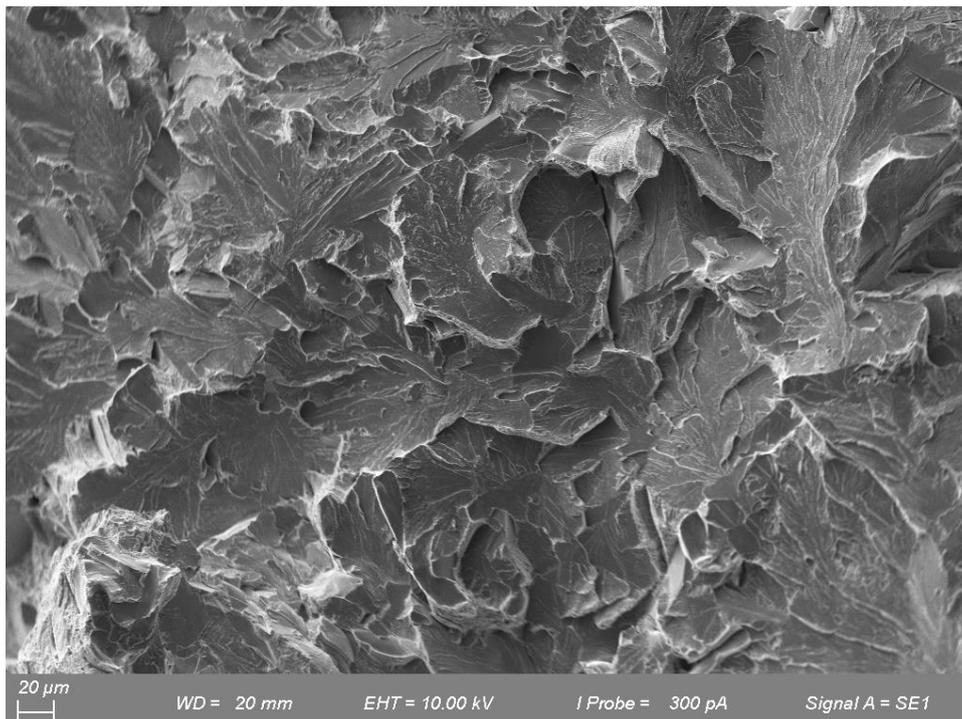


Fig. 2.6.3 - Exemplo de uma superfície de fratura frágil observada por SEM (electrões secundários). Fonte: Laboratório do IIS.

A fratura frágil intergranular, designada por decoesão dos limites do grão, é promovida pelo efeito sinérgico das condições ambientais e da tensão de tração, ou é o resultado da presença dos

constituintes de ponto de fusão mais baixo nos limites do grão. É fácil reconhecer a fratura intergranular, mas a identificação das causas da fratura é mais complexa.

O processo coesivo que envolve o enfraquecimento das ligações atômicas, a redução da energia superficial necessária para a deformação localizada, a pressão do gás molecular, a depleção das películas protectoras e a dissolução anódica nos locais activos está associado à fragilização por hidrogénio e à fissuração por corrosão sob tensão (SCC).

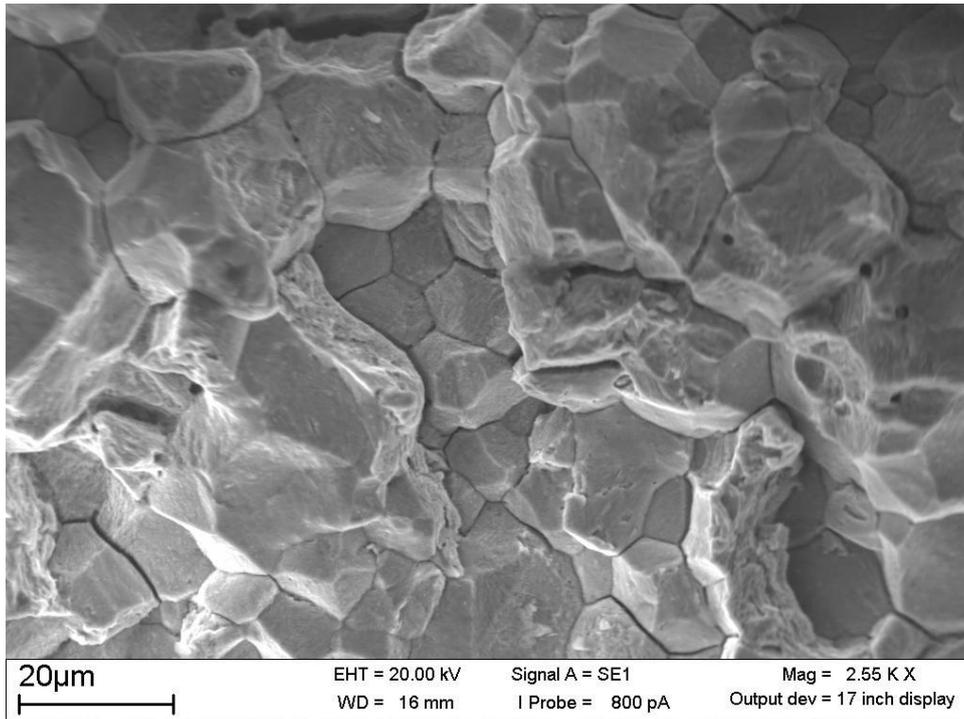


Fig. 2.6.4 - Exemplo de superfície de fratura intergranular observada por SEM (electrões secundários). Fonte: Laboratório do IIS.

A fadiga é um mecanismo dependente do tempo que pode ser separado em três fases que apresentam características diferentes:

- Fase I: início da fissura ou nucleação da fissura.
- Fase II: propagação da fenda.
- Fase III: fratura definitiva por sobrecarga.

O estágio I é um ponto (ou pontos) que se situa normalmente na superfície, onde a deformação cíclica é maior ou onde os defeitos do material ou as tensões residuais diminuem a resistência à fadiga do componente. A fenda inicia-se normalmente numa pequena zona e propaga-se por fratura por deslizamento, estendendo-se para o interior a partir da superfície a 45° do eixo de tensão.

A localização da origem é definida pela interpretação das características da zona de propagação da fenda da fase II. As marcas de praia macroscópicas irradiam para longe da origem

em semicírculos concêntricos. Estas são as marcas de progressão normalmente associadas à fadiga. Quando a zona de propagação é examinada por SEM com maior ampliação (> 5000x), as marcas de praia podem ser resolvidas em centenas ou milhares de estrias de fadiga.

As estrias são caracteristicamente paralelas entre si e perpendiculares à direção local de propagação da fenda. O espaçamento entre estrias varia com a intensidade da tensão cíclica, sendo igual em número ao número de ciclos de carga. Além disso, as estrias de fadiga não se cruzam entre si, mas podem juntar-se e formar uma nova zona de propagação local de fendas.

Se o componente tiver sido sujeito a cargas uniformemente aplicadas de magnitude suficiente, um único avanço da frente da fenda (a distância entre duas estrias adjacentes, é uma medida da taxa de propagação por ciclo de tensão). No entanto, se o carregamento não for uniforme, existem grandes variações entre uma determinada série de ciclos de tensão e o espaçamento das estrias, embora um ciclo de tensão não apresente estrias.

Apesar da presença de estrias indicar a fadiga como o modo de falha, a sua ausência não elimina a fadiga como uma possibilidade. Por exemplo, a estriação por fadiga é bem definida nas ligas de alumínio, mas é frequentemente mal definida nas ligas ferrosas; além disso, a oxidação, a corrosão ou os danos mecânicos podem eliminar as estrias.



Fig. 2.6.5 - Exemplo de veio de liga de níquel fracturado por fenómenos de fadiga. Fonte: Laboratório do IIS.

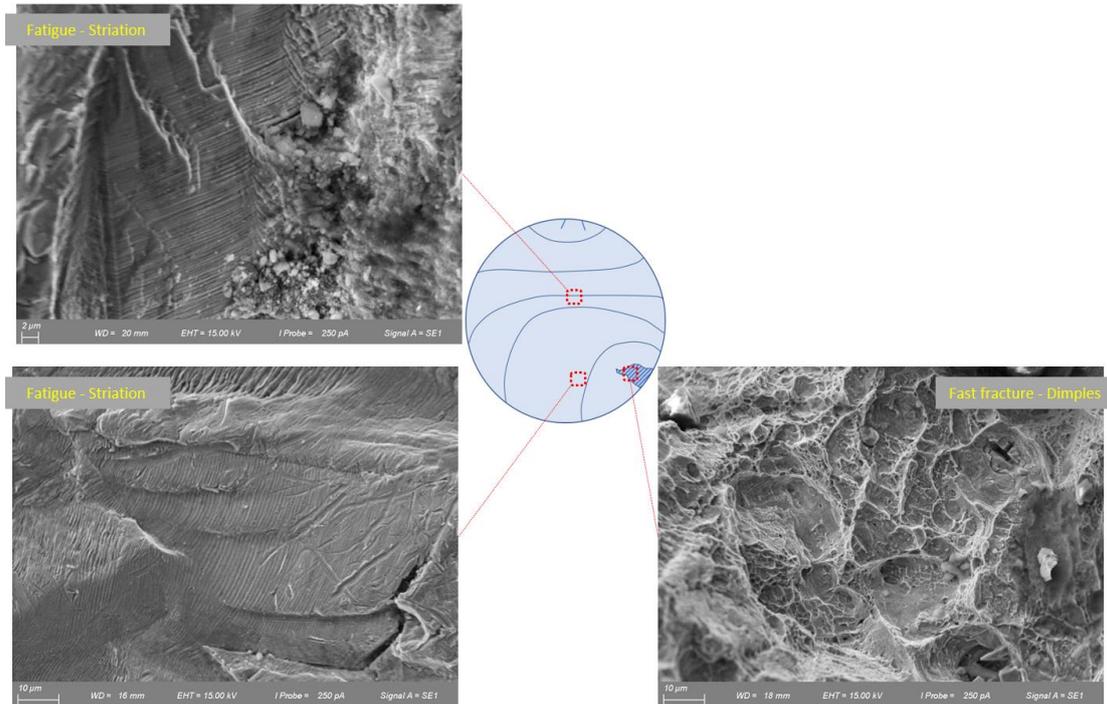


Fig. 2.6.6 - Pormenores da superfície de fratura na zona de propagação com estriamento e fratura rápida final com mecanismo dúctil (cavinhas). Fonte: Laboratório do IIS.

2.6.2 SEM aplicado à análise de falhas de ligas metálicas e suas juntas de soldadura

De acordo com o parágrafo anterior, é fácil compreender porque é que o MEV é tão importante para o estudo dos mecanismos de dano. Para além da análise da morfologia da fratura, permite analisar fases, compostos intermetálicos, depósitos/produtos de corrosão, e realizar análises químicas pontuais por sonda EDS. Alguns casos práticos são apresentados de seguida.

Exemplo 1:

Investigação de uma fissura observada no metal de solda de uma junta soldada dissimilar entre um aço carbono e um aço inoxidável super-duplex, realizada adoptando um metal de adição de liga à base de Ni (Inconel 625) e um processo de soldadura SAW.

As imagens BSE (Back Scattered Electron) revelaram a presença de uma fase branca lamelar (eutética), localizada em correspondência com as superfícies e as pontas das fissuras (ver fotos 2.6.7).

A microanálise qualitativa por EDS mostrou que estes compostos são constituídos por fases intermetálicas ricas em Nb/Mo. Estes compostos são caracterizados por um baixo ponto de fusão.

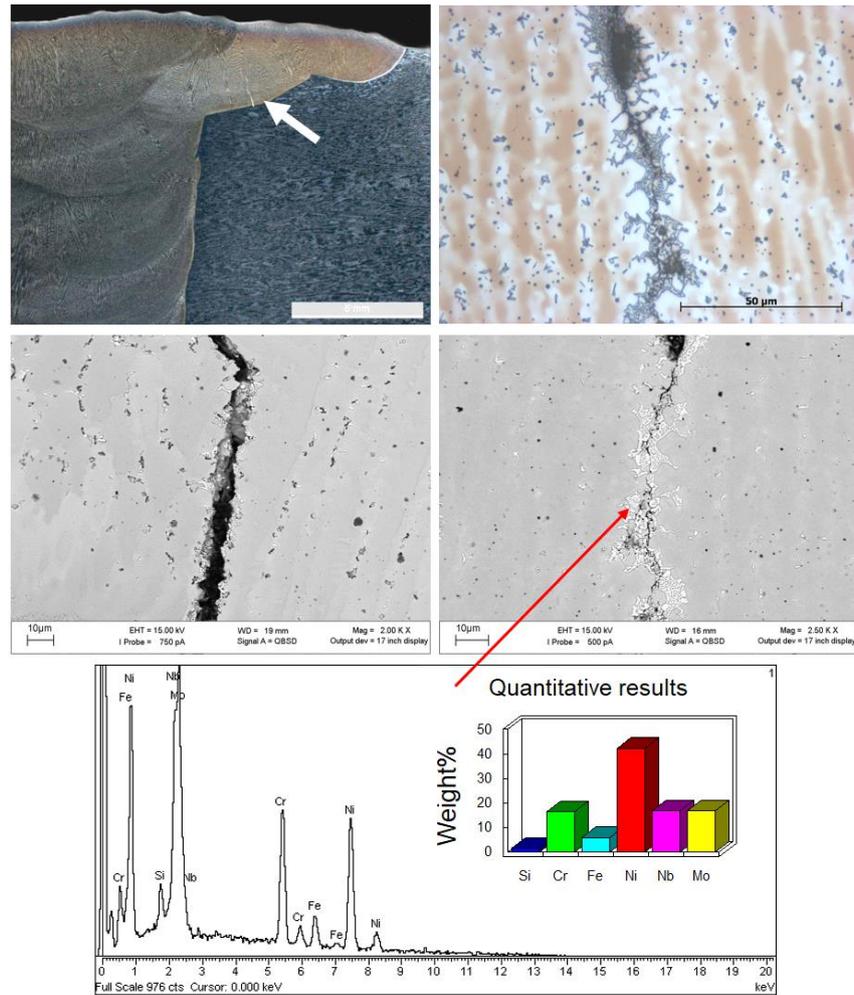


Fig. 2.6.7 - Trinca a quente observada no metal de solda de junta soldada dissimilar entre aço carbono e aço inoxidável superdúplex realizada com metal de adição de liga à base de Ni. Fonte: Laboratório do IIS.

Exemplo 2:

Investigação de uma fissura observada junto a uma junta de brasagem de um componente em liga de níquel do tipo Incoloy 800. A liga de brasagem era uma liga CuAgZn.

A investigação SEM realizada numa secção micrográfica mostrou as fissuras intergranulares. As análises EDS efectuadas no interior das fissuras revelaram principalmente cobre, prata e zinco, atribuíveis à liga de brasagem. O mecanismo de falha foi devido à fragilização por metal líquido (LME).

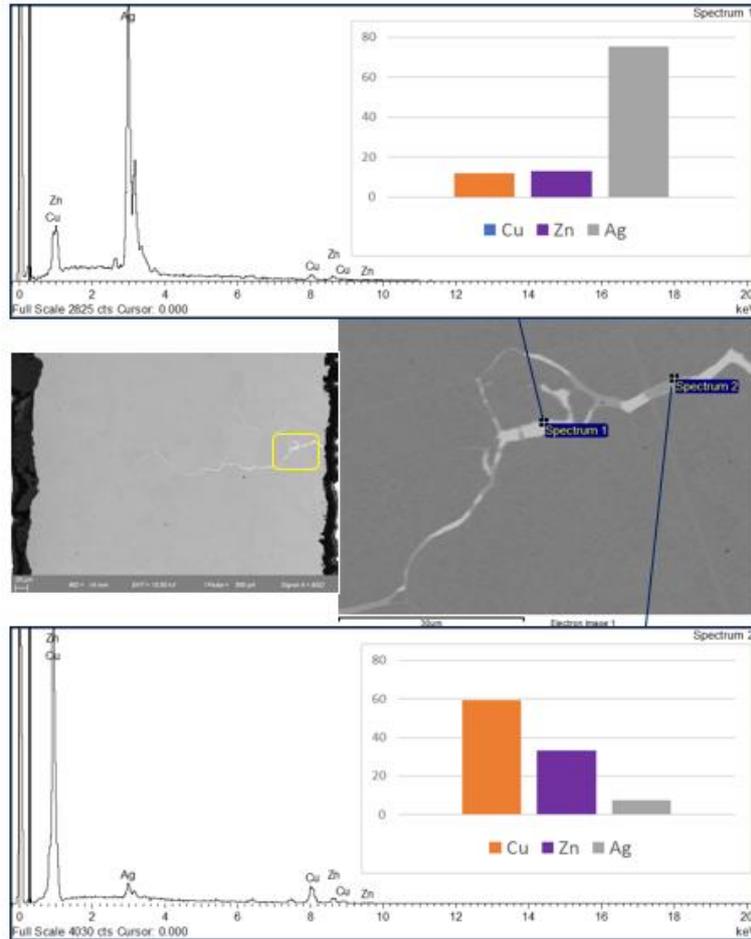


Fig. 2.6.8 - LME observada num componente soldado - Fonte: Laboratório IIS.

Exemplo 3:

Investigação de uma fratura ocorrida num tubo de permutador de calor em liga de aço inoxidável austenítico do tipo AISI 316L.

O exame micrográfico revelou uma rede de fissuras transgranulares e ramificadas em toda a secção investigada. As análises SEM e EDS detectaram cloro e outros elementos atribuíveis ao material de base. O mecanismo de falha deveu-se à fissuração por corrosão sob tensão do cloro (Cl-SCC).

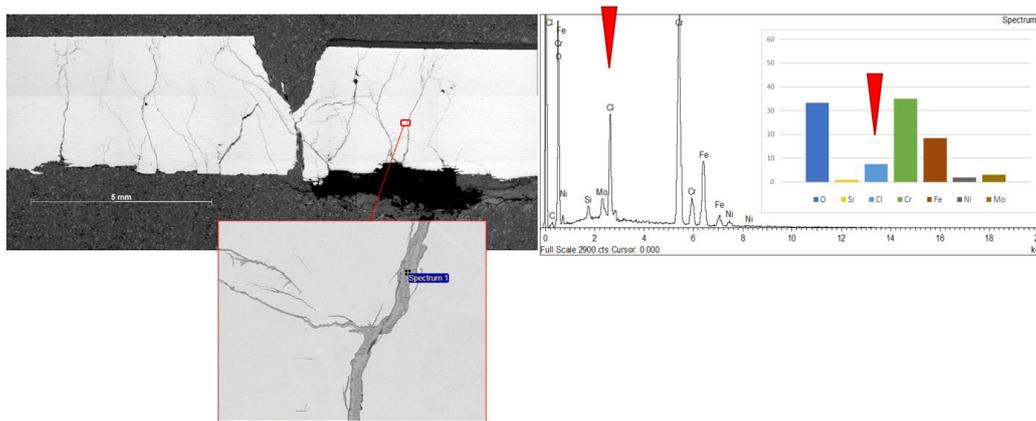




Fig. 2.6.9 - Corrosão selectiva de um aço inoxidável duplex em meio alcalino. Fonte: Laboratório do IIS.

Exemplo 4:

Investigação dos fenómenos de corrosão observados numa junta de soldadura de aço inoxidável duplex. Tanto o exame micrográfico como o fractográfico, realizados por SEM, mostraram uma corrosão selectiva de uma fase de austenite na zona afetada pelo calor do duplex. Este fenómeno é típico de um ambiente alcalino.

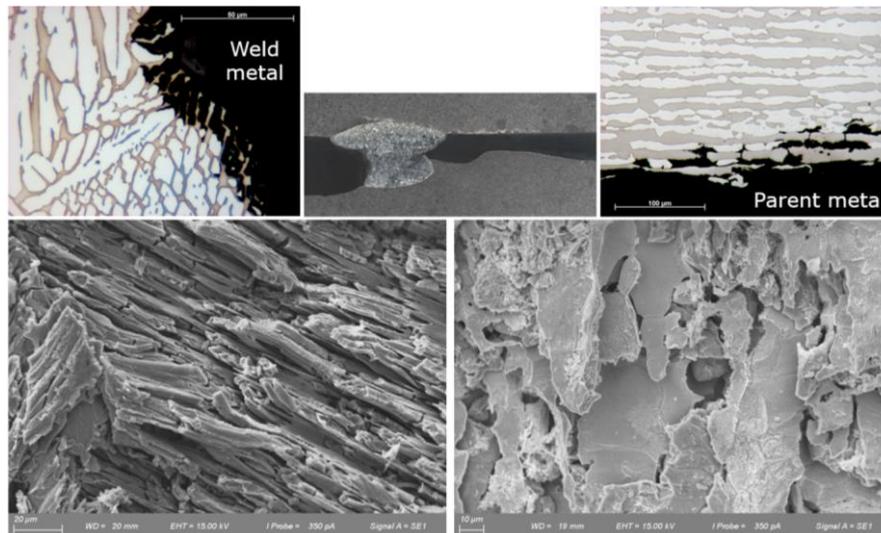


Fig. 2.6.10 - Corrosão selectiva de um aço inoxidável duplex em meio alcalino. Fonte: Laboratório do IIS.

Exemplo 5:

Investigação de uma amostra retirada de uma "caixa de entrada" de uma turbina, afetada por numerosas fissuras.

O invólucro foi fabricado em aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304 H.

A turbina foi sujeita a ciclos térmicos severos, com numerosos arranques e paragens.

A temperatura do fluxo de entrada era de cerca de 800 °C; o vapor era injetado no interior a partir dos tubos localizados no cone central, com o duplo objetivo de pré-aquecer o invólucro antes do arranque e de o arrefecer durante o funcionamento. A temperatura de serviço tinha de ser inferior a 732 °C

o vapor é injetado com um caudal de cerca de 45 kg/hora, mas em alguns períodos atingiu cerca de 800 kg/hora.

Os exames micrográficos revelaram fissuras com um padrão ramificado e intergranular, caracterizado pela presença de depósitos no seu interior. As análises EDS dos depósitos revelaram elementos atribuíveis ao material de base e quantidades variáveis de enxofre.

Os fenómenos de corrosão ocorridos foram atribuídos à fissuração por corrosão sob tensão provocada por ácidos politónicos (Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking - PASCC). Os sulfuretos podem reagir com a humidade presente no vapor e formar ácidos politónicos (H_2SnO_6). O PASCC

ocorre tipicamente durante os períodos de paragem, ou durante o funcionamento se houver condensação no vapor. O grão sensibilizado do aço inoxidável austenítico também proporciona um ponto fraco preferencial que favorece o desenvolvimento do fenómeno.

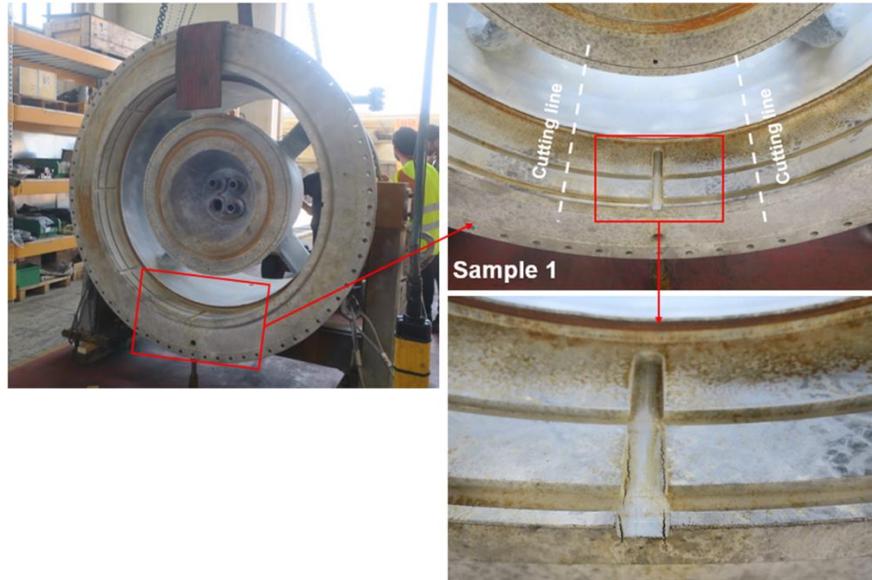


Fig. 2.6.11 - Pormenores da caixa de entrada de uma turbina fabricada em aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304H. Fonte: Laboratório IIS.

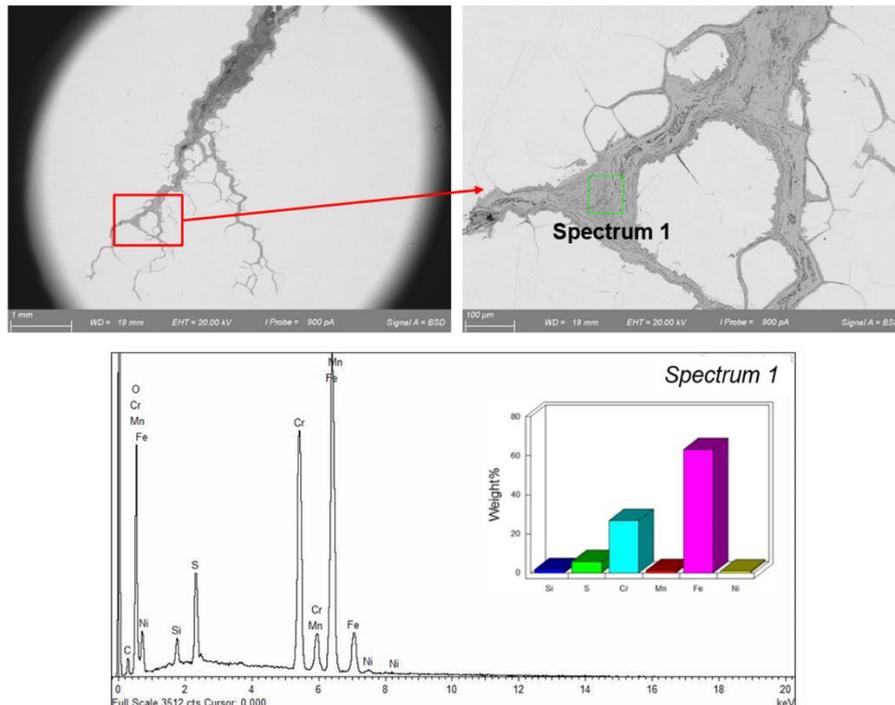


Fig. 2.6.12 - Pormenores da secção micrográfica tirada da caixa de entrada em algumas fissuras observadas pelo Microscópio Eletrónico de Varrimento. A análise EDS mostra a presença de elementos atribuíveis a metais comuns e enxofre. Fonte: Laboratório do IIS.



Referências:

[2.6.1] ASM HANDBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas

[2.6.2] ASM HANDBOOK - Volume 12 - Fractografia

[2.6.3] ADM HANDBOOK - Volume 11 - Análise e prevenção de avarias

[2.6.4] Microscopia eletrónica de varrimento e microanálise de raios X - Terceira edição - Joseph Goldstein, Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer, e Joseph Michael.



3 CU3: Demonstrações de exame macro e microscópico

3.1 Demonstração da avaliação de amostras macroscópicas de articulações

3.1.1 Considerações de carácter geral

A metalografia é uma parte da metalurgia física que se ocupa do estudo da macroestrutura e da microestrutura dos materiais metálicos.

A análise macroscópica representa um método rápido e simples de investigação dos materiais. Envolve o exame de grandes superfícies, destacando defeitos locais ou gerais, sendo os pormenores negligenciados. É o método mais simples e rápido de investigação de metais e ligas metálicas. Normalmente, precede qualquer análise estrutural e consiste na observação visual a olho nu ou com uma ampliação máxima de 50:1 para as amostras que estão a ser examinadas.

Através da análise macroscópica, podem ser revelados aspectos relacionados com a solidificação dos materiais metálicos (dendrites, cavidades de retração, fissuras, etc.), as suas fracturas, inhomogeneidades mecânicas e estruturais e a estrutura das juntas soldadas. É realizada diretamente sobre o aspeto exterior da amostra (material) sem qualquer preparação prévia ou sobre superfícies resultantes de fracturas (invólucros), quer não preparadas quer preparadas por trituração e ataque químico. Qualquer que seja o tipo de análise macroscópica, a sua execução implica uma série de operações: seleção do local de amostragem e obtenção da amostra, seccionamento, trituração e, se necessário, ataque químico.

3.1.1.1 Preparação de amostras metalográficas

A preparação de amostras metalográficas consiste em três fases:

1. **Amostragem (extração de amostras)** - O local de amostragem deve ser escolhido de modo a que a amostra seja representativa do material em estudo. Uma vez que não existe uma regra geral para a escolha deste local, esta dependerá da natureza, forma e dimensão da amostra, bem como dos tratamentos mecânicos ou térmicos a que o material foi sujeito. As instruções sobre como recolher e preparar amostras metalográficas são fornecidas na norma ISO/TR 20580:2022 "Preparação de amostras metalográficas".
2. **Preparação da superfície de exame** - A superfície preparada das amostras deve ser plana e isenta de marcas de impacto, riscos ou corpos estranhos introduzidos durante o processo de preparação. As três fases de preparação da superfície são:
 - nivelamento - conseguido através de retificação ou polimento. Se a amostra tiver sido cortada com máquinas-ferramentas ou com uma serra manual, este passo pode não ser necessário. Devem ser tomadas precauções para evitar o sobreaquecimento e a deformação da superfície.



- Retificação - efectuada com materiais abrasivos (papéis abrasivos) com grãos abrasivos cada vez mais finos. A retificação das amostras pode ser efectuada manual ou automaticamente.
 - polimento - tem por objetivo remover os últimos riscos muito finos e criar um brilho perfeito na superfície preparada. Esta operação pode ser realizada com recurso a máquinas de lixar mecânicas ou através de um processo eletrolítico.
3. **Gravação metalográfica** - Dependendo do material da amostra, é utilizada uma grande variedade de gravadores metalográficos. Quando estes se encontram com a superfície polida da amostra, dissolvem ou colorem os constituintes estruturais de forma diferente, revelando a estrutura. A gravação pode ser efectuada por imersão da peça no gravador ou por passagem com algodão embebido no gravador. Normalmente, a amostra é considerada gravada quando perde o seu brilho metálico. Depois de revelada a estrutura através da corrosão, as amostras são lavadas com água, depois com álcool e secas com uma ligeira passagem por papel de filtro ou numa corrente de ar quente.

3.1.2 Análise macroscópica em superfícies não preparadas

Trata-se do exame e análise de materiais a um nível macroscópico sem qualquer preparação prévia da superfície. Nesta abordagem, a superfície do material é observada e avaliada no seu estado natural ou tal como se encontra, sem qualquer polimento, retificação ou ataque químico.

A análise macroscópica em superfícies não preparadas pode fornecer informações valiosas sobre o estado geral, defeitos e características de um material. Permite uma avaliação rápida das propriedades e características do material sem a necessidade de uma preparação extensiva da amostra.

Este método é particularmente útil quando é necessária uma avaliação rápida, ou quando é necessário estudar as características externas e os defeitos do material sem alterar o seu estado natural. No entanto, pode ter limitações na revelação de pormenores estruturais finos em comparação com técnicas de microscopia mais avançadas que envolvem a preparação de amostras.

Em resumo, a análise macroscópica em superfícies não preparadas é uma ferramenta valiosa na análise de materiais, oferecendo uma forma direta de avaliar o estado e as características dos materiais sem a necessidade de uma preparação extensiva da amostra.



Figura 3.1.1. Amostra de aço recozido. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Os aços cementados e revenidos têm uma estrutura de grão mais fino no exterior do que na região central da secção, e a tonalidade de cinzento varia do exterior para o interior (Figura 2).

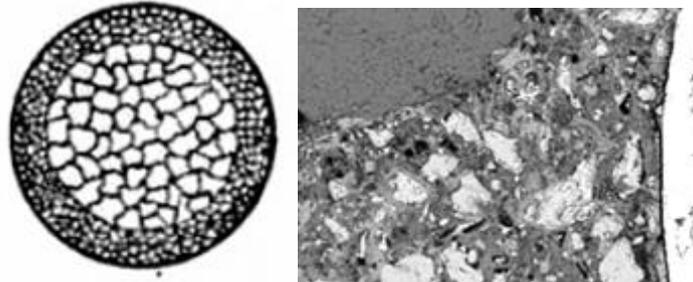


Figura 3.1.2. Amostra de Aço Carburado. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

A cor das peças que se fracturaram durante a utilização pode indicar potencialmente a causa da fratura. Se numa área a cor for mais escura do que no resto da superfície, isso sugere a presença de uma fenda pré-existente antes da fratura final.

A formação e o aspeto de uma superfície de fratura fornecem informações sobre as causas da fratura e o tipo de tensão que a originou. Uma superfície de fratura em forma de cone e taça na vizinhança do estrangulamento indica fissuras dúcteis, enquanto uma superfície de fratura sem deformações de estrangulamento sugere fissuras frágeis. As propagações de fadiga são reconhecidas pelo seu aspeto específico na superfície de fratura (Figura 3). Sob a influência de tensões dinâmicas variáveis, formam-se pequenas fissuras que se propagam do exterior para o interior, raramente na direção oposta, reduzindo a secção transversal de suporte de carga e conduzindo, em última análise, a uma falha súbita do material. A região onde a fissura se propaga gradualmente tem um aspeto liso e brilhante (devido ao atrito das superfícies em contacto), e a zona de fratura final tem um aspeto granuloso. As fissuras iniciais podem ter origem em imperfeições superficiais (riscos, ranhuras, transições abruptas de secção, etc.), que actuam como concentradores de tensões.

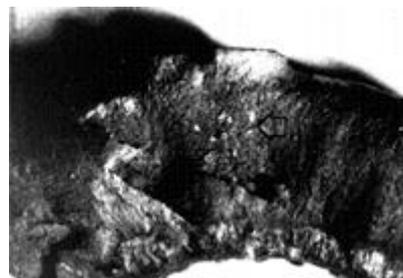


Figura 3.1.3. Superfície de fratura por fadiga. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>



Ao fraturar um lingote de metal intergranular, a superfície resultante pode revelar as três zonas formadas durante a cristalização primária.

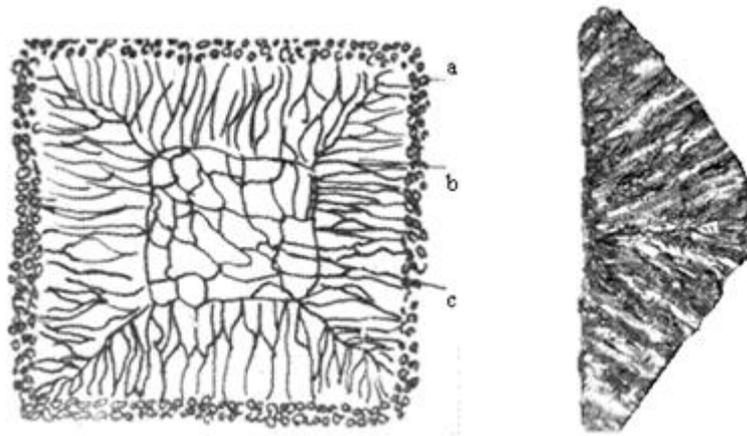


Figura 3.1.4. Zonas formadas durante a cristalização primária:

a) Zona de grãos finos equiaxiais; b) Zona de grãos colunares;

c) Zona de grãos grosseiros equiaxiais. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

A zona 1 é constituída por grãos pequenos, esféricos e equiaxiais. Nesta zona, a taxa de arrefecimento é muito elevada devido ao contacto entre o líquido (fundido) e a parede fria do molde, resultando numa taxa de cristalização rápida e numa elevada capacidade de cristalização. Além disso, a rugosidade e as partículas de impureza nas paredes do molde actuam como núcleos de cristalização estranhos, conduzindo a uma estrutura de grão fino.

A zona 2 é a região dos grãos colunares (a zona de trans-cristalização). A formação de grãos alongados ao longo do gradiente de temperatura é causada pela alta taxa de resfriamento, resultando em uma alta taxa de cristalização linear. No entanto, a capacidade de cristalização é menor nesta zona devido à ausência de núcleos de cristalização estranhos.

A zona 3 é constituída por grãos grosseiros, esféricos e equiaxiais, não orientados. Esta zona encontra-se no centro do lingote, onde a taxa de arrefecimento é muito baixa devido à camada exterior solidificada, resultando num baixo grau de sobreaquecimento e, conseqüentemente, numa capacidade e taxa de cristalização baixa e uniforme.

O material metálico com uma estrutura tão pouco homogénea só pode ser utilizado após ter sido submetido a um processo de tratamento térmico para recozer e homogeneizar a estrutura.

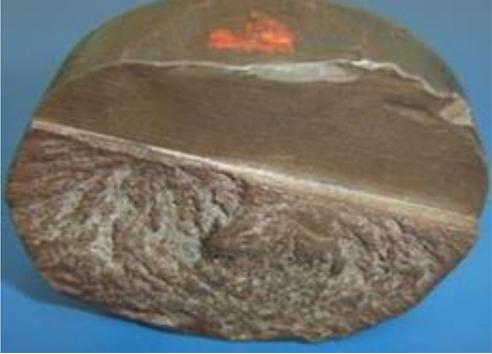
3.1.3 A análise macroscópica de materiais metálicos em superfícies não preparadas permite o exame e a avaliação destas características estruturais

N.º.	Amostra estudada	Observações
1		<p>Ferro fundido branco no seu estado bruto</p> <p>A amostra é proveniente de um bloco de refusão; material metálico frágil.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fratura branco-prateada com grãos colunares grosseiros (aspeto xistoso). - Os poros (bolhas externas) são visíveis na superfície exterior e as bolhas internas podem ser vistas no interior da fratura.
2		<p>Ferro fundido cinzento em bruto</p> <p>A amostra provém de um bloco de refusão. A fratura tem uma cor cinzenta e, no seu interior, pode observar-se o seguinte</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grãos finos equiaxiais (globulares) de tamanho não uniforme. - Vazios elipsoidais causados por gases aprisionados no metal fundido durante a solidificação (bolhas internas). - Uma não homogeneidade química de cor preta resultante da segregação do carbono da grafite (segregação zonal). - Os poros são visíveis na superfície exterior.



3		<p>Ferro fundido com manchas</p> <p>A amostra provém de um bloco de refusão. É um tipo de ferro fundido que transita do ferro fundido branco para o ferro fundido cinzento, o que é confirmado pela sua fratura:</p> <ul style="list-style-type: none">- No exterior, apresenta a cor e a estrutura macroscópica típicas do ferro fundido branco, enquanto na base corresponde ao ferro fundido cinzento (entre estas duas zonas típicas, existe uma mistura de grãos colunares de ferro fundido branco com grãos equiaxiais de ferro fundido cinzento).- São visíveis os alvéolos internos e externos (poros), bem como uma calote fria de forma esférica.
4		<p>Ferro fundido cinzento mecânico</p> <p>A amostra provém de um componente produzido por fundição de ferro fundido cinzento de fusão secundária.</p> <ul style="list-style-type: none">- A cor da fratura é cinzenta e os grãos são equiaxiais, muito finos e uniformes.- Não existem espiráculos (poros) internos ou externos.
5		<p>Aço fundido</p> <ul style="list-style-type: none">- A amostra provém de uma barra fundida.- A superfície exterior é irregular.- A fratura tem uma cor branco-prateada.- Os grãos são grandes e de forma globular.



6		<p>Aço laminado a quente</p> <p>A amostra provém de um perfil redondo que foi laminado a quente e entalhado para facilitar a fratura.</p> <ul style="list-style-type: none">- A superfície exterior é lisa.- A fratura tem uma cor branco-prateada e apresenta grãos globulares finos e brilhantes.- No interior da fenda, é possível observar também as direcções de deformação plástica do material, que foi fracturado por flexão, dispostas radialmente sob a forma de aglomerados de material metálico.
7		<p>Aço com defeito</p> <ul style="list-style-type: none">- A amostra apresenta fissuras (superfícies de fratura).- As fissuras podem resultar quer de uma têmpera vigorosa (fratura cinzenta com grãos muito finos, imperceptíveis a olho nu, aveludados) quer de um sobreaquecimento prolongado (queima - oxidação intergranular), seguido de deformação plástica.
8		<p>Amostra de um bloco de zinco</p> <p>Branco-prateado, fratura brilhante com grãos grosseiros.</p>



9		<p>Amostra com desgaste mecânico</p> <p>A amostra provém de um bocal de jato de areia utilizado numa instalação de limpeza de peças fundidas.</p> <ul style="list-style-type: none">- No interior da peça, existe uma irregularidade na sua forma circular devido ao desgaste.
10		<p>Amostra com desgaste mecânico</p> <p>A amostra provém de um rolamento deslizante, mais concretamente de um meio rolamento.</p> <ul style="list-style-type: none">- Observa-se a esfoliação da liga anti-fricção.

3.1.4 Análise macroscópica em superfícies preparadas

O objetivo desta análise é determinar as inhomogeneidades químicas e estruturais dos materiais metálicos.

3.1.4.1 Preparação de amostras metalográficas

A amostra deve ser retirada de uma região do material que permita obter o máximo de informações sobre o material, os seus processos de fabrico e os tratamentos a que foi submetido. Esta operação é efectuada através de rutura, corte (serragem manual ou mecânica, etc.) ou fratura (se o material for frágil).

A análise de materiais metálicos ao microscópio é efectuada em pequenas amostras, que são previamente preparadas para diferenciar os constituintes metalográficos.

Os materiais metálicos são corpos sólidos e cristalinos, opacos, que necessitam de ser examinados ao microscópio ótico segundo o princípio da reflexão da luz. Para que os raios luminosos possam ser reflectidos de forma diferenciada pelos vários constituintes metalográficos, é necessário preparar a superfície de estudo da amostra. A preparação das amostras para o exame com um microscópio metalográfico ótico envolve as seguintes operações: extração da amostra, preparação da superfície de trabalho e gravação química.

As amostras metalográficas são peças relativamente pequenas com superfícies que variam entre $(0,5...30) \times (30...0,5) \text{ mm}^2$, especialmente preparadas a partir dos materiais metálicos a estudar ao microscópio ótico.



Preparação de amostras - Operações

No laboratório, são recolhidas amostras de diversos materiais com um disco abrasivo muito fino. Uma superfície de amostra será preparada através de nivelamento, lixamento, polimento, gravação química e, finalmente, será examinada a olho nu ou num microscópio metalográfico com a estrutura a ser desenhada.

Para a análise macroscópica, é necessário efetuar uma série de operações: selecionar o local de amostragem e recolher a amostra, nivelar, lixar, polir e, se necessário, fazer um ataque químico.

1. *Recolha de amostras:* Para obter as informações mais exactas sobre o material em estudo, a amostra recolhida deve ser representativa e adequada ao fim a que se destina. A escolha do local de amostragem deve ser feita de modo a que a amostra inclua a estrutura característica do material metálico, bem como quaisquer efeitos de processamento mecânico, térmico, termoquímico prévio, defeitos existentes, etc. As amostras metalográficas não devem ser demasiado grandes, pois dependendo dos produtos semi-acabados ou das peças em estudo, as amostras podem ter dimensões diferentes. As amostras retiradas de chapas finas, fios, peças pequenas, como ligas médicas, ou amostras que necessitem de ser estudadas na extremidade devem ser fixadas num suporte ou embebidas em resina sintética ou material facilmente fundível. A extração de amostras de materiais metálicos pode ser feita por corte manual ou mecânico, utilizando uma serra ou um disco abrasivo. Também podem ser utilizadas máquinas como fresadoras, tornos ou outros equipamentos, garantindo que a estrutura inicial da amostra não seja alterada devido ao aquecimento ou deformação. Assim, deve ser evitado o corte oxiacetilénico por chama, o corte elétrico, que produzem um aquecimento excessivo, ou o corte por cisalhamento e cinzelamento, que provocam deformações. Quando não existe outra solução, a parte alterada do material devido ao processo de extração deve ser removida por fresagem, torneamento, trituração, etc. Os materiais duros devem ser cortados com discos abrasivos finos com arrefecimento abundante, enquanto que para os materiais frágeis, as amostras devem ser fracturadas.
2. *Deslizamento:* as amostras metalográficas maquinadas são submetidas a um nivelamento da superfície de estudo, que é efectuado com recurso a uma rebarbadora, torno ou fresadora, assegurando que as amostras não sofrem sobreaquecimento, especialmente as que foram temperadas ou tratadas termicamente.
3. *A retificação* é efectuada em papel metalográfico, que tem grãos abrasivos de vários tamanhos fixados num dos lados, por ordem decrescente. Este processo pode ser efectuado manualmente através de um movimento linear de vaivém (com o papel fixado numa placa de vidro) ou automaticamente em máquinas de lixar equipadas com um ou dois discos



rotativos a uma velocidade de 10-15 m/s, aos quais é fixado o papel metalográfico. Se a superfície da amostra tiver sido acabada por uma operação de maquinagem, a retificação deve começar com um abrasivo de grão médio (25 centésimos de mm) ou n.º 60 (a dimensão da malha linear do crivo através do qual o abrasivo foi peneirado), seguido de grão fino (16, 12, 10), grão muito fino (8, 6, 4) e, finalmente, papéis contendo micro-pós extra-finos (M40, M28...M7). A passagem de um papel com um determinado grão para outro com um grão mais fino deve ocorrer quando os riscos da lixagem anterior tiverem desaparecido, assegurando que a amostra é rodada 90 graus em relação à sua posição anterior. As amostras com dimensões normais podem ser seguradas diretamente com a mão, enquanto as mais pequenas podem ser montadas ou embutidas em resinas sintéticas ou materiais mais macios. Durante o lixamento, deve ser aplicada uma ligeira pressão no papel abrasivo para evitar o sobreaquecimento acima de 50-60°C e a oxidação da superfície.

4. *O polimento* da superfície de estudo da amostra é efectuado para remover os riscos finais da retificação e obter uma superfície lisa com um brilho perfeito. Este processo é efectuado numa máquina de polir, onde é utilizado um disco rotativo com uma velocidade superior à do lixamento (15-20 m/s) e onde é colocado um pano de lã (feltro) humedecido continuamente com uma solução de suspensão abrasiva 1:20 (óxido de alumínio, óxido de magnésio, etc.). Para o polimento, a amostra é segurada com a mão e pressionada suavemente sobre o pano até que todos os riscos desapareçam (máx. 5 min.). Durante o polimento, a amostra é rodada lentamente para evitar o rasgamento das inclusões e a formação de novos riscos. O prolongamento do tempo de polimento faz com que a estrutura se torne elevada devido ao desgaste dos constituintes estruturais macios. Após o polimento, a amostra é lavada com um jato de água para remover quaisquer vestígios de abrasivo, depois com álcool e, por vezes, é efectuada uma neutralização dos vestígios de ácido utilizando uma solução básica (carbonato de sódio). A amostra é seca com uma corrente de ar quente ou através de uma ligeira passagem por papel de filtro. A amostra assim preparada pode ser submetida a um exame microscópico para determinar inclusões não metálicas (escórias, óxidos, sulfuretos, grafite, etc.), eventuais defeitos (microfissuras, micro reticulações, etc.), ou pode ser gravada quimicamente para diferenciar os constituintes estruturais.
5. *Gravura química*: Os reagentes químicos não reagem uniformemente com todos os constituintes estruturais do material metálico sujeito a gravura. Alguns constituintes (especialmente os heterogéneos) são corroídos (dissolvidos) ou coloridos, enquanto outros permanecem brilhantes. Se a superfície polida contiver o mesmo tipo de constituintes



metalográficos, o reagente químico corroerá apenas os limites entre os grãos do mesmo tipo, porque nos limites dos grãos existem zonas heterogêneas (com impurezas, inclusões, camadas amorfas, etc.) que não são resistentes à ação química dos reagentes. Os produtos químicos normalmente utilizados são ácidos ou soluções de ácidos em água ou álcool (ver quadro), e o ataque químico pode ser efectuado à temperatura ambiente ou com aquecimento. Após o ataque químico, as amostras metalográficas são lavadas com um jato de água e depois com álcool (para remover quaisquer resíduos de ácido ou gordura da superfície de estudo). Por vezes, é efectuada a neutralização dos vestígios de ácido com uma solução básica (carbonato de sódio). A amostra é seca com uma corrente de ar quente ou através de uma ligeira secagem com papel de filtro. Ao microscópio, os limites entre os grãos corroídos e os que apresentam uma coloração mais escura parecem escuros porque os raios de luz são absorvidos pelas superfícies negras. Os raios de luz também podem ser desviados para outro lado (de acordo com as leis da reflexão) se forem comparados com o sistema ótico do microscópio, como se pode ver na figura 5 (com iluminação vertical - campo claro). Os constituintes não atacados (brilhantes) (a) reflectem os raios de luz para a ocular do microscópio e aparecem com uma cor branca. Os constituintes corroídos (b) ou os limites entre os grãos podem ter uma superfície brilhante, caso em que os raios são reflectidos lateralmente (o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão), ou podem ter uma superfície mate, quando os raios são total ou parcialmente absorvidos. Em ambos os casos, os constituintes aparecem escuros ao microscópio. Os constituintes coloridos (c), que absorvem os raios luminosos, são observados ao microscópio como escuros, com diferentes graus de escurecimento.

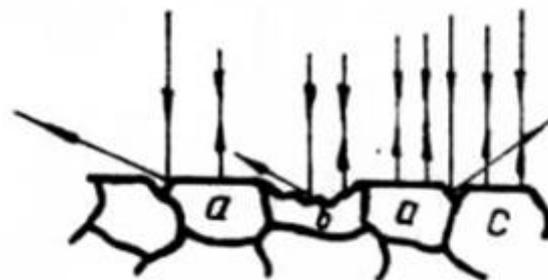


Figura 3.1.5. Realce dos constituintes ao microscópio ótico. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

A gravação é efectuada por imersão da amostra no reagente ou por humedecimento da superfície com um cotonete embebido no reagente químico até que a superfície brilhante da amostra se torne ligeiramente mate. A ação do reagente é interrompida lavando a amostra com um jato de água e depois com álcool. As amostras são secas com uma corrente de ar quente ou



pressionando suavemente um papel de filtro sobre a superfície lavada. A gravação pode ser efectuada à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas (até 400°C).

Os reagentes metalográficos são seleccionados com base na natureza do material metálico em investigação e nos aspectos específicos a estudar:

- Para os aços comuns e os ferros fundidos, utiliza-se Nital (2-5% HNO_3 em álcool etílico). Para os aços inoxidáveis ligados, utiliza-se a água régia (20-30 ml de HCl, 10 ml de HNO_3 , 30-70 ml de glicerol).
- As ligas médicas nobres, semi-nobres e não nobres à base de Cr-Ni ou Cr-Mo utilizam o reagente Aqua Regia (20-30 ml de HCl + 10 ml de HNO_3 + 30-70 ml de glicerol). Outro reagente para este tipo de materiais é composto por 3 partes de HCl e 1 parte de HNO_3 , ou pode utilizar-se o reagente de Groesbeck (4 g de permanganato de potássio + 4 g de NaOH + 100 ml de água). Estes reagentes podem também ser utilizados para os aços inoxidáveis e refractários.
- As ligas médicas à base de cobre utilizam reagentes como 50 ml de bióxido de amónio (NH_4BiO_3) + 20-50 ml (H_2O_2) + 50 ml de água (H_2O), ou 30-50 ml (HNO_3) + 70-50 ml de água (H_2O), ou 5 g de persulfato de amónio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) + 90 ml de água (H_2O).
- Para realçar a estrutura de platina, são utilizados 100 ml de HCl + 10 ml de HNO_3 + 50 ml de água (H_2O). Para as estruturas de prata, é utilizada uma solução de 50 ml de cianeto de potássio (KCN) com uma concentração de 5% + 50 ml de persulfato de amónio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) com uma concentração de 5%. Para as estruturas de titânio, utilizam-se 25 ml de HNO_3 + 25 ml de HF + 50 ml de glicerol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$).

Análise macroscópica

Como resultado da deformação plástica do material metálico, a estrutura do grão é reorganizada de acordo com a direcção da deformação (fluxo de grão). No processo de deformação plástica a frio ($T_{\text{deformação}} < T_{\text{recristalização}}$) com elevados graus de deformação (estiramento, laminagem, etc.), os grãos do material metálico alongam-se na direcção da deformação máxima. A secção longitudinal obtida (tratada com um reagente químico) é caracterizada por grãos alongados obtidos por deformação plástica a frio (Figura 6).

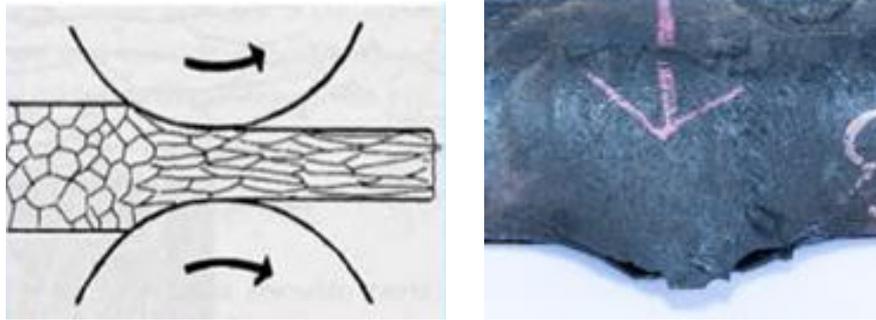


Figura 3.1.6. A estrutura de grão obtida como resultado da deformação plástica a frio. Fonte: <https://learnmech.com/hot-rolling-vs-cold-rolling-difference-between-hot-rolling-and-cold-rolling/>

Após a deformação plástica a quente ($T_{\text{deformação}} > T_{\text{recristalização}}$), o fluxo de grãos que aparece nas secções longitudinais já não é caracterizado pela forma alongada dos grãos. Isto deve-se ao facto de a recristalização ocorrer devido à temperatura da deformação plástica exceder a temperatura de recristalização, fazendo com que os grãos se tornem equiaxiais. Neste caso, o fluxo de grãos é evidenciado pela distribuição das inclusões em camadas. Observa-se na Figura 7 que o fluxo de grãos acompanha o contorno da peça. Na ausência de inclusões não metálicas, o material metálico deformado a quente não apresenta um aspeto fibroso.

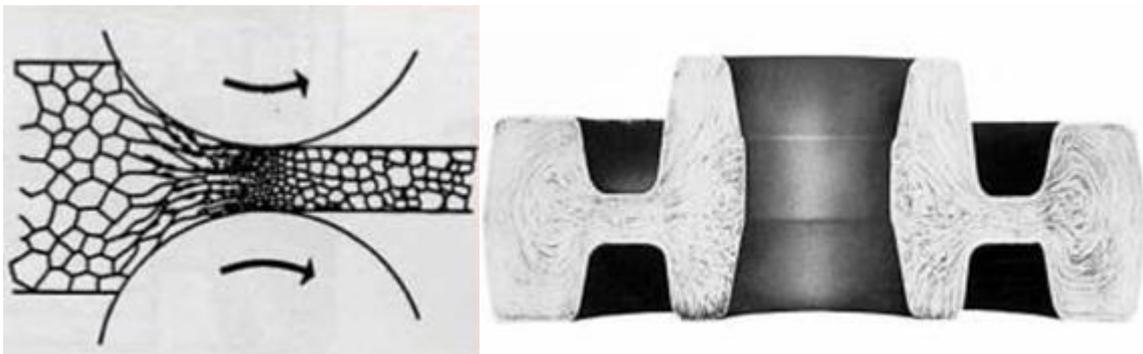


Figura 3.1.7. A estrutura de grão obtida como resultado da deformação plástica a quente. Fonte: <https://learnmech.com/hot-rolling-vs-cold-rolling-difference-between-hot-rolling-and-cold-rolling/>

Aspectos das juntas soldadas

Podem também ser destacados vários aspectos das juntas soldadas, tais como a forma do cordão de soldadura (em X, V, U, etc.), diferentes camadas de soldadura, a zona afetada pelo calor (ZTA) - que aparece com uma cor mais escura, e a zona do metal de soldadura (ZMSS). Além disso, o exame da secção transversal das juntas soldadas pode revelar zonas características (Figura 8) após a retificação e o ataque químico: a zona do metal de base (BMZ), a zona afetada pelo calor (HAZ) - que é de cor mais escura, e a zona do metal de solda (WMZ). Outras características que podem ser observadas incluem a forma da secção transversal da soldadura (forma de V, forma de X, forma de U, etc.), camadas de soldadura distintas, a zona de recristalização (cristais colunares) e defeitos (poros, segregações, falta de fusão, fissuras, etc.).



A zona do metal de base está localizada suficientemente longe da operação de soldadura para evitar quaisquer alterações físico-químicas significativas.

A zona afetada pelo calor representa uma área onde os efeitos térmicos durante um processo de soldadura induziram alterações estruturais e de propriedades no metal de base.

O cordão de soldadura é a área fundida e solidificada onde o efeito térmico máximo permitiu temporariamente a fusão dos bordos do material de base, possivelmente com a participação do material de enchimento ou apenas do próprio material de enchimento.

As diferentes zonas da secção transversal do cordão de soldadura são realçadas através de uma preparação adequada e de um ataque químico (por exemplo, o reagente Adler é utilizado para os aços).

Por conseguinte, o exame macroscópico da área da secção transversal das juntas soldadas revela as seguintes zonas:

- zona de metais de base (BMZ)
- zona afetada pelo calor (HAZ)
- zona de metal de solda (WMZ)

A zona do metal de base, estando suficientemente distante, não sofre quaisquer alterações físico-químicas significativas devido à operação de soldadura. No entanto, a zona afetada pelo calor representa uma área onde ocorreram alterações estruturais e de propriedades no metal de base devido à temperatura elevada durante o processo de soldadura. O cordão de soldadura (cordão de soldadura) é a zona fundida e solidificada onde o efeito térmico máximo levou à fusão temporária dos bordos das peças a soldar, com ou sem a participação de material de adição. O perfil e as dimensões destas zonas podem variar para um mesmo material metálico, em função do tipo de soldadura e dos tratamentos térmicos aplicados antes, depois ou durante a soldadura.

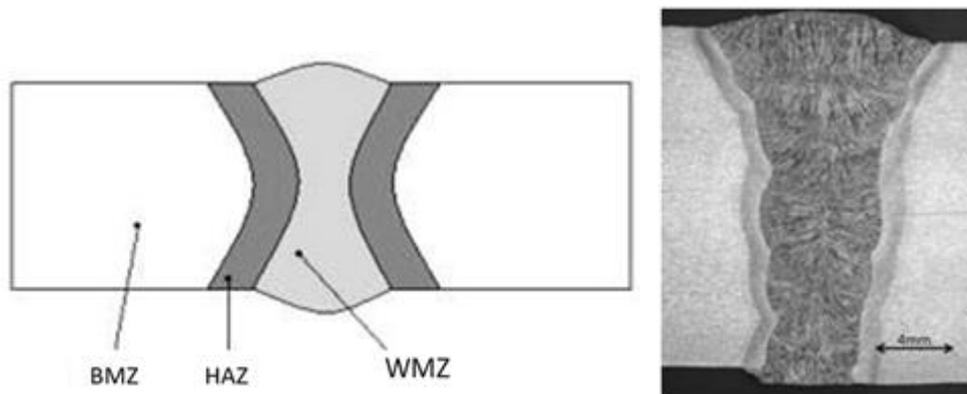


Figura 3.1.8. Zonas da junta de soldadura na soldadura por arco elétrico clássica com material de enchimento.

Fonte: [https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator SM 2020.pdf](https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator_SM_2020.pdf)

A não homogeneidade química resultante da fundição, deformação plástica ou tratamentos termoquímicos também pode ser realçada através de um exame macroscópico. Por exemplo, a estrutura dendrítica pode ser realçada através de um ataque químico adequado (reagente de Oberhoffer para aços e reagente de Keller para ligas de alumínio). A Figura 9 mostra a estrutura dendrítica primária de uma liga Al-Si (AlSi12), onde a não homogeneidade química resultante da fundição é evidente.

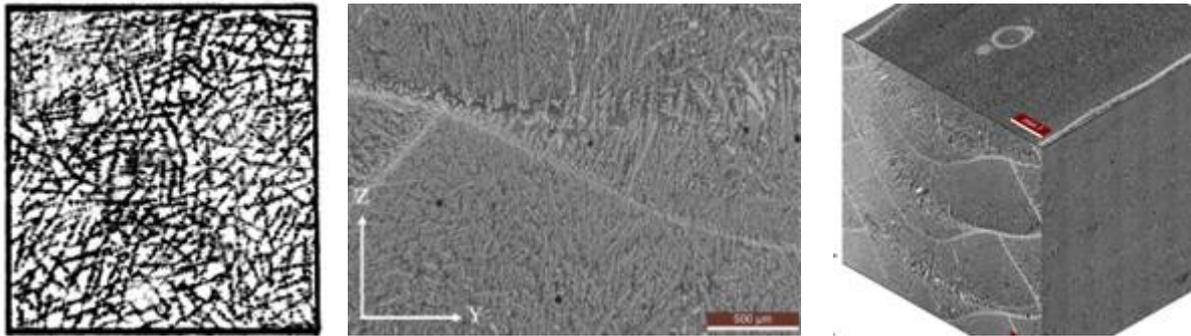


Figura 3.1.9. Estrutura dendrítica primária de uma liga de Al-Si. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Adicionalmente, através do ataque químico a uma superfície transversal de uma peça tratada termicamente por cementação, a camada exterior enriquecida em carbono (com uma cor mais escura) pode ser observada, permitindo a avaliação macroscópica da profundidade da difusão do carbono na camada superficial da peça.

Durante o exame macroscópico de superfícies preparadas e quimicamente gravadas de materiais metálicos, podem ser detectados certos defeitos, tais como inclusões de escória, sobreposições de material, poros, bolhas, fissuras, etc.

Equipamentos, materiais e processos de trabalho

A análise macroscópica envolve o exame visual de superfícies fracturadas ou preparadas, ou de superfícies quimicamente gravadas de amostras feitas de vários materiais metálicos (ferros fundidos, aços, ligas não ferrosas). Recomenda-se a utilização de lentes de aumento (Figura 10) para realçar certos aspectos macroestruturais que são difíceis de observar a olho nu. As amostras metalográficas serão analisadas com ênfase na sua forma, na cor e no tipo de fratura, nas inhomogeneidades estruturais, nos defeitos resultantes do processamento ou das tensões do material, etc., ou na secção soldada.



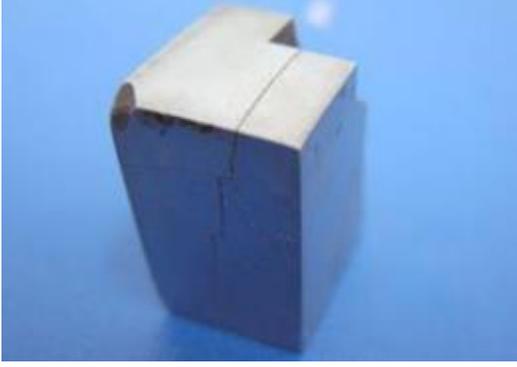
Figura 3.1.10. Lupas para exame macroscópico. Fonte: https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator_SM_2020.pdf

Além disso, serão analisadas as superfícies de fratura de amostras feitas de vários materiais metálicos para determinar o tipo de fratura e o comportamento do material sob deformação plástica. Com base na análise efectuada, serão tiradas conclusões sobre se o material examinado apresenta um comportamento dúctil ou frágil e em que condições pode ser utilizado na prática.

3.1.5 Exames macroscópicos de materiais metálicos em superfícies preparadas

<i>Não.</i>	<i>Amostra estudada</i>	<i>Observações</i>
1		Ligas de alumínio fundido A amostra é retirada de um pequeno lingote de liga metálica: <ul style="list-style-type: none">- Na superfície preparada e gravada quimicamente, observam-se dendrites.- No topo da amostra, existe uma cavidade de retração e uma fenda causada pela contração do material durante a solidificação.- No centro da amostra, é visível um vazio interno (bolha de ar).



2		<p>Amostra de aço fissurado</p> <p>Após o tratamento térmico de têmpera, a amostra fissurou devido a tensões internas elevadas induzidas pela presença de concentradores de tensão mecânica (por exemplo, uma ranhura de chaveta não ligada) ou impurezas dispostas em filas.</p>
3		<p>Amostra de um componente soldado sob carga</p> <p>Numa vista de secção transversal, gravada quimicamente, podem ser observadas as três zonas características da soldadura:</p> <ul style="list-style-type: none">- Zona de materiais de base (BMZ).- Zona afetada pelo calor (cor mais escura - HAZ).- Zona de metal de soldadura (WMZ).
4		<p>Amostra de um aço soldado em V</p> <p>Numa vista de secção transversal, quimicamente gravada, pode observar-se a zona de material solidificado e o material de base.</p> <ul style="list-style-type: none">- A soldadura foi criada através da conclusão do passe de raiz.
5		<p>Deformação a frio da amostra</p> <p>É possível observar a estrutura do grão que segue o contorno da peça.</p>



3.1.6 Perguntas

1. Qual é o objetivo da demonstração da avaliação de amostras macroscópicas de articulações neste contexto?
2. Quais são as etapas envolvidas na preparação de amostras metalográficas?
3. Quais são as fases de preparação da superfície para exame?
4. Em que é que a análise macroscópica em superfícies não preparadas difere da análise macroscópica em superfícies preparadas?
5. Porque é que a análise macroscópica de materiais metálicos em superfícies não preparadas é importante e que características estruturais podem ser examinadas através deste método?
6. Quais são as áreas da secção transversal das juntas soldadas que podem ser realçadas?
7. São abordadas técnicas ou ferramentas específicas para a análise macroscópica?
8. Quais são as potenciais aplicações ou indústrias onde esta análise macroscópica de materiais metálicos é relevante?

3.2 Formação prática na identificação sem ajuda de imperfeições de soldadura em amostras macroscópicas

3.2.1 Introdução às imperfeições de soldadura

As imperfeições de soldadura são desvios ou irregularidades numa soldadura que podem afetar a sua integridade, resistência e qualidade geral. Estas imperfeições podem resultar de vários factores, incluindo parâmetros do processo de soldadura, propriedades do material, competências do operador e condições ambientais. Identificar e tratar estas imperfeições é crucial para garantir a fiabilidade e a segurança das estruturas soldadas.

3.2.1.1 Visão geral das imperfeições de soldadura mais comuns

- **A porosidade** refere-se à presença de pequenas cavidades ou vazios no metal de solda causados por gases aprisionados, como o hidrogénio ou o azoto. Estes vazios podem enfraquecer a soldadura e torná-la mais suscetível à fissuração.

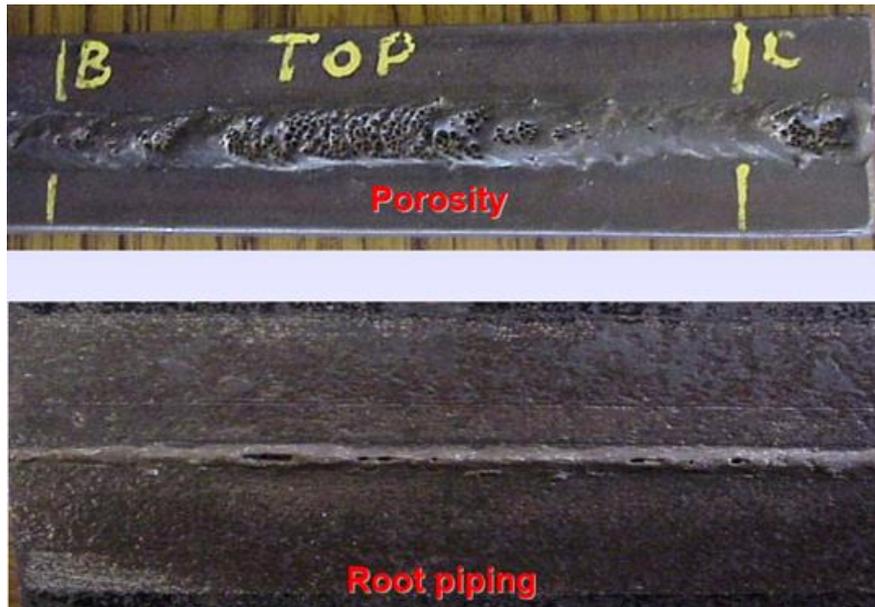


Fig. 3.2.1. Características visuais das cavidades de gás. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003.

- **A falta de fusão** ocorre quando há uma ligação inadequada entre o metal de solda e o metal de base ou entre diferentes passes de solda. Pode resultar numa junta fraca que pode não ser capaz de suportar as forças aplicadas.

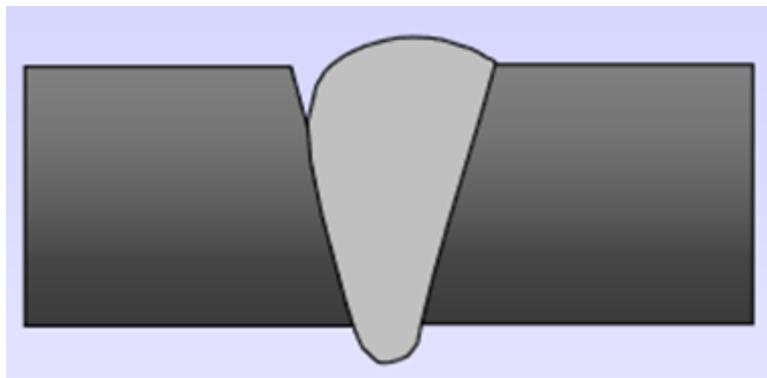


Fig. 3.2.3. Ranhura preenchida incompleta. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **A penetração incompleta** ocorre quando o metal de solda não penetra totalmente na junta ou não se estende por toda a espessura do metal de base. Isto pode levar a uma redução da resistência e da integridade.

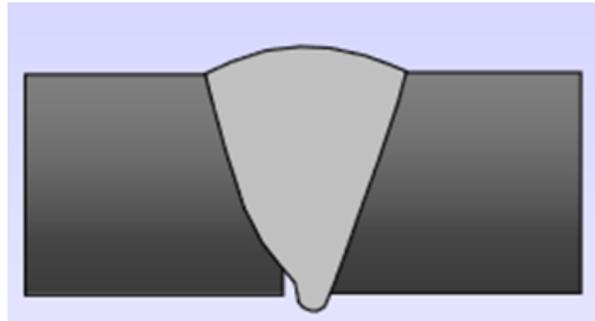


Fig. 3.2.4. Fusão radicular incompleta. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

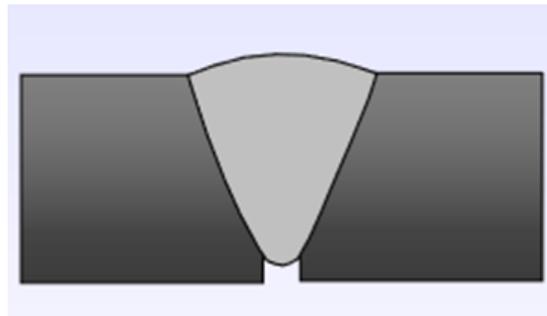


Fig. 3.2.5. Penetração incompleta da raiz. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **A subcotação** é a formação de uma ranhura ao longo do metal de base perto da soldadura devido ao calor excessivo ou a uma técnica de soldadura inadequada. Pode criar concentrações de tensão e enfraquecer a junta.

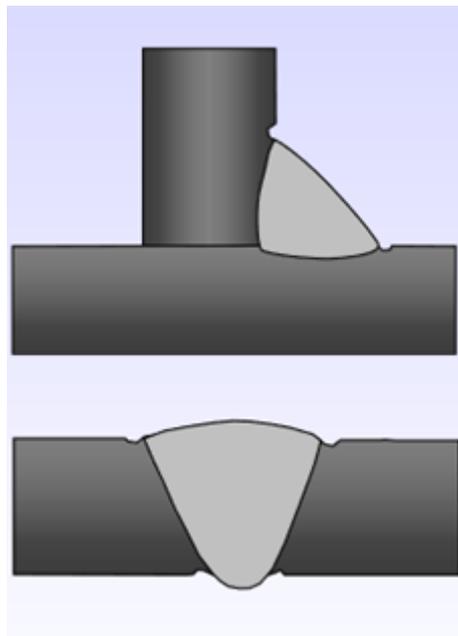


Fig. 3.2.6. Raiz e chapéu sob corte. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **A sobreposição** ocorre quando o metal de solda se estende para a superfície do metal de base sem uma fusão adequada. Isto pode resultar numa falta de resistência e numa maior suscetibilidade à fissuração.

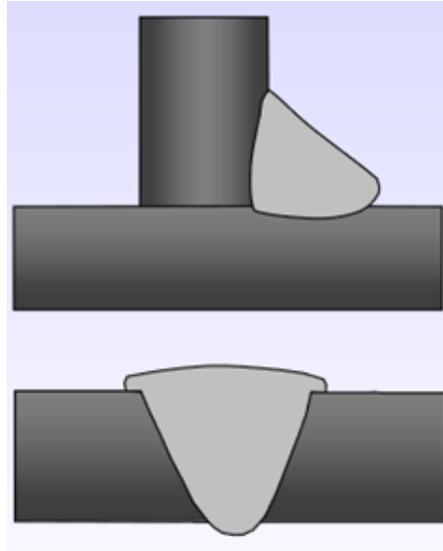


Fig. 3.2.7. Sobreposição do dedo do pé na soldadura Butt/Fillet. Fonte: M.S. Rogers, Welding Inspection Defects/Repairs Course Reference WIS 5, 2003

- **As fissuras** podem formar-se em várias orientações e localizações dentro da soldadura. Os tipos mais comuns incluem fissuras longitudinais ao longo do eixo da soldadura, fissuras transversais ao longo da soldadura e fissuras na zona afetada pelo calor. As fissuras podem comprometer a integridade estrutural da soldadura.

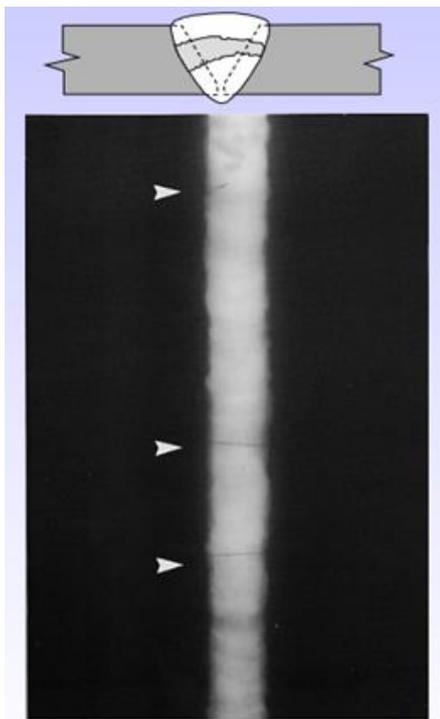


Fig. 3.2.8. Fissura transversal

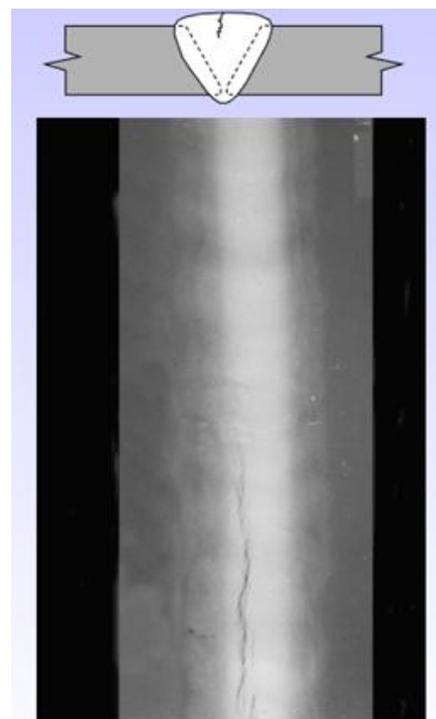


Fig. 3.2.9. Fissura longitudinal

Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações Referência do Curso WIS 5, 2003

- **Os salpicos de soldadura referem-se** às pequenas gotas de metal fundido expelidas pelo arco de soldadura que podem aderir à superfície da soldadura. Embora nem sempre sejam estruturalmente prejudiciais, os salpicos excessivos podem afetar o aspeto e causar pontos fracos.



Fig. 3.2.10. Características visuais dos salpicos. Fonte: M.S. Rogers, Welding Inspection Defects/Repairs Course Reference WIS 5, 2003.

- **As inclusões** são materiais estranhos, como escória, óxido, tungsténio ou fluxo, que ficam presos na soldadura. Podem causar áreas de fraqueza e reduzir a resistência à corrosão.

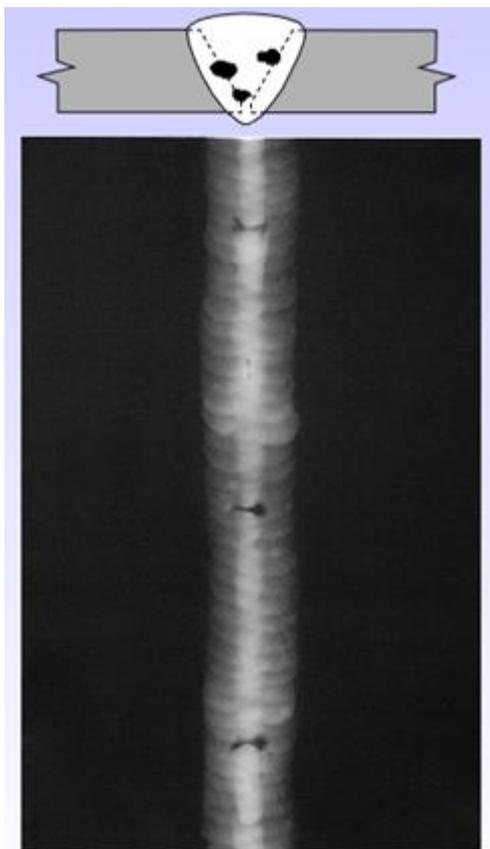
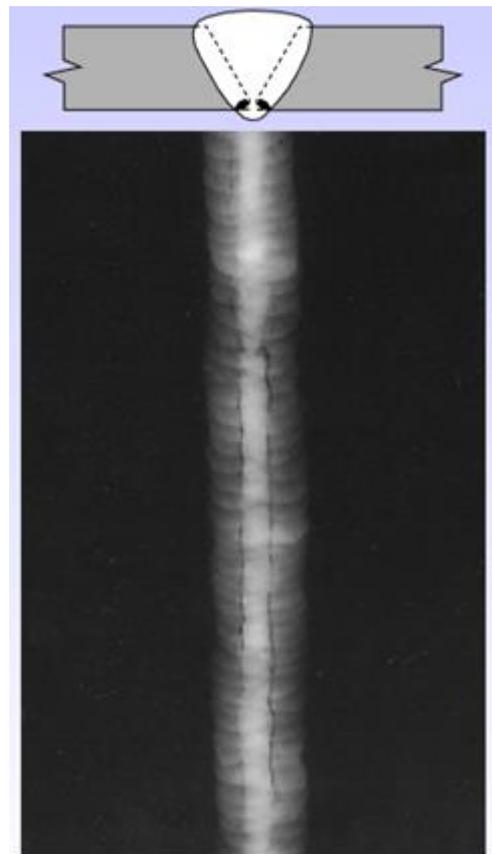


Fig. 3.2.11. Inclusões de escória entre passagens



. 3.2.12. Linhas de escória

Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações Referência do Curso WIS 5, 2003



- **O desalinhamento** ocorre quando a junta de soldadura não está corretamente alinhada antes da soldadura, dando origem a soldaduras irregulares e fracas.

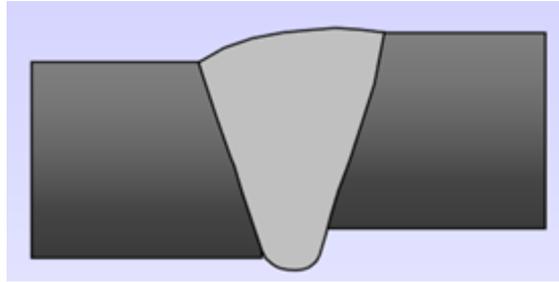


Fig. 3.2.13. Desalinhamento linear. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

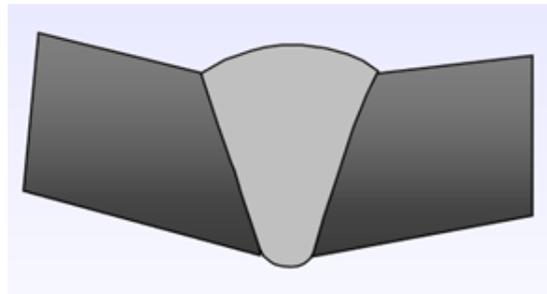


Fig. 3.2.14. Desalinhamento angular. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **O reforço excessivo** ocorre quando o cordão de soldadura se estende para além das dimensões exigidas. Isto pode levar a concentrações de tensão e pode não cumprir as especificações do projeto.

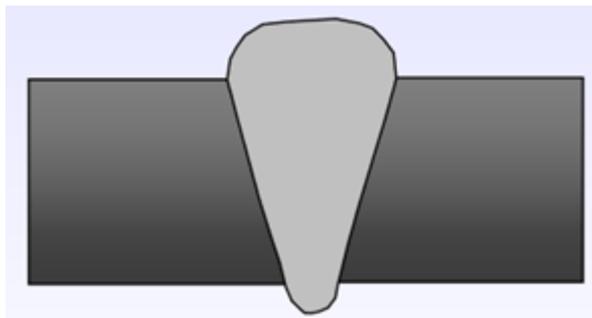


Fig. 3.2.15. Altura excessiva da tampa. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **O "Burn-Through"** ocorre quando o calor da soldadura é excessivo, provocando a fusão do metal de base e podendo criar orifícios.

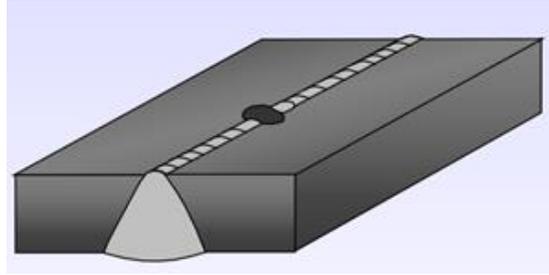


Fig. 3.2.16. Queimadura. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

- **A distorção** refere-se ao empeno ou à deformação da estrutura soldada devido à entrada de calor durante a soldadura. Embora não seja necessariamente um defeito, a distorção excessiva pode afetar o ajuste e a função.

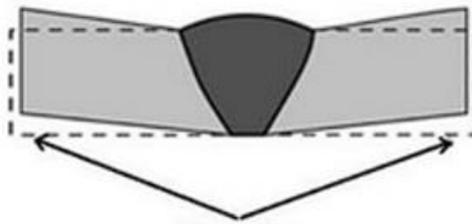


Fig. 3.2.17. Distorção. Fonte: M.S. Rogers, Inspeção de Soldadura Defeitos/Reparações, Referência do Curso WIS 5, 2003

As imperfeições de soldadura podem ser correlacionadas com o tipo de processo de soldadura utilizado devido às características e parâmetros específicos associados a cada método de soldadura. Diferentes processos de soldadura têm fontes de calor, taxas de deposição e técnicas distintas, que podem influenciar os tipos de imperfeições mais prováveis de ocorrer.

A soldadura por arco metálico protegido pode ser mais propensa a inclusões de escória, especialmente se não for efectuada uma limpeza adequada e a remoção da escória entre passagens. A porosidade e a falta de fusão também podem ocorrer devido à natureza manual do processo, o que pode levar a uma cobertura inconsistente e a um controlo inadequado do calor.

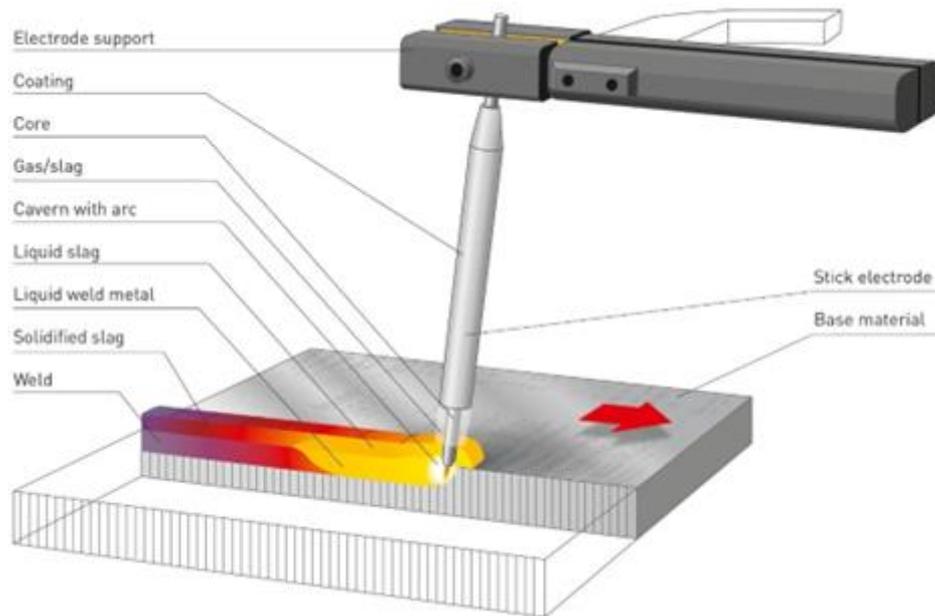


Fig. 3.2.18. Soldadura por arco metálico protegido. Fonte: <https://www.kjellberg.de/gas-shielded-metal-arc-welding.html>

A soldadura por arco metálico com proteção gasosa é geralmente menos propensa a imperfeições relacionadas com escórias, mas pode ter problemas de porosidade e fusão incompleta se o gás de proteção não for adequadamente controlado. Os salpicos de soldadura também podem estar presentes devido à utilização de fio de eletrodo consumível.

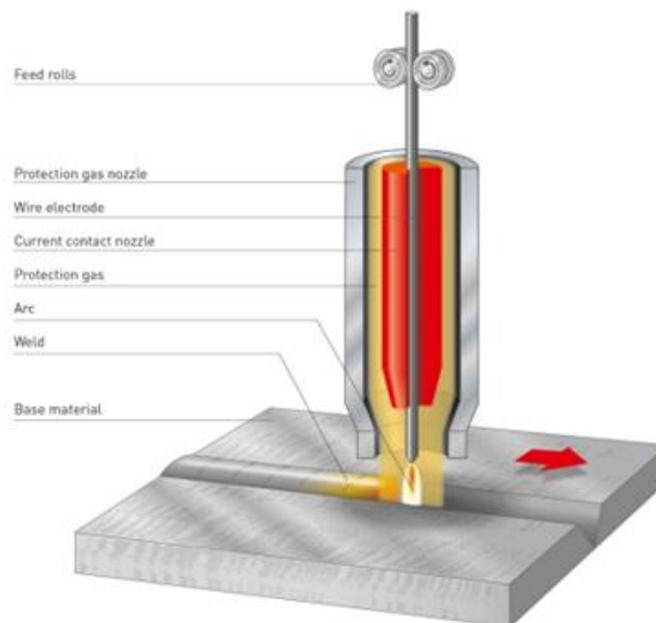


Fig. 3.2.19. Soldadura por arco metálico com proteção gasosa. Fonte: <https://www.kjellberg.de/manual-metal-arc-welding.html>

A soldadura por arco de tungsténio gasoso é conhecida por produzir soldaduras de alta qualidade, mas a falta de fusão e a penetração incompleta podem ocorrer se a entrada de calor não for

controlada corretamente. As inclusões de tungstênio também podem ser um problema se o eletrodo de tungstênio entrar em contacto com a poça de fusão.

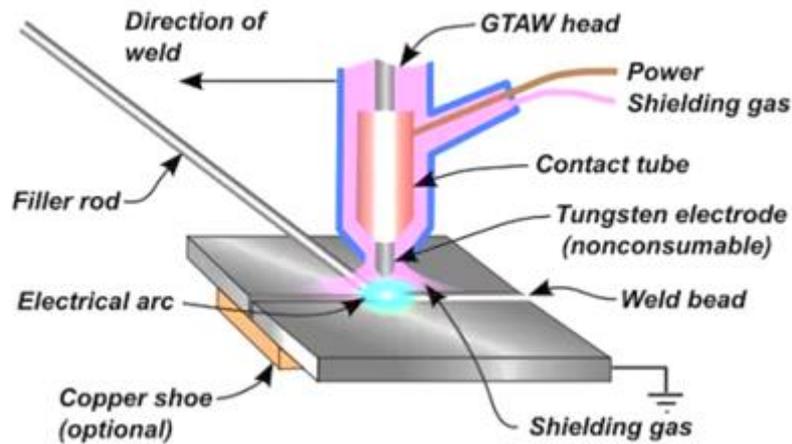


Fig. 3.2.20. Soldadura por Arco de Tungstênio Gasoso. Fonte: <https://www.weldingis.com/gtaw-welding/>

A soldadura por arco com fio fluxado pode apresentar inclusões de escória e porosidade se o núcleo do fluxo não for devidamente compatível com o metal de base ou se o gás de proteção for insuficiente. À semelhança da soldadura GMAW, os salpicos podem ser um problema devido à utilização de fio de enchimento consumível.

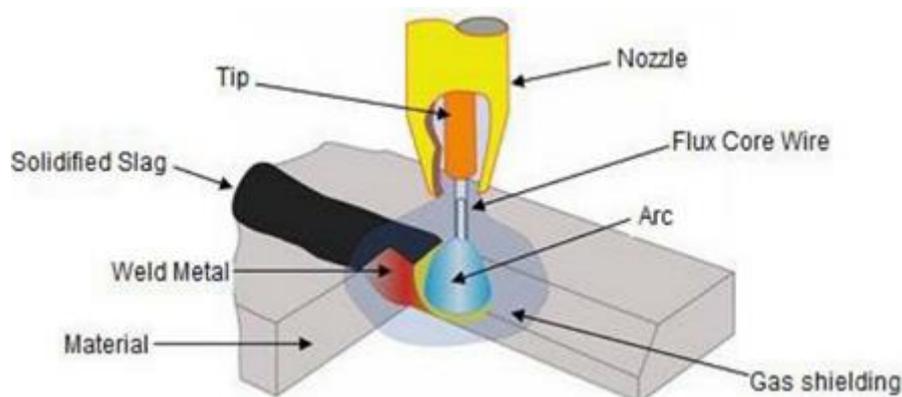


Fig. 3.2.21. Soldadura por arco fluxado. Fonte: Celso, Alves Correa; Niederauer, Mastelari (2014). Efeito dos parâmetros de soldagem em flux core arc welding (FCAW) com corrente convencional e pulsada na eficiência e taxa de fusão do revestimento fundido. Pesquisas e Ensaios Científicos.

A soldadura por arco submerso está geralmente associada a soldaduras profundas e de alta qualidade, mas pode ocorrer fusão incompleta e falta de fusão da parede lateral se a preparação e o alinhamento da junta não forem bem controlados.

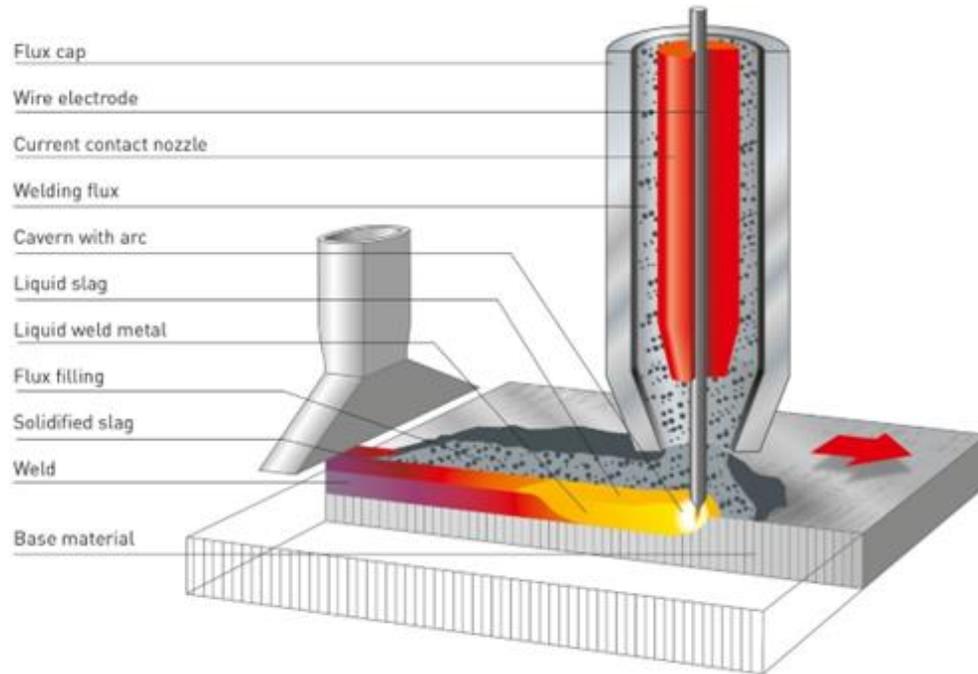


Fig. 3.2.22. Soldadura por arco submerso. Fonte: <https://www.kjellberg.de/submerged-arc-welding-2.html>

A soldadura por arco plasma reduz as soldaduras precisas e controladas, mas a penetração inadequada e a falta de fusão podem surgir se os parâmetros não forem corretamente definidos. As inclusões de tungstênio e o controlo incorreto do buraco da fechadura também podem dar origem a defeitos.

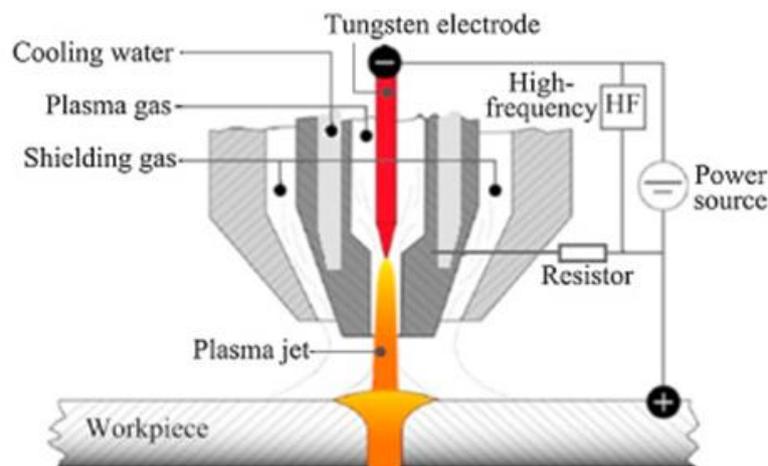


Fig. 3.2.23. Soldadura por arco plasma. Fonte: Liu, Zu Ming; Cui, Shuang Lin; Luo, Zhen; Zhang, Chang Zhen; Wang, Zheng Ming; Zhang, Yu Chen (2016). Soldadura por arco de plasma: Variantes do processo e seus recentes desenvolvimentos de detecção, controlo e modelação. Journal of Manufacturing Processes.

A soldadura por feixe de electrões é conhecida pelo seu processo de elevada densidade de energia, resultando normalmente em imperfeições mínimas. No entanto, o ajuste inadequado da junta, a instabilidade do buraco da fechadura e os problemas de focagem do feixe podem levar a defeitos de soldadura como a falta de fusão e a porosidade.

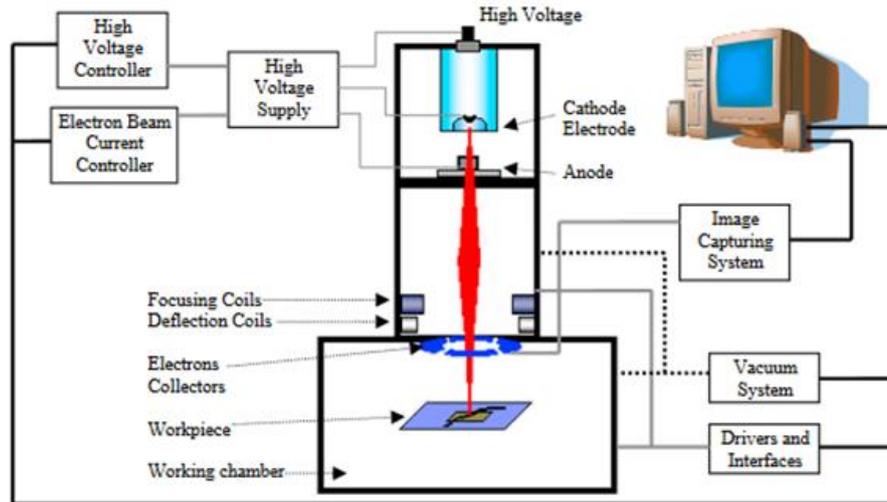


Fig. 3.2.24. Soldadura por feixe de electrões. Fonte: Oltean, Stelian-Emilian (2018). Estratégias de monitoramento e controle com rastreamento de costura na soldagem por feixe de elétrons. *Procedia Manufacturing*, 22(), 605-612.

3.2.2 Técnicas de inspeção visual para identificação de imperfeições de soldadura

A inspeção visual é um método crucial para identificar imperfeições de soldadura. Envolve um exame visual detalhado da soldadura e da sua área circundante para detetar irregularidades, defeitos e imperfeições.

Preparação e limpeza: antes de iniciar a inspeção visual, certifique-se de que a área de soldadura está limpa e livre de quaisquer detritos, tinta ou contaminantes que possam ocultar imperfeições. Poderá ser necessário limpar a superfície com uma escova de arame ou com um solvente adequado.

Iluminação adequada: a iluminação adequada é essencial para uma inspeção visual precisa. Utilize uma iluminação clara e difusa para minimizar sombras e reflexos que podem esconder imperfeições.

Ângulo de observação: examinar a soldadura de vários ângulos, incluindo vistas perpendiculares e oblíquas. Alterar o ângulo de observação pode revelar imperfeições que podem não ser visíveis a partir de uma única perspetiva.

Padrões de referência: ter padrões de referência ou amostras de soldaduras aceitáveis e inaceitáveis disponíveis para comparação. Estes padrões podem ajudar a determinar se as imperfeições observadas excedem os limites aceitáveis.

Ferramentas de auxílio visual: dependendo do tamanho e do pormenor da soldadura, utilize ferramentas de auxílio visual como lupas, binóculos, calibradores ou boroscópios para melhorar a sua capacidade de detetar imperfeições finas.

Inspeção sistemática: siga um procedimento de inspeção sistemática, examinando a junta de soldadura numa sequência estruturada. Comece por uma extremidade e vá até à outra, assegurando que nenhuma área é esquecida.



Distinguir imperfeições aceitáveis e inaceitáveis: desenvolver a capacidade de distinguir entre imperfeições aceitáveis, como irregularidades superficiais, pequenas ondulações ou salpicos, e defeitos reais, como fissuras, rebaixos ou falta de fusão, em função das informações fornecidas na norma adequada.

Conhecimento dos processos de soldadura: familiarize-se com o processo de soldadura específico utilizado, uma vez que cada um tem características únicas e potenciais imperfeições ou defeitos associados. A compreensão do processo pode ajudar a identificar os defeitos.

Conformidade com códigos e normas: ter conhecimento dos códigos e normas industriais relevantes que especificam as tolerâncias aceitáveis para imperfeições de soldadura. A conformidade com estas normas é obrigatória.

Formação e experiência: a experiência desempenha um papel importante para se tornar proficiente na inspeção visual. A formação contínua, a prática e a exposição a vários tipos de soldaduras e imperfeições melhoram as suas competências.

Ensaio não destrutivo (NDT): compreender quando complementar a inspeção visual com técnicas NDT mais avançadas, tais como ensaios radiográficos, ensaios ultra-sónicos, ensaios de partículas magnéticas ou ensaios de penetração de corantes, para uma avaliação mais abrangente, especialmente em aplicações críticas.

3.2.2.1 Procedimentos de inspeção e melhores práticas

Os procedimentos de inspeção eficazes e as melhores práticas são cruciais para garantir avaliações precisas e completas de soldaduras e outros materiais. Os procedimentos de inspeção adequados ajudam a manter a qualidade, a segurança e a conformidade com as normas da indústria.

Segurança:

- Dê prioridade à segurança, utilizando equipamento de proteção individual (EPI) adequado, como óculos de segurança, luvas, capacetes e vestuário.
- Esteja ciente de quaisquer riscos potenciais no ambiente de inspeção, especialmente quando inspecciona em ambientes industriais.

Planear e preparar:

- Desenvolver um plano de inspeção claro que defina o âmbito, os objectivos e os critérios de aceitação da inspeção.
- Reúna todo o equipamento de inspeção, ferramentas, normas de referência e documentação necessários antes de iniciar a inspeção.

Sequência de inspeção visual:

- Seguir uma sequência sistemática que assegure que todas as áreas da soldadura são cuidadosamente examinadas.



- Comece por uma extremidade e vá até à outra para não perder nenhuma secção.

Limpeza e preparação: Assegurar que as superfícies a inspecionar estão limpas, isentas de contaminantes e devidamente preparadas. Remover sujidade, ferrugem, tinta ou outros detritos que possam ocultar imperfeições.

Iluminação adequada:

- Utilizar condições de iluminação adequadas que proporcionem uma iluminação adequada da área de inspeção.
- Incline a luz para minimizar as sombras e os reflexos.

Auxiliares de inspeção: Utilize auxiliares de inspeção adequados, tais como ferramentas de ampliação, boroscópios e espelhos para melhorar a visibilidade e o acesso a áreas de difícil acesso.

Apresentação de relatórios e manutenção de registos:

- Gerar relatórios de inspeção detalhados que incluam resultados de inspeção, fotografias, desenhos e quaisquer recomendações para reparações ou acções correctivas.
- Manter um registo exaustivo de todas as inspecções para referência futura.

3.2.3 Exame macroscópico de juntas soldadas

A inspeção macroscópica de juntas de soldadura é uma técnica de ensaio destrutivo utilizada para avaliar visualmente a qualidade geral, a integridade e as características de uma junta soldada. Este método de inspeção envolve um exame visual pormenorizado da soldadura e das suas imediações imediatas, utilizando o olho nu ou meios auxiliares de baixa ampliação. O principal objetivo da inspeção macroscópica é identificar e avaliar defeitos macroscópicos, irregularidades ou descontinuidades na soldadura, garantindo que esta cumpre as normas e os requisitos especificados.

Preparação e avaliação de espécimes macroscópicos

A preparação de espécimes de ensaio para inspeção macroscópica envolve a preparação e seccionamento cuidadosos de amostras representativas das juntas soldadas ou dos componentes que têm de ser examinados. O objetivo é criar secções transversais que permitam uma avaliação visual clara e detalhada da soldadura e de quaisquer potenciais defeitos. Os passos para preparar os espécimes de teste para a inspeção macroscópica são os seguintes:

Selecionar amostras representativas: Escolha amostras de teste que representem com precisão o tipo de juntas soldadas ou componentes que pretende inspecionar. Os espécimes devem conter as soldaduras ou áreas de interesse.

Corte:

- Utilizar equipamento de corte adequado, como uma serra de fita, uma serra de arco ou um disco de corte abrasivo, para efetuar cortes limpos e precisos nos provetes de ensaio. O objetivo é criar secções transversais das soldaduras ou componentes.



- Assegurar que o processo de corte não provoca danos ou defeitos adicionais nos espécimes.

Orientação:

- Marcar os espécimes para indicar a orientação da junta de soldadura ou da área de interesse. Isto ajuda a manter a consistência durante a inspeção e análise.
- Se possível, cortar os espécimes para revelar tanto o cordão de soldadura como o material de base adjacente e a zona afetada pelo calor (HAZ).

Montagem: Dependendo do tamanho e da forma dos espécimes de teste, poderá ser necessário montá-los num material adequado para facilitar o manuseamento, o esmerilamento e o polimento. Os materiais de montagem comuns incluem resina epoxi ou acrílico.

Retificação: Utilizar uma série de lixas ou discos abrasivos com grãos progressivamente mais finos para remover o excesso de material e criar uma superfície plana e lisa nos espécimes de teste. Este passo é fundamental para obter uma superfície polida que permita uma inspeção clara.

Polimento: Utilizar compostos de polimento de grão fino ou pastas de diamante para melhorar ainda mais a qualidade da superfície. Continuar a polir até a superfície atingir um acabamento espelhado.

Gravura (opcional): Em alguns casos, a aplicação de um condicionador adequado à superfície do espécime pode revelar detalhes microestruturais e destacar características como limites de solda, estrutura de grãos e a presença de defeitos. A escolha do condicionador depende do material a ser inspeccionado.

Nas inspeções macroscópicas, os agentes de corrosão são produtos químicos utilizados para revelar e realçar detalhes microestruturais em materiais metálicos. Estes agentes de corrosão são aplicados à superfície de amostras de teste preparadas para diferenciar entre vários constituintes estruturais, limites de grão, fases e potenciais defeitos. A escolha do agente de corrosão depende do material a ser inspeccionado e das características microestruturais específicas de interesse.



Vídeo 3.2.1: Técnicas Macroscópicas Parte 1. Fonte: Prof. Dr. Ing. Rainer Schwab, Hochschule Karlsruhe, Universidade de Ciências Aplicadas, Karlsruhe, Alemanha [<https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw>]



Vídeo 3.2.2: Técnicas Macroscópicas Parte 2. Fonte: Prof. Dr. Ing. Rainer Schwab, Hochschule Karlsruhe, Universidade de Ciências Aplicadas, Karlsruhe, Alemanha [<https://www.youtube.com/watch?v=UuHofNW40Yw&t=14s>]



Classificação dos gravadores:

1. Nital (solução de ácido nítrico): O Nital é um agente de corrosão comumente utilizado para revelar os limites de grão e a microestrutura geral de materiais ferrosos, como o aço. É normalmente constituído por ácido nítrico (HNO_3) misturado com etanol ou metanol.
2. O condicionador Picral, que consiste em ácido pícrico dissolvido em etanol ou metanol, é frequentemente utilizado para revelar limites de grão em alumínio e ligas de alumínio.
3. O Reagente de Keller é uma mistura de ácido nítrico e álcool, e é normalmente utilizado para revelar a estrutura do grão e a estrutura dendrítica em ligas de alumínio e magnésio.
4. O reagente de Vilella é uma mistura de água, ácido clorídrico e ácido nítrico. É utilizado para revelar a macroestrutura do cobre e das ligas de cobre.
5. O Reagente de Marble é utilizado para gravar latão e ligas de cobre. É composto por uma solução de cloreto de cobre em ácido clorídrico.
6. A água régia é uma mistura de ácido nítrico concentrado e ácido clorídrico concentrado. É utilizada para gravar ouro e alguns metais do grupo da platina para revelar características macroscópicas.
7. Os condicionadores de hidróxido de sódio são utilizados no alumínio e nas suas ligas para revelar características macroscópicas. São normalmente constituídos por uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) ou soda cáustica.
8. O reagente de Fry é uma mistura de ácido acético e peróxido de hidrogénio e é utilizado para revelar a macroestrutura do aço inoxidável e de algumas ligas à base de níquel.
9. O Nital-Etanol é uma mistura de nital e etanol que é frequentemente utilizada para examinar soldaduras, uma vez que ajuda a realçar a estrutura da soldadura e potenciais defeitos na área da soldadura.
10. O condicionador nº 2 da Kalling é utilizado para revelar a macroestrutura dos ferros fundidos.

É essencial escolher o agente de corrosão adequado com base no material a ser inspeccionado e nas características macroestruturais específicas de interesse. O processo de gravação deve ser cuidadosamente controlado para alcançar os resultados desejados sem gravar demasiado ou danificar a amostra. Devem ser observadas as devidas precauções de segurança ao manusear os agentes de corrosão, uma vez que muitos deles são corrosivos ou potencialmente perigosos.

Limpeza: Limpar cuidadosamente os espécimes preparados para remover quaisquer resíduos dos processos de corte, retificação e polimento. Assegurar que a superfície está livre de contaminantes.

Armazenamento e rotulagem:



- Rotular corretamente cada espécime com informações essenciais, incluindo a data de preparação, o tipo de espécime, a orientação e quaisquer detalhes relevantes sobre a soldadura ou o componente.
- Armazenar os espécimes num ambiente controlado para evitar a corrosão ou a degradação até estarem prontos para a inspeção.

Documentação: Manter registos pormenorizados do processo de preparação dos provetes, incluindo fotografias e notas, de modo a fornecer um historial completo de cada provete.

Quando os espécimes de teste estiverem preparados, estão prontos para a inspeção macroscópica. Durante a inspeção, utilize iluminação adequada, ferramentas de ampliação e procedimentos de inspeção para examinar minuciosamente as secções transversais e avaliar a qualidade da soldadura e a presença de quaisquer defeitos. Os espécimes corretamente preparados são essenciais para obter resultados de inspeção precisos e fiáveis.



Vídeo 3.2.3: Preparação de amostras de metalografia. Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=ok42dVq2CU0>

3.2.4 Formação prática na identificação de imperfeições de soldadura

A identificação de imperfeições de soldadura é uma componente fundamental para garantir a qualidade, segurança e fiabilidade de estruturas e componentes soldados. Este programa de formação prática fornece aos participantes as competências e conhecimentos essenciais necessários para identificar imperfeições de soldadura sem a ajuda de ferramentas ou tecnologias avançadas. O programa está estruturado para fornecer uma compreensão abrangente das imperfeições de soldadura, técnicas de inspeção, medidas de segurança e práticas de documentação.



O programa de formação prática inclui vários componentes-chave. Em primeiro lugar, os participantes são introduzidos na tarefa crítica de identificar imperfeições de soldadura e compreender o seu potencial impacto estrutural, com uma visão geral das imperfeições comuns, como a porosidade e as fissuras. Em seguida, mergulham no mundo das ferramentas e equipamentos de inspeção visual, aprendendo a utilizar eficazmente instrumentos como iluminação, lupas e cabinas de exame para avaliações exaustivas. São abordadas as melhores práticas para inspeções consistentes e fiáveis, seguidas de uma exploração aprofundada do exame macroscópico para detetar imperfeições de soldadura. Exercícios práticos oferecem experiência real na identificação e caracterização de imperfeições. O programa também orienta os participantes no exame de amostras macroscópicas e na interpretação das suas descobertas para fazer avaliações informadas da qualidade da soldadura. A ênfase é colocada na importância de uma documentação precisa e de relatórios transparentes, juntamente com a adesão a precauções de segurança, incluindo requisitos de Equipamento de Proteção Individual (EPI) e medidas de mitigação de riscos durante as inspeções de soldadura.

3.2.5 Prática com técnicas de inspeção visual

1. Familiarização com o equipamento de inspeção visual:

Os participantes começam por se familiarizar com o equipamento e as ferramentas de inspeção visual que irão utilizar durante os exercícios. Isto inclui iluminação, lupas, espelhos e cabinas de exame.

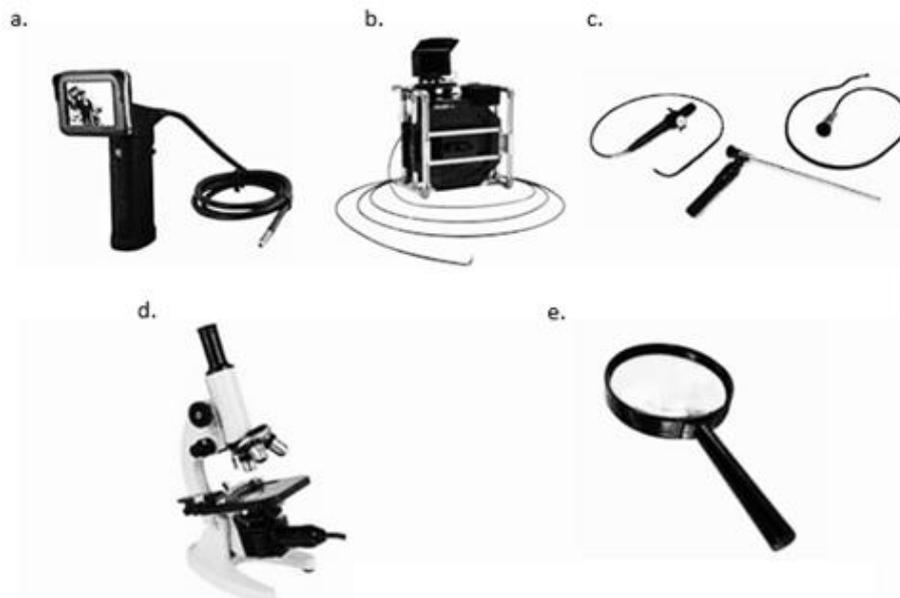


Fig 3.2.25: Videoscópio (a); videoscópio avançado (b); boroscópios (c); lupa (d); microscópio (e). Fonte: <https://worldofndt.com/introduction-to-visual-testing/>



2. Exemplos de juntas soldadas:

São fornecidos exemplos físicos de juntas de soldadura ou espécimes com imperfeições de soldadura introduzidas intencionalmente para inspeção. Estes espécimes representam cenários do mundo real e servem de base para a prática.

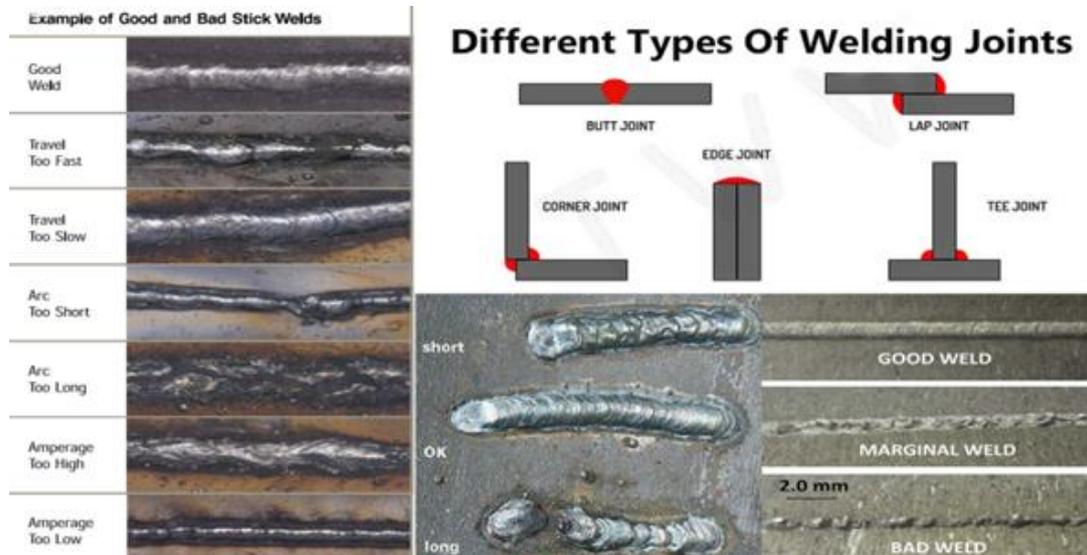


Fig. 3.2.26: Diferentes tipos de juntas de soldadura. Fonte: <https://engineeringdiscoveries.com/different-types-of-welding-joints/>

3. Exercícios práticos:

Os participantes são guiados através de uma série de exercícios práticos, cada um centrado em aspectos específicos da inspeção visual. Estes exercícios podem incluir:

- **Identificação de porosidade:** Os participantes aprendem a reconhecer e a diferenciar os diferentes tipos de porosidade, tais como pinholes, porosidade superficial e porosidade subsuperficial. Praticam a avaliação da extensão e gravidade da porosidade nas soldaduras.



Fig. 3.2.27: Porosidade. Fonte: <https://www.mechanicwiz.com/porosity-in-welding/>



- **Deteção de fissuras:** Os participantes praticam a identificação de fissuras, tanto superficiais como subsuperficiais. Aprendem a distinguir os tipos de fissuras, tais como fissuras longitudinais, transversais e de cratera.



Fig. 3.2.28: Fissura. Fonte: <https://www.rapiddirect.com/blog/types-of-welding-defects/>

- **Falta de fusão e penetração incompleta:** Os exercícios envolvem a deteção de áreas onde ocorreu falta de fusão ou penetração incompleta. Os participantes avaliam as implicações destas imperfeições na qualidade da soldadura.



Fig. 3.2.29: Falta de fusão. Fonte: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/what-is-lack-of-fusion-in-welds>



Fig. 3.2.30: Penetração incompleta. Fonte: <https://allgas.us/b/what-are-welding-defects--types-causes-and-remedies>



- **Avaliação de rebaixos:** Os participantes aprendem a identificar o undercut, a sua localização nas soldaduras e o seu potencial impacto na integridade estrutural.

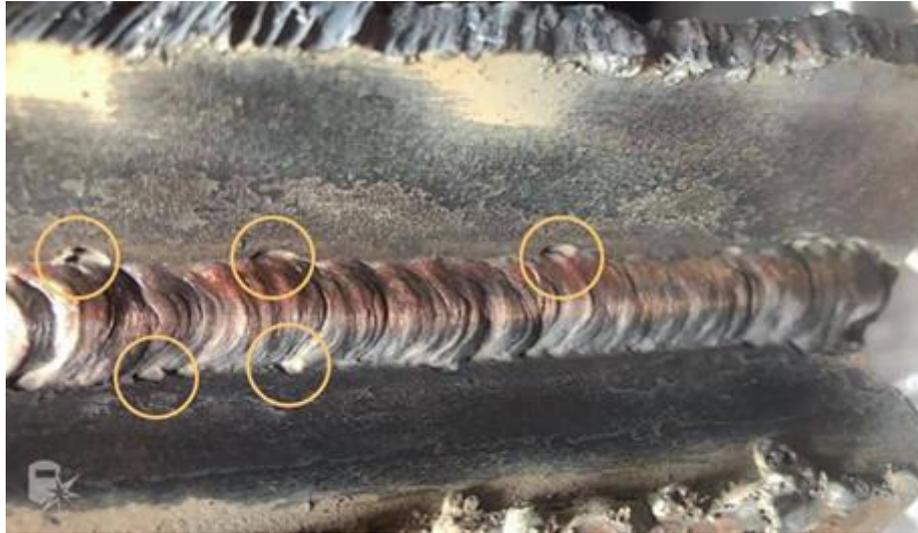


Fig. 3.2.31: Cortes inferiores. Fonte: <https://weldguru.com/undercut-in-welding/>

- **Exame de perfis de soldadura:** Os participantes analisam os perfis de soldadura para garantir que cumprem as normas e dimensões especificadas.



Vídeo 3.2.4: Inspeção de soldadura. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=nKH17J19p7E>

4. Avaliação da gravidade:

Os participantes não só identificam as imperfeições, como também praticam a avaliação da sua gravidade. Isto é crucial para determinar se uma soldadura é aceitável ou se necessita de medidas correctivas.



Fig. 3.2.32: Diferença entre uma boa e uma má soldadura, exemplo 1. Fonte: <https://waterwelders.com/good-weld-vs-bad-weld/>



Fig. 3.2.33: Diferença entre soldadura boa e má, exemplo 2. Fonte: <https://blog.daihen-usa.com/why-welding-parameters-are-so-important-to-finished-quality>

5. Prática de documentação:

Os participantes documentam as suas descobertas durante os exercícios de inspeção. Isto inclui registar o tipo e a localização das imperfeições, as suas dimensões e quaisquer observações relevantes.



YOUR LOGO GOES HERE **Organisation:** Template Library
Project: Example Project
Team: Example Team **Template ID:** DP-QUAL-0017
Template Version: 4 Form Versión: 2
Form created: Tuesday, 23 October 2018, 4:58:45 pm

Visual Weld Inspection

Automated Form Number: Template Library-Example Project-Example Team-DP-QUAL-0017 -3
Date: Tuesday, 03 April 2018, 12:00:00 am

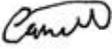
Inspection Overview

Traveler No.	Item Description Part #	Acceptance Criteria	LIR	Inspector	Type of Report	Welder ID
N-1000-8275	HA-700	W x 5/16 in. (3mm)	120-756	Jimmy Summers	Pi-up	N13000

Inspection Details

Defect No.	Defect Description	Sheet/Zone	Photo
12	Slag	1 of 2	 <small>See full page photos attached at end of PDF</small>
13	Por team	2 of 2	

Disposition: Have all defects been reported? Yes **Comments:** Reported back to project manager because impacts timeframe

Inspector's Signature:  Dave Hodgson, Tuesday, 23 October 2018, 4:28:50 pm

Key:

- P - Porosity
- LF - Lack of Fusion
- C - Crack
- UF - Underfill
- US - Undersized
- UC - Undercut
- CS - Cold Shut
- AS - Arc Strike

Generated with sitemate.com Printed version is uncontrolled Page 1 of 3 This PDF was created at Tuesday, 23 October 2018, 4:58:23 pm

Fig. 3.2.34: Exemplo de prática de documentação 1/3. Fonte:

<https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>

YOUR LOGO GOES HERE **Organisation:** Template Library
Project: Example Project
Team: Example Team **Template ID:** DP-QUAL-0017
Template Version: 4 Form Versión: 2
Form created: Tuesday, 23 October 2018, 4:58:45 pm

BB - Spatter
PH - Pin Hole

Generated with sitemate.com Printed version is uncontrolled Page 2 of 3 This PDF was created at Tuesday, 23 October 2018, 4:58:23 pm

Fig. 3.2.35: Exemplo de prática de documentação 2/3. Fonte:

<https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>

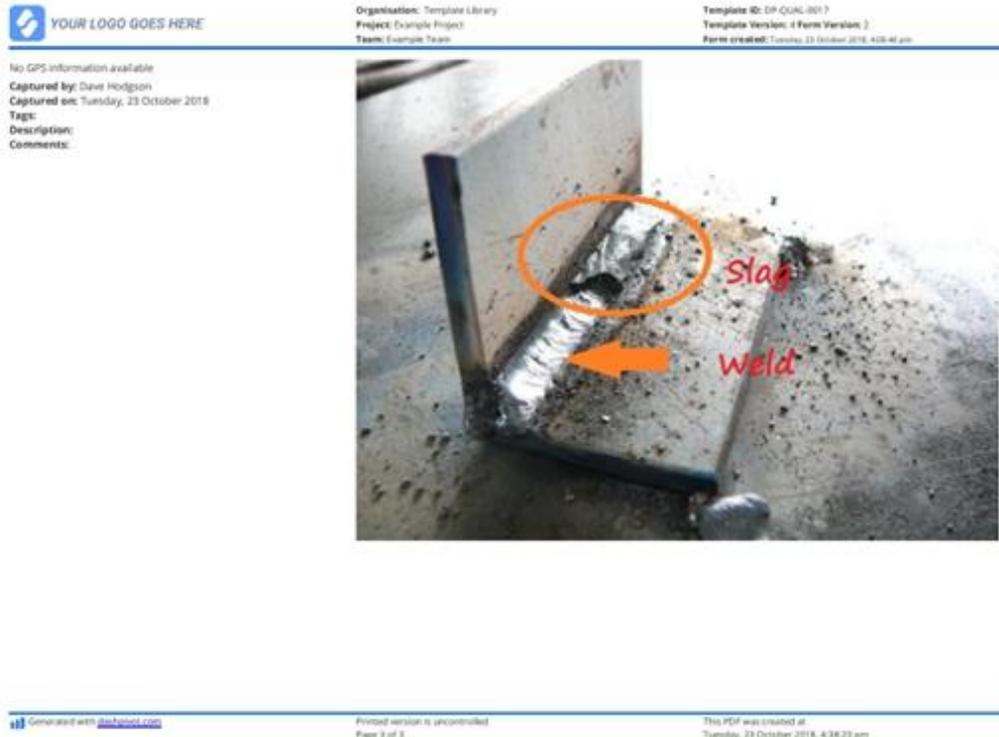


Fig. 3.2.36: Exemplo de prática de documentação 3/3. Fonte:

<https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>

6. Orientação do instrutor:

Ao longo dos exercícios, instrutores experientes fornecem orientação, respondem a perguntas e oferecem feedback para ajudar os participantes a melhorar as suas competências de inspeção.

7. Reconhecimento e correção de erros:

Os participantes são encorajados a reconhecer e corrigir quaisquer erros que possam cometer durante o processo de inspeção. Isto promove a melhoria contínua e a exatidão.

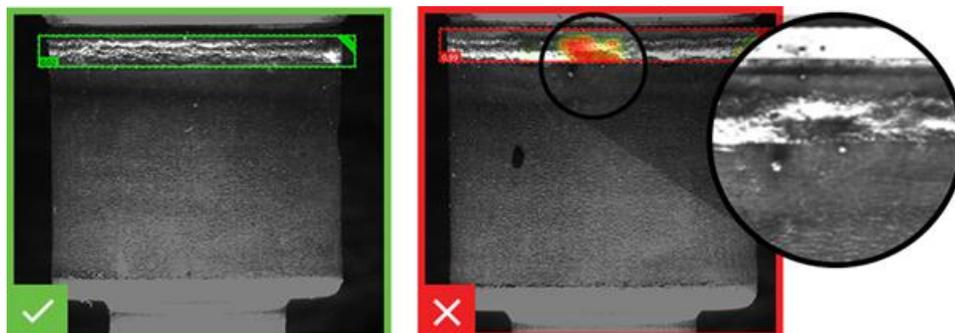


Fig. 3.2.37: Inspeção de cordões de soldadura. Fonte:

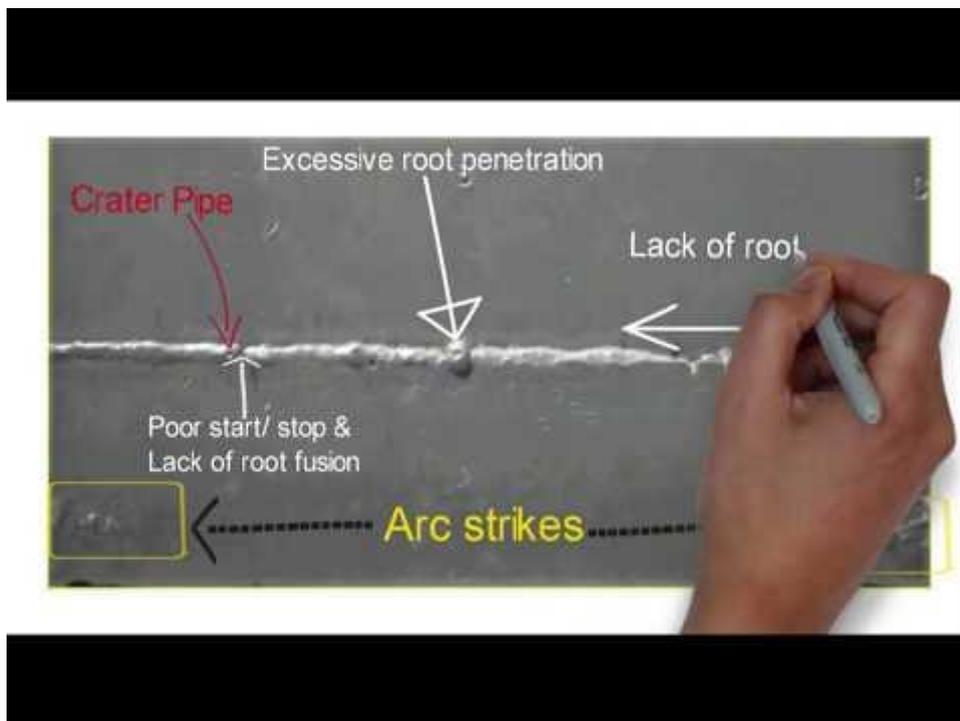
<https://www.cognex.com/industries/automotive/powertrain-systems/welding-seam-inspection>

3.2.6 Exame e análise de espécimes macroscópicos

O exame e análise de amostras macroscópicas, particularmente no contexto da ciência e engenharia dos materiais, envolve a inspeção visual minuciosa e a avaliação de amostras ou

componentes preparados para recolher informações sobre as suas características físicas, defeitos e qualidade geral.

O processo de análise de materiais inclui várias etapas fundamentais. Começa com a preparação dos espécimes, envolvendo corte, montagem, retificação e polimento para garantir superfícies bem preparadas para análise. Subsequentemente, é realizada uma inspeção visual para identificar características e anomalias visíveis. Pode seguir-se um exame microestrutural, utilizando microscópios para examinar as dimensões dos grãos, os limites e a composição do material. São tiradas fotografias para documentação, o que se revela inestimável para análise e comparação posteriores. Os defeitos, irregularidades e dimensões são meticulosamente registados, seguidos de uma avaliação da estrutura global e do estado da superfície. Os resultados são então comparados com as normas, códigos e especificações da indústria, determinando a conformidade com os requisitos de qualidade e segurança. Com base nesta análise, é efectuada uma avaliação da adequação dos espécimes ao fim a que se destinam. É criado um relatório de inspeção abrangente, que inclui descrições, medições, fotografias e recomendações. Finalmente, os espécimes e a documentação relacionada são arquivados e armazenados para referência futura, mantendo um sistema robusto de controlo de qualidade e gestão de registos.



Vídeo 3.2.5: Defeitos de soldadura, seu aparecimento e identificação. Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=lgeUT5EIH5o>



3.2.6.1 Documentação e comunicação de imperfeições de soldadura

A documentação e a comunicação de imperfeições de soldadura são aspectos essenciais do controlo e garantia da qualidade em projectos de soldadura. Documentar e comunicar corretamente as imperfeições ajuda a garantir a transparência, a rastreabilidade e a conformidade com as normas da indústria e as especificações do projeto.

Guia de documentação:

Comece por utilizar formulários ou modelos padronizados criados com o objetivo de documentar imperfeições/defeitos de soldadura. Estes formulários incluem normalmente campos para detalhes vitais e listas de verificação para identificar defeitos prevalentes.

Marcar claramente o relatório de inspeção ou de ensaio com informações cruciais, que incluem o nome do projeto, a localização, a data, a identidade do inspetor e um identificador único para o item examinado.

Fazer uma observação específica sobre cada imperfeição ou defeito de soldadura identificado. Esta observação deve incluir informações específicas sobre o tipo de defeito, a sua localização exacta na soldadura, as dimensões e quaisquer observações contextuais pertinentes.

Categorizar cada imperfeição/defeito de acordo com as normas ou códigos reconhecidos pela indústria. Diferentes defeitos podem ter diferentes níveis de gravidade, e esta categorização ajuda a avaliar o seu potencial impacto na integridade estrutural.

Incluir fotografias explícitas ou documentação visual de todas as imperfeições. As provas visuais revelam-se frequentemente mais eficazes para elucidar a natureza e a extensão de cada defeito.

Utilize esboços ou diagramas para representar visualmente o posicionamento e as medidas das imperfeições de soldadura. Estas ajudas gráficas melhoram a compreensão.

Consultar os critérios ou normas de aceitação utilizados para avaliar as imperfeições. Isto facilita a determinação clara de se o defeito se enquadra nos parâmetros aceitáveis.

Documentar os métodos de inspeção e o equipamento utilizado para detetar e medir as imperfeições de soldadura. Esta informação contextual fornece uma visão do processo de inspeção.

Propor recomendações para acções correctivas, procedimentos de reparação ou outras avaliações com base nas imperfeições identificadas. Estas sugestões servem de orientação para a tomada de decisões.

Incluir espaços designados para a assinatura do inspetor e quaisquer endossos obrigatórios de partes relevantes. Este passo valida a exatidão do relatório e autoriza as acções propostas.

Apresentar os relatórios de inspeção imediatamente após a conclusão da inspeção. A apresentação atempada de relatórios garante que as medidas necessárias podem ser tomadas sem atrasos indevidos.



Transmitir as conclusões e recomendações a todas as partes interessadas pertinentes, incluindo soldadores, supervisores, engenheiros e gestores de projectos.

Estabelecer um sistema eficiente para o armazenamento e arquivo ordenados dos relatórios de inspeção e documentação relacionada. Uma conservação adequada garante a acessibilidade dos registos históricos.

Manter um registo exaustivo de todos os relatórios de inspeção, quer para referência futura, quer como componente integral de uma iniciativa de controlo e garantia da qualidade.

Rever periodicamente os relatórios de inspeção para identificar tendências, problemas recorrentes ou áreas onde podem ser aplicadas melhorias no processo. Utilizar esta informação para aperfeiçoar as práticas de soldadura.

3.2.6.2 Formatos e requisitos dos relatórios

Os formatos e requisitos dos relatórios podem variar muito, dependendo do sector específico, da organização e da natureza das informações a relatar. No entanto, existem alguns elementos e considerações comuns que se aplicam a muitos tipos de relatórios.

- **Título e página de rosto:** Os relatórios começam normalmente com uma página de título que inclui o título do relatório, a data de apresentação, o nome do autor ou da organização e quaisquer logótipos ou marcas relevantes.
- **Resumo executivo:** Muitos relatórios começam com um resumo executivo, que fornece uma visão geral concisa dos principais resultados, recomendações e conclusões do relatório. É frequentemente a primeira secção que os decisores lêem.
- **Índice:** Um índice enumera as principais secções e subsecções do relatório, juntamente com os números das páginas. Ajuda os leitores a navegar facilmente no documento.
- **Introdução:** Prepara o terreno para o relatório, explicando a sua finalidade, âmbito e objectivos. Fornece igualmente informações de base e o contexto do conteúdo do relatório.
- **Metodologia:** Nos relatórios técnicos ou de investigação, a secção da metodologia explica como os dados foram recolhidos, analisados e quaisquer métodos de investigação ou ensaio relevantes utilizados.
- **Conclusões ou resultados:** Esta secção apresenta as principais conclusões, resultados ou observações do relatório. Inclui frequentemente dados, gráficos, quadros ou outros recursos visuais para apoiar as conclusões.
- **Discussão:** Esta secção interpreta os resultados e apresenta uma análise. Pode abordar as implicações dos resultados, tendências, comparações e quaisquer teorias ou quadros relevantes.



- **Recomendações:** Se aplicável, deve apresentar recomendações claras e accionáveis com base nas conclusões. As recomendações devem ser específicas, práticas e alinhadas com os objectivos do relatório.
- **Conclusão:** Resume os pontos-chave do relatório e reafirma as suas principais conclusões. Reforça as principais conclusões do relatório.
- **Requisitos de formatação:** Siga as directrizes de formatação, como o tamanho do tipo de letra, o espaçamento entre linhas, as margens e a numeração das páginas. A consistência na formatação garante uma aparência profissional e polida.
- **Gráficos e elementos visuais:** Utilizar gráficos, quadros, tabelas e outros elementos visuais, quando apropriado, para melhorar a apresentação de dados e informações. Assegurar que os elementos visuais são rotulados e referenciados corretamente.
- **Linguagem e estilo:** Utilizar uma linguagem clara e concisa e manter um estilo de redação coerente em todo o relatório. Evitar jargões ou termos técnicos que possam não ser familiares ao público.
- **Consideração do público:** Adaptar o conteúdo, o tom e o nível de pormenor técnico do relatório às necessidades e expectativas do público a que se destina.
- **Distribuição:** Determinar a forma como o relatório será distribuído ao público a que se destina. Isto pode envolver a distribuição eletrónica, cópias físicas ou apresentações.

www.inspection-for-industry.com Quality Control Form WELDING DAILY REPORT (PIPING)		Project:													
		Client:	Report No.:												
		Contractor:	Date:												
		Ref. Standard:	Page 1 of 1												
		Doc. No.:													
Area/ Location:		Ref. Drawing:	Rev.												
Line No.	Spool No.	Joint No.	Joint Type	O.D.	Thk.	Welder (s) ID			Type of Material/Material Spec.	WPS No.	Pre-heat	PWHT	Fill up Report No.	VT Result	Remarks
						Root	Hot	Cap							
Technical Comments:															
Abbreviation: Acc. : Accept Rej. : Reject RC : Re-Cap NA: Not Applicable B: Butt Weld, S: Socket Weld, T: Seal Weld (for Threaded Joints), M: Miter For Example: Pipe / 5L X52 to Flange / A105															
Name: _____ Sign: _____ Date: _____						Name: _____ Sign: _____ Date: _____						Name: _____ Sign: _____ Date: _____			

Fig. 3.2.38: Exemplo de modelo de relatório de inspeção de soldadura. Fonte:

<https://in.pinterest.com/pin/welding-inspection-report-template-1-templates-example--504543964505475585/>



3.2.7 Precauções de segurança durante a inspeção de soldaduras

As precauções de segurança durante a inspeção de soldaduras são fundamentais para garantir o bem-estar do pessoal envolvido no processo de inspeção. As operações de soldadura podem produzir condições perigosas e a inspeção de soldaduras, especialmente em ambientes industriais, requer uma atenção cuidadosa aos protocolos de segurança.

Requisitos de segurança:

- **Equipamento de Proteção Individual (EPI):** Deve ser sempre usado EPI adequado, incluindo óculos de segurança, um capacete de soldadura ou uma proteção facial, vestuário resistente às chamas, luvas e botas de segurança com biqueira de aço. Os requisitos específicos de EPI podem variar consoante o ambiente de inspeção.



Fig. 3.2.39. Equipamento de proteção individual. Fonte: <https://safetyculture.com/topics/ppe-safety/>

- **A proteção respiratória e as medidas de ventilação** são essenciais quando se lida com a potencial exposição a fumos de soldadura, gases ou partículas. Devem ser usados respiradores adequadamente seleccionados para lidar com o tipo e nível específicos de contaminantes presentes, assegurando simultaneamente que a área de inspeção mantém uma boa ventilação para diminuir a concentração de fumos de soldadura, reduzindo assim o risco de exposição por inalação.
- **Proteção contra o ruído:** Os processos de soldadura podem gerar níveis elevados de ruído. É obrigatória a utilização de proteção auditiva, como tampões para os ouvidos ou protectores auriculares, para evitar lesões auditivas.
- **Proteção dos olhos:** Para se proteger de potenciais perigos, tais como detritos voadores, faíscas e radiação ultravioleta (UV) ou infravermelha (IV), é essencial usar óculos de soldadura ou capacetes com lentes adequadas.



- **Iluminação adequada:** Uma iluminação adequada é crucial para uma inspeção precisa; a área de inspeção deve estar bem iluminada; recomenda-se a utilização de uma luz de trabalho portátil ou de lâmpadas de inspeção, quando necessário.
- **Segurança eléctrica:** Os riscos eléctricos associados ao equipamento de soldadura devem ser tidos em conta; os cabos de alimentação, as fichas e as ligações eléctricas devem ser inspeccionados quanto a danos. A ligação à terra adequada do equipamento de soldadura é obrigatória.
- **Prevenção de quedas de objectos:** Ao trabalhar em alturas ou em posições elevadas, deve ser utilizado equipamento de proteção contra quedas, como arneses e cabos de segurança, para evitar acidentes.
- **Manuseamento de ferramentas e equipamento:** As ferramentas e o equipamento devem ser utilizados com cuidado para evitar cortes, abrasões ou ferimentos; as ferramentas devem ser mantidas em boas condições de funcionamento.
- **Segurança contra incêndios:** Os riscos de incêndio devem ser evitados; assim, os extintores de incêndio devem estar próximos do local de trabalho e o pessoal deve ser instruído sobre a sua utilização; todos os materiais inflamáveis devem ser retirados do local de trabalho.
- **Superfícies quentes:** Os componentes soldados e as superfícies próximas podem ficar extremamente quentes. O contacto com estas superfícies quentes deve ser evitado para prevenir queimaduras; devem ser utilizadas barreiras térmicas ou materiais isolantes quando necessário.
- **Acesso seguro:** Deve ser assegurado o acesso seguro às áreas de inspeção, utilizando plataformas estáveis, escadas ou andaimes, conforme necessário, para alcançar espaços de trabalho elevados.
- **Exposição a produtos químicos:** Os produtos químicos ou de limpeza utilizados no processo de inspeção são potencialmente perigosos, pelo que se recomenda o cumprimento de procedimentos adequados de manuseamento e eliminação, bem como o uso de luvas adequadas quando necessário.
- **Comunicação:** Deve ser assegurada uma comunicação clara com todo o pessoal que se encontre nas imediações do espaço de trabalho, sendo encorajada a utilização de sinais, tabuletas ou comunicação verbal para garantir que todos têm conhecimento das actividades em curso.
- **Procedimentos de emergência:** O pessoal deve estar familiarizado com o plano de resposta a emergências (localização das saídas de emergência, kits de primeiros socorros, estações de lavagem de olhos e chuveiros de emergência).



- **Formação:** As actualizações regulares da formação de segurança são essenciais; é obrigatório que o pessoal que opera no espaço de trabalho tenha recebido formação adequada em segurança de soldadura e protocolos de inspeção.
- **Avaliação dos riscos:** A avaliação dos riscos é necessária antes do início de qualquer atividade, nomeadamente, a necessidade de identificar os perigos potenciais e de aplicar medidas de controlo que atenuem os riscos.

3.2.7.1 Requisitos de equipamento de protecção individual (EPI)

Os requisitos do Equipamento de Protecção Individual (EPI) para a inspeção de soldaduras, tal como os da própria soldadura, são cruciais para garantir a segurança e o bem-estar dos indivíduos envolvidos no processo de inspeção. Os requisitos específicos de EPI podem variar com base em factores como o tipo de soldadura a ser inspeccionada, o ambiente de inspeção e os potenciais perigos presentes.

Protecção dos olhos:

- **Óculos de segurança ou óculos de protecção:** Estes óculos protegem os olhos de detritos voadores, faíscas e outros potenciais perigos para os olhos.

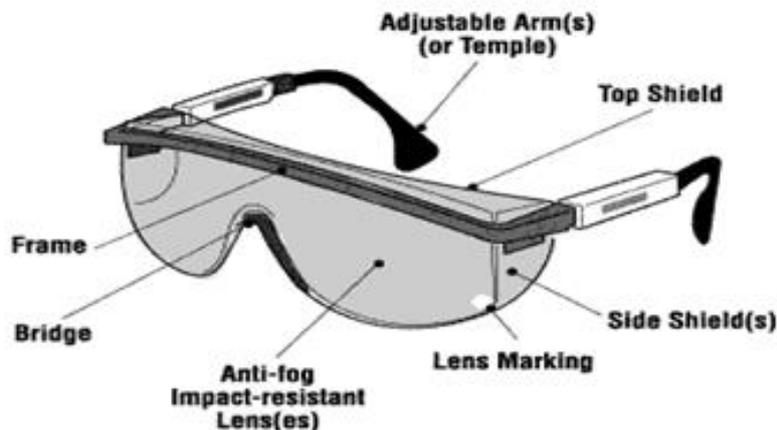


Fig. 3.2.40. Óculos de protecção para soldadura. Fonte: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/prevention/ppe/glasses.html>

- **Capacete de soldadura:** Um capacete de soldadura com um tom de lente adequado protege contra a luz intensa, os raios UV e IV produzidos durante as inspecções de soldadura.

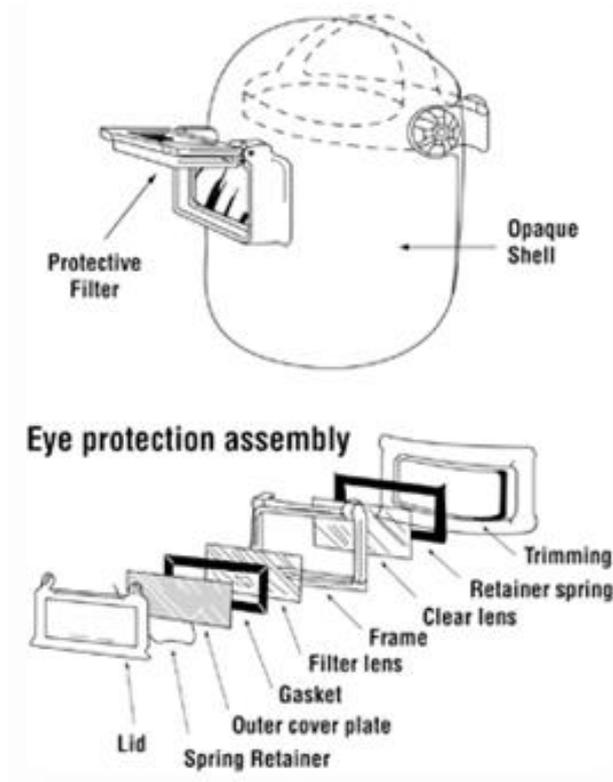


Fig. 3.2.41. Capacete de soldadura. Fonte: https://www.ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/welding/ppp.html

- **Proteção facial:** Quando é necessária uma proteção facial adicional, pode ser utilizada uma proteção facial sobre óculos de segurança ou óculos de proteção.

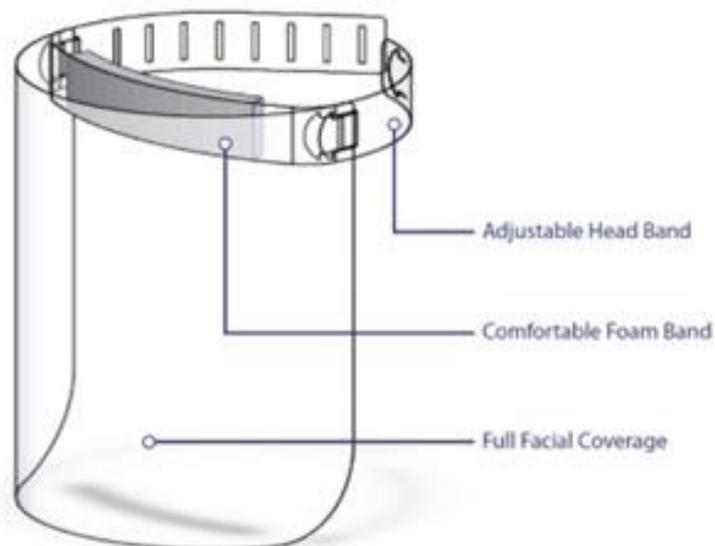


Fig. 3.2.42. Proteção facial. Fonte: <https://www.ardentdisplays.com/protective-face-shields/>

Proteção respiratória:

- **Respiradores:** Dependendo do ambiente de inspeção, os inspectores de soldadura podem precisar de respiradores para se protegerem contra fumos de soldadura, gases ou partículas. O tipo de respirador necessário depende dos contaminantes específicos presentes.



Fig. 3.2.43. Proteção respiratória. Fonte: <https://pesticidestewardship.org/respirators/air-purifying-respirators/>

Proteção auditiva:

- **Tampões para os ouvidos ou protectores de ouvidos:** As inspecções de soldadura podem ocorrer em ambientes ruidosos. A proteção auditiva ajuda a evitar lesões auditivas resultantes da exposição prolongada a níveis de ruído elevados.

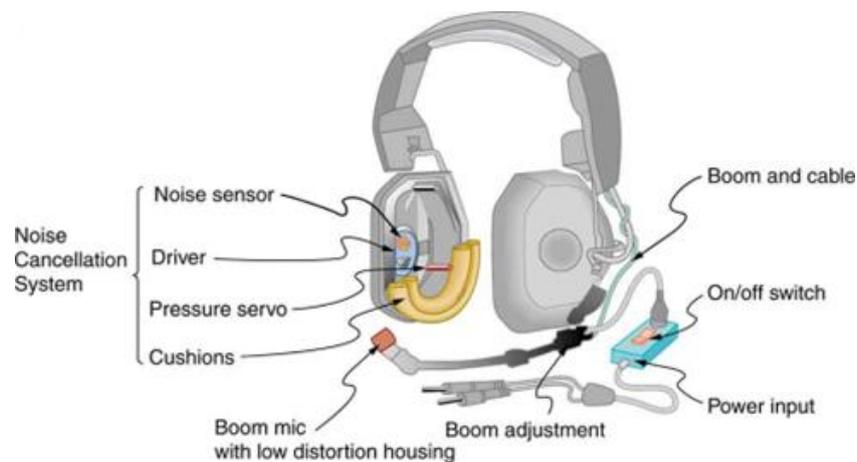


Fig. 3.2.44. Protectores auriculares para proteção da audição. Fonte: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/ear-defenders-guide>



Proteção das mãos

- **Luvas de soldadura:** São essenciais para proteger as mãos de queimaduras, faíscas e superfícies quentes. Podem ser necessárias luvas isoladas para manusear componentes quentes.



Fig. 3.2.45. Luvas de soldadura. Fonte: <https://www.amazon.de/YEZIHJ-Schwei%C3%9Fhandschuhe-H%C3%A4ndeschutzschwei%C3%9Fhandschuhe-Lederarbeitsschwei%C3%9Fferhandschuhe-Hitzebest%C3%A4ndiger/dp/B0B7R39GGC>

Proteção do corpo:

- **Vestuário resistente às chamas:** Os inspetores devem usar vestuário resistente às chamas para se protegerem contra queimaduras e faíscas. Isto inclui camisas, calças e fatos-macaco resistentes às chamas.

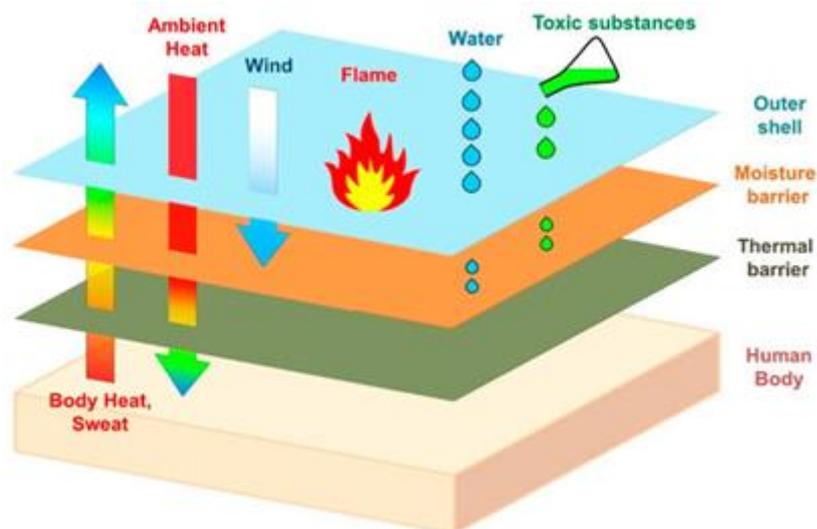


Fig. 3.2.46. Esquema da construção de um conjunto multicamada utilizado no vestuário de proteção dos bombeiros. Fonte: Renard M, Puzskarz AK. Modelação da transferência de calor através do vestuário de proteção multicamada dos bombeiros utilizando a dinâmica de fluidos computacional assistida por microtomografia de raios X e termografia. *Materiais*. 2022



- **Casaco de soldadura:** Um colete de soldadura proporciona proteção adicional para a parte superior do corpo.



Fig. 3.2.47. Camisa de soldadura. Fonte: <https://www.eskosafety.com/shop/esko-fusion-leather-welders-jacket/>

Proteção dos pés:

- **Botas de segurança com biqueira de aço:** As botas de segurança com biqueira de aço protegem os pés da queda de objectos e de metal quente.



Fig. 3.2.48. Botas de segurança com biqueira. Fonte: <https://www.ctcgroupe.com/en/your-markets/personal-protective-equipment/ce-marking-current-footwear-ppe-and-standards-162-1.html>



Proteção da cabeça:

- **Capacete de proteção:** Em ambientes com perigos aéreos ou risco de queda de objectos, é necessário usar um capacete de proteção.

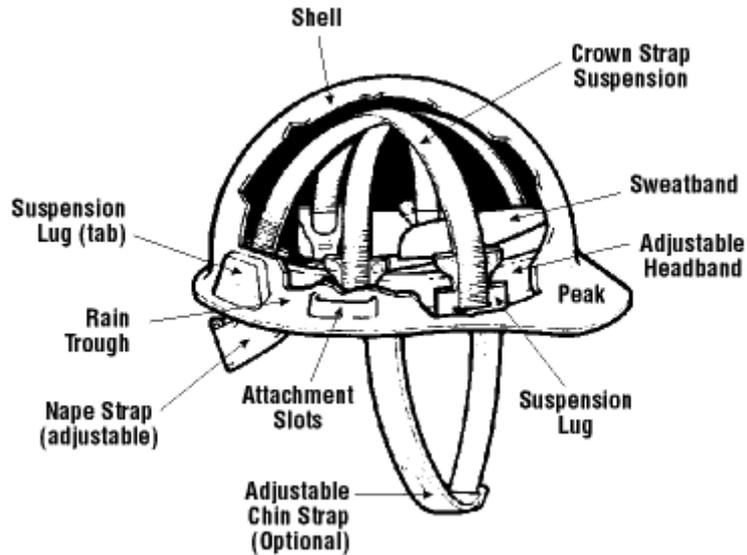


Fig. 3.2.49. Chapéu de proteção para soldadura. Fonte:

<https://www.ccohs.ca/oshanswers/prevention/ppe/headwear.html>

Proteção contra quedas:

- Se a inspeção envolver trabalhos em altura, pode ser necessário equipamento de proteção contra quedas, como um arnês de segurança e um cordão de segurança.



Fig. 3.2.50. Componentes de um sistema anti-queda. Fonte: <https://www.karam.in/blog/revisiting-concept-fall-protection>

É importante notar que os requisitos de EPI podem variar consoante os regulamentos locais, as normas da indústria e as políticas da empresa. Antes de iniciar qualquer inspeção de soldadura, os indivíduos devem receber formação sobre a utilização e manutenção adequadas do EPI, bem como uma compreensão dos perigos específicos associados à tarefa de inspeção. Além disso, o EPI deve estar sempre em boas condições, ser inspecionado regularmente e substituído se estiver danificado ou gasto.

3.3 Formação prática na preparação de amostras

A formação prática para a preparação de materiais comuns é apresentada de acordo com a metodologia apresentada na figura 1.2.2.

3.3.1 Aços ao carbono

No caso dos aços ao carbono, a preparação deve seguir os métodos básicos (ver Capítulo 1.2.1.). Exemplo de uma preparação de aço-carbono de acordo com a norma ISO 16060:2003.

Recolha de amostras: Corte de uma amostra de tamanho adequado (em função da montagem). Os métodos de corte adequados são o corte por jato de água, o corte mecânico sob arrefecimento, etc. A figura 3.3.1. mostra uma máquina de corte utilizada em ensaios de microscopia.



Figura 3.3.1.1. Metcon Servocut 302

Montagem: A montagem a quente ou a frio também é adequada (ver capítulo 1.2.2.), o diâmetro do cilindro de montagem é normalmente de 25-50 mm. Durante a montagem a quente, é necessário seguir o manual da máquina de montagem a quente. Um exemplo de uma máquina de montagem a quente é apresentado na Figura 3.3.1.2.



Figura 3.3.1.2. Máquina de embutir a quente

Durante o processo de embutimento a frio, é necessário seguir o manual do material de embutimento (resina de dois componentes).



Figura 3.3.1.3. Exemplo de processo de embutimento a frio

Retificação: para a retificação debaixo de água, utilizar uma máquina de retificação adequada.

Retificação fina: Utilizar lixas ou folhas de SiC de grão 200 -1000. No caso de retificação manual, seguir o capítulo 1.2.5, enquanto que para a utilização da máquina de retificação (fig. 3.3.1.4) consultar o manual do utilizador. Utilizar papéis ou folhas de lixa em função dos requisitos da máquina com o mesmo grão que o processo de retificação manual.



Figura 3.3.1.4. Exemplo de uma máquina de retificação

Polimento: o polimento é efectuado por uma máquina de polir que utiliza um disco de polimento com partículas adesivas. As almofadas de polimento podem ser de várias formas e qualidades (feltro, veludo, linho, etc.). O abrasivo pode ser diamante ou alumina ($9-0,05\mu\text{m}$) em suspensão aquosa.

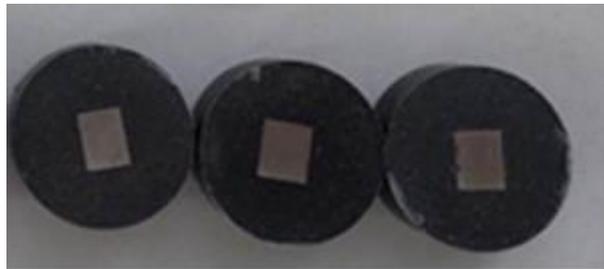


Figura 3.3.1.5. Amostras de ensaio polidas

Limpeza: a superfície do aço-carbono deve ser limpa com metanol para remover toda a contaminação e água (ver capítulo 1.2.4).

Secagem: a secagem deve ser efectuada com uma corrente de ar suave.

Gravura: sugerido Nital (ver quadro 1.2.8.1.)

3.3.2 Aço inoxidável austenítico

A preparação das amostras de ensaio de aço inoxidável é a mesma que no caso do aço-carbono. É necessário ter cuidado ao cortar porque os aços inoxidáveis austeníticos têm baixa dureza. Recomenda-se o corte com um jato de água, se disponível. Durante a retificação e o polimento, a preparação tem de ser efectuada cuidadosamente, para manter a microestrutura do



aço inoxidável austenítico. A preparação do aço inoxidável deve ser efectuada de acordo com a norma ISO 16060:2003.

Gravura: solução de ácido oxálico sugerida (ver quadro 1.2.8.1.)

3.3.3 Cobre e ligas

A preparação das amostras de ensaio de cobre e ligas é normalmente a mesma que para os aços e outros metais, mas durante o polimento sugere-se a utilização de partículas abrasivas de diamante (3-0,05 μ m). O processo de limpeza e secagem é o mesmo que no caso dos aços ao carbono. A preparação do cobre e das suas ligas deve ser efectuada de acordo com a norma ISO 16060:2003.

Gravura: sugerida Ácido clorídrico-cloreto de ferro (ver quadro 1.2.8.1.)

3.3.4 Alumínio e ligas

A preparação das amostras de ensaio de alumínio e das suas ligas é idêntica à do aço-carbono. É necessário ter cuidado ao cortar porque o alumínio e as ligas têm baixa dureza. Recomenda-se o corte com um jato de água, se disponível. Efetuar a preparação do alumínio com base na norma ISO 16060:2003.

Gravura: sugerido o condicionador Kroll (ver quadro 1.2.8.1.)

3.3.5 Titânio e ligas

A preparação das amostras de ensaio de titânio e das suas ligas é normalmente a mesma que para os aços e outros metais, mas durante o polimento sugere-se a utilização de partículas abrasivas de diamante (3-0,05 μ m). No último passo do polimento, deve ser utilizada uma suspensão de diamante combinada com H₂O₂. O processo de limpeza e secagem é o mesmo que no caso dos aços ao carbono. Efetuar a preparação do titânio e das ligas com base na norma ISO 16060:2003.

Condicionamento: Condicionador de Keller (ver quadro 1.2.8.1.).

3.3.6. Polímeros

A preparação de amostras de polímeros é diferente da dos metais, pelo que exige uma preparação mais cuidadosa.

Amostragem: é possível encontrar uma vasta gama de polímeros com diferentes durezas à temperatura ambiente. Por conseguinte, recomenda-se o corte dos polímeros abaixo da temperatura de transição vítrea, que, no caso dos polímeros soldáveis, é superior à temperatura ambiente. Podem ser utilizados métodos de corte mecânico com arrefecimento a água ou corte manual a baixa velocidade.

Embutimento: é muito importante conhecer a temperatura de fusão ou amolecimento do polímero juntamente com a temperatura de polimerização. A temperatura de montagem a quente tem de ser



inferior à temperatura de polimerização, amolecimento e fusão. O material de embutimento deve ser escolhido de acordo com o polímero, para que não haja reação química entre eles. O processo de montagem tem em conta a capacidade química e a temperatura de reação do material de montagem.

Retificação e retificação fina: Utilizar lixas ou folhas de lixa de SiC de grão 200 -1000. No caso de retificação manual, seguir o Capítulo 1.2.5. No caso da máquina de retificação, seguir o manual da máquina. Utilizar papéis ou folhas de lixa em função dos requisitos da máquina com o mesmo grão que a retificação manual. A Figura 3.3.1.4. mostra uma máquina de lixar. Utilizar uma velocidade de rotação baixa durante a preparação do polímero.

Polimento: o polimento é efectuado por uma máquina de polir, que utiliza um disco de polimento com partículas adesivas. Os discos de polimento podem ser de várias formas e qualidades (feltro, veludo, linho, etc.). O abrasivo pode ser diamante ou alumina (9-0,05 μ m) em suspensão aquosa.

Limpeza: apenas limpeza com água.

Secagem: a secagem deve ser efectuada numa corrente de ar ambiente (verificar a temperatura ambiente).

Gravura: sem gravura.

Referências:

[3.3.1] Bramfitt B. L., Benschoter A. O.: Guia do Metalógrafo, Práticas e Procedimentos para Ferros e Aços. 1st. Ed. ASM International, Materials Park, 2002. 169-244.

[3.3.2] McCall J. L., Mueller W. M.: Metallographic Specimen Preparation, Optical and Electron Microscopy 1st. ed. Plenum Press, New York, 1973. 1-348.

[3.3.3] Vander Voort G. F.: Metallography Principles and Practice. 4ª ed. ASM International, Materials Park, 2007. 1-258.

[3.3. 4] ISO/TR 16060:2003 Ensaio destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Condicionadores para exame macroscópico e microscópico, 2003

3.4 Normas para a avaliação da qualidade das juntas realizadas por soldadura e técnicas afins

3.4.1 EN ISO 17639 Ensaio destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Exame macroscópico e microscópico de soldaduras

Esta norma fornece recomendações para a preparação de amostras, procedimentos de ensaio e seus principais objectivos para o exame macroscópico e microscópico. Define exame macroscópico e microscópico, conforme descrito abaixo:



- exame macroscópico: o exame do provete preparado deve ser efectuado por exame visual sem ampliação ou com uma ampliação máxima de 50x. A superfície examinada do provete pode ser gravada ou não gravada.
- exame microscópico: o exame do provete preparado deve ser efectuado ao microscópio, com uma ampliação entre 50x e 500x. A superfície examinada do provete pode ser gravada ou não gravada.

A norma define a condição pessoal, a pessoa que efectua o teste é o examinador.

A norma fornece todas as instruções para a preparação do provete de ensaio, incluindo o acabamento da superfície e os métodos de gravação com os gravadores referidos. Enumera as regras de segurança a observar durante o exame. O exame da superfície preparada pode ser efectuado nas amostras gravadas ou não gravadas, de acordo com as normas relevantes. A norma sugere a forma do relatório experimental.

3.4.2 ISO/TR 15608 Soldadura - Directrizes para um sistema de agrupamento de materiais metálicos

Esta norma inclui um sistema uniforme de classificação de materiais metálicos para soldadura. O sistema de agrupamento pode ser utilizado para tratamento térmico ou ensaio de materiais.

Os materiais a que se refere a presente norma são os seguintes: aços, alumínio e ligas, cobre e ligas, níquel e ligas, titânio e ligas, zircónio e ligas, ferros fundidos.

Os aços são classificados em função do limite de elasticidade mínimo, com base nos processos de fabrico ou de tratamento térmico e de acordo com o seu teor de liga de crómio e níquel ou com base na microestrutura (por exemplo, austenite, ferrite, martensite).

O alumínio, o cobre, o níquel, o titânio, o zircónio e as respectivas ligas, são classificados com base nos seus elementos de liga. Os ferros fundidos são classificados de acordo com a microestrutura. Esta norma refere-se às seguintes normas ISO/TR 20172 Soldadura - Sistema de agrupamento de materiais - Materiais europeus, ISO/TR 20173 Soldadura - Sistema de agrupamento de materiais - Materiais americanos, ISO/TR 20174 Soldadura - Sistema de agrupamento de materiais - Materiais japoneses.

3.4.3 ISO/TR 17671-2 Soldadura - Recomendações para a soldadura de materiais metálicos - Parte 2: Soldadura por arco de aços ferríticos

Esta norma fornece orientações para a soldadura por arco manual, semi-mecanizada, mecanizada e automática de aços ferríticos, excluindo os aços inoxidáveis ferríticos, em todas as



formas de produto. São dados detalhes sobre os possíveis fenómenos prejudiciais que podem ocorrer, com conselhos sobre os métodos pelos quais podem ser evitados.

Esta parte da norma ISO/TR 17671 é geralmente aplicável a todos os aços ferríticos e é apropriada independentemente do tipo de fabrico envolvido, embora a norma de aplicação possa ter requisitos adicionais.

3.4.4 ISO/TR 16060 Ensaios destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - Condicionadores para exame macroscópico e microscópico

Esta norma fornece uma revisão dos materiais de corrosão mais importantes (com composição química) para o exame macroscópico e microscópico dos ensaios de materiais soldados, de acordo com a norma EN ISO 17639. A norma sugere os métodos de preparação da superfície antes do condicionamento ácido e fornece requisitos adicionais.

3.4.5 EN ISO 17637 Ensaios não destrutivos de soldaduras - Ensaios visuais de juntas soldadas por fusão

Esta norma especifica os ensaios visuais de soldaduras por fusão em materiais metálicos. Pode também ser aplicada ao ensaio visual da junta antes da soldadura. O ensaio não destrutivo de soldaduras é aplicável a:

- Fabricantes de juntas soldadas por fusão
- Autoridades de inspeção em vários sectores, como a construção, o sector automóvel, a engenharia geral, o sector aeroespacial e o sector marítimo
- Organismos de formação e qualificação autorizados
- Organismos de certificação

A norma garante que o ensaio visual de soldaduras por fusão em materiais metálicos é uniforme e repetível, independentemente de novos processos, práticas normalizadas revistas, equipamento recentemente desenvolvido ou alterações aos materiais utilizados. Pode assim ajudar a melhorar a qualidade da soldadura através de ensaios visuais precisos e eficientes de juntas soldadas por fusão.

3.4.6 ISO 15614-1 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1: Soldadura por arco e a gás de aços e soldadura por arco de níquel e ligas de níquel

Esta norma especifica como uma especificação preliminar de procedimento de soldadura é qualificada por testes de procedimento de soldadura. A ISO 15614-1 aplica-se à soldadura de produção, à soldadura de reparação e à soldadura de acumulação. A ISO 15614-1 define as



condições para a execução de ensaios de procedimentos de soldadura e a gama de qualificação para procedimentos de soldadura para todas as operações práticas de soldadura no âmbito da qualificação deste documento.

O principal objetivo da qualificação do procedimento de soldadura é demonstrar que o processo de junção proposto para construção é capaz de produzir juntas com as propriedades mecânicas necessárias para a aplicação pretendida.

São apresentados dois níveis de ensaios de procedimentos de soldadura, a fim de alargar o âmbito de aplicação às juntas soldadas. No nível 2, a extensão dos ensaios é maior e as gamas de qualificação são mais restritivas do que no nível 1. Os ensaios de procedimento efectuados para o nível 2 qualificam automaticamente para os requisitos do nível 1, mas não vice-versa. Quando nenhum nível é especificado num contrato ou numa norma de aplicação, aplicam-se todos os requisitos do nível 2.

Esta norma aplica-se à soldadura por arco e a gás de aços em todas as formas de produto e à soldadura por arco de níquel e ligas de níquel em todas as formas de produto.

A soldadura por arco e por gás é abrangida pelos seguintes processos, de acordo com a norma ISO 4063.

111 - soldadura manual por arco metálico (soldadura por arco metálico com eléctrodo revestido);

114 - soldadura por arco com núcleo tubular auto-protégido;

12 - soldadura por arco submerso;

13 - soldadura por arco metálico com protecção gasosa;

14 - soldadura por arco com protecção gasosa com eléctrodo não consumível;

15 - soldadura por arco de plasma;

311 - soldadura oxi-acetilénica.

Os princípios deste documento podem ser aplicados a outros processos de soldadura por fusão.

Vale a pena mencionar que um número de processo anterior não requer um novo teste de qualificação de acordo com este documento. A especificação e qualificação de procedimentos de soldadura que foram feitos de acordo com edições anteriores deste documento podem ser utilizados para qualquer aplicação para a qual a edição atual é especificada. Neste caso, as gamas de qualificação das edições anteriores continuam a ser aplicáveis.

Também é possível criar uma nova gama de qualificação WPQR (registo de qualificação do procedimento de soldadura) de acordo com esta edição, com base no WPQR qualificado existente, desde que a intenção técnica dos requisitos de ensaio deste documento tenha sido satisfeita.



Quando for necessário efetuar ensaios adicionais para tornar a qualificação tecnicamente equivalente, só é necessário realizar o ensaio adicional numa peça de ensaio.

3.4.7 ISO 15614-2 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 2: Soldadura por arco de alumínio e suas ligas

Esta norma especifica como uma especificação preliminar de procedimento de soldadura é qualificada por ensaios de procedimento de soldadura.

Aplica-se à soldadura por arco de alumínio forjado e fundido e das suas ligas. Não se aplica à soldadura de acabamento de peças fundidas de alumínio, que é mencionada na ISO 15614-4.

3.4.8 EN 10247 Exame micrográfico do teor de inclusões não metálicas dos aços através de imagens normalizadas.

Este projeto de norma europeia define um método de avaliação de inclusões endógenas não metálicas microscópicas utilizando gráficos. O método não se aplica a partículas com um comprimento ou diâmetro inferior a 3,0 µm ou uma largura inferior a 2,0 µm. Se definido por uma norma de produto ou por um acordo entre as partes envolvidas para determinados produtos especiais, as inclusões com uma largura inferior a 2,0 µm podem ser avaliadas apenas pelo comprimento. As inclusões com dimensões que excedam os limites superiores são resumidas nesta norma. Se as partículas forem alongadas ou se existirem filas de partículas, parte-se do princípio que estas são paralelas entre si. Outras disposições não são abrangidas por este projeto de norma. Este projeto de norma europeia aplica-se a amostras com uma precipitação microscópica que se aproxima de uma distribuição aleatória.

A partir dos dados das medições obtidas por este método, pode ser estabelecida uma avaliação de acordo com outras normas. Este projeto de norma europeia não se aplica aos aços de corte livre.

Vale a pena mencionar que o princípio básico deste projeto de norma europeia permite a determinação do teor de inclusões não metálicas através de técnicas de análise de imagem.

3.4.9 ISO 6520-1, Soldadura e processos afins - Classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos - Parte 1: Soldadura por fusão

Esta norma serve de base para uma classificação e descrição precisas das imperfeições de soldadura.

Para evitar qualquer confusão, os tipos de imperfeição são definidos com explicações e ilustrações sempre que necessário. As imperfeições metalúrgicas não estão incluídas.



É possível um outro sistema para a designação de imperfeições de acordo com a norma ISO/TS 17845. É dada alguma correspondência entre a atual classificação de imperfeições de acordo com a ISO 6520-1 e o sistema de designação de acordo com a ISO/TS 17845.

3.4.10 ISO/TS 17845 Soldadura e processos afins - Sistema de designação de imperfeições

Esta norma fornece um sistema para a designação de imperfeições na soldadura e processos associados. Aplica-se a materiais metálicos e não metálicos (por exemplo, termoplásticos). Pode também ser aplicada para outros fins (por exemplo, fundição).

3.4.11 ISO 6520-1 Soldadura e processos afins - Classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos - Parte 1: Soldadura por fusão

Esta norma serve de base para uma classificação e descrição precisas das imperfeições de soldadura. Para evitar qualquer confusão, os tipos de imperfeição são definidos com explicações e ilustrações quando necessário. As imperfeições metalúrgicas não estão incluídas. É possível um outro sistema para a designação de imperfeições de acordo com a norma ISO/TS 17845. É dada alguma correspondência entre a atual classificação de imperfeições de acordo com a ISO 6520-1 e o sistema de designação de acordo com a ISO/TS 17845.

Referências:

[3.4.1] EN ISO 17637 Ensaio não destrutivo de soldaduras - Ensaio visual de juntas soldadas por fusão

[3.4.2] EN ISO 17639:2022 Ensaio destrutivo de soldaduras em materiais metálicos - Exame macroscópico e microscópico de soldaduras 2022.

[3.4.3] ISO 15614-1:2017 Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos - Ensaio de procedimento de soldadura - Parte 1: Soldadura por arco e a gás de aço e soldadura por arco de níquel e ligas de níquel.

[3.4.4] EN 10247 Exame micrográfico do teor de inclusões não metálicas dos aços utilizando imagens normalizadas

[3.4.5] ISO 6520-1 Soldadura e processos afins - Classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos - Parte 1: Soldadura por fusão

3.5 Formação prática para a identificação da estrutura de espécimes microscópicos.

3.5.1 Aço carbono e aço de baixa liga

O aço-carbono e o aço-liga podem ser fabricados com uma vasta gama de propriedades. Para descrever estas microestruturas, é necessário identificar os constituintes presentes. Os constituintes

monofásicos incluem austenite, ferrite, δ ferrite, cementite, vários carbonetos de liga e martensite, bem como várias fases intermetálicas, nitretos e nenhuma inclusão metálica.

Os grãos ferríticos podem ser equiaxiais ou alongados (na direção da laminação). No aço-carbono, os aços totalmente ferríticos só são obtidos quando o teor de carbono é baixo ($C < 0,08$ % em peso). A ferrite é uma fase macia de baixa resistência e, se o tamanho do grão for fino, obtém-se uma boa ductilidade e formabilidade.

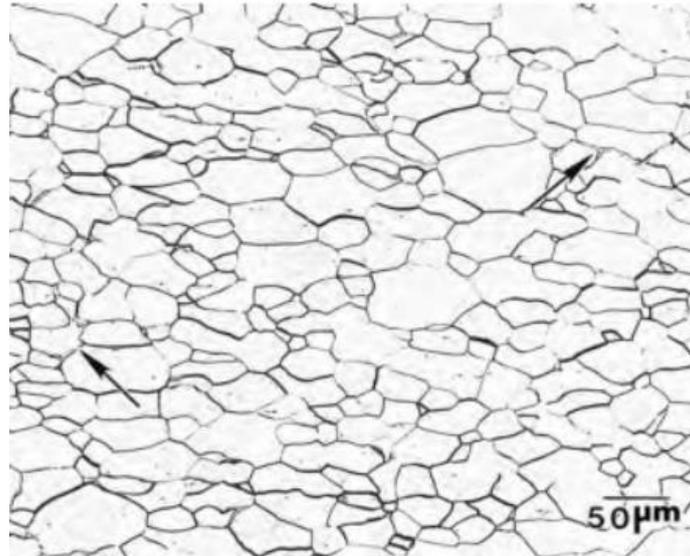


Fig. 3.5.1 - Aço de baixa liga ($C < 0,08$ % em peso). Estrutura totalmente ferrítica. Condicionante: Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS

A maior parte dos tipos de aço não ligado para aplicações estruturais ou sob pressão (teor de C entre 0,08 e 0,4 % em peso) é constituída por ferrite e perlite. A quantidade de perlite é qualitativamente indicativa do teor de carbono na liga. Um maior teor de carbono para além do limite de solubilidade do Fe (0,08 % em peso) significa uma maior precipitação de cementite (Fe_3C) e, conseqüentemente, uma maior presença de perlite (estrutura lamelar de cementite e ferrite).

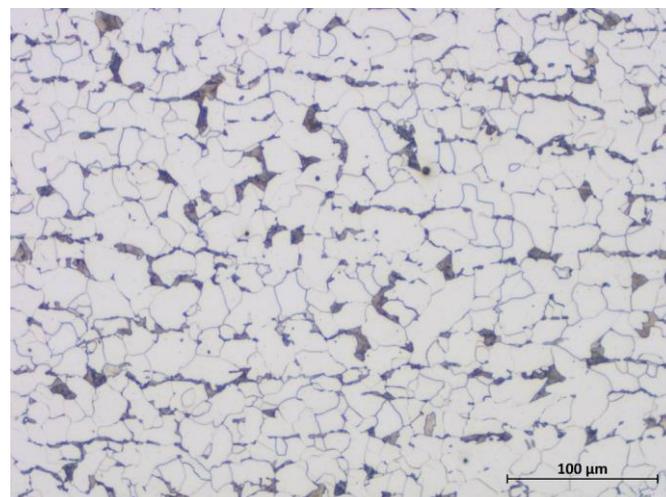


Fig. 3.5.2 - Aço-carbono para tubos de caldeiras e sobreaquecedores ($C = 0,2$ % em peso). Ferrite e perlite. Gravador: Nital 2%, Fonte: Laboratório IIS

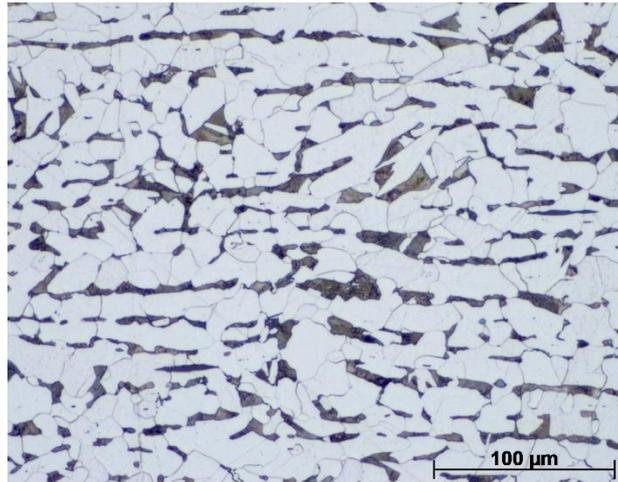


Fig. 3.5.3 - Aço-carbono para aplicações estruturais do tipo S355J0 (C = 0,25 % em peso). Ferrite e perlite.
Gravador: Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS

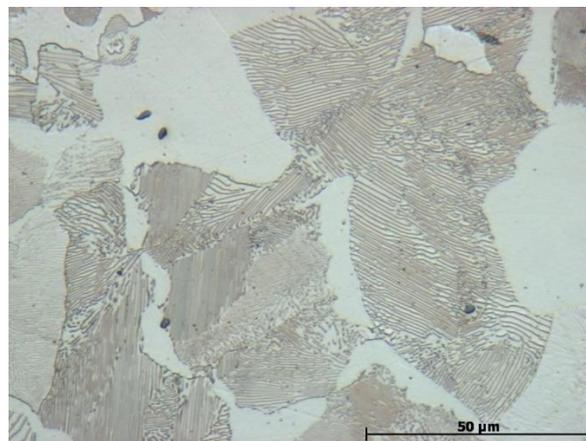


Fig. 3.5.4 - Pormenor de perlite em grande ampliação (500x) - A perlite é constituída por flocos alternados de ferrite (branca) e cementite (cinzenta/castanha). Condensador: Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS



Fig. 3.5.5 - Pormenor de um aço de médio carbono do tipo C45 (C = 0,45 % em peso) - Ilhas de perlita e ferrite.
Condensador: Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS

As diferentes formas alotrópicas do ferro e a presença de carbono e de outros elementos de liga permitem transformações da estrutura sujeita a ciclos térmicos devidos a tratamentos térmicos ou à execução de soldadura.

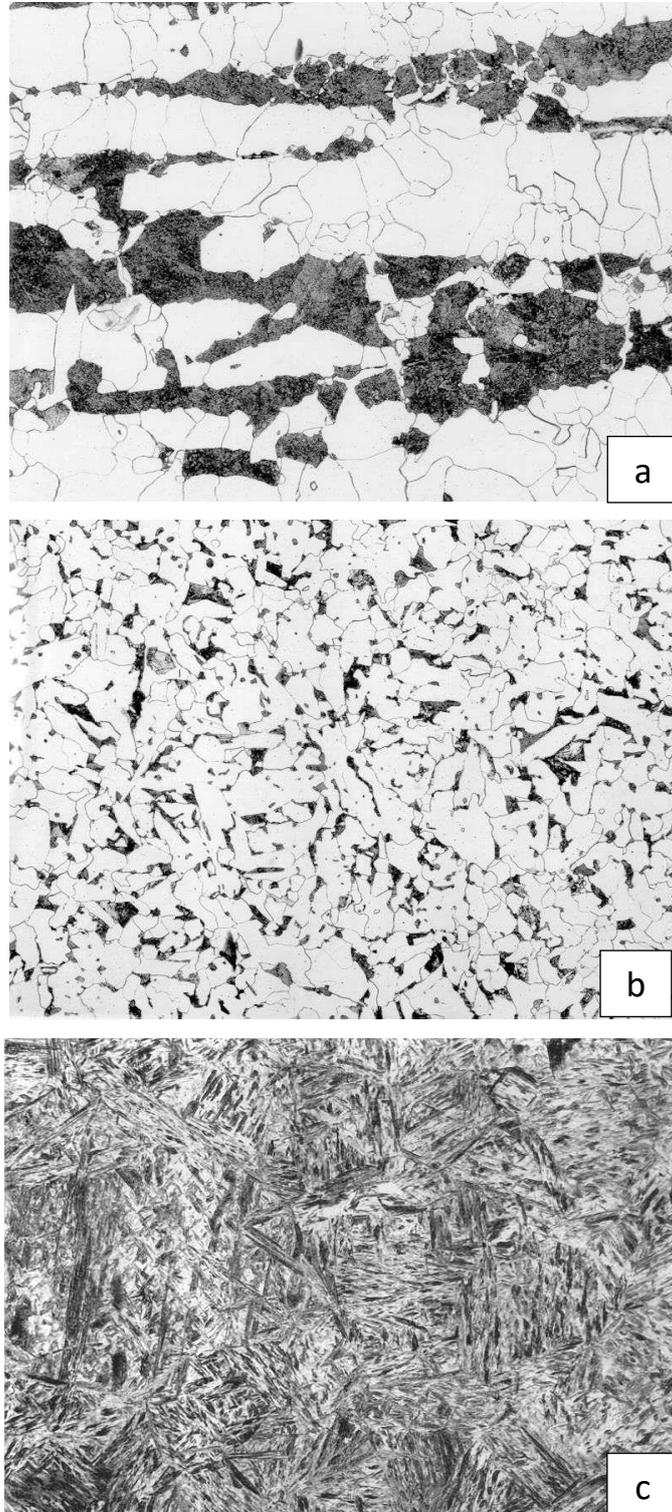


Fig. 3.5.6 - Pormenores de um aço estrutural do tipo S355J2 com diferentes tratamentos térmicos. (a) Recozido; (b) Normalizado; (c) Temperado. Condensador: Nital 2%. Fonte: Laboratório do IIS.

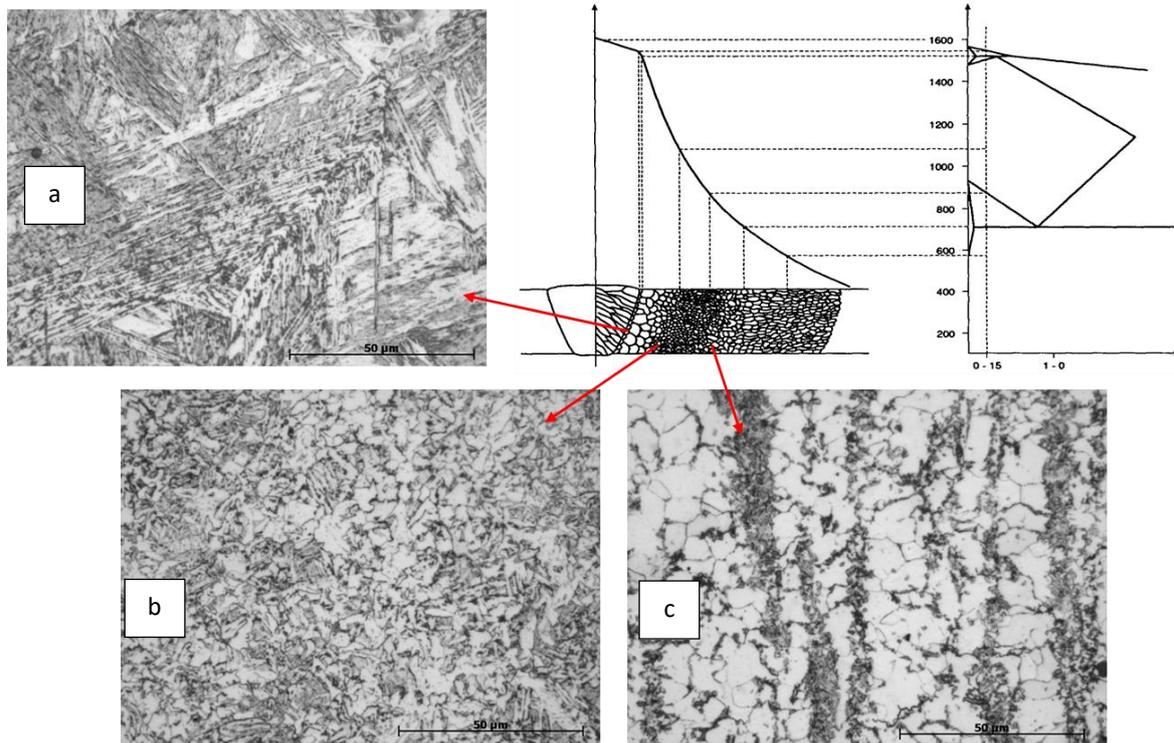


Fig. 3.5.7 - Detalhes da zona afetada pelo calor de uma junta de soldadura de aço de baixa liga. (A) Zona de grão grosso; (b) Zona de grão fino; (c) Zona de transformação parcial - Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS.

3.5.2 Aço inoxidável austenítico

Ao adicionar elementos de liga ao aço, o equilíbrio das fases e a estrutura final podem ser modificados. Alguns elementos estabilizam a fase ferrítica (equivalente em cromo), enquanto outros estabilizam a fase austenítica (equivalente em níquel). A família mais importante de aços de alta liga é a dos aços inoxidáveis.

Se estiverem presentes grandes quantidades de elementos estabilizadores da austenite (carbono, níquel, manganês, azoto), então a austenite pode ser observada a baixa temperatura.

Os aços inoxidáveis austeníticos e os aços manganês austeníticos são ligas totalmente austeníticas. Trata-se de ligas monofásicas. A austenite é também uma fase macia de baixa resistência; no entanto, o trabalho a frio produz endurecimento.

Nos aços inoxidáveis austeníticos (série AISI 300), a transformação alotrópica no estado sólido é suprimida; e não há quaisquer transformações devido ao ciclo térmico; assim, apenas se observa um aumento do grão na zona afetada pelo calor (HAZ).

Normalmente, a zona de soldadura tem uma estrutura dendrítica com cerca de 5-10 % de ferrite delta. A presença de ferrite delta é muito importante porque melhora a resistência à fissuração a quente durante a soldadura.



Fig. 3.5.8 - Pormenor da estrutura totalmente austenítica (100x) - Grãos austeníticos poligonais. Condensador: Solução electrolítica de ácido oxálico. Fonte: Laboratório IIS

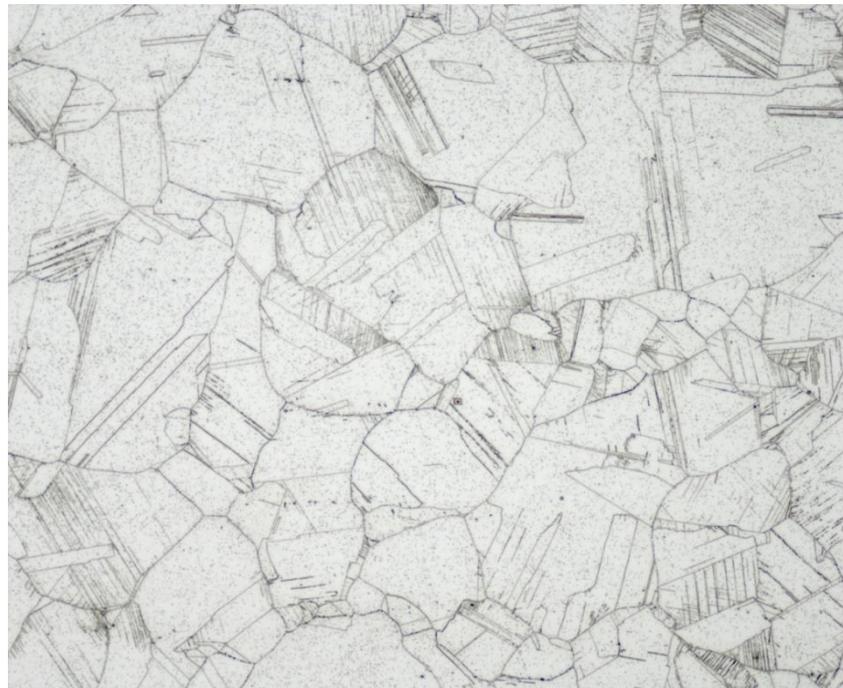


Fig. 3.5.9 - Pormenor de estrutura totalmente austenítica (100x) com sinais de endurecimento - Grãos austeníticos poligonais. Condensador: Solução electrolítica de ácido oxálico. Fonte: Laboratório IIS



Fig. 3.5.10 - Zona termicamente afetada (ZTA) de um aço inoxidável austenítico do tipo AISI 316 (25 x). Grãos grosseiros na ZTA. Fonte: Laboratório IIS

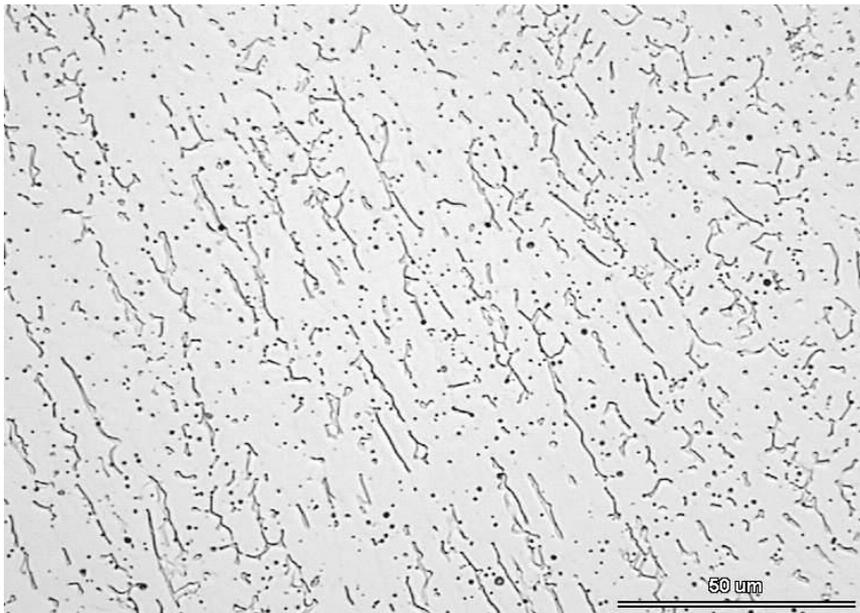


Fig. 3.5.11 - Zona de soldadura (ZS) de um aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304. Estrutura dendrítica da austenite com ferrite delta. Condicionante: Solução electrolítica de ácido oxálico - Fonte: Laboratório IIS

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ficar sensibilizados se forem tratados termicamente ou utilizados a temperaturas da ordem dos 500 - 850°C. As zonas afectadas pelo calor das soldaduras também podem ser sensibilizadas em algumas circunstâncias. Os carbonetos de cromo são visíveis como pontos escuros nos limites dos grãos.

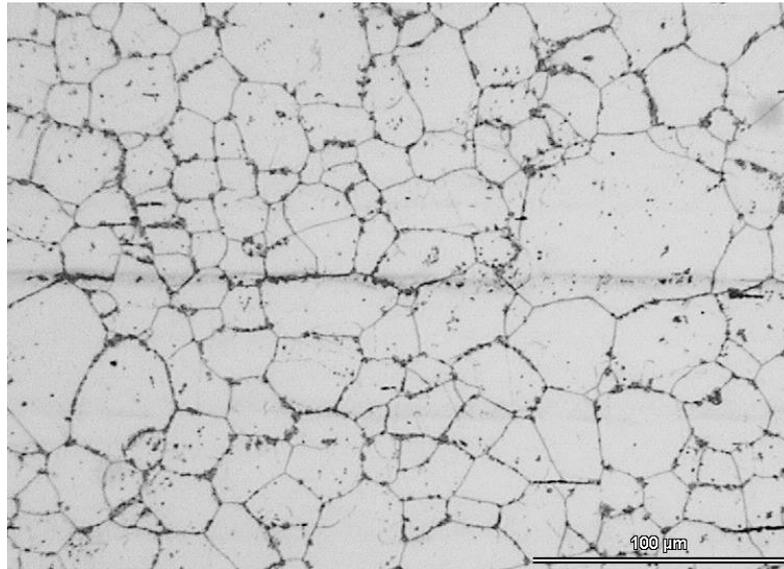


Fig. 3.5.12 - Pormenor de estrutura totalmente austenítica (200x) com carbonetos de crómio nos limites de grão (sensitização). Condensador: Solução electrolítica de ácido oxálico - Fonte: Laboratório IIS

A fase Sigma é uma fase intermetálica não magnética, composta principalmente por ferro e crómio, que se forma nos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos durante uma longa exposição a 550 - 950 °C; trata-se de um problema que ocorre durante o funcionamento ou os tratamentos térmicos e não durante a soldadura.

A fase sigma é dura e quebradiça e, quando presente nos aços inoxidáveis, é normalmente indesejável. Através do ataque eletrolítico cáustico (por exemplo, solução de NaOH ou KOH) podemos detetar a fase sigma, exibindo assim morfologias globulares dispersas.

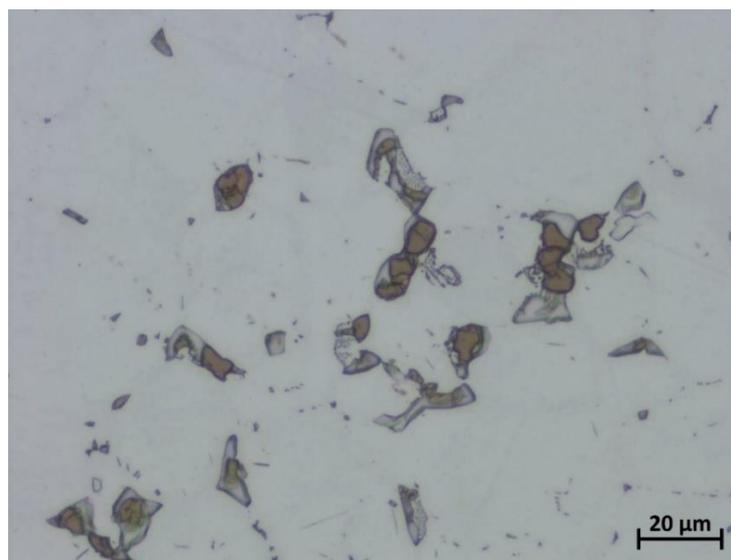


Fig. 3.5.13 - Fase Sigma em aço inoxidável austenítico tipo 304H. Condicionante: Solução electrolítica de NaOH. Fonte: Laboratório IIS

3.5.3 Aço inoxidável duplex

Os aços inoxidáveis duplex são baseados no sistema de ligas Fe-Cr-Ni-N. A composição química destas ligas foi ajustada de modo a que a microestrutura do metal de base seja normalmente constituída por cerca de 50% de ferrite e 50% de austenite.

Devido à complexa liga dos tipos duplex, pode ocorrer uma série de reacções de precipitação numa gama de temperaturas abaixo de aproximadamente 1000 °C. Muitos destes precipitados fragilizam as ligas duplex e devem ser evitados. Estes incluem sigma (σ), chi (χ) e alfa (α) prime, bem como nitretos de cromo.

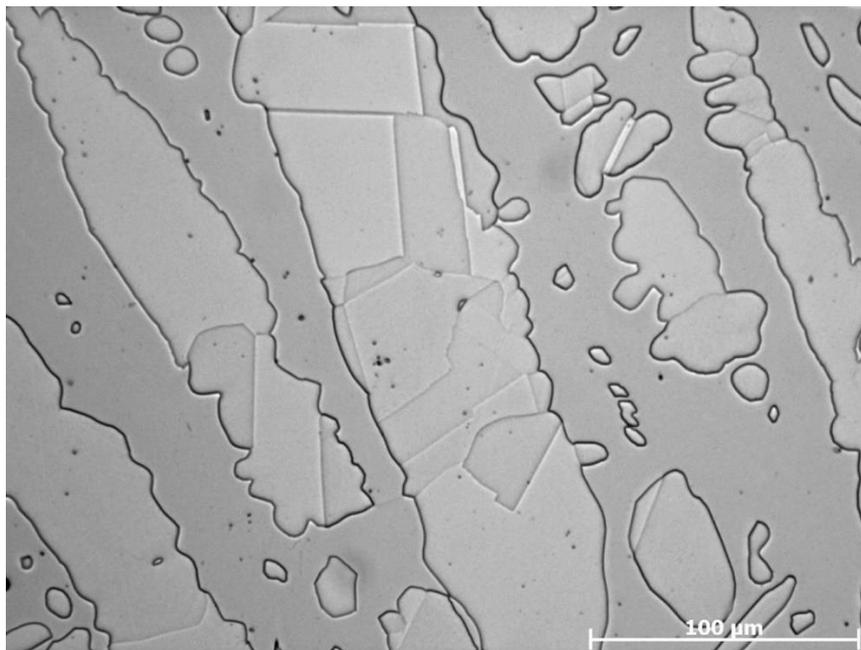


Fig. 3.5.14 - Aço inoxidável duplex - estrutura bifásica de ferrite e austenite. Condicionador: Ácido oxálico eletrolítico. Fonte: Laboratório IIS

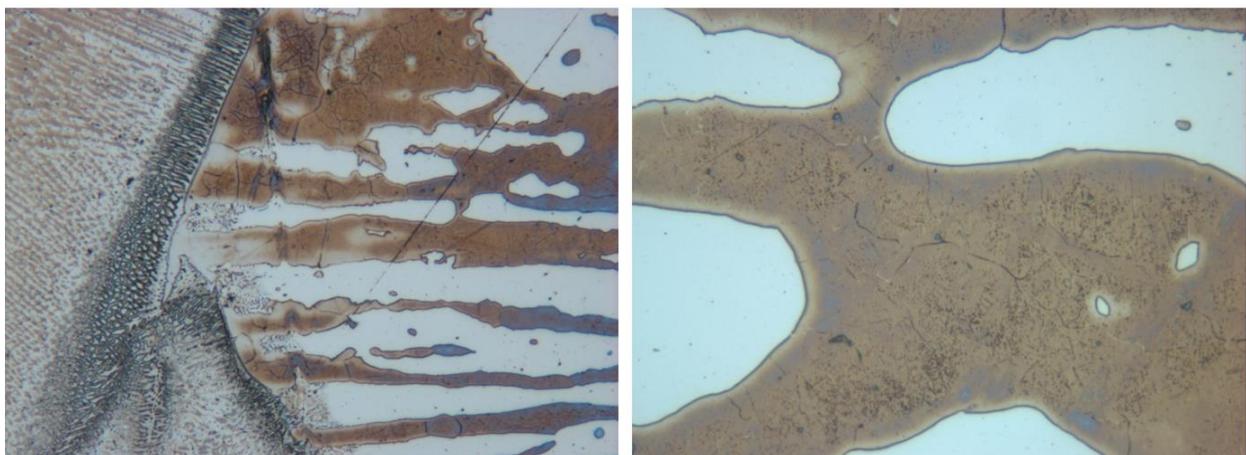


Fig. 3.5.15 - Detalhes da Zona Afetada pelo Calor de um aço inoxidável duplex (2205). Presença de nitretos de cromo intragranulares na fase ferrítica. Condicionante: Solução eletrolítica de NaOH. Fonte: Laboratório IIS



3.5.4 Estrutura martensítica

Martensite é o termo genérico para microestruturas formadas por transformação de fase sem difusão. As transformações martensíticas ocorrem no aço e nas ligas à base de ferro, bem como em vários sistemas não ferrosos. A martensite é normalmente produzida em aço ou ligas à base de ferro por arrefecimento rápido da austenite e forma-se por um mecanismo de cisalhamento. A estrutura final é fina e acicular; nalguns casos é possível observar o limite de grão austenítico primário.

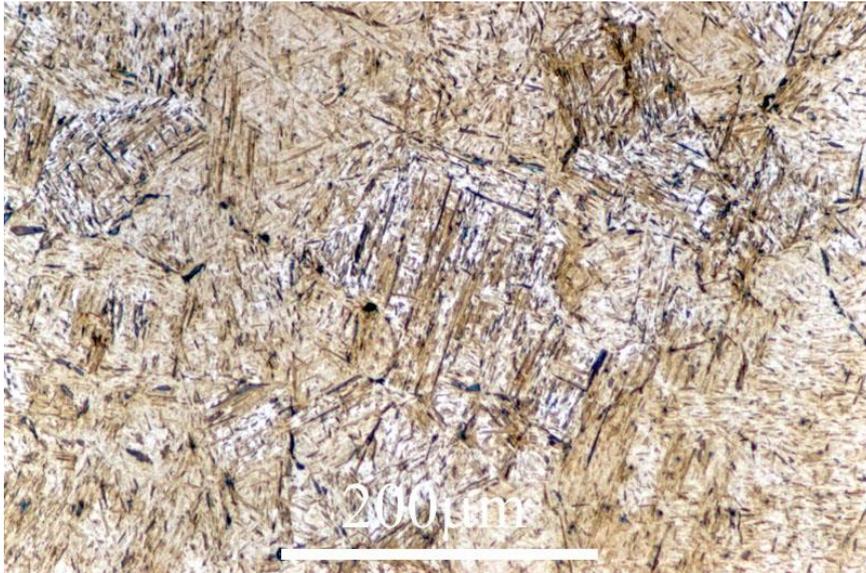


Fig. 3.5.16 - Pormenores de um aço de médio carbono temperado. Condensador: Nital 2%. Fonte: Laboratório

IIS

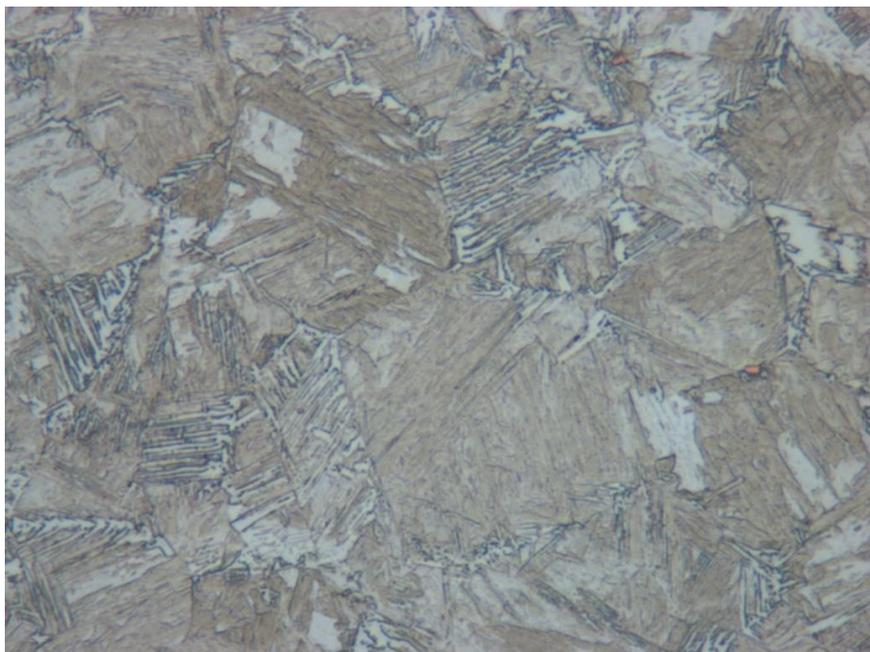


Fig. 3.5.17 - Pormenores do aço crómio-molibdénio (P91). Gravador: Vilella. Fonte: Laboratório IIS

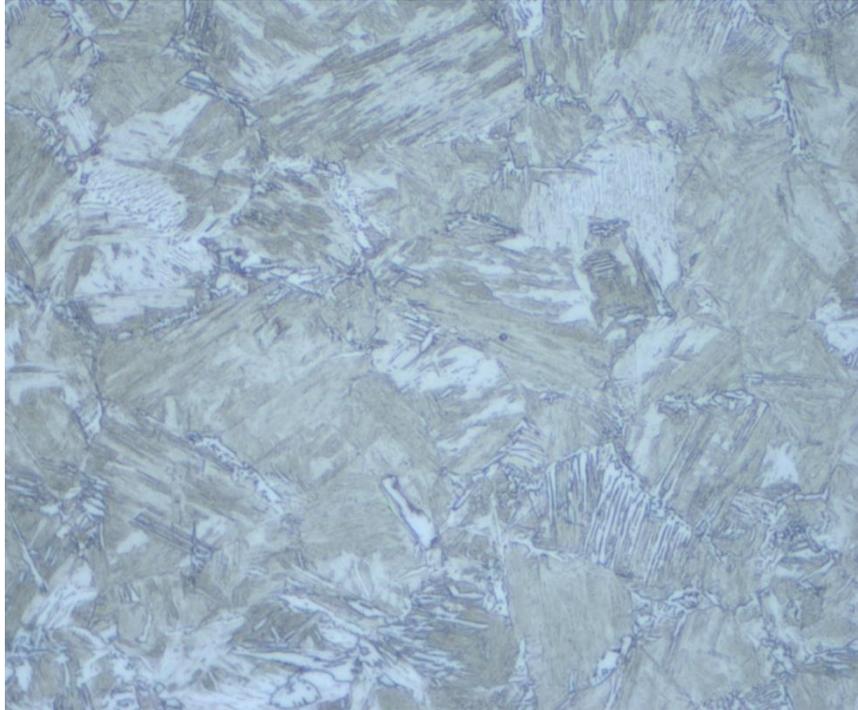


Fig. 3.5.18 - Pormenores de um aço balístico (Secure 500). Gravador: Nital 2%. Fonte: Laboratório IIS.

Referências:

[3.5.1] ASM HANDBOOK - Volume 9 - Metalografia e Microestruturas

[3.5.2] Metalurgia da Soldadura e Soldabilidade Aços Inoxidáveis - John C. Lippold e Damian J. Kotechi.

3.6 Demonstração de diferentes tipos de estruturas microscópicas

3.6.1 Análise de soldadura

O exame macro é normalmente efectuado em secções transversais não montadas através de juntas soldadas e envolve técnicas de corte e de retificação grosseira/fina. O acabamento resultante é adequado para a gravação, seguida de um exame das características macro da junta soldada.

Alguns deles são enumerados a seguir:

- Geometria da soldadura
- Número e dimensão dos passes
- Profundidade de penetração
- Extensão da HAZ (zona afetada pelo calor)
- Imperfeições da superfície, tais como fissuras, rebaixos, excesso de garganta, convexidade e ângulo de ponta da soldadura.
- Imperfeições internas, tais como fissuras, porosidade, inclusões metálicas, falta de fusão, falta de penetração e escória



- Imperfeições da geometria da junta, tais como a folga da raiz, a face da raiz, o ângulo de chanfradura e o desalinhamento

Para as técnicas de microexame, será necessário dispor de uma superfície polida e opticamente plana. O exame microscópico é efectuado para estudar as imperfeições da soldadura e as características microestruturais, tais como:

- Vazios (porosidades, cavidades de retração, microfissuras)
- Fases especiais (fase sigma em aço inoxidável)
- Tamanhos de grão/estrutura
- Estrutura de soldadura
- Segregação
- HAZ e estrutura de base

3.6.2 Análise de fases

A definição de fase no caso do material metálico é a seguinte: a parte do sistema que é homogénea, tem propriedades química e fisicamente idênticas e pode ser separada por uma superfície de fronteira independente é designada por fase. A análise da fase metálica é necessária para caracterizar as diferentes fases dos materiais metálicos. A análise de fases é uma técnica especial utilizada na engenharia de soldadura e na ciência dos materiais para determinar as fases de uma amostra através de diferentes métodos. Pode ser realizada através de vários métodos, incluindo gravura colorida, difração de raios X (XRD), microscopia eletrónica de varrimento (SEM) e microscopia eletrónica de transmissão (TEM), dependendo dos resultados pretendidos. A análise da fase metálica é vital para obter informações sobre materiais específicos soldados e de base.

O resultado da análise de fases do metal de base, da ZTA e da junta fornece informações sobre as propriedades mecânicas esperadas e a adequação da estrutura soldada. Exemplo: na ZTA de um aço de baixo carbono soldado, a fase martensite não é desejada. Outro exemplo são as precipitações na ZTA de um aço inoxidável austenítico. A análise de fase pode também informar-nos, no caso dos aços ao carbono, sobre o método de austenitização (tamanhos de grão da austenite), porque após o arrefecimento, mesmo que ocorra uma transformação de fase (ferrite, perlite), os grãos mantêm o tamanho de grão da austenite anterior.

3.6.3 Análise da porosidade

Na junta soldada, pode ocorrer várias vezes a porosidade. A razão para a porosidade é a absorção de azoto, oxigénio e hidrogénio na poça de fusão, que é depois libertada na solidificação e fica presa no metal de solda. A melhor maneira de evitar a porosidade é limpar a peça de trabalho antes da soldadura. A tabela resume alguns tipos de metais e os gases que causam a porosidade.

Tabela 3.6.1. Os gases que provocam a porosidade



Metal	Gás
Aço C-Mn	H, N, O
Aço inoxidável	H
Alumínio e ligas	H
Cobre e ligas	H, N
Níquel e ligas	N
Titânio e ligas	H, N, O

A porosidade pode ser encontrada na junta (Figura 3.6.1.) ou perto da superfície (Figura 3.6.2.) da junta soldada.

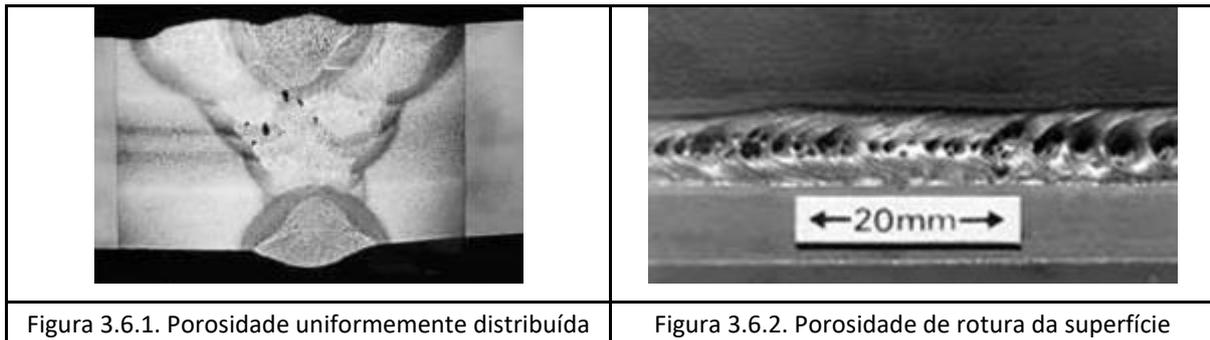


Figura 3.6.1. Porosidade uniformemente distribuída

Figura 3.6.2. Porosidade de rotura da superfície

Vários ensaios não destrutivos são adequados, como a inspeção por penetrantes ou partículas magnéticas, a inspeção ultra-sónica, o ensaio de raios X, etc. O ensaio destrutivo, como um exame microscópico, é adequado (Figura 3.6.1.).

3.6.4 Descarburização

A descarbonetação é um processo químico em que o carbono do aço se une ao oxigénio. Este processo é estabelecido a altas temperaturas (acima de 700 °C) (Figura 3.6.3.). O problema com este processo é que o teor de carbono do aço diminui. O processo é efectuado por difusão e a difusão é também um limite deste processo. A descarbonetação pode normalmente ocorrer na superfície do aço e numa camada fina sob a superfície. A camada descarbonetada tem um impacto negativo na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta soldada e pode causar fissuração na fronteira entre a junta e o metal de base.



Figura 3.6.3. Superfície descarbonizada do aço C-Mn

3.6.5 Estruturas de cobre

A estrutura do cobre e da liga depende do processo de fabrico (fundição, laminagem, etc.). A estrutura do cobre fundido apresenta uma estrutura dendrítica, e a estrutura laminada e recozida apresenta uma estrutura de pequenos grãos. O cobre pode formar óxidos na estrutura, o que é detetável por teste de microscopia.

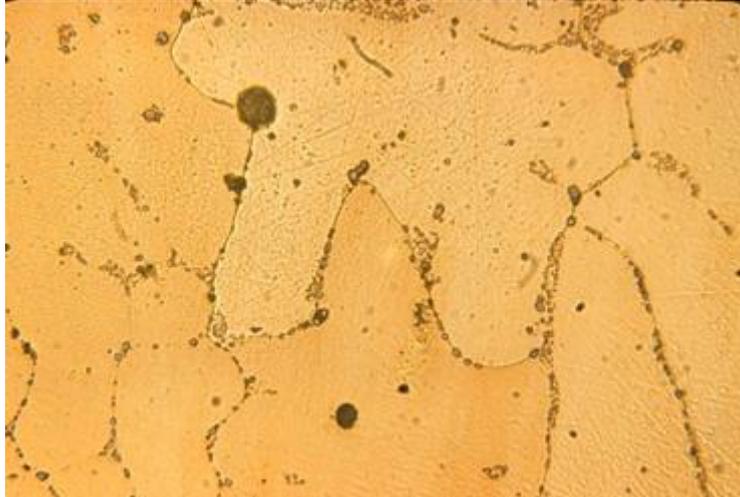


Figura 3.6.4. Microestrutura do cobre com óxidos

3.6.6 Estruturas de alumínio

As estruturas do alumínio e das ligas dependem do processo de fabrico (fundição, laminagem, etc.). A estrutura do cobre fundido apresenta uma estrutura dendrítica, e a estrutura laminada e recozida apresenta uma estrutura de pequenos grãos. O alumínio forma uma camada de óxido na superfície da peça de trabalho. No caso do alumínio fundido, pode encontrar-se porosidade na superfície da camada de óxido porosa e fina. Durante a soldadura, o alumínio fundido reage com o oxigénio e cria óxidos ou porosidades. A espessura da camada de óxido aumenta com o tempo, a temperatura e a quantidade de oxigénio disponível. A secção transversal de uma peça de alumínio é mostrada na Figura 3.6.5.

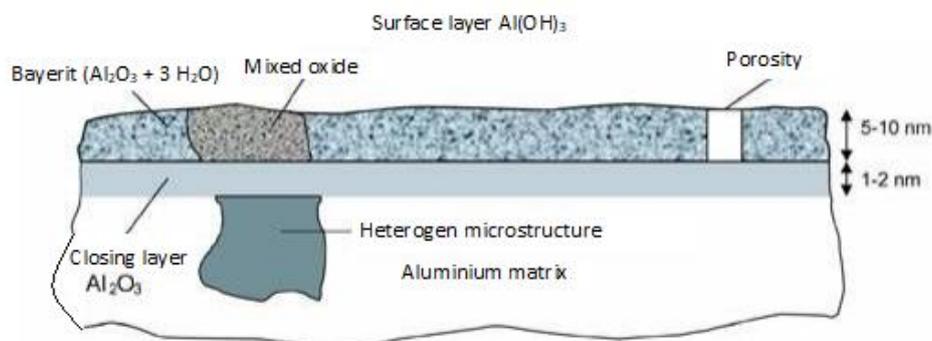


Figura 3.6.5. Secção transversal de uma peça de alumínio

O tratamento térmico no caso da liga de alumínio especial pode modificar a estrutura da superfície. A ilustração do tratamento por solução e do tratamento térmico de endurecimento por precipitação por envelhecimento é apresentada na Figura 3.6.6.

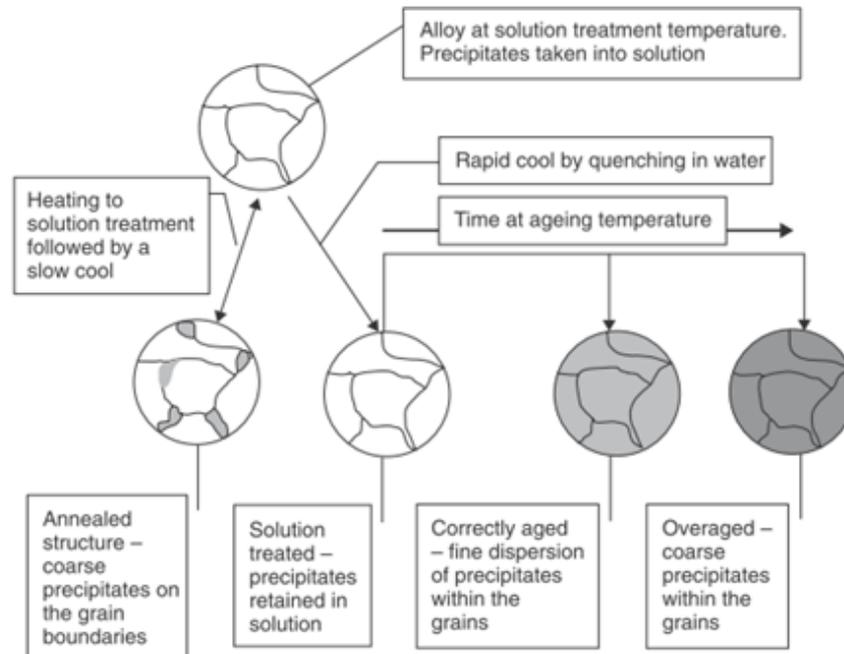


Figura 3.6.6. As estruturas afectadas pelo tratamento térmico

3.6.7 Estruturas em ferro fundido

A metalurgia do ferro fundido é muito mais complexa do que a sua economia. O ferro fundido é um dos sistemas metalúrgicos mais complexos. É interessante notar que as ligas ferro-carbono (com menos de 2% de carbono) são metaestáveis. O verdadeiro sistema estável é o sistema de transformação de fase ferro-grafite (Fe-C). As transformações no estado sólido, nas quais se baseiam os tratamentos térmicos do ferro fundido, são semelhantes às aplicadas aos aços e podem ser caracterizadas como:

- No arrefecimento de ferros hipoeutéticos, a uma temperatura ligeiramente inferior a 1147 °C, a microestrutura consiste em austenite proeutética e ledeburite. Ao arrefecer mais, o excesso de carbono sai como cementite da austenite proeutética e eutética. Finalmente, a 727 °C, a austenite eutética e proeutética decompõe-se em perlite com um teor de carbono de aproximadamente 0,77%.
- No arrefecimento de ferros fundidos eutéticos, forma-se ledeburite. Após o arrefecimento, o excesso de carbono sai da solução como cementite da austenite eutética. Finalmente, a 727 °C, a austenite eutética decompõe-se em perlite.
- No arrefecimento dos ferros hipereutéticos, a uma temperatura ligeiramente inferior a 1147 °C, a microestrutura é constituída por austenite proeutética e ledeburite. Após o

arrefecimento, o excesso de carbono surge como cementite sob a forma de cementite proeutectóide e austenite eutética. Finalmente, a 727 °C, a austenite eutética decompõe-se em perlite.

Se uma liga de ferro exceder 2,11% de carbono, o carbono não tem de nuclear-se a partir da decomposição da austenite, mas pode formar-se diretamente a partir da fusão por uma reação eutética. Note-se que a cementite (Fe_3C) pode ainda nuclear-se no eutético mais facilmente do que a grafite, mas num arrefecimento suficientemente lento, a própria grafite pode formar-se e crescer.

Com base no processo de solidificação, dividimo-nos em dois grupos. Os ferros fundidos brancos (Figura 3.6.7.) cristalizam de acordo com o sistema Fe-C metaestável e os ferros fundidos cinzentos (Figura 3.6.8.) cristalizam de acordo com o sistema Fe-C estável.

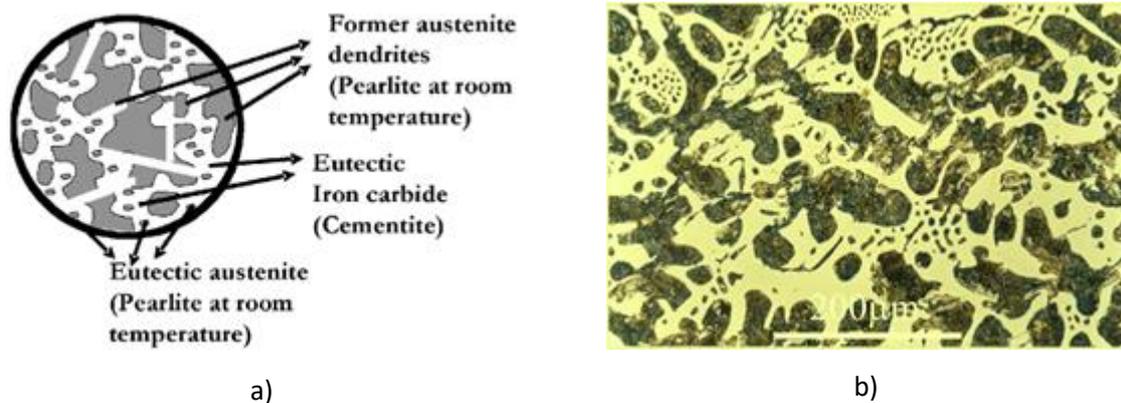


Figura 3.6.7. Ferro fundido branco a) representação esquemática, b) imagem de microscopia

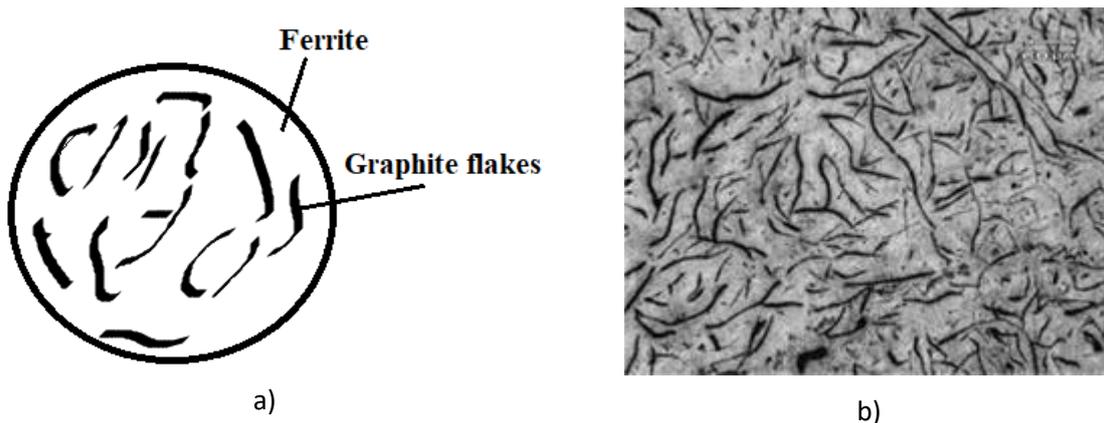


Figura 3.6.8. Ferro fundido cinzento a) representação esquemática, b) imagem de microscopia

A estrutura do ferro fundido branco pode ser modificada através de um processo de tratamento térmico. O ferro fundido maleável é produzido por tratamento térmico. Esta conversão, na prática habitual, é um processo em duas fases, comumente designado por primeira e segunda fases de grafitação. A primeira fase de um ciclo típico de tratamento térmico consiste em aquecer



as peças fundidas a uma temperatura entre 900 e 950°C. A perlite transforma-se em austenite por um processo de difusão rápida do carbono da cementite para o ferro, formando uma solução sólida de carbono em ferro gama. Os carbonetos maciços praticamente não são afectados pelo aquecimento. Por conseguinte, acima do intervalo eutectoide (mas abaixo do eutético), o ferro é constituído por carbonetos maciços na austenite. Após a primeira fase de grafitação, a estrutura de um ferro fundido maleável consiste em austenite e grafite (Figura 3.6.9.).

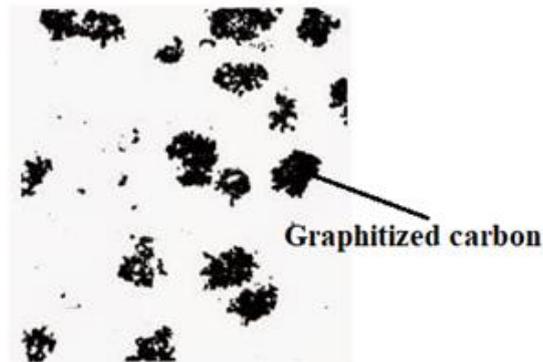


Figura 3.6.9. Ferro fundido maleável ferrítico

Referências

- 3.6.1. Gene Mathers: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd. EUA 2002.
- 3.6.2. Welding for design engineers, CWB Group, Canadian Welding Bureau 2006. ISBN 0-9739175-0-4
- 3.6.3. John C. Lippold; Welding Metallurgy and Weldability, John Wiley & Sons, Inc, Canadá, 2015.

3.1 Demonstração dos métodos de preparação de amostras para exame metalográfico

3.1.1 Ensaios macroscópicos das etapas de preparação de amostras metalográficas

1. Recolha de amostras: É necessário cortar lentamente um provete de ensaio de tamanho adequado (ver capítulo 1.2.1.) sob arrefecimento a água (Figura 3.7.1.). Pode ser utilizado o corte por jato de água, se disponível.



Figura 3.7.1. Corte mecânico sob arrefecimento a água

2. Montagem: Depende do tamanho e da geometria da amostra. No caso do exame macroscópico, a amostra, que pode ser segurada na mão, pode ser preparada sem embutimento (o embutimento é visto no Capítulo 1.2.2.).
3. Marcação: O provete de ensaio deve ser marcado para ser identificado durante o processo de preparação (ver capítulo 1.2.3.).
4. Moagem: Moagem com papel SiC, passo a passo, em papel de grão mais fino, como descrito no capítulo 1.2.5.



Figura 3.7.2. Retificação

5. Limpeza: lavagem com água, seguida de sopro de ar (ver capítulo 1.2.4.)
6. Gravura: se necessário, de acordo com o tipo de análise prevista (ver capítulo 1.2.8).

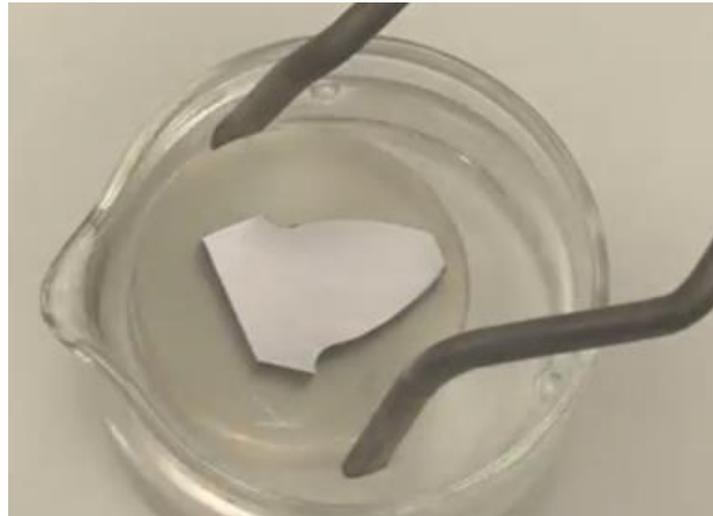


Figura 3.7.3. Gravura

7. Limpeza: lavagem com água, seguida de limpeza com álcool (ver capítulo 1.2.4.). No caso de espécimes de polímeros, só deve ser utilizada a limpeza com água.



Limpeza com água



Limpeza com metanol

Figura 3.7.4. Limpeza

8. Secagem: A secagem deve ser efectuada numa corrente de ar suave, no caso dos polímeros com temperatura do ar ambiente (ver capítulo 1.2.4.).

3.1.2 Ensaios microscópicos das etapas de preparação de amostras metalográficas

1. Amostragem: É necessário cortar um provete de dimensão adequada, normalmente com um máximo de $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, ou um cilindro com um máximo de 25 mm de diâmetro e 25 mm de altura (ver capítulo 1.2.1.), cortado lentamente sob arrefecimento a água (figura 3.7.1.) ou utilizando o corte por jato de água.

2. Limpeza: lavagem com água e depois com metanol (ver capítulo 1.2.4.); no caso de espécimes de polímero, só é necessária a limpeza com água. Também pode ser limpo por banho de ultra-sons.

3. Secagem: A secagem deve ser efectuada com uma corrente de ar suave (ver capítulo 1.2.4.).



4. Montagem: montagem a quente ou a frio (a montagem é vista no capítulo 1.2.2.).



Figura 3.7.5. Montagem

5. Marcação: O provete de ensaio deve ser marcado para o identificar durante o processo de preparação (ver capítulo 1.2.3.).

6. Moagem: Retificação com papel SiC, passo a passo, em papel de grão mais fino (figura 3.7.6.) (ver capítulo 1.2.5.).



Figura 3.7.6. Retificação

7. Limpeza: lavagem com água (ver capítulo 1.2.4.).

8. Polimento: Polimento numa almofada de polimento com partículas abrasivas de alumina ou diamante, passo a passo em partículas abrasivas mais finas, podendo também ser utilizado o polimento eletrolítico (ver Capítulo 1.2.6. e Capítulo 1.2.7.).

9. Limpeza: lavar com água e depois com álcool (ver capítulo 1.2.4.).

10. Secagem: a secagem deve ser efectuada com uma corrente de ar suave (ver capítulo 1.2.4.).

11. Gravura: com um agente de corrosão adequado (figura 3.7.3.) (ver capítulo 1.2.8.).



12. Limpeza: lavar com água e depois com álcool (ver capítulo 1.2.4.).
13. Secagem: a secagem deve ser efectuada com uma corrente de ar suave (ver capítulo 1.2.4.).