

NOÇÕES BÁSICAS SOBRE METALURGIA

PAULO DUARTE

REVISÃO TÉCNICA

Serafim Oliveira

engebook



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO NORTE

ÍNDICE

PREFÁCIO	IX
1. INTRODUÇÃO	11
2. METALURGIA QUÍMICA	13
2.1. Introdução	13
2.2. Energia Livre.....	14
2.3. Difusão Atômica	19
2.4. Solidificação	25
2.5. Transformações	29
2.6. Electroquímica.....	40
2.7. Corrosão.....	43
2.8. Ensaio de Caracterização	57
3. METALURGIA FÍSICA	67
3.1. Introdução	67
3.2. Estruturas Cristalinas.....	68
3.3. Mobilidade Atômica	73
3.4. Microestruturas.....	78
3.5. Ensaio de Caracterização	84

4. METALURGIA MECÂNICA	95
4.1. Propriedades Mecânicas.....	96
4.2. Mecânica da Fractura.....	101
4.3. Fadiga	106
4.4. Desgaste.....	108
4.5. Fluência.....	110
4.6. Ensaio de Caracterização	112
5. PRODUÇÃO DE METAIS	123
5.1. Introdução.....	123
5.2. Extração e Concentração de Minérios	125
5.3. Metalurgia Primária.....	134
5.3.1. Produção dos aços.....	141
5.3.2. Produção de alumínio.....	150
5.3.3. Produção do cobre.....	153
5.3.4. Produção de titânio.....	159
5.4. Metalurgia Secundária.....	160
5.4.1. Forjamento.....	163
5.4.2. Laminagem a quente	164
5.4.3. Laminagem a frio.....	165
5.4.4. Calibração	167
5.4.5. Tratamentos siderúrgicos.....	169
5.4.6. Produtos siderúrgicos.....	175
5.5. Reciclagem.....	179
6. ASPECTOS PRÁTICOS NO FABRICO DE MATERIAIS E PRODUTOS ...	185
6.1. Introdução.....	185
6.2. Composições Químicas	186
6.3. Soldabilidade	193
6.4. Conformação por Deformação Plástica.....	200
6.5. Maquinabilidade.....	208
6.6. Acabamento.....	215
7. CONCLUSÃO	225
REFERÊNCIAS.....	CCXXIX

PREFÁCIO

O conhecimento é uma riqueza de cada indivíduo que deve ser disponibilizada para todos. Este livro é a materialização do modo como o conhecimento adquirido na teoria se conjuga com as aprendizagens práticas para enriquecer a forma como vemos a metalurgia, os materiais e as suas aplicações. Em resumo, o livro compila as teorias e as aprendizagens práticas para que não se percam em gavetas ou, simplesmente, em memórias.

O Paulo Duarte, que conheço desde os tempos de estudante na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tem traçado o seu percurso profissional entre o ensino da engenharia e a prática industrial da engenharia. Desde os tempos de faculdade, o Paulo sempre demonstrou a acuidade para transformar o que é teoria de conceitos em prática de laboratório e/ou de indústria, acrescentando-lhe o sentido de deixar esses conteúdos registados para que nada fiquem perdidos em memórias ou gavetas.

Com este livro, o Paulo fomenta o crescimento do conhecimento com base nos dois pilares que considero fundamentais, o primeiro é a articulação da interdisciplinaridade (química, física, e matemática) das coisas dentro da metalurgia, e o segundo é o uso do conhecimento empírico e científico para ajustar os conceitos básicos e fundamentais do primeiro pilar com as práticas industriais, no sentido de colmatar as discrepâncias que advêm dos defeitos/erros introduzidos pelos materiais e/ou processos. Desse modo, este livro revisita os conceitos mais básicos da química, da física e da mecânica metalúrgica para criar uma base de supor-

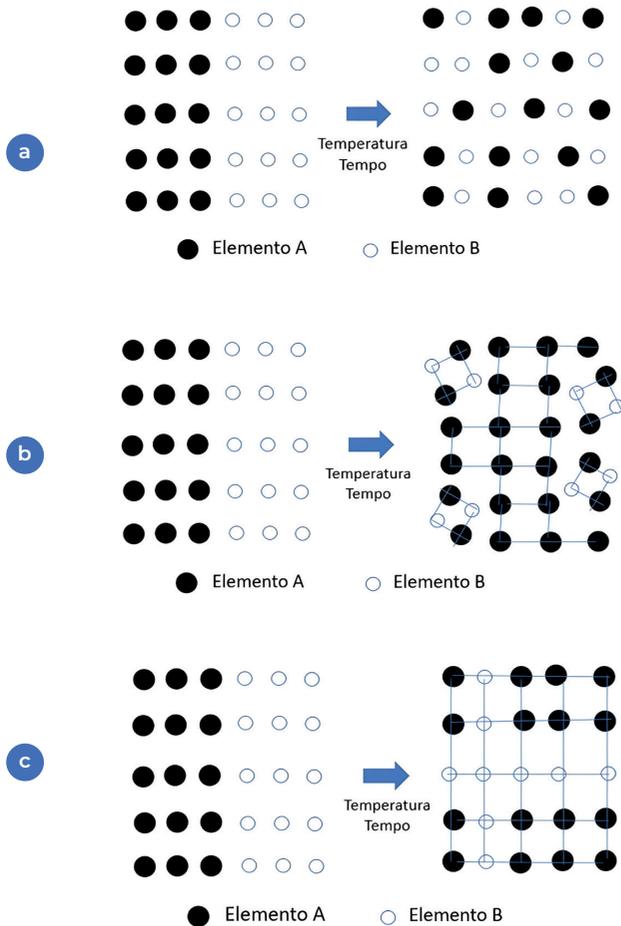


Figura 2.4. Exemplo da difusão atômica entre dois elementos químicos: a) com solubilidade total; b) dissolução parcial; c) elementos imiscíveis.

São muitos os casos da aplicação da difusão no processamento e transformação de metais. Um deles ocorre na produção dos materiais metálicos e está associado, por exemplo, ao tratamento térmico de homogeneização do aço, após solidificação. A segregação interna dos elementos químicos presentes no aço, tal como por exemplo o carbono e o crômio, entre outros, encontram-se após solidificação, com uma maior concentração no interior do metal do que à sua superfície (figura 2.5.a.). Durante o estágio a alta temperatura, a difusão tem lugar e a variação da composição começa a ser atenuada, tomando uma distribuição idêntica à mostrada na figura 2.5.b.). Após várias horas de estágio, a concentração dos vários elementos químicos presentes no aço tende a tomar uma maior homogeneidade ao longo de toda a espessura da peça ou forma metálica como mostra a figura 2.5.c.), dada a mobilidade atômica ocorrida no interior do lingote, durante a imposição de um determinado ciclo térmico.

mica está presente e é responsável pela alteração das composições e das propriedades que os vários materiais adquirem durante processamento e que estão na base das características finais dos produtos fabricados.

No caso do tratamento térmico de endurecimento dos aços por cementação, os gradientes de composição em carbono instalados na superfície das peças, são responsáveis pela existência, após arrefecimento brusco, de variação de dureza na respectiva superfície (figura 2.9.a.).

No caso do revestimento por imersão do aço num banho de zinco fundido (galvanização), a superfície do aço incorpora o elemento zinco, através de um processo de difusão que é responsável pela formação de compostos superficiais, dispostos em camadas ricas em zinco e ferro, que facilitam a aderência da camada de deposição solidificada sobre o aço (figura 2.9.b.) após remoção do banho.

Nos processos de conformação a quente, como forjamento ou ligação por difusão (figura 2.9.c.), a mobilidade dos átomos acontece durante o processo, sendo responsável pela alteração da estrutura interna (forjamento) ou composição química superficial (ligação por difusão), sendo este processo acelerado pela aplicação de uma pressão que fornece energia adicional e aumenta a mobilidade atômica, de modo que os átomos se movam mais favoravelmente e produzam a microestrutura (arranjo atômico) interna desejada.

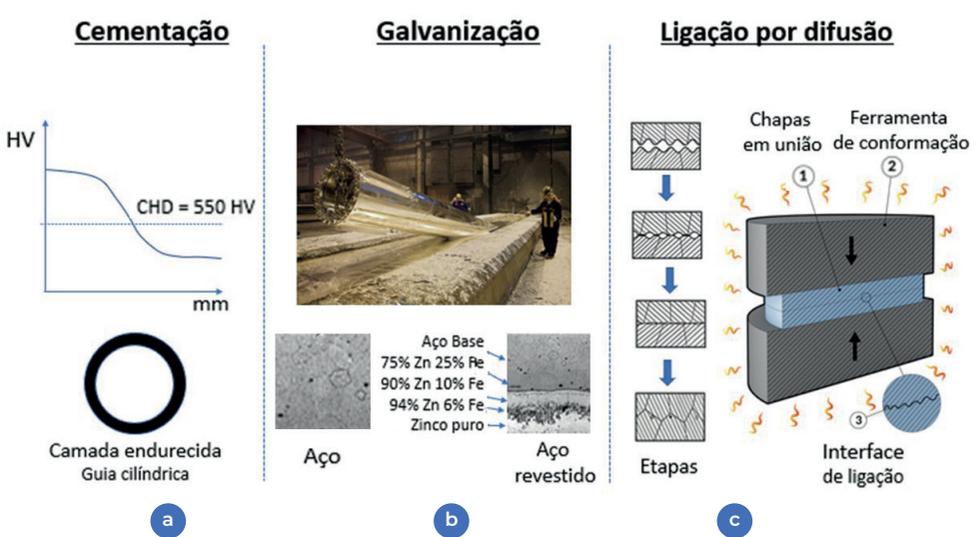


Figura 2.9. Exemplos de aplicação da teoria da difusão em processos industriais: a) cementação do aço; b) galvanização dos aços (adaptado a partir das referências [3] e [4]); c) ligação por difusão (adaptado a partir das referências [5] e [5a]).

A corrosão por meios electroquímicos pode ser interpretada pelas curvas de polarização, determinadas para cada tipo de combinação meio corrosivo/metal ou liga metálica em corrosão em causa. Nestas curvas estão descritas as relações entre a corrente e o potencial envolvidos nas reacções de corrosão. Destas curvas (figura 2.35.) derivam as rectas de Tafel correspondentes às reacções anódicas e catódicas, cujo comportamento é descrito pelas tangentes às curvas experimentalmente determinadas mostradas na figura 2.35. A respectiva intercepção das curvas anódicas e catódicas estabelece o equilíbrio químico da reacção global de corrosão, em que o movimento dos electrões associados à corrosão e provenientes de ambas as reacções anódica e catódica, se igualam fazendo com que a corrosão ocorra a uma corrente e um potencial bem estabelecidos na ausência de polarização do sistema responsável pela corrosão.

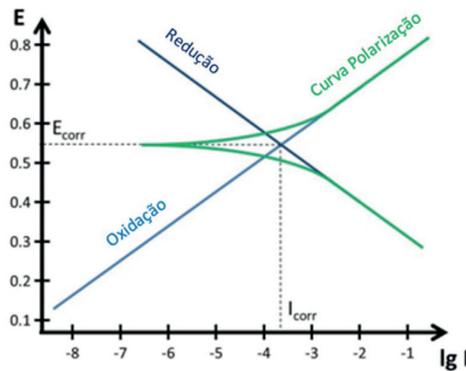


Figura 2.35. Diagrama de Tafel e Evans.^[26]

Para certas condições de corrente e de potencial ocorre a passivação do metal (figura 2.36.), significando isso que a velocidade de corrosão do metal ou sua liga após aplicação destas condições de passivação é significativamente diminuída. A passivação introduz uma película de óxido fino e insolúvel, na superfície metálica, que impede a progressão da corrosão do metal ou liga metálica em posterior contacto com o meio ambiente (isolamento do metal pela formação uma barreira de produtos de corrosão).

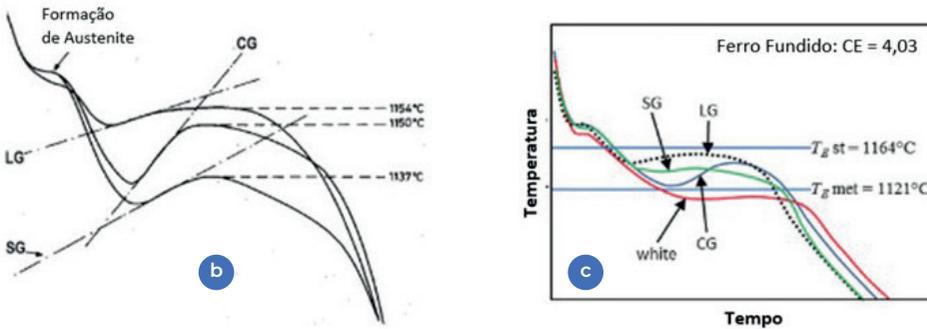


Figura 2.60. Análise térmica de ferros fundidos: a) meios experimentais usados no ensaio;^[74] b) resultados obtidos com molde metálico;^[75] c) resultados obtidos utilizando molde em areia.^[75]

Os ensaios de corrosão permitem ainda verificar a susceptibilidade dos aços inoxidáveis apresentarem corrosão intergranular. Estes ensaios de corrosão acelerada consistem na avaliação da presença de carbonetos nas fronteiras de grão, associados a um determinado estado de processamento do aço.

Este tipo de ensaio é normalizado segundo o referencial ASTM A262 prática A e baseia-se na realização de um teste, com imersão do aço inoxidável em ácido oxálico (figura 2.63.a.) e posterior análise da superfície de uma amostra polida para avaliação da estrutura interna (presença ou não de carbonetos nas fronteiras de grão, conforme mostrado na figura 2.63.b.).

3. METALURGIA FÍSICA

3.1. Introdução

O modo como os átomos se organizam no interior dos materiais metálicos determina as propriedades dos metais e das suas ligas. Esta organização atômica ocorre durante o processamento, por variação da temperatura, do tempo e das velocidades de arrefecimento definindo assim as características que estes materiais possuem em serviço e que os tornam aptos para as mais diversas aplicações onde estes materiais de engenharia se aplicam.

Os átomos arranjam-se no interior de dado metal ou sua liga segundo estruturas cristalinas (células atômicas unitárias – figura 3.1), que se repetindo no espaço, geram a malha interna tridimensional, segundo a qual estes materiais são constituídos. Os átomos dispõem-se desse modo sobre diferentes planos, originando fases, que dão origem a diferentes microestruturas, como veremos mais à frente, contendo grãos (compostos por uma única fase, ou várias fases), e partículas duras, como carbonetos, precipitados, etc. As transformações de fase (subcapítulo 2.5.) resultantes de oscilações de temperatura ocorridas durante processamento, produzem alterações microestruturais (mudanças de estrutura cristalina), que se traduzem, para uma mesma composição química, em diferenças de propriedades nos metais metálicos, as quais por sua vez dão origem a uma modificação nos comportamentos e desempenhos destes materiais em serviço.

diz respeito às disposições das células paralelepípedicas, que compõem a estrutura global hexagonal compacta). Por outras palavras estes paralelepípedos estando rodados entre si de 120° , não permitem um movimento continuamente alinhado, não assegurando assim um facilitado deslizamento dos átomos entre os paralelepípedos ao longo de toda a estrutura cristalina, sendo obrigados a mudanças de plano deslizamento. Na estrutura HC o deslizamento ocorre então preferencialmente nos planos basais, indicados na figura 3.4., segundo os quais, o deslizamento é perfeitamente contínuo no interior da estrutura cristalina. Dai que os metais com estrutura cristalina HC serem mais frágeis e mais difíceis de deformar.

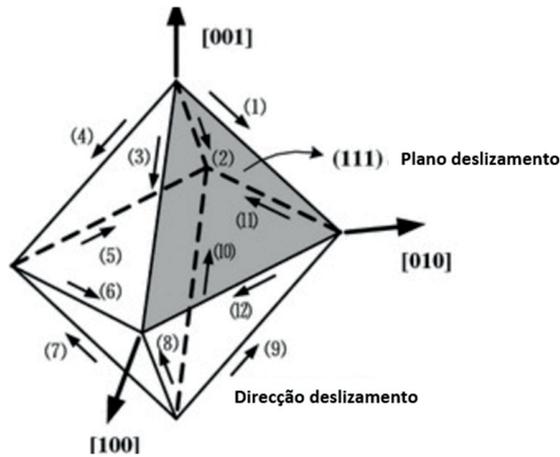


Figura 3.3. Planos de deslizamento da estrutura cristalina CFC.^[84]

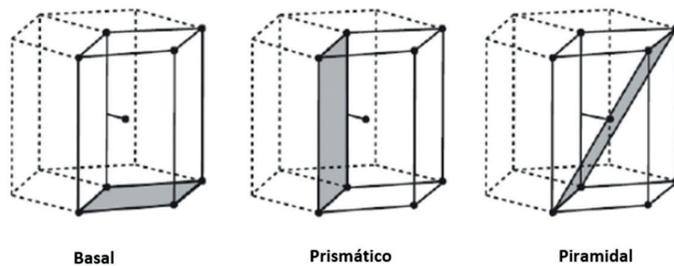


Figura 3.4. Planos de deslizamento da estrutura HC.^[85]

3.3. Mobilidade Atômica

A deformação dos metais acontece, como acabado de explicar no capítulo anterior, ao longo de planos cristalinos, por deslizamento dos átomos uns sobre os

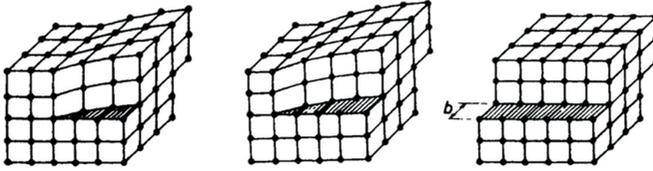


Figura 3.8. Movimentação de uma deslocação em hélice.^[89]

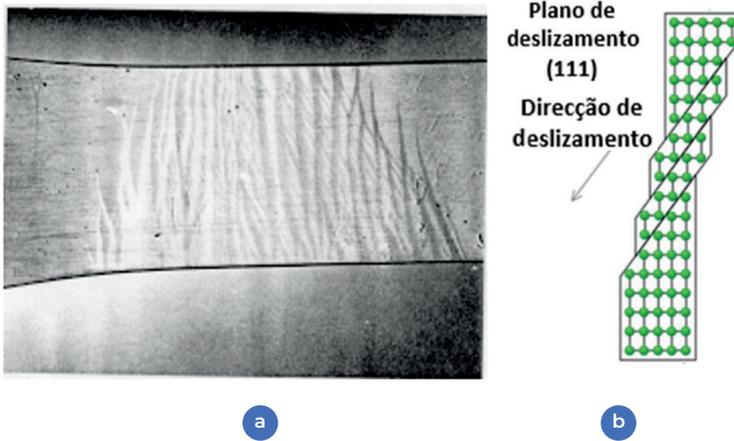


Figura 3.9. Formação de bandas de Luders macroscópicas: a) aspecto das bandas de Luders numa liga de alumínio da série 5000;^[90] b) esquema da formação de bandas de Luders.^[91]

O endurecimento dos materiais metálicos ocorre quando existe uma oposição à sua deformação (movimentação dos átomos), devido ao facto de durante a aplicação de um esforço externo os átomos ao se moverem, encontrarem pela frente obstáculos. Estes obstáculos podem ser:

- outros átomos, que se deslocam num outro plano, que entronca com o plano em deslizamento (empilhamento de deslocações);
- partículas de segunda fase (grãos com diferente composição química ou partículas de uma outra natureza: como carbonetos ou precipitados);
- fronteiras de grão, nas quais a orientação da estrutura cristalina termina e inicia-se uma nova de orientação distinta;
- átomos substitucionais ou intersticiais (figura 3.10.). Nestas condições as deslocações encravam, durante o seu movimento, tendo de vencer o campo de deformação imposta por estes átomos.

No caso de as deslocações terem de vencer os obstáculos, poderão ter que ver alterado o plano de deslizamento, originar a criação de mais defeitos internos, ou contornar o campo de tensões afecto ao obstáculo, como forma de continuarem a progredir, requerendo assim um maior esforço mecânico para que a deformação progrida, chamando-se a este efeito de endurecimento.

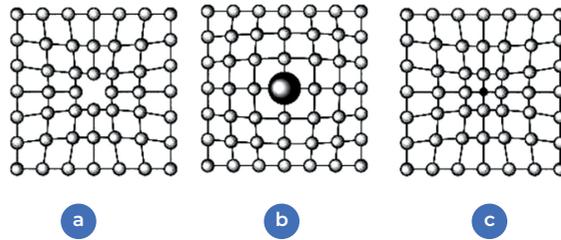


Figura 3.10. Exemplo de defeitos das estruturas cristalinas dos metais causados pela existência de^[92]: a) lacunas – ausências de átomos; b) deformação da estrutura pelo facto de os átomos do elemento de liga ser maior do que os átomos do metal principal; c) deformação da estrutura cristalina quando os átomos do soluto são menores do que os átomos do metal principal.

As deslocações em movimento correspondem, em termos de deslizamento, a uma frente (uma linha de átomos) que se move sobre um plano. Esta frente ao encontrar um dos obstáculos acima descrito, altera a sua trajectória para um outro plano (figura 3.11.a.) ou contorna o obstáculo (figura 3.11.b.) dando origem a novos defeitos cristalinos conforme mostrado na figura 3.11. Este fenómeno chama-se de encruamento, ou seja, torna-se necessário aumentar o esforço para efectuar a deformação de um material metálico com obstáculos, no entanto, a criação de um maior número de deslocações por estes mecanismos, faz com que o material para continuar a ser deformado com ligeiros aumentos de carga se deforme proporcionalmente melhor (ver deformação plástica no capítulo de metalurgia mecânica).

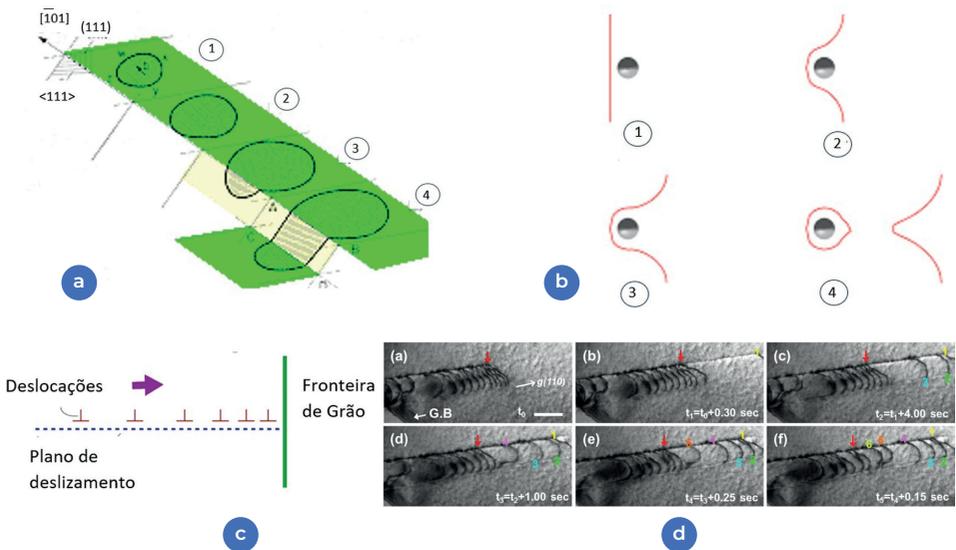


Figura 3.11. Movimentação de deslocações; a) mudança de plano deslizamento da frente de uma deslocação para um novo plano;^[93a] b) contorno de uma partícula dura por uma deslocação durante a deformação;^[93b] c) empilhamento de deslocações;^[93c] d) movimentação das deslocações num aço ao manganês.^[93d]

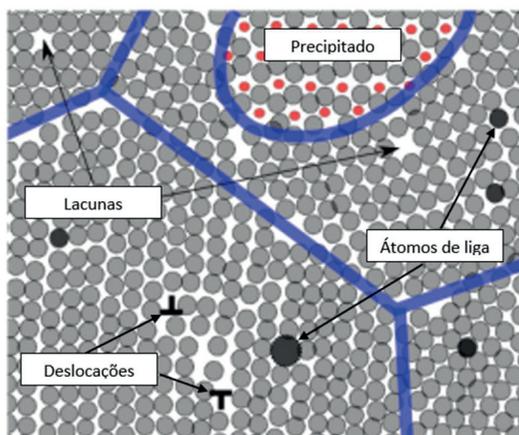


Figura 3.12. Constituintes de uma microestrutura.^[94]

A microestrutura varia conforme o processamento térmico, segundo o qual a gama de temperatura atingida, o tempo de estágio à temperatura e a velocidade de arrefecimento para um dado metal ou liga metálica, fazem alterar a estrutura interna que os materiais metálicos irão apresentar.

O material metálico mais utilizado pelo Homem, o aço, apresenta vários tipos de microestruturas, tal como os restantes metais e suas ligas. Dada a relevância do aço como material de engenharia, torna-se importante descrever os seus principais tipos de microestruturas e o modo como estas são produzidas.

A figura 3.13. mostra o detalhe mais relevante do diagrama de equilíbrio para os aços ao carbono. Nele estão representados os tipos de microestruturas obtidas a partir de um arrefecimento lento, desde uma temperatura elevada no domínio austenítico até à temperatura ambiente. No interior desse domínio austenítico (fase γ), a fase austenite é estável sendo composta exclusivamente apenas por grãos de austenite, nos quais todo o carbono adicionado ao ferro é dissolvido na malha cristalina CFC da austenite. Quando a temperatura desce imediatamente abaixo de A_3 ou A_{cm} , uma nova, segunda fase, surge na microestrutura, ferrite (abaixo de A_3) ou cementite (a uma temperatura inferior a A_{cm}). O carbono reparte-se de forma desigual por estas fases presentes na microestrutura, apresentando um baixo teor em carbono para a ferrite, teor de carbono intermédio para a austenite e teor elevado em carbono (assumindo o valor de 6,67%) para a cementite. A composição química em concreto de cada um dessas fases (microconstituintes) é obtida sobre as linhas de limite das fases, nos locais onde a linha horizontal da temperatura em causa intersecta os limites do domínio do diagrama (ver figura 3.13.).

Os minérios finos podem ser utilizados nos processos que envolvem a fusão, através de métodos de aglomeração dos minérios com outras matérias-primas, seguida de sinterização posterior destinada a provocar uma pré-redução dos metais em produção. Estes processos são vulgares na produção de sinter e de peletes destinadas à obtenção de aço.

O objectivo da produção de sinter ou de peletes está ligado ao aproveitamento de pós finos resultantes da fragmentação de minérios. Estes pós, não podendo ser introduzidos directamente nos fornos de redução por fusão (realizada no alto-forno), são utilizados na forma aglomerada e sinterizada de modo a possuir maiores dimensões e peso e assim serem carregadas nos fornos de redução. Os pós finos de minério, devido ao facto apresentarem uma baixa massa, são pulverizados para o exterior do forno, devido à velocidade que os gases apresentam ao se libertarem através dos locais de carga do forno, impedindo assim o seu uso. Por este motivo aproveitam-se os finos dos minérios aglomerando as matérias-primas usadas em siderurgia, realizando a sua sinterização em formas mais pesadas e volumosas, correspondentes ao sinter ou às peletes.

O sinter é produzido misturando as várias-matérias primas (calcário, coque e minério) que se adicionam ao alto forno, em conjunto com água para formar uma pasta. A mistura assim obtida é vertida sobre uma base na forma de uma massa pastosa, delicada e sem grande consistência. A mistura é então aquecida (sinterizada) de modo a produzir uma ligação sólida entre as partículas que constituem cada um dos volumes em sinterização. Neste processo formam-se assim pré-reduzidos, correspondendo a óxidos parcialmente convertidos em metal, uma vez que conjuntamente com os minérios se adiciona coque fino redutor que produz este efeito. O sinter então produzido é mais resistente, obtendo-se assim a consistência desejada à mistura de matérias-primas finas aproveitadas de modo a serem introduzidas nos fornos de redução.

A figura 5.23. mostra, esquematicamente, o processo de produção de sinter. O produto final sinterizado é fragmentado em pequenas partículas, com peso suficiente para serem utilizadas no alto forno (figura 5.23.b.).

5. PRODUÇÃO DE METAIS

5.1. Introdução

Os metais e suas ligas são produzidos por duas rotas de processamento distintas: a partir dos seus minérios, ou então por via da reciclagem de sucatas.

Por recurso aos seus minérios, os óxidos ou sulfuretos, contendo um elevado teor no elemento químico principal pretendido, são inicialmente fragmentados, concentrados e finalmente reduzidos a um estado metálico mais rico (mais puro) no elemento metálico que se procura obter. Por esta via os metais são produzidos ou por sequência de técnicas pirometalúrgicas, isto é envolvendo a fusão de matérias-primas, ou por uma outra forma de processamento alternativo envolvendo uma diferente sequência de produção, designada por hidrometalurgia, segundo a qual ocorre a dissolução do metal contido nos minérios, num meio líquido, sendo posteriormente obtido o metal por diversas técnicas de recuperação.

Alguns metais preciosos surgem na natureza de forma nativa, isto é, na sua forma pura. Estes metais apresentam uma mais simples técnica de produção, no entanto, a sua fraca abundância exige que sejam tidos em consideração cuidados como o recurso a processos de concentração, a partir das fontes de extracção, pois é necessário realizar uma elevada taxa de remoção de solo, para que sejam obtidas pequenas quantidades destes metais de forma rentável.

Os metais produzidos a partir da sucata dão origem a matérias-primas metálicas (pré-formas) destinadas a serem transformadas por processo de metalurgia secundária, com o intuito de conferir a forma, a microestrutura e as propriedades pretendidas. Esta conformação secundária é idêntica à dos metais obtidos a partir dos minérios, ou seja, a deformação das formas por forjamento ou laminagem elimina defeitos internos e produz a forma final das matérias-primas, fornecidas ao mercado das indústrias transformadoras do sector metalúrgico e metalomecânico.

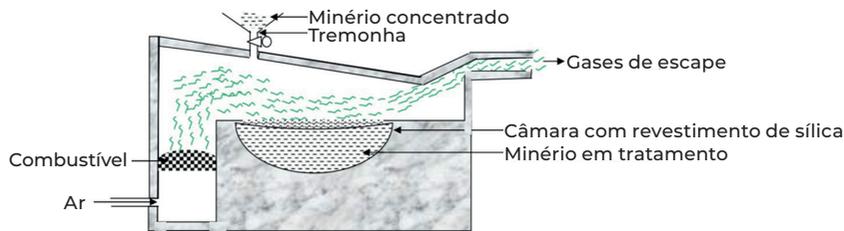
Os produtos reciclados obtidos podem ser ou novamente refundidos pelas fundições (no caso dos lingotes), de modo a dar origem a peças metálicas vazadas, ou então por deformação para dar origem a formas finais de matérias-primas como barras, placas, chapas ou perfis, usadas para fabrico de peças conformadas maioritariamente por deformação, soldadura, ou maquinagem e por um outro conjunto mais limitado de técnicas.

5.2. Extração e Concentração de Minérios

Em minas subterrâneas (figura 5.1.) ou a céu aberto (figura 5.2.), correspondentes a localizações no globo, onde determinados metais existem em concentrações mais elevadas, são escavados solos e partidas rochas, contendo os minérios ricos no elemento metálico que se pretende obter. São exemplo desses minérios, os óxidos e os sulfuretos indicados na figura 5.3., correspondentes aos principais metais produzidos pelo homem.



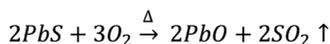
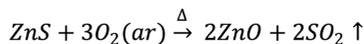
Figura 5.1. Extração de minérios em mina subterrânea localizada na Europa.^[167]



Forno de reverbo ou reverbatório

Figura 5.21. Forno de calcinação em corte.^[193]

Outro pré-tratamento pirometalúrgico (a conversão) também usado pelo Homem para produção de metais, consiste na conversão de minérios sulfurosos em óxidos, cuja fusão é mais facilitada. Neste processo o minério, sob a forma de partículas finas, é aquecido com a insuflação de ar quente, produzindo-se no contacto do ar com as partículas de minério, a formação de um óxido estável e a libertação de dióxido de enxofre gasoso para a atmosfera. Este processo aplica-se, por exemplo em minérios de zinco, chumbo e cobre. Abaixo indicam-se as reacções de conversão dos minérios como a blenda e galena.



A conversão dos sulfuretos pode ser realizada recorrendo a diversas tecnologias, tais como fornos de reverbo, fornos de fluxo fluidizado, fornos rotativos, entre outros. A figura 5.22. mostra um forno de conversão de fluxo fluidizado, utilizado como tecnologia de produção de zinco. Neste processo, o minério de zinco é adicionado à frente do local de injeção de uma mistura de ar e com combustível, que provoca a projecção do minério para o interior de uma câmara, na qual ocorre a formação de óxido e a libertação do dióxido de enxofre, sendo as partículas atiradas a várias velocidades e recolhidas por condutas posicionadas a diferentes alturas, procedendo-se assim à recolha da totalidade das partículas convertidas em óxido. Estas são, posteriormente, arrefecidas em água formando uma lama utilizada na etapa seguinte de processamento pirometalúrgico.

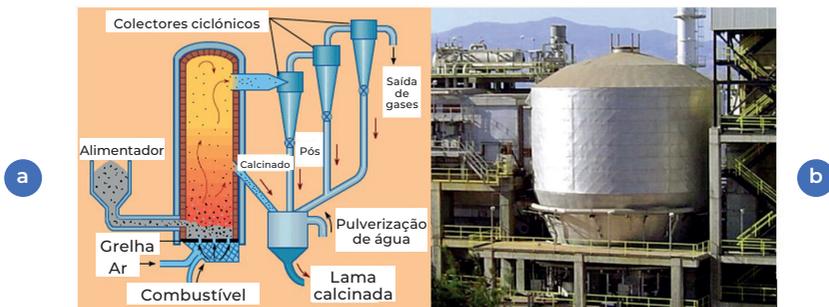


Figura 5.22. Forno de fluxo fluidizado para produção de zinco: a) princípio de funcionamento;^[194] b) especto de um conversor industrial.^[195]

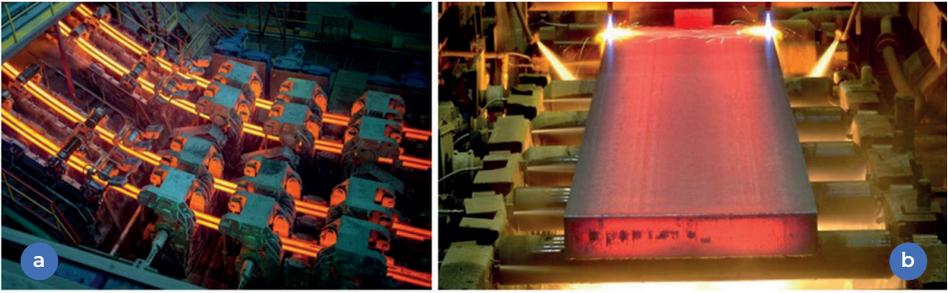


Figura 5.46. Produção de *slabs*: a) passagem dos *slabs* nos rolos de movimentação da linha de vazamento contínuo;^[230] b) *slab* em fase de corte por chama.^[231]

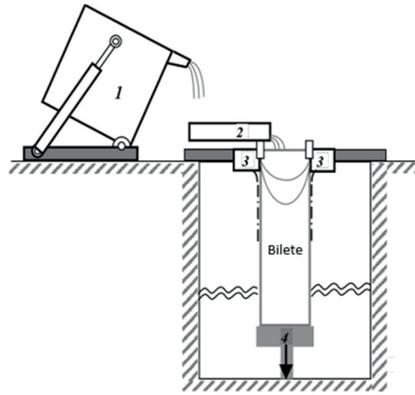
Os lingotes destinados à produção de aços especiais para aeronáutica, competição ou ferramentas, podem ser submetidos a um novo processo de fusão (refusão) mostrada na figura 5.47., recorrendo a uma das tecnologias alternativas de refusão feita em fornos ESR (*Electro Slag Remelting*) ou em fornos VAR (*Vacuum Arc Remelting*).

No processo ESR, um eléctrodo de grafite desce sobre o lingote, fazendo com que a descarga eléctrica, que se liberta entre o eléctrodo e o lingote, derreta a superfície do lingote sólido, conduzindo a que as impurezas, presentes nas inclusões não metálicas do lingote, se libertem das gotas de metal fundido. Por este processo as gotas de metal líquido vão escorrendo do topo em fusão para a base. Uma vez que esta fusão é muito localizada, as impurezas têm assim a capacidade de virem à tona e se separarem do restante grande volume sólido. Desta forma é formada uma escória na superfície do aço.

No caso da refusão a vácuo, o processo é idêntico, no entanto, o metal está envolvido numa câmara de vácuo que vai aspirando os gases libertados e mantendo assim uma atmosfera não oxidante sobre a massa de aço fundida. A figura 5.48. mostra exemplos industriais de equipamentos de refusão ESR e VAR.



Figura 5.50. Produção de alumínio em célula Hall-Héroult: a) instalação industrial com várias células em funcionamento;^[238] b) painel de transferência.^[239]



1. Cadinho, 2. Bacia de vazamento, 3. Molde

Figura 5.51. Vazamento de *slabs* ou *biletas*.^[240]



Figura 5.52. Produção industrial de *biletas* de alumínio: a) vazamento;^[241] b) sistema de enchimento dos *biletas*;^[242] c) remoção dos *biletas*.^[243]

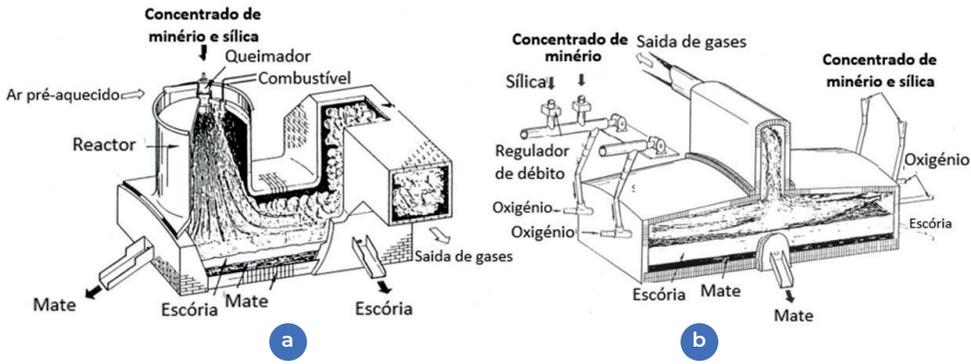


Figura 5.57. Fornos usados para produção de mate: ^[248] a) forno *flash* utilizado pela Outokumpu; b) forno *flash* INCO a oxigênio.

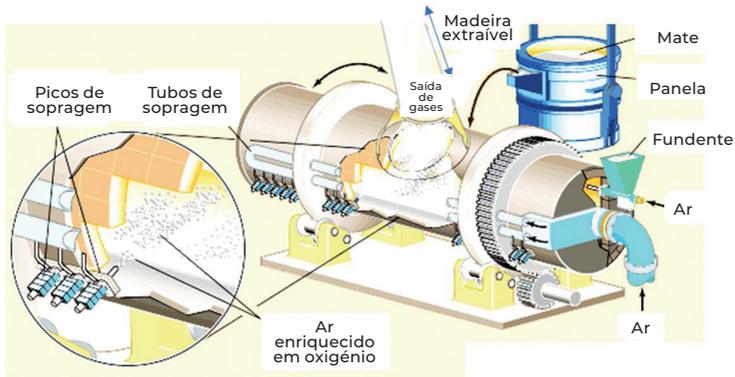


Figura 5.58. Forno rotativo de produção de cobre *blister*.^[249]



Figura 5.59. Forno de refinação para a produção de ânodos.^[250]

No processo de laminagem a frio não ocorre a recristalização dinâmica, uma vez que o processo de deformação é realizado à temperatura ambiente, sem capacidade de activação térmica da difusão no sentido de gerar novos grãos. Desta forma a estrutura interna dos materiais laminados fica alongada no sentido do deslocamento da chapa, originando uma anisotropia de propriedades. Neste tipo de conformação, a chapa fica com diferenças de resistência e ductilidade, na direcção da laminagem da chapa e na direcção perpendicular a esta, fruto da diferença entre os respectivos tamanhos dos grãos (seu alongamento) em cada uma das direcções principais da chapa. Após laminagem a frio, a chapa possuirá maior resistência mecânica, apresentando menor capacidade de deformação (alongamento), sobretudo se solicitada na direcção perpendicular ao sentido de laminagem, fruto desta orientação dos grãos da estrutura interna.

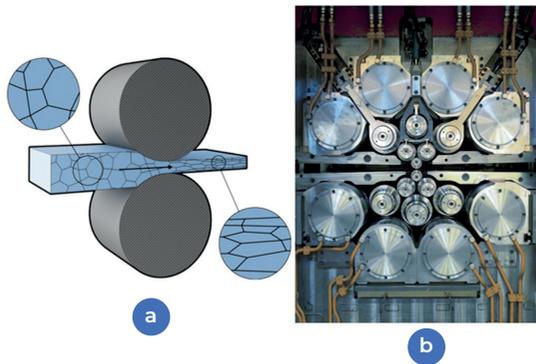


Figura 5.73. Laminagem a frio: a) esquema de laminagem a frio ilustrando modificações microestruturais ocorridas;^[269] b) conjunto de rolos necessários para produzir uma única redução de espessura.^[270]

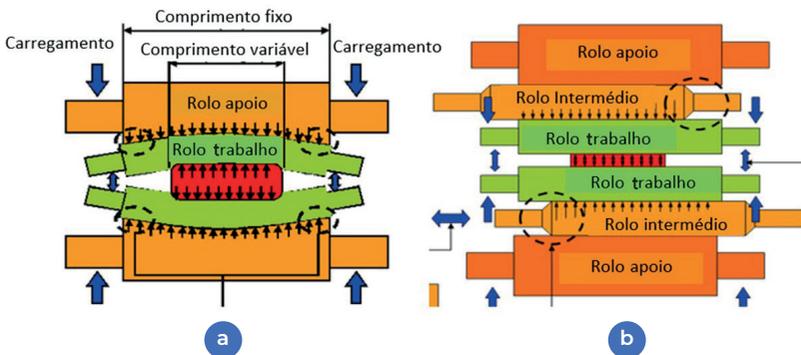


Figura 5.74. Laminagem a frio, características dos rolos de laminagem^[271]:
a) laminagem convencionais para redução das espessuras mais elevadas;
b) laminagem em sistema mais robusto, composto por maior número de rolos, para uma maior precisão na definição da espessura final da chapa produzida.

Um teste simples e eficaz para determinar a conformabilidade dos materiais consiste na realização do ensaio Erichsen (figura 6.24.), segundo o qual uma esfera é empurrada sobre uma chapa, presa entre placas, que se deforma originando uma calote. O aspecto da superfície, bem como o grau de deformação final obtido (altura da calote), é após ensaio analisado, de forma a retirar informação sobre a aptidão da chapa para conformação.

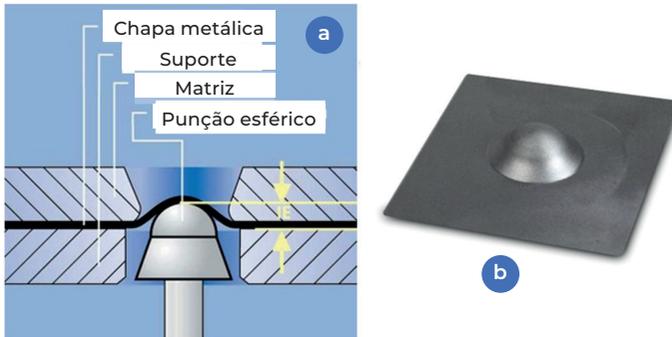


Figura 6.24. Ensaio Erichsen^[342]: a) esquema de princípio; b) chapa após ensaio.

O aspecto da superfície da calote ensaiada evidencia dois parâmetros: a rugosidade da chapa (aparecimento ou não de defeito de casca de laranja); e o aparecimento de fissuração (figura 6.25.). A altura da calote está relacionada também com a aptidão à conformação, uma vez que quanto maior for esta calote, maior será a capacidade de deformação da chapa ensaiada. Este ensaio permite comparar o comportamento à deformação de diferentes materiais ou de materiais com a mesma composição, mas com diferentes tipos de processamento (encruamentos e tamanhos de grão diferentes). As figuras 6.26. e 6.27. ajudam a compreender a conformabilidade de várias combinações de chapas metálicas.



Figura 6.25. Aspecto do rompimento de uma chapa ensaiada numa máquina Erichsen.^[343]

mada e cortada. Outros materiais apresentam distinto comportamento, face ao alumínio, em função da resistência que oferecem ao corte de avara, fruto do modo como a sua microestrutura se deforma e fractura.

A adição de chumbo ou enxofre a materiais metálicos como os aços (figura 6.31.) ou os latões, torna o processo de maquinagem mais produtivo e fácil, uma vez que a avara se quebra e se liberta mais facilmente e de forma fina do material em fabrico. Estes dois elementos promovem a fragilização dos metais e a formação de inclusões, que conduzem a uma fissuração da avara que se liberta assim de forma mais expedita do material em fabrico. A figura 6.32. mostra o modo como as inclusões de sulfuretos resultam no aparecimento de fissuras, originando a quebra de avara sob uma forma mais fina durante o escoamento do material em deformação. Os sulfuretos ao possuírem muito baixa resistência mecânica são facilmente deformados e provocam uma descontinuidade aguçada, no interior do material ao ser cortado, funcionando como entalhes que quebram assim mais facilmente a avara na zona de corte (figura 6.32.), permitindo uma maquinagem mais rápida. O chumbo forma uma película de material em volta do sulfureto, aumentando assim o seu tamanho, facilitando ainda mais o processo de maquinagem. Por esse motivo os aços ligados a estes dois elementos químicos possuem a maior maquinabilidade entre todas as referências comerciais de aço disponíveis.

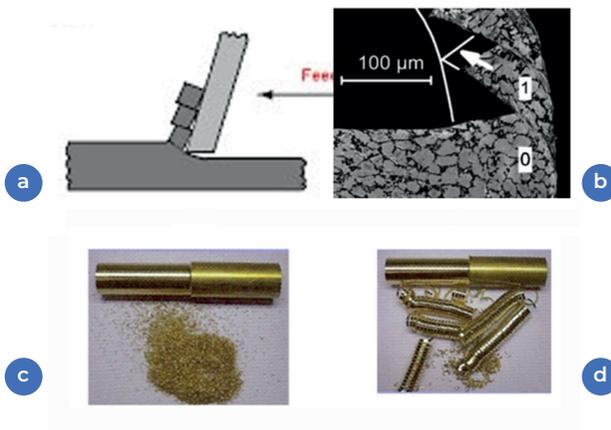


Figura 6.29. Remoção de avara por maquinagem: a) princípio de remoção de avara; b) remoção de avara numa liga de titânio;^[347] c) exemplo de aparas finas libertadas num latão de corte fácil CuZn38Pb2;^[348] d) aparas longas obtidas por maquinagem do latão CuZn38As de baixo chumbo.^[348]

Os aços possuem maior ou menor maquinabilidade em função do tipo de estrutura e dureza a ela associada. A figura 6.33. compara a maquinabilidade de alguns dos aços comerciais e relaciona a maquinabilidade com o tipo de estrutura e composição química que cada material apresenta. Os aços com menor teor em carbonetos (partículas duras) e com a maior presença de inclusões revelam a

aços, isto é, ajudam a quebrar a apara por serem entalhes e descontinuidades desta, libertando assim uma apara quebrada de forma mais fina (figura 6.29.c.). O chumbo adere também à ferramenta, funcionando como lubrificante sólido, facilitando ainda mais a maquinagem. Estes materiais ligados ao chumbo apresentam, comparativamente ao mesmo tipo de liga, mas com baixo teor neste elemento (figura 6.29.d.), por estes motivos uma muito maior maquinabilidade. A dureza das ligas e o tipo de microestrutura que as ligas de cobre apresentam definem a respectiva maquinabilidade destes materiais, conforme demonstrado na figura 6.36.

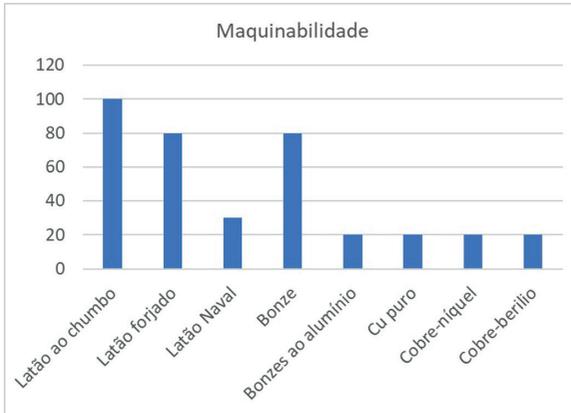


Figura 6.36. Maquinabilidade das ligas de cobre. Gráfico construído a partir de informação disponibilizada pela referência [355].

As liga de níquel, também de estrutura CFC, sofrem um efeito de deformação durante a maquinagem, pelo que são vulgarmente maquinadas num estado mais encruado (endurecido por exemplo por estiramento). A este estado acrescenta-se à matéria-prima um tratamento térmico de alívio de tensões, de modo que a maquinagem decorra de forma mais estável (com menor empeno e com maior rigor dimensional). A figura 6.37. compara a maquinabilidade de algumas conhecidas ligas comerciais de níquel.

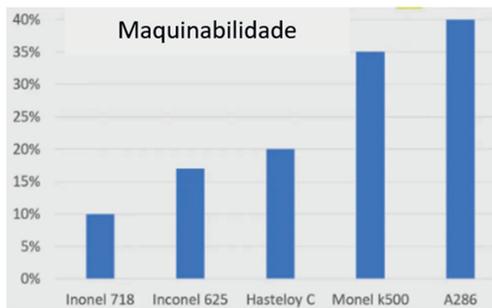


Figura 6.37. Maquinabilidade das ligas de níquel.^[356]

7. CONCLUSÃO

O trabalho sobre os metais remonta a períodos ancestrais de cerca de 8.000 a.C., quando o homem começou a martelar o cobre nativo, transformando-o em utensílios úteis. Desde essa altura foram-se produzindo diversos avanços tecnológicos e construído profundo conhecimento e saber fazer sobre as técnicas de elaboração e sobre o fabrico de produtos metálicos.

Hoje, a metalurgia representa o domínio do Homem sobre a fusão dos materiais metálicos e sua posterior transformação, inicialmente produzindo matérias-primas e finalmente fabricando produtos acabados. Esta transformação ocorre através do uso de diversas tecnologias incorporadas em fábricas pertencentes ao universo da indústria metalúrgica e metalomecânica. Outras indústrias tais, como por exemplo é o caso das produtoras de veículos, máquinas e os diversos equipamentos, recorrem também à transformação das ligas metálicas igualmente recorrendo a processos metalúrgicos, existentes internamente ou por via de subcontratação, incorporando produtos em metálicos nos diversos bens que produzem.

A elaboração e a transformação dos metais regem-se por princípios científicos construídos ao longo de milhares de anos. Estes princípios continuam em contínuo desenvolvimento, fruto do avanço das técnicas de caracterização e dos estudos científicos, realizados um pouco por todo o lado, através de cientistas e metalurgistas que no fundo têm gosto e se sentem motivados pela relevância e prazer trazido pela metalurgia. Estes princípios científicos e tecnológicos estão ligados

NOÇÕES BÁSICAS SOBRE METALURGIA

PAULO DUARTE

REVISÃO TÉCNICA

Serafim Oliveira

Sobre a obra

Noções Básicas sobre Metalurgia reúne um conjunto de conceitos chave que são essenciais para um eficaz processamento dos materiais metálicos, tendo em mente o desenho de melhores performances a atingir pelas várias ligas metálicas utilizadas pelo homem, aquando do fabrico dos produtos metálicos usados nas diversas aplicações de engenharia.

O livro apresenta de uma forma simples e acessível os conhecimentos científicos e tecnológicos necessários para a produção e transformação dos metais e suas ligas em produtos metálicos, sendo as explicações dadas no livro devidamente enquadradas com uma visão prática dos conceitos apresentados à realidade industrial actual. O livro representa uma obra de referência para que qualquer profissional da indústria metalúrgica e metalomecânica possa exercer o seu trabalho de forma mais consistente e sustentável. O livro destina-se igualmente a estudantes aspirantes a trabalhar nesta área industrial, como forma de reter o que de essencial lhe é importante saber.

Sobre o autor

Paulo Duarte

Licenciado em 1995 em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e Mestre em Engenharia Mecânica, 2001. Exerceu actividade profissional de engenharia e gestão em empresas relevantes no contexto nacional da indústria da fundição, como a Zollern e Funfrap e do fornecimento de aços e serviços de tratamento térmico, como a Ramada Aços. Foi Engenheiro de desenvolvimento, docente na Universidade do Porto na área da Metalurgia, consultor, director de qualidade, director técnico e director industrial do sector dos aços e tratamentos térmicos, e mais recentemente criou a sua própria empresa: a Metalsolvus. É autor de várias patentes e publicações científico-tecnológicas. Actualmente desenvolve trabalho de I&D na área dos tratamentos térmicos, realiza formações na área da metalurgia e metalomecânica e actua na área de desenvolvimento de negócios com materiais metálicos. Colabora com a Zinc-it e a comissão técnica de normalização - CT43 - corrosão.

Sobre o revisor

Serafim Oliveira

Licenciado em 1995 em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestre em Engenharia de Materiais em 1999 e Doutoramento em Engenharia Biomédica em 2008. Exerceu actividade profissional em empresas da metalomecânica nacional e internacional de renome, como responsável de laboratório, coordenador de tratamento térmico e director de Produção. É docente do ensino superior lecionando disciplinas de ciência e engenharia dos materiais, sistemas de transmissão mecânica e energia na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, onde foi director do Departamento de Engenharia Mecânica e coordenou o curso de Tecnologia Automóvel. É investigador e membro da direcção do CISeD. Assinou várias publicações científicas e duas patentes, resultantes da realização de vários projectos nacionais e internacionais de I&D, envolvendo a cooperação entre a indústria e o meio científico-tecnológico nacional e norte-americano.

Apoios



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO NORTE

METALSOLVUS



RAMADA AÇOS
SPECIAL STEEL SOLUTIONS

Também disponível em formato e-book



ISBN: 978-989-917-757-4



9 789899 177574
www.quanticaeditora.pt

engebook