



Materiais de construção mecânica

Materiais de construção mecânica

Éder Cícero Adão Simêncio

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Alberto S. Santana

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Cristiane Lisandra Danna

Danielly Nunes Andrade Noé

Emanuel Santana

Grasiele Aparecida Lourenço

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Paulo Heraldo Costa do Valle

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

João Carlos dos Santos

Luiz Eduardo Zampar Filho

Editorial

Adilson Braga Fontes

André Augusto de Andrade Ramos

Cristiane Lisandra Danna

Diogo Ribeiro Garcia

Emanuel Santana

Erick Silva Griep

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Simêncio, Êder Cícero Adão
S589m Materiais de construção mecânica / Êder Cícero Adão
Simêncio. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional
S.A., 2017.
208 p.

ISBN 978-85-8482-849-4

1. Mecânica aplicada. 2. Materiais de construção. I.
Titulo.

CDD 620.11

2017

Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 – Londrina – PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Propriedades mecânicas e mecanismos de aumento de resistência dos metais	7
Seção 1.1 - Deformações elástica e plástica	9
Seção 1.2 - Tensão e deformação verdadeira	26
Seção 1.3 - Ensaio de dureza e mecanismos de aumento de resistência dos metais	42
Unidade 2 Diagramas e transformações de fases	59
Seção 2.1 - Conceitos básicos e diagrama de fases unários	61
Seção 2.2 - Diagrama de fases binários em equilíbrio	77
Seção 2.3 - Diagrama de fases: sistema ferro-carbono	95
Unidade 3 Tratamentos térmicos	111
Seção 3.1 - Recozimento e normalização	113
Seção 3.2 - Têmpera e revenimento	132
Seção 3.3 - Martêmpera, austêmpera e tratamentos termoquímicos	147
Unidade 4 Conformação e materiais de construção mecânica	159
Seção 4.1 - Conformação a quente	161
Seção 4.2 - Trabalho a frio	176
Seção 4.3 - Aços e ferros fundidos utilizados na construção mecânica	190

Palavras do autor

Olá, estudante. Seja bem-vindo aos estudos da disciplina de *Materiais de Construção Mecânica*. Para chegar até aqui, você passou por diversas disciplinas e, certamente, cursou a disciplina de *Ciência dos materiais*, que é um alicerce importante para o desenvolvimento destes estudos. Neste livro, você aprenderá conceitos essenciais sobre as propriedades dos materiais, principalmente sobre os metais, que são, possivelmente, os materiais mais importantes para a engenharia mecânica e foco dos nossos estudos.

O objetivo principal deste estudo é conhecer e compreender a relação entre as propriedades, o comportamento e as microestruturas dos materiais de construção mecânica. A partir da compreensão dessas relações, você será capaz de selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, por exemplo, decidir os metais apropriados que podem ser utilizados para a construção de blocos de motores automotivos, de maneira que atendam às características do projeto, do processamento e, conseqüentemente, da aplicação.

O livro está estruturado da seguinte maneira: na Unidade 1 trataremos das propriedades mecânicas dos materiais metálicos e compreenderemos os conceitos de deformação plástica e elástica, tensão e deformação verdadeiras e, por fim, abordaremos os ensaios de dureza e os mecanismos de aumento de resistência dos metais. Já na Unidade 2, você será apresentado aos diagramas de fases para sistemas de ligas e compreenderá que os diagramas de fases fornecem informações extremamente importantes sobre alguns fenômenos, como a formação de microestruturas, fundição, fusão, entre outros. Na Unidade 3 serão abordados os principais tratamentos térmicos, as transformações de fases e as propriedades dos metais após serem submetidos a esses tratamentos. Na Unidade 4 vamos conhecer a conformação dos metais a quente e a frio e finalizaremos nossos estudos conhecendo os principais aços e ferros fundidos utilizados na construção mecânica. Assim, os estudos dos temas abordados nesta disciplina os tornarão capaz de avaliar e selecionar diferentes tipos de metais aplicados em projetos mecânicos.

Propriedades mecânicas e mecanismos de aumento de resistência dos metais

Convite ao estudo

Caro aluno, seja bem-vindo à nossa primeira unidade do livro didático da disciplina de *Materiais de Construção Mecânica*. Iniciaremos os estudos desta unidade de ensino abordando um dos principais ensaios utilizados para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, o ensaio de tração. No entanto, antes de compreendermos os gráficos e as informações geradas nesse ensaio, vamos entender os conceitos de tensão e deformação. A partir do gráfico de tensão e deformação vamos conhecer os conceitos de deformação elástica e deformação plástica, assim como os conceitos de ductilidade, resiliência e tenacidade. Posteriormente, serão introduzidos os conceitos de tensão verdadeira e deformação verdadeira, e você será capaz de compreender a diferença desses conceitos. Além dos conceitos obtidos a partir de um ensaio de tração, serão abordados temas tais como: deformações compressivas, cisalhante e torcional; a recuperação elástica e o coeficiente de Poisson; a deformação plástica dos materiais policristalinos, deformação por maclas, discordâncias e suas características; os sistemas de escorregamento, o aumento da resistência por: refino de grão, solução sólida e encruamento; a recuperação, recristalização e crescimento de grão; o cálculo do coeficiente de encruamento e, por fim, os ensaios de dureza Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers. Os estudos desses temas os tornarão capaz de analisar as propriedades dos materiais a partir de ensaios mecânicos destrutivos. Isso tornará você, aluno, cada vez mais apto para selecionar e avaliar diferentes tipos de materiais aplicados em projetos mecânicos.

Então, é chegada a hora do desafio desta unidade de ensino: você está atuando em uma das principais montadoras de automóveis, e recentemente não tem recebido boas notícias com seu último lançamento no mercado. Muitos clientes fizeram reclamações no serviço de atendimento ao cliente (SAC) relatando alguns casos de acidentes provocados pelo deslocamento das rodas dianteiras. Como um dos engenheiros mecânicos da equipe, de imediato, você foi acionado pelo diretor da fábrica para verificar o que está acontecendo. Analisando um dos automóveis que apresentaram esse problema, você concluiu que o problema estava nas buchas de fixação dos braços da suspensão dianteira. Mas qual o problema dessas buchas? As peças foram projetadas corretamente? Qual o material utilizado? É o material mais indicado? Como é possível fazer essa avaliação?

Para responder a essas questões, ao longo da unidade, teremos três situações distintas: no primeiro momento, você indicará ao técnico de laboratório qual ou quais são as análises pertinentes para identificação do material e de suas propriedades mecânicas. Posteriormente, será necessário analisar se esses elementos de fixação estão sujeitos a deformações e, por fim, a partir dos dados obtidos em um ensaio de dureza, você concluirá a análise das propriedades do material utilizado a partir de ensaios mecânicos destrutivos.

Os conteúdos abordados durante os seus estudos lhe darão suporte e segurança para uma boa avaliação do desafio proposto. Dessa forma, empenhe-se, dedique-se e estude. O perfil do profissional de engenharia é o de resolver problemas e você, na sua vida profissional, enfrentará diversos deles, mas o que lhe trará segurança? A resposta é simples: uma boa formação acadêmica, que dependerá em muito do seu empenho e dedicação em se tornar um profissional responsável e respeitado. Bons estudos!

"Você não consegue escapar da responsabilidade de amanhã esquivando-se dela hoje".

Abraham Lincoln

Seção 1.1

Deformações elástica e plástica

Diálogo aberto

Você faz parte da equipe de engenheiros de uma grande montadora de automóveis e a solução de problemas faz parte de sua rotina profissional. Recentemente, a empresa lançou um automóvel no mercado brasileiro e o SAC tem recebido diversas ligações de clientes insatisfeitos devido à quebra de um componente que faz com que as rodas dianteiras se desloquem, o que provocou alguns acidentes. Você foi acionado para verificar o que está acontecendo com esse modelo de carro, já que foi detectado um problema na fabricação. Os clientes deverão ser comunicados sobre um recall. Nesse primeiro momento, as causas serão investigadas, e você já tem em mãos as análises químicas do aço SAE 1020, que foi o metal utilizado na fabricação das buchas, e que, a priori, a escolha do material está correta. O aço SAE 1020 é um aço ao carbono mais comumente utilizado devido a uma boa combinação de propriedades. Segundo a norma SAE (*Society of Automotive Engineers*), uma das mais utilizadas, o aço SAE 1020 possui 0,2% de carbono em sua composição química e é classificado como aço de baixo carbono. Mas se o material está correto, qual será o problema dos elementos de fixação? Para ajudá-lo em suas conclusões, você solicitou um ensaio de tração de uma amostra do aço que foi utilizado e o laudo técnico já está em sua mesa para análise. A quais informações e conclusões você chegou após estudar esse laudo, e o que você deverá reportar para a diretoria?

Nesta seção, vamos discutir sobre os conceitos de tensão e deformação para que você seja capaz de analisar a curva obtida de um ensaio de tração e obter informações importantes quanto às propriedades mecânicas dos materiais, tais como: ductilidade, resiliência e tenacidade. É muito importante compreender os dados obtidos por ensaios mecânicos, como o ensaio de tração, pois são dados que devem ser considerados em um projeto mecânico.

Para os seus estudos, além deste material, faça uso das diferentes bibliografias básicas e complementares que estão disponíveis em nossas bibliotecas e pesquise em sites confiáveis.

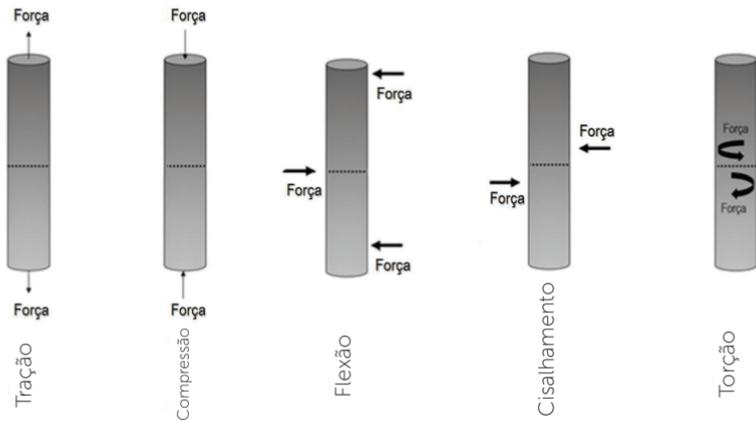
Pronto para iniciarmos nossos estudos?

Muito boa sorte e lembre-se: dedique-se aos estudos!

Não pode faltar

As propriedades mecânicas de um material são aquelas que envolvem uma reação a uma carga aplicada. Essas propriedades determinam a gama de utilidade de um material e estabelecem a vida útil que pode ser esperada de um determinado componente, além de serem utilizadas para ajudar a classificar e identificar um material. As propriedades mecânicas mais comuns são a resiliência, ductilidade, dureza, resistência ao impacto e à fratura. No entanto, essas propriedades de um material não são constantes e muitas vezes mudam em função da temperatura, taxa de carga e outras condições. A aplicação de uma força em um objeto é conhecida como carregamento. Os materiais podem ser submetidos a diferentes cenários de carregamento. Existem cinco condições fundamentais de carga: compressão, flexão, cisalhamento, torção e tração. A compressão envolve a pressão uniaxial de cargas no mesmo sentido. O carregamento por flexão envolve a aplicação de uma carga de modo que o material se curve, resultando, assim, na compressão de um lado desse material e no estiramento do outro. O cisalhamento envolve a aplicação de forças em sentidos opostos, mas com direção semelhante. A torção, como o próprio nome diz, é a aplicação de uma força que provoca a torção do material. A tração é o tipo de carga com a qual duas seções do material, uma de cada lado do plano, são puxadas em sentidos opostos, o que provoca o alongamento delas. A Figura 1.1 mostra as forças aplicadas em cada um dos tipos de carregamento citados, na qual a linha pontilhada indica a metade do comprimento do corpo de prova.

Figura 1.1 | Forças de carregamentos



Fonte: elaborada pelo autor.

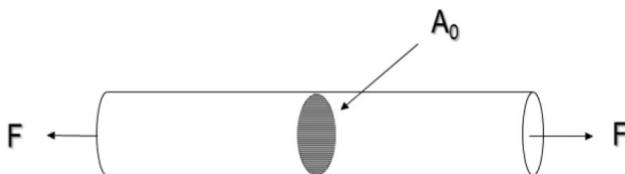
Os carregamentos ocorrem de duas maneiras: se o material é submetido a uma força constante, o carregamento é denominado estático; se o carregamento do material não é constante, isto é, se ocorrem variações na intensidade ou velocidade da força, o carregamento é chamado de dinâmico ou cíclico. A maneira como um material é carregado afeta, e muito, suas propriedades mecânicas, e determina, em grande parte, como um componente falhará ou se o mesmo dará sinais de alerta antes da falha realmente ocorrer.

A palavra tensão é utilizada para expressar o carregamento em termos de força aplicada a uma determinada área da seção transversal de um objeto. Do ponto de vista de carga, a tensão é a força aplicada ou um sistema de forças que tende a deformar um corpo. Já do ponto de vista do que está acontecendo dentro de um material, a tensão é a distribuição interna de forças do corpo que se equilibram e reagem às cargas aplicadas a ele.

A distribuição de tensão pode ou não ser uniforme, dependendo da natureza da condição de carga. Por exemplo, uma barra carregada em tensão terá essencialmente uma distribuição uniforme de tensões de tração. No entanto, uma barra carregada em flexão terá uma distribuição de tensão que varia com o raio da barra. Com o intuito de simplificar os cálculos de engenharia, a tensão é representada como

uma quantidade vetorial que possui magnitude e direção. Por exemplo, a tensão em uma barra carregada axialmente (Figura 1.2) é representada matematicamente igual à força (F) aplicada dividida pela área da seção transversal da barra (A_0), como mostra a Equação 1.1, em que a tensão é representada pela letra grega sigma (σ).

Figura 1.2 | Barra cilíndrica carregada uniaxialmente



Fonte: elaborada pelo autor.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

A unidade de tensão, de acordo com o sistema internacional (SI), é o pascal (Pa) e seus múltiplos: quilo (k), mega (M) e giga (G). A unidade Pascal corresponde a um Newton (N) dividido por metro quadrado (m^2), isto é, $\left(\frac{N}{m^2}\right)$, sendo $1 \text{ Mpa} = 10^6 \text{ N/m}^2$.

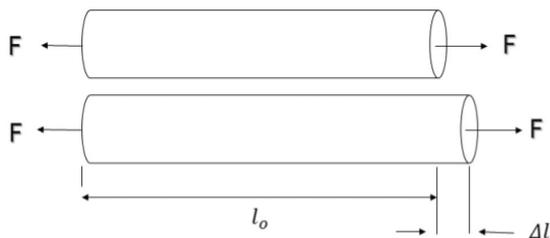
Além da tensão, é importante compreendermos o conceito de deformação, que é a resposta de um sistema a uma tensão aplicada. Quando um material é sujeito a uma força, essa força produz uma tensão que, por sua vez, faz com que o material se deforme. A deformação de engenharia é representada pela letra grega épsilon (ϵ). É definida como a quantidade de deformação na direção da força aplicada dividida pelo comprimento original, conforme apresentado na Equação 1.2.

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

Onde l_0 representada o comprimento original antes de qualquer tipo de carregamento, l_i é o comprimento instantâneo e Δl representa a variação do comprimento, também denominado alongamento

em relação ao comprimento original (CALLISTER JR., 2012). A Figura 1.3 apresenta um material submetido à tração com o comprimento original e após sua deformação.

Figura 1.3 | Deformação após tração

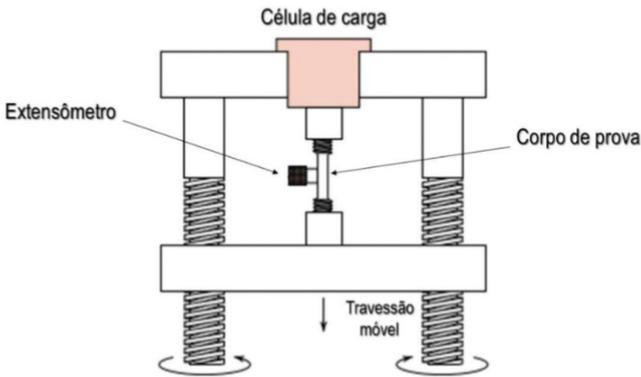


Fonte: elaborada pelo autor.

Diferentemente da tensão, a deformação no SI é adimensional, no entanto, pode ser representada por metros por metros (m/m) ou como porcentagem, em que o valor obtido é multiplicado por 100. Os conceitos de tensão e deformação são importantes para compreendermos os resultados obtidos a partir de um ensaio de tração, que são dados de força em função do alongamento. Assim como a tensão, a distribuição da deformação pode ou não ser uniforme em um elemento estrutural complexo, dependendo da natureza da condição de carga.

As propriedades de resistência à tensão de tração indicam como o material reage às forças nele aplicadas. O ensaio de tração é um ensaio mecânico fundamental no qual uma amostra cuidadosamente preparada em relação à própria forma e às próprias dimensões (padronizadas conforme norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013 - versão corrigida 2:2018) é carregada de uma forma muito controlada enquanto se medem a carga aplicada e o alongamento ao longo do eixo longitudinal da amostra, registrando a sua variação de comprimento. (CALLISTER JR., 2012). A Figura 1.4 mostra uma representação esquemática do equipamento utilizado no ensaio de tração.

Figura 1.4 | Representação esquemática do equipamento utilizado para ensaios de tração



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 151).

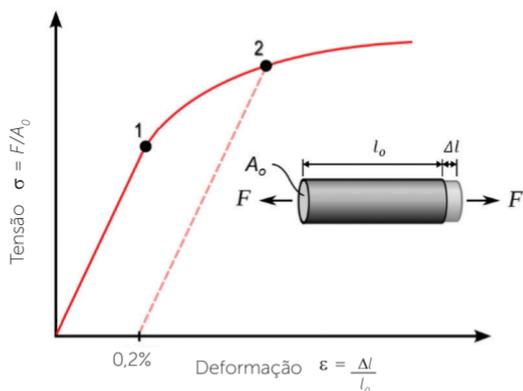


Assimile

Para a realização dos ensaios mecânicos de tração, é comum utilizar um único equipamento, denominado máquina universal de ensaios.

Os testes de tração são usados para determinar algumas propriedades importantes como: o módulo de elasticidade; o limite elástico; o alongamento; o limite proporcional; a redução de área; a resistência à tração; o limite de elasticidade; e outras propriedades de tensão. Os principais produtos de um ensaio de tração são os valores de carga e alongamento, que são posteriormente convertidos em uma curva de tensão x deformação. Uma vez que a tensão e a deformação são obtidas dividindo a carga e o alongamento por valores constantes (dados da geometria da amostra), é possível obtermos a curva tensão-deformação de engenharia. A curva tensão-deformação relaciona a tensão aplicada à sua respectiva deformação resultante e cada material tem sua própria e única curva. Uma curva típica de tensão-deformação de engenharia para ligas metálicas não ferrosas é apresentada na Figura 1.5, em que os pontos 1 e 2 correspondem, respectivamente, ao limite de proporcionalidade e à tensão de escoamento determinado pelo método da pré-deformação.

Figura 1.5 | Curva tensão versus deformação



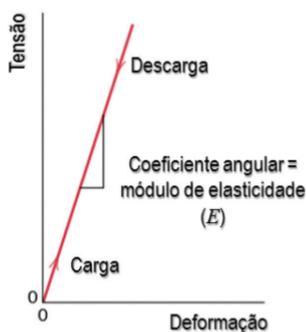
Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8e/Metal_yield.svg/2000px-Metal_yield.svg.png>. Acesso em: 3 nov. 2016.

Na Figura 1.5 é possível observar que a tensão e a deformação aumentam inicialmente com uma relação linear, isto é, a tensão e a deformação são proporcionais. Nessa região de proporcionalidade ocorre a deformação denominada deformação elástica (CALLISTER JR., 2012). Como o próprio nome sugere, para esse tipo de deformação, quando a tensão é reduzida, o material retornará à sua forma original. Nessa região linear, a linha obedece à relação definida como a Lei de Hooke, dada pela Equação 1.3:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.3)$$

Na Equação 1.3, E é o módulo de elasticidade ou módulo Young, que pode ser obtido pela inclinação da linha (coeficiente angular da reta) na região onde a tensão é proporcional à deformação, ou pela razão entre a tensão e a deformação. O módulo de elasticidade (E) define as propriedades de um material à medida que sofre uma tensão, deforma e retorna à sua forma original após a tensão ser removida, e é uma medida da rigidez de um dado material (CALLISTER JR., 2012). A Figura 1.6 apresenta a região de deformação plástica na curva tensão-deformação em um ciclo de carga e descarga.

Figura 1.6 | Esquemático tensão-deformação na região de deformação plástica



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 155).

Como a deformação é adimensional, o módulo de elasticidade (E) terá as mesmas unidades que a tensão (GPa ou psi). O módulo de elasticidade aplica-se especificamente à situação de um componente alongado por uma força de tração. Esse módulo é de interesse, pois quanto maior o seu valor, mais rígido o material. No entanto, para a maioria dos materiais de engenharia, existe um componente da deformação elástica que depende do tempo. Isso significa que após a liberação da carga, será necessário um tempo finito para que se dê a recuperação completa material. Esse comportamento elástico dependente do tempo e é conhecido por anelasticidade (ASKELAND; WRIGHT, 2014).



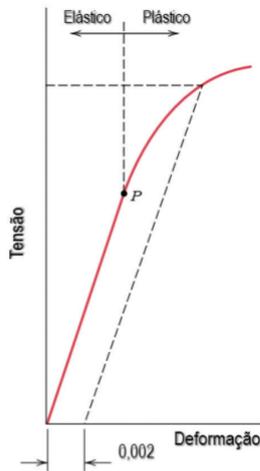
Pesquise mais

Quer saber mais sobre a tensão de cisalhamento? Assista ao vídeo indicado e aprenda um pouco mais sobre esse tema. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=R4byLQ2E9FI>>. Acesso em: 2 nov. 2016.

A deformação elástica, para os metais, persiste apenas até 0,005 de deformação e, a partir desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação, como apresentada pela Lei de Hooke. A deformação passa a ser permanente, mais conhecida como deformação plástica (CALLISTER JR., 2012). A transição entre a deformação elástica e a plástica é gradual para a maioria

dos metais. Na seleção de um material para uma dada estrutura, é importante que a mesma seja projetada de maneira que ocorram somente deformações elásticas quando sujeita a cargas externas. No entanto, é importante conhecer o nível de tensão onde se dá origem a deformação plástica, denominado escoamento. Devido à dificuldade de precisão para se encontrar essa transição nos metais, foi estabelecida uma convenção, na qual é construída uma linha reta e paralela à região elástica a partir de uma deformação de 0,002 ou 0,2%. O ponto de intersecção da reta com a curva tensão-deformação é definido como a tensão limite de escoamento (Figura 1.7).

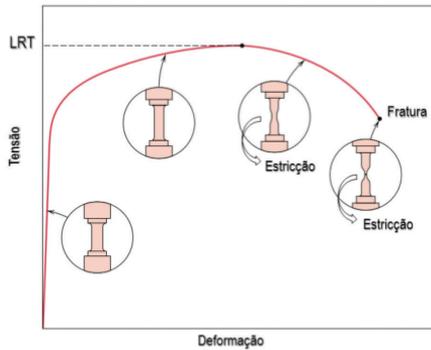
Figura 1.7 | Tensão limite de escoamento a partir do método de pré-deformação



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 160).

Já para materiais que possuem um região elástica não linear, não é possível aplicar o método da pré-deformação. Então, utiliza-se convencionalmente a tensão limite de escoamento como a tensão necessária para provocar uma determinada deformação, como 0,5% (CALLISTER JR., 2012). Posterior ao limite de escoamento, observa-se um valor crescente da tensão e consequente aumento da deformação plástica até atingir um valor máximo, denominado limite de resistência à tração (LRT), que corresponde à tensão máxima suportada por uma estrutura sob tração (Figura 1.8).

Figura 1.8 | Curva tensão-deformação até a fratura do material



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 162).

É importante verificar que a tensão é distribuída uniformemente na região estreita do material até atingir o LRT. Nesse momento, é formada uma região de constrictão, e toda deformação subsequente é restrita a essa região. Esse fenômeno é conhecido como estricção ou empescoamento, e a fratura ocorre nessa região (SHACKELFORD, 2008).



Refleta

Realizando um ensaio de tração, o técnico de um laboratório realizou o ensaio até o limite de escoamento. É correto afirmar que com essa informação é possível projetar o limite de resistência à tração?

Outras propriedades importantes podem ser obtidas por um ensaio de tração, como a ductilidade, resiliência e tenacidade. A ductilidade representa a medida do grau de deformação que foi suportada até a fratura e pode ser expressa quantitativamente pelo alongamento percentual (AL%) ou redução de área percentual (RA%), representadas respectivamente pelas Equações 1.4 e 1.5.

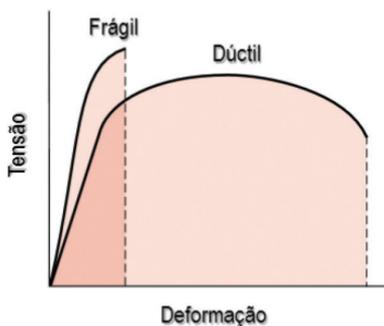
$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \times 100 \quad (1.4)$$

$$RA\% = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100 \quad (1.5)$$

Onde l_f é o comprimento final (no momento da fratura); l_o é o comprimento útil original; A_o é a área original da seção reta e A_f é a área da seção reta no ponto de fratura.

Um material que experimenta uma deformação plástica pequena é denominado frágil, enquanto o material dúctil é aquele que suporta grandes deformações até o momento de fratura, como pode ser observado na Figura 1.9.

Figura 1.9 | Comportamento tensão-deformação em materiais dúcteis e frágeis



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 164).



Exemplificando

Os materiais cerâmicos são exemplos de materiais que possuem comportamento frágil, já que suportam uma deformação nula ou praticamente nula.

A resiliência é a capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e, depois, com a liberação da carga, ter essa energia recuperada. É importante ressaltar que a resiliência é uma propriedade observada dentro do regime elástico. A propriedade associada é o módulo de resiliência (U_r), que representa a energia de deformação por unidade de volume exigida para tensionar um material desde um estado com ausência de carga até a sua tensão limite de escoamento, e é dada pela Equação 1.6 (CALLISTER JR., 2012).

$$U_r = \frac{(\sigma_{\text{escoamento}})^2}{2E} \quad (1.6)$$

Assim, os materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamento elevados e módulos de elasticidade pequenos; tais ligas encontram-se em aplicações como mola (CALLISTER JR., 2012).

Já a tenacidade corresponde à capacidade do material de absorver energia até a ruptura (CALLISTER JR., 2012). A tenacidade para materiais dúcteis e frágeis é calculada, respectivamente, a partir das Equações 1.7 e 1.8.

$$U_t \cong \sigma_r \varepsilon_r \quad (1.7)$$

$$U_t \cong \frac{2}{3} \sigma_r \varepsilon_r \quad (1.8)$$

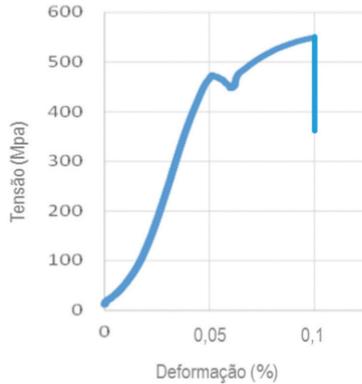
Onde σ_r é a tensão de ruptura e ε_r é o alongamento correspondente à tensão de ruptura.

Sem medo de errar

Você, como parte da equipe de engenheiros de uma grande montadora de automóveis, foi acionado para verificar o que está acontecendo com um modelo de carro que tem apresentado a quebra de elementos de fixação, deslocando, assim, as rodas dianteiras. O material utilizado está correto e, para ajudá-lo em suas conclusões, você recebeu as informações do ensaio de tensão-deformação. A quais informações e conclusões você chegou após estudar esse laudo e o que você deverá reportar para a diretoria?

É dada na Figura 1.10 a curva tensão-deformação (hipotética) obtida do ensaio de tração do aço SAE 1020 após a fabricação dos elementos de fixação.

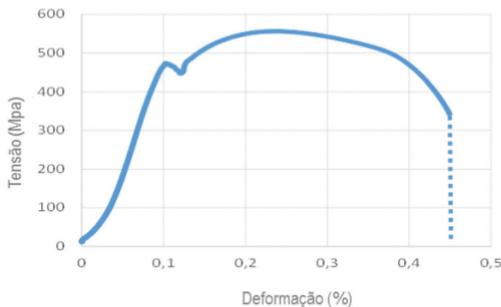
Figura 1.10 | Curva tensão-deformação aço SAE 1020



Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a curva tensão-deformação do aço SAE 1020, verificou-se que o material possui um limite de resistência à tração de aproximadamente 550 Mpa. No entanto, ao analisar a deformação, o aço experimentou uma deformação de apenas 0,1%, mostrando que o aço apresenta um comportamento frágil. Esse comportamento justifica a fratura dos elementos de fixação do automóvel. Porém, esse aço é utilizado para esses fins pois, normalmente, apresentam boa ductilidade. A curva tensão-deformação esperada é dada na Figura 1.11, em que observa-se que o aço 1020 suporta valores acima de 0,4% e menores de 0,5% de deformação, evidenciando sua ductilidade.

Figura 1.11 | Curva tensão-deformação aço SAE 1020 de referência



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, nessa etapa, é possível concluir que as buchas de fixação apresentam demasiada fragilidade quando o esperado seria observar ductilidade do material. Essas evidências deixam claro que mais pesquisas e informações deverão ser investigadas para um laudo conclusivo.

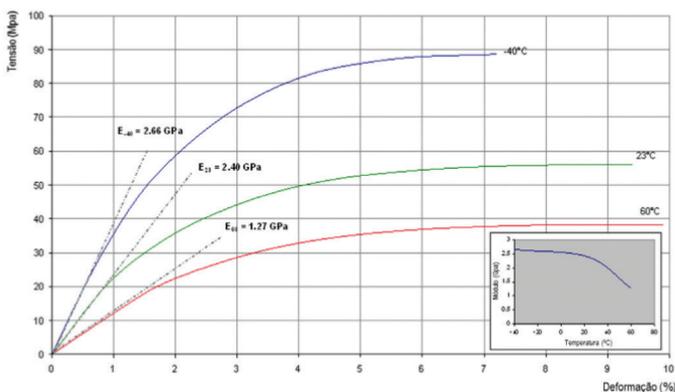
Avançando na prática

Deformações elástica e plástica

Descrição da situação-problema

Uma empresa de material polimérico desenvolveu um polímero nomeado como SACE 232, que será utilizado em condições de temperatura extremas que variam de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Você, como engenheiro mecânico de um laboratório de ensaio mecânicos, avaliou algumas amostras do material em diferentes temperaturas e obteve a curva tensão-deformação dada na Figura 1.12.

Figura 1.12 | Curva tensão-deformação polímero SACE 232



Fonte: <<http://www.ipolytech.com/Tesnile%20vs%20temp.gif>>. Acesso em: 4 nov. 2016.

Com base nas curvas obtidas, o que você pode concluir com relação ao efeito da temperatura nesse material?

Resolução da situação-problema

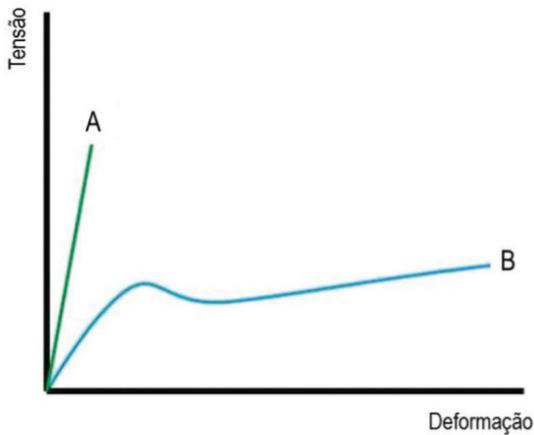
Analisando as curvas tensão-deformação para o polímero nomeado como SACE 232, é possível concluir que a mudança

de temperatura afeta as propriedades mecânicas do material, principalmente a ductilidade. A $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ o material suporta tensões na ordem de 90 Mpa (LRT), com deformação na ruptura de 7,2%. Aumentando-se a temperatura para $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, observa-se uma queda no valor do LRT na ordem de 55 Mpa. No entanto, o material torna-se mais dúctil com deformação na ruptura de 9,4%, mesmo comportamento observado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Novamente, o valor do LRT diminui para 38 Mpa com conseqüente aumento da deformação na ruptura para 9,8%. Dessa forma, é importante considerar a aplicação desse material em temperaturas diferentes, já que em baixas temperaturas o material é mais resistente e experimenta menores deformações, enquanto que em temperaturas mais elevadas o material apresenta maior ductilidade e menor resistência.

Faça valer a pena

1. O ensaio de tração é um ensaio mecânico fundamental no qual uma amostra cuidadosamente preparada é carregada de uma forma muito controlada enquanto se mede a carga aplicada e o alongamento da amostra a uma certa distância.

A seguir, é dada a curva tensão-deformação para os materiais A e B.



Assinale a alternativa correta em relação às propriedades dos materiais A e B.

a) O material A é mais resistente que B e apresenta maior ductilidade.

- b) O material A apresenta comportamento frágil devido a experimentar elevada deformação.
- c) O material A é dito um material frágil, pois suporta elevada tensão e experimenta deformação nula ou quase nula.
- d) O material B é um material frágil, pois suporta valores de tensão inferiores ao material A.
- e) O material B é um material resiliente, pois apresenta a capacidade do material de absorver energia quando é deformado plasticamente até o momento de ruptura.

2. A tensão e a deformação de engenharia são obtidas dividindo-se a carga e o alongamento por valores constantes (dados da geometria da amostra), o que torna possível obter a curva tensão-deformação.

Analise as afirmações a seguir:

- I. A deformação elástica é a região da curva tensão-deformação na qual a tensão e a deformação são proporcionais.
- II. A tensão é distribuída uniformemente na região estreita do material até atingir o LRT.
- III. O ponto de intersecção da reta com a curva tensão-deformação é definido como a tensão de escoamento.

É correto o que se afirma:

- a) Somente em I.
- b) Somente em II.
- c) Somente em III.
- d) Em II e III.
- e) Em I, II e III.

3. Existem cinco condições fundamentais de carga: compressão, flexão, cisalhamento, torção e tensão.

A _____ envolve a pressão uniaxial de cargas no mesmo sentido. A _____ é o tipo de carga na qual duas seções do material, uma de cada lado do plano, tendem a ser puxadas ou alongadas em sentidos opostos, e a _____ envolve a aplicação de uma carga de maneira que um material se curve, resultando na compressão do material em um lado e no estiramento do outro.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas.

- a) compressão, tensão, flexão
- b) tensão, flexão, compressão
- c) flexão, compressão, tensão
- d) compressão, flexão, tensão
- e) tensão, compressão, flexão

Seção 1.2

Tensão e deformação verdadeira

Diálogo aberto

Atuando em uma das principais montadoras de automóveis do país, você, como parte da equipe de engenheiros mecânicos, está investigando por que motivo as buchas de fixação dos braços da suspensão dianteira estão se rompendo. Esse problema causa o deslocamento das rodas dianteiras, colocando em risco a vida dos passageiros. Portanto, você precisa ser muito eficiente na sua investigação. No primeiro momento, você analisou a curva tensão-deformação do aço SAE 1020 utilizado na fabricação desses elementos de fixação. No entanto, é importante compreender outras informações desse aço baseadas na curva tensão-deformação obtida, utilizando a área original do corpo de prova. Mas qual área será utilizada? Quais informações serão agregadas? Nesta seção, serão discutidos os conceitos de tensão e deformação verdadeira. Vamos também compreender quais as diferenças entre elas. Diferentemente da tensão e deformação de engenharia, na tensão e deformação verdadeira, é utilizada a área instantânea, isto é, a área onde ocorre o empescoamento ou estricção.

A partir dos estudos desses temas, você será capaz de compreender a relação entre as propriedades e o comportamento dos materiais de construção mecânica com suas microestruturas, conceitos fundamentais para a avaliação e seleção de diferentes tipos de materiais aplicados em projetos mecânicos.

Além do estudo deste material, não deixe de consultar as bibliografias básicas e complementares, além de sites confiáveis: uma dica importante é a utilização de sites renomados. Na área de engenharia, a grande maioria está em inglês, o que não deve ser um obstáculo, já que a maioria das normas de engenharia e a literatura de apoio encontram-se nesse idioma. Prontos para iniciarmos nossos estudos?

Muito boa sorte e lembre-se: dedique-se aos estudos!

Não pode faltar

Na seção passada, discutimos os conceitos de tensão e deformação de engenharia, que são definidos a partir da área da seção reta original de um corpo de prova antes de qualquer deformação (CALLISTER JR., 2012). No entanto, em algumas situações, é necessário considerar a tensão verdadeira e a deformação verdadeira, que são definidas em função das mudanças que ocorrem na área transversal do corpo de prova, utilizando-se valores instantâneos de área. A curva de tensão-deformação de engenharia não fornece uma verdadeira indicação das características de deformação de um metal porque se baseia nas dimensões originais da amostra, porém, durante um ensaio mecânico, essas dimensões mudam continuamente. A tensão verdadeira (σ_v) é determinada pela razão entre a carga F e a área da seção transversal instantânea (A_i) onde a deformação está ocorrendo, como mostra a Equação 1.9.

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i} \quad (1.9)$$



Refleta

Ao iniciar um ensaio de tração, temos a área original do corpo de prova. No entanto, para calcular a tensão verdadeira, é necessário utilizar a seção transversal do corpo de prova. Qual o momento adequado de obter essa informação?

Do mesmo modo, torna-se imprescindível representar a deformação verdadeira (ϵ_v) definida pelo logaritmo neperiano (\ln) da razão entre o comprimento instantâneo (l_i) e o comprimento original (l_o) (Equação 1.10).

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_o} \quad (1.10)$$

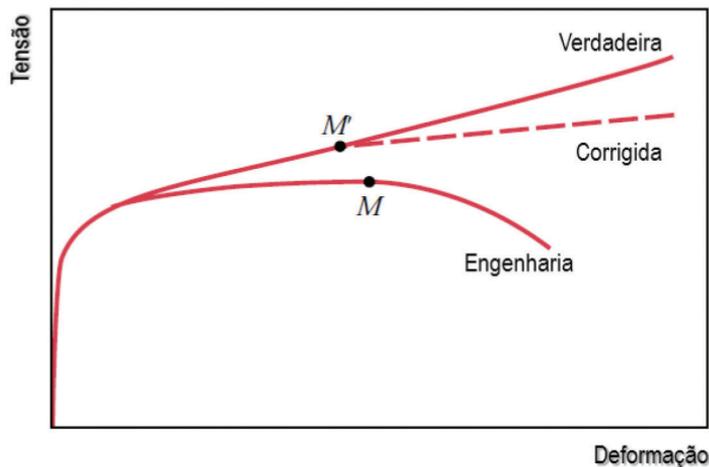
Caso não ocorra alteração de volume durante a deformação, as tensões e deformações verdadeiras se relacionam com as tensões e deformações de engenharia, de acordo com as Equações 1.11 e 1.12.

$$\sigma_v = \sigma(l + \epsilon) \quad (1.11)$$

$$\epsilon_v = \ln(l + \epsilon) \quad (1.12)$$

É importante ressaltar que as Equações 1.11 e 1.12 são válidas somente até o surgimento do pescoço. Após esse ponto, as tensões e deformações devem ser calculadas a partir das medidas de carga, da seção transversal do corpo de prova e do comprimento útil reais (CALLISTER JR., 2012). Utilizando as Equações 1.11 e 1.12, é possível derivar a curva tensão-deformação verdadeira da curva de tensão-deformação de engenharia, como mostra a Figura 1.13. O ponto M observado na Figura 1.13 representa o início da formação do pescoço para a curva de engenharia e corresponde ao ponto M' na curva para as condições verdadeiras. A curva pontilhada corresponde à curva tensão-deformação corrigida, na qual é considerado o complexo estado de tensões no interior da região do empescoamento (CALLISTER JR., 2012).

Figura 1.13 | Comparação das curvas tensão-deformação verdadeira e de engenharia



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 68).

Em muitos metais e ligas, a região da curva tensão-deformação verdadeira entre o início da deformação plástica e o começo do empescoamento pode ser aproximada pela Equações 1.13 (SHACKELFORD, 2008).

$$\sigma_V = k\varepsilon_V^n \quad (1.13)$$

Onde K e n são constantes que variam para cada metal de acordo com sua condição termomecânica. O parâmetro n é denominado expoente de encruamento.

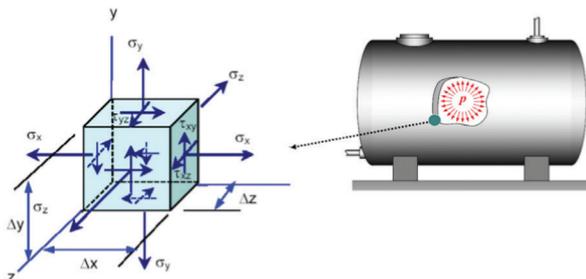
Pesquise mais

Quer saber os valores destas constantes K e n ? O livro indicado a seguir apresenta na página 125 uma tabela com os valores dessas constantes para alguns aços e ligas metálicas.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

As tensões aplicadas em duas ou três dimensões são mais complexas e precisam ser definidas detalhadamente. A força interna que atua sobre uma pequena área de um plano pode ser dividida em três componentes: uma componente normal e duas paralelas ao plano. A componente de força normal dividida pela área fornece as tensões normais, enquanto que as componentes de força paralelas divididas pela área produzem tensões de cisalhamento, representadas pela letra grega tau (τ). Como as tensões são definidas em relação ao plano que passa por um determinado ponto e o número desses planos é infinito, aparece um conjunto infinito de tensões surgindo em um único ponto. No entanto, as tensões em qualquer ponto podem ser calculadas a partir das tensões em três planos ortogonais que passam pelo ponto (x , y e z), como mostra a Figura 1.14.

Figura 1.14 | Decomposição de tensões em um ponto



Fonte: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/utfprtensosmodii.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2016.

Como cada plano tem três tensões (uma normal e duas cisalhantes), o tensor de tensão possui nove componentes de σ_{ij} , em que i indica o plano e j indica a direção, que descrevem completamente o estado de tensão em um ponto. As componentes do tensor de tensão são representadas matricialmente como mostra a Figura 1.15.

Figura 1.15 | Componentes σ_{ij} do tensor de tensão

$$[\sigma] = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Fonte: <https://wikimedia.org/api/rest_v1/media/math/render/svg/0e4551c928a295263b36367bdd1c2402d50ad2bb>. Acesso em: 23 nov. 2016.

Quando um material é submetido a tensão de tração, um alongamento elástico e sua deformação correspondente resultam na direção da tensão aplicada (CALLISTER JR., 2012). Assim, a deformação axial é sempre acompanhada por contrações laterais de sinal oposto nas duas direções mutuamente perpendiculares à deformação axial. As deformações que resultam no aumento de comprimento são designadas como positivas (+) e as que resultam na diminuição de comprimento são designadas como negativas (-). O coeficiente de Poisson, representado pela letra grega nu (ν), é definido como o negativo da razão entre a deformação lateral e axial para um estado de tensão uniaxial, como apresentada na Equação 1.14.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}} \quad (1.14)$$

O coeficiente de Poisson para tensões dentro da faixa elástica é aproximadamente constante. Para um material elástico perfeitamente isotrópico, o coeficiente de Poisson é 0,25 mas, para a maioria dos materiais, o valor está na faixa de 0,25 a 0,35. Para os aços, por exemplo, o valor do coeficiente de Poisson é aproximadamente 0,3. Isso significa que se houver 1 mm/mm de deformação na direção em que a tensão é aplicada, haverá 0,3 mm/mm de deformação perpendicular à direção em que a força é aplicada (CALLISTER JR., 2012).



Um material dito isotrópico é aquele que apresenta valores idênticos de uma propriedade em todas as direções cristalográficas.

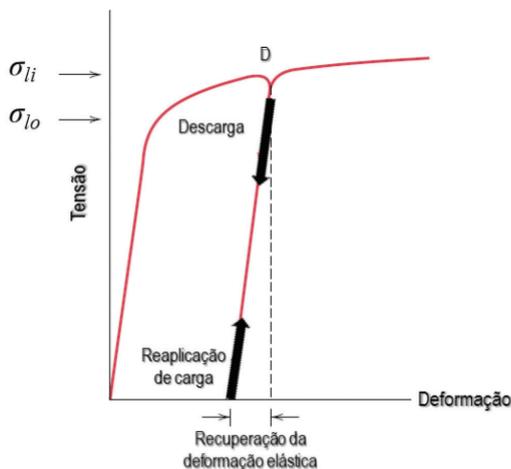
Para materiais isotrópicos, os módulos de cisalhamento e de elasticidade estão relacionados entre si e com o coeficiente de Poisson de acordo com a Equação 1.15.

$$E = 2G(1 + \nu) \tag{1.15}$$

Onde G representa o módulo de cisalhamento, também denominado módulo de rigidez.

Normalmente, um ensaio de tração é realizado até a fratura do material para que se obtenha o máximo de informações possíveis. No entanto, se o ensaio é interrompido após o limite de elasticidade (na região de deformação plástica) e a carga aplicada é liberada, uma porção da deformação plástica é recuperada na forma de deformação elástica, como se observa na Figura 1.16.

Figura 1.16 | Recuperação da deformação elástica.



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 171).

Onde σ_{i0} é designado o limite de escoamento inicial e σ_{iy} é o limite de escoamento após a liberação de carga no ponto D.

Se for iniciado um novo ensaio de tração, a carga re aplicada percorrerá a mesma região linear percorrida durante o descarregamento, no entanto, em sentido oposto, e o escoamento ocorrerá no nível de tensão onde o descarregamento teve início (CALLISTER JR., 2012).

Além da tensão de tração, também temos a denominada tensão por cisalhamento, que ocorre devido a uma força cisalhante. A tensão de cisalhamento é representada pela letra grega tau (τ) e é calculada a partir da razão entre uma força (F) imposta em uma direção paralela às faces superior e inferior e sua área A_0 (Equação 1.16).

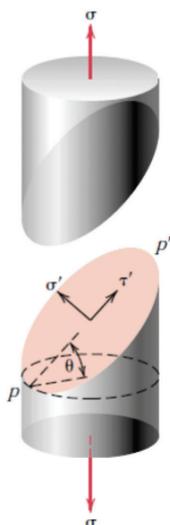
$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (1.16)$$

Ao contrário do alongamento que é obtido pela diferença entre os comprimentos final e original do material, a deformação por cisalhamento é calculada pela diferença angular entre dois segmentos de retas inicialmente perpendiculares, com posterior mudança angular (θ). Veja a Equação 1.17.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (1.17)$$

A Figura 1.17 traz uma representação esquemática mostrando a tensão normal e de cisalhamento que atuam sobre um plano que se encontra orientado em um ângulo θ em relação ao plano tomado como perpendicular à direção ao longo da qual é aplicada uma tensão de natureza de tração (CALLISTER JR., 2012).

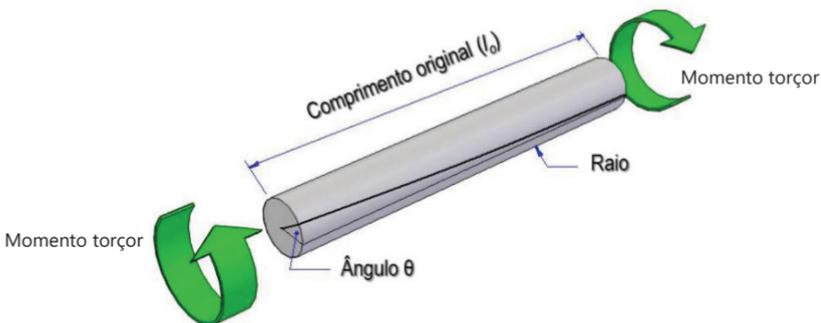
Figura 1.17 | Deformação por cisalhamento



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 152).

É importante compreender a tensão e deformação de cisalhamento, pois a torção é uma variação do cisalhamento, no qual o espécime do material é torcido pela ação do momento torçor, ou seja, o produto de uma força por deslocamento, que produzem um movimento de rotação em torno do eixo longitudinal em uma das extremidades do corpo de prova em relação a outra, como ilustra a Figura 1.18.

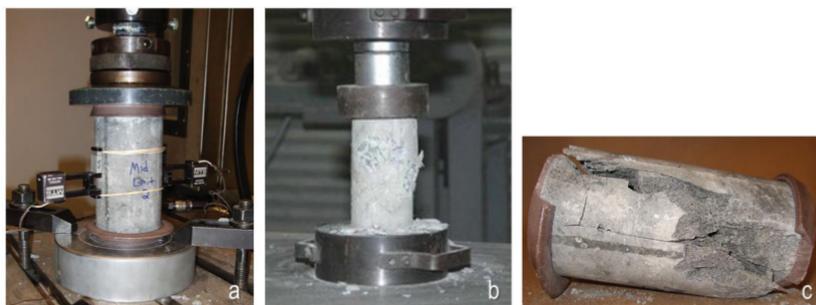
Figura 1.18 | Corpo de prova submetido a forças de torção



Fonte: adaptado de <<https://www.kullabs.com/uploads/Notes/afd7ducsf1VzCPGx.JPG>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

Em teoria, o teste de compressão é simplesmente o oposto do teste de tração com respeito à direção de carregamento. Nos ensaios de compressão, como o próprio nome diz, a amostra é comprimida por forças de natureza compressivas. Por convenção, uma força compressiva é considerada negativa. Como consequência, a tensão também será negativa. Para alguns materiais, como o concreto, a resistência à compressão é a propriedade mais importante. Ela é utilizada para projetar e construir uma estrutura. A resistência à compressão também é comumente utilizada para determinar se uma mistura de concreto atende às especificações de trabalho. A Figura 1.19 apresenta uma sequência do ensaio de compressão em um cilindro de concreto, e a Figura 1.19a mostra o cilindro de concreto posicionado para o início do teste. A Figura 1.19b, por sua vez, apresenta o início da deformação plástica e a Figura 1.19c, o corpo de prova após a fratura total.

Figura 1.19 | Ensaio de compressão em um cilindro de concreto



Fonte:

a) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/Concrete_Compression_Testing.jpg>.

b) <<http://3.imimg.com/data3/BV/NL/MY-75588/concrete-core-testing-250x250.jpg>>.

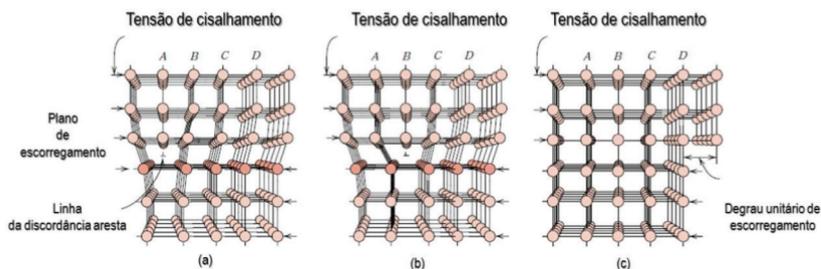
c) <https://en.wikipedia.org/wiki/Properties_of_concrete#/media/File:Failed_Concrete_Cylinder.jpg>.

Acesso em: 26 nov. 2016.

Os diferentes tipos de deformações que observamos em um material podem ser analisados em uma escala microscópica. As deformações plásticas correspondem ao movimento atômico em resposta à aplicação de tensão, no qual ocorrem quebras de ligações interatômicas e a formação de novas ligações. Porém, as deformações também envolvem o movimento de discordâncias, conhecido por escorregamento. Assim, quando um monocristal é deformado sob uma tensão, a deformação plástica ocorre por escorregamento de

planos paralelos bem definidos dentro do cristal. Esses planos são conhecidos como planos de escorregamento, e a deformação ocorre com maior facilidade no plano de maior densidade atômica. A Figura 1.20 apresenta uma representação esquemática do movimento de discordância em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento.

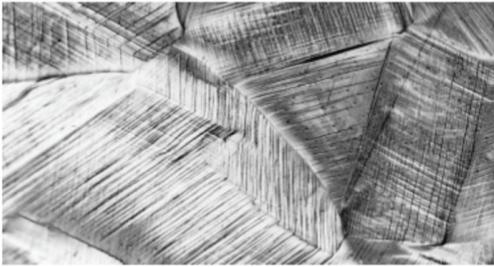
Figura 1.20 | Movimento de discordância em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 199).

A Figura 1.20a apresenta o semiplano em A, enquanto que a Figura 1.20b apresenta o movimento do semiplano em uma unidade atômica de A para B, isto é, as ligações dos átomos do semiplano B são rompidas, e ocorre o movimento da discordância em uma unidade atômica de A para B, sendo reestabelecidas novas ligações em B. Por fim, na Figura 1.20c, o semiplano em B move-se até formar um degrau unitário de escorregamento. Em materiais policristalinos, devido às orientações cristalográficas aleatórias dos grãos, a direção do escorregamento varia de acordo com cada grão. A fotomicrografia da Figura 1.21 exemplifica o movimento das discordâncias que ocorre em um material policristalino, sendo possível observar as linhas de escorregamentos nesse tipo de material.

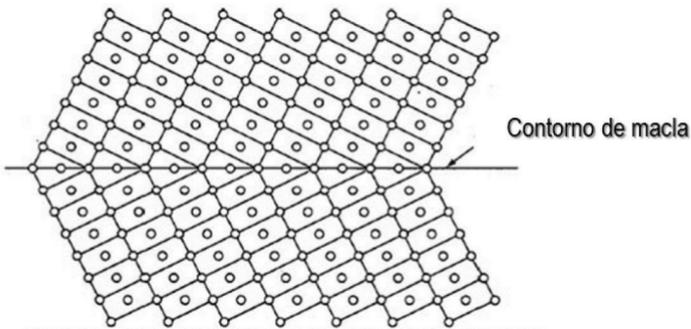
Figura 1.21 | Linhas de escorregamento de um metal policristalino deformado



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 205).

Além do escorregamento, a deformação plástica nos metais também pode ocorrer pelo contorno de maclas. Nesse tipo de defeito, os átomos em um dos lados do contorno de grão estão localizados em posição de imagem em relação aos átomos do outro lado. A região de material entre esses contornos é denominada macla. As maclas são consequências dos deslocamentos atômicos produzidos por forças mecânicas de cisalhamento. A Figura 1.22 traz um diagrama esquemático mostrando um contorno de macla.

Figura 1.22 | Esquemático mostrando o contorno de macla

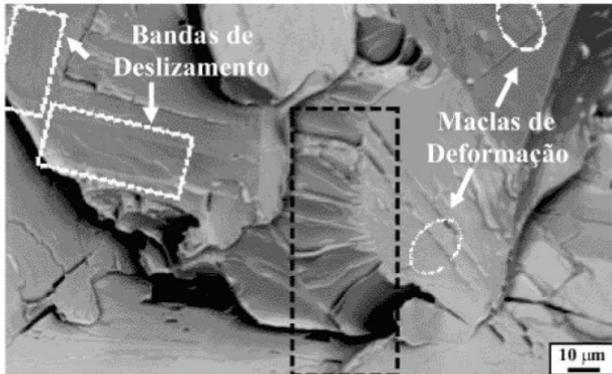


Fonte: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/MR640/questresp_arquivos/image035.jpg>. Acesso em: 26 nov. 2016.



Para melhor compreensão, a Figura 1.23 apresenta uma fractografia de uma parte de um corpo de prova evidenciando as bandas de deslizamento ou escorregamento e as maclas de deformação.

Figura 1.23 | Fractografia de uma parte de corpo de prova metálico



Fonte: <<http://www.scielo.br/img/revistas/rem/v62n2/v62n2a07f5c.gif>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

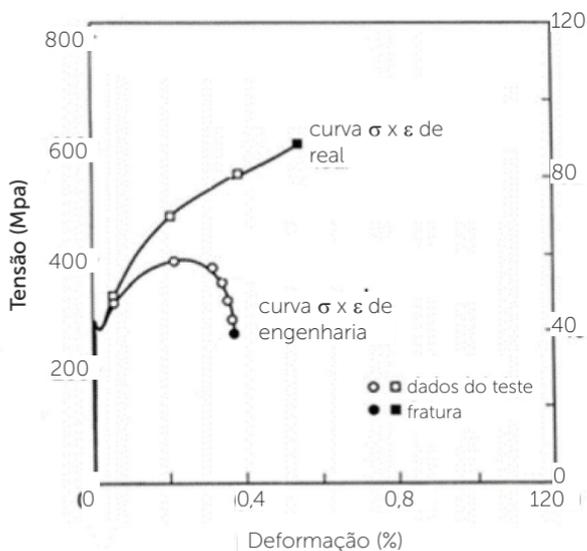
Sem medo de errar

Como um dos engenheiros mecânicos de uma grande montadora, você está investigando por que razão as buchas de fixação dos braços da suspensão dianteiras estão se quebrando. Além da curva de tensão-deformação de engenharia, outras informações podem ser extraídas, como a tensão-deformação verdadeira. Mas qual área será utilizada? Quais informações serão agregadas?

A partir desses estudos, você foi capaz de concluir que a curva de tensão-deformação de engenharia não fornece uma verdadeira indicação das características de deformação do aço SAE 1020, pois a engenharia se baseia nas dimensões originais da amostra e durante um ensaio mecânico essas dimensões mudam continuamente. Já a tensão verdadeira é determinada pela razão entre a carga e a área da seção reta instantânea, na qual a deformação está ocorrendo. A Figura

1.24 apresenta a curva tensão-deformação verdadeira (hipotética) para o aço 1020 utilizado na fabricação dos elementos de fixação.

Figura 1.24 | Curvas tensão-deformação de engenharia e verdadeira para um aço AISI 1020



Fonte: adaptada de Boyer (1990, p. 5).

A partir da análise das curvas de tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira, você foi capaz de confirmar a análise feita em um primeiro momento: o material apresenta uma elevada resistência, o que lhe confere um comportamento de material frágil, fato constatado na quebra das buchas de fixação dos braços da suspensão dianteira. A partir de agora, outras propriedades serão investigadas.

Avançando na prática

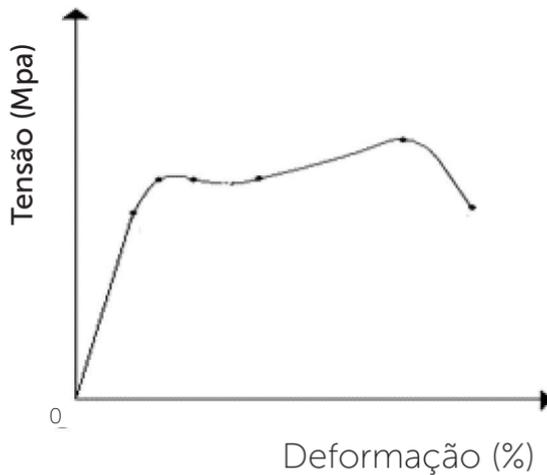
Tensão e deformação verdadeira

Descrição da situação-problema

Atuando há mais de uma década como engenheiro em um laboratório de análises técnicas, você recebeu o mais novo colaborador

do setor para treinamento. Você solicitou que o recém-formado realizasse um ensaio de tração em um material metálico e emitisse um laudo com o parecer técnico. No laudo emitido pelo jovem, além da curva de tensão-deformação de engenharia, constava o parecer técnico finalizado com o seguinte parágrafo: “A partir dos dados obtidos pelo ensaio de tração da liga de magnálio, concluiu-se que o material apresenta elevada deformação real, característica de um material altamente dúctil”. Com o laudo em mãos, qual feedback o novo trabalhador receberá? Será que existe algum problema no laudo? A Figura 1.25 apresenta a curva de tensão-deformação de engenharia do material.

Figura 1.25 | Curva hipotética tensão x deformação de engenharia



Fonte: <<http://i.imgur.com/4eMo74m.png>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

Resolução da situação-problema

A elaboração de um laudo técnico requer atenção redobrada. Após o estudo desta seção, vimos que a tensão verdadeira e deformação verdadeira são definidas em função das mudanças que ocorrem na área transversal do corpo de prova utilizando-se valores instantâneos de área, enquanto que a curva de tensão-deformação de engenharia não fornece uma verdadeira indicação das características de deformação de um metal porque se baseia nas dimensões originais

da amostra. No laudo consta a curva de tensão-deformação de engenharia, e a informação está correta. No entanto, ao redigir o laudo, o novo funcionário utilizou o termo deformação real, que é sinônimo de deformação verdadeira. Assim, é necessário fazer a correção do laudo, que pode ser de duas maneiras: 1 – utilizar a curva tensão x deformação verdadeira; ou 2 – substituir o termo deformação real por deformação de engenharia. Como vimos, a Figura 1.24, anteriormente citada, apresenta uma comparação.

Faça valer a pena

1. Os conceitos de tensão e deformação de engenharia são definidos a partir da área da seção reta original de um corpo de prova antes de qualquer deformação (CALLISTER JR., 2012). No entanto, em algumas situações, é necessário considerar a tensão verdadeira e a deformação verdadeira.

Analise as afirmações a seguir:

- I. A tensão verdadeira é determinada pela razão entre a carga e a deformação da área da seção reta do corpo e prova.
- II. A deformação por cisalhamento é calculada pela diferença angular entre dois segmentos de retas inicialmente perpendiculares, com posterior mudança angular.
- III. Em um material submetido à tração, a deformação axial é sempre acompanhada por contrações laterais de sinal oposto nas duas direções mutuamente perpendiculares à deformação axial.

É correto o que se afirma em:

- a) Somente I.
- b) Somente II.
- c) Somente III.
- d) Apenas I e III.
- e) Apenas II e III.

2. Os diferentes tipos de deformações observados em um material podem ser analisados em uma escala microscópica.

As deformações _____ correspondem ao _____ em resposta à aplicação de tensão, no qual ocorrem _____ de ligações interatômicas.

Assinale a alternativa que preenche as lacunas corretamente:

- a) plásticas - movimento atômico - quebras
- b) plásticas - alongamento - formações
- c) elásticas - movimento atômico - formações
- d) elásticas - movimento do plano - quebras
- e) plásticas - alongamento - quebras

3. O coeficiente de Poisson é definido como o negativo da razão entre a deformação lateral e axial para um estado de tensão uniaxial.

Assinale a alternativa correta em relação ao coeficiente de Poisson:

- a) O coeficiente de Poisson para tensões acima da faixa elástica é aproximadamente constante.
- b) O coeficiente de Poisson para tensões dentro da faixa elástica é aproximadamente constante.
- c) O coeficiente de Poisson é válido somente na região plástica.
- d) Para um material elástico perfeitamente anisotrópico, o coeficiente de Poisson é igual 0,25.
- e) Para um material plástico perfeitamente isotrópico, o coeficiente de Poisson é igual a 0,25.

Seção 1.3

Ensaio de dureza e mecanismos de aumento de resistência dos metais

Diálogo aberto

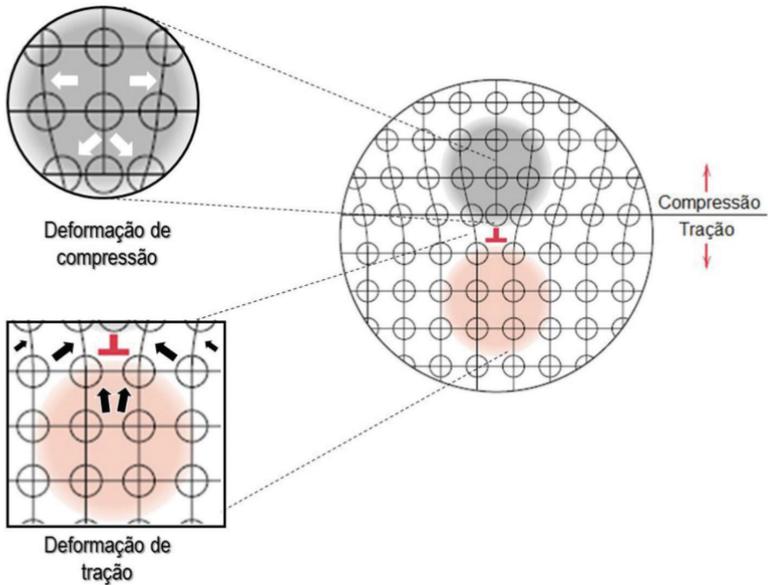
O cotidiano de uma equipe de engenharia dentro de uma empresa é marcado pela detecção, avaliação e resolução de problemas. Você, como integrante da equipe de engenheiros mecânicos de uma montadora de automóveis, está estudando as causas que levam à quebra das buchas de fixação das rodas dianteiras de um modelo de automóvel recém-colocado no mercado brasileiro. Nessa investigação, primeiramente você solicitou um ensaio de tração e analisou a curva tensão-deformação do aço SAE 1020, material utilizado na fabricação desses componentes. Posteriormente, você realizou uma comparação entre as curvas tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira e, a partir desses estudos, você concluiu que o material apresentava uma elevada resistência o que lhe conferia um comportamento de material frágil, fato constatado na quebra das buchas de fixação dos braços da suspensão dianteira. No entanto, para finalizar esse trabalho e emitir um laudo técnico conclusivo, a quais outros testes o material poderá ser submetido? Nesta última seção, vamos conhecer os ensaios de dureza, que é uma propriedade mecânica que consiste na medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Bons estudos!

Não pode faltar

Na seção anterior, vimos que a capacidade de um material cristalino se deformar plasticamente depende do movimento das discordâncias presentes no cristal. As características das discordâncias são importantes, pois influenciam as propriedades mecânicas dos materiais. A tensão e deformação existentes em torno de uma discordância influenciam na interação de outras discordâncias, impurezas etc. Os metais, por exemplo, quando sujeitos à deformação plástica, uma fração da energia de deformação é retida internamente, enquanto o

restante é dissipado em forma de calor. A maior parte da energia que foi retida consiste em uma energia que está associada às discordâncias (CALLISTER JR.; RETHWISH, 2012). A Figura 1.26 apresenta a região de tensões formadas ao redor de uma discordância aresta.

Figura 1.26 | Regiões de tensões ao redor de uma discordância aresta



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 201).

Na Figura 1.26 é possível observar que em razão da presença de um semiplano atômico extra os átomos da vizinhança são comprimidos, isto é, os átomos experimentam uma tensão de compressão. Em contrapartida, os átomos que estão localizados diretamente abaixo do semiplano são "esticados", isto é, experimentam uma deformação de tração. As discordâncias interagem entre si. Quando estão no mesmo plano e no mesmo sentido, se repelem. Quando estão em sentidos opostos, se anulam. Em geral, os campos de tensão das discordâncias aumentam e se repelem quando estão próximos devido ao aumento da energia potencial, ocasionando o estiramento de uma região do material. No entanto, as discordâncias não se movem com o mesmo grau de facilidade em todos planos e direções cristalográficas. Sempre haverá um plano preferencial com direções específicas que

são denominados sistemas de escorregamento (CALLISTER JR.; RETHWISH, 2012).

Os sistemas de escorregamento dependem da estrutura cristalina do material, enquanto que o plano e a direção de escorregamento apresentam elevada compactação atômica.

As estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de face centrada (CFC) possuem um número grande de sistemas de escorregamento, o que torna os materiais que apresentam essas estruturas mais dúcteis. Em contrapartida, os materiais com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) são frágeis devido à limitação de sistemas de escorregamento. A Tabela 1.1 apresenta alguns sistemas de escorregamento para metais CCC, CFC e HC.

Tabela 1.1 | Sistemas de escorregamento para metais CCC, CFC e HC

Metais	Plano	Direções	Sistemas possíveis
	Cúbico de Faces Centradas		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$	12
	Cúbico de Corpo Centrado		
α -Fe, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$	12
α -Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$	12
α -Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$	24
	Hexagonal Compacto		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	{10 $\bar{1}$ 0}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	{10 $\bar{1}$ 1}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

Fonte: Callister Jr. (2001, p. 204).



Pesquise mais

Quer saber mais sobre o fenômeno de escorregamento? Não deixe de consultar as bibliografias indicadas. Uma dica é o estudo do tema:

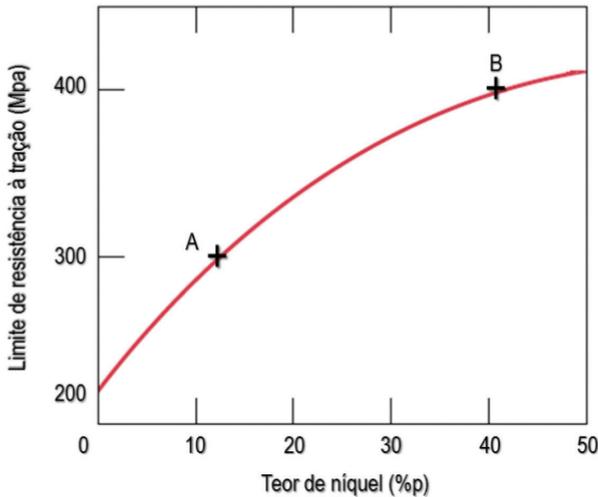
CALLISTER JUNIOR, W. D. Escorregamento em monocristais. In: _____. **Fundamento da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2006. p. 182-184.

Como dito anteriormente, a capacidade de um material cristalino de se deformar plasticamente depende do deslocamento das discordâncias. Dessa forma, restringir ou impedir o movimento de discordâncias resultará nos aumentos da resistência e da dureza. Entre as técnicas utilizadas no aumento da resistência destacam-se a redução do tamanho de grão, solução sólida e o encruamento. O tamanho dos grãos de um metal policristalino influencia diretamente nas propriedades do mesmo metal. O contorno dos grãos atua como uma barreira ao movimento das discordâncias de duas maneiras: quando os grãos adjacentes apresentam diferentes orientações cristalográficas e pela desordenação atômica no interior do contorno de grão, que resulta na descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para o outro (CALLISTER JR.; RETHWISH, 2012). Assim, quanto menor for o tamanho dos grãos, maior será a resistência do material devido à área total de contornos de grãos.

Outro mecanismo utilizado para o aumento da resistência e dureza de um metal ou liga metálica é pela adição de átomos de impurezas, denominado aumento de resistência por solução sólida. As soluções sólidas podem ser formadas quando os átomos de impurezas assumem a localização dos átomos originais, formando uma solução sólida substitucional, ou quando os átomos de impureza se localizam nos espaços vazios entre os átomos, formando uma solução sólida intersticial.

O bronze e o latão são exemplos da formação de soluções sólidas substitucionais. No bronze, os átomos de cobre são substituídos por átomos de estanho, enquanto que no latão, os átomos de cobre são substituídos por átomos de zinco. O aço é um exemplo típico da formação de uma solução sólida intersticial. Os metais puros são mais moles e fracos quando comparados com as ligas compostas pelo mesmo metal de base. A Figura 1.27 traz a curva do limite de resistência à tração para a liga cobre-níquel em função do teor de níquel presente na liga.

Figura 1.27 | Variação do limite de resistência à tração para ligas cobre-níquel



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 209).

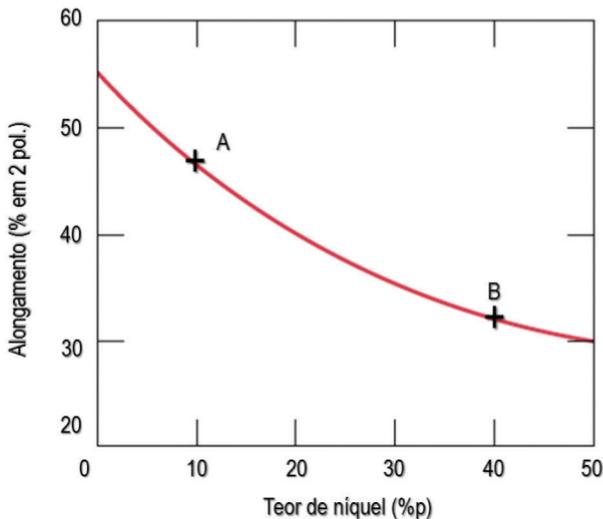
Analisando os pontos da curva do limite de resistência à tração da figura acima, verificamos que no ponto A temos uma liga de concentração aproximada de 13%p de níquel e 87%p de cobre com LRT (limite de resistência à tração) igual a 300 Mpa. Se aumentarmos a quantidade de níquel (ponto B) para uma concentração de 40%p níquel e 60%p cobre, o LRT aumenta para 400 Mpa, portanto, é possível verificar que o níquel atua como impureza na liga metálica, aumentando a resistência mecânica do cobre. No entanto, o aumento da resistência mecânica provoca a redução da ductilidade.

Assumindo as mesmas concentrações das ligas cobre-níquel, para o ponto A igual a 13%pNi 87%pCu e para B igual a 40%p Ni e 60%p Cu, observamos que, apesar da concentração de níquel aumentar o LRT, esse aumento resulta na diminuição da ductilidade para essa liga metálica. A liga no ponto A apresenta um alongamento percentual de aproximadamente 55, enquanto no ponto B, a ductilidade é reduzida para 32%, como mostra a Figura 1.28.



A adição de impurezas e outros mecanismos são utilizados para obtermos determinadas propriedades dos materiais. Mas a adição de impurezas traz sempre a melhoria de todas as propriedades de uma liga metálica? Ao manipular as propriedades dos materiais, o que devemos considerar?

Figura 1.28 | Variação da ductilidade para ligas cobre-níquel



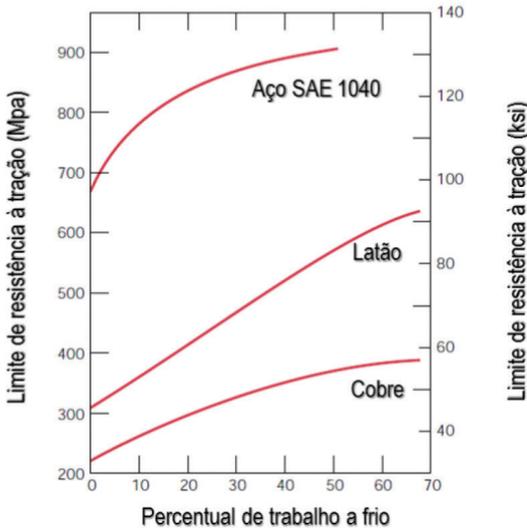
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 209).

O encruamento é outro mecanismo utilizado para deixar um metal dúctil mais resistente através da deformação plástica. Quando um metal é deformado plasticamente, ocorre o movimento das discordâncias, que geram tensões adicionais. Assim, quanto maior for a quantidade de discordâncias em um metal, maior será a dificuldade de movimento dos planos atômicos, que resultará no endurecimento do material. Esse fenômeno também é conhecido como endurecimento por trabalho a frio, pois ocorre a uma temperatura suficientemente baixa, que impossibilita que os átomos se reorganizem. A deformação plástica, muitas vezes, é representada como percentual de trabalho a frio (%TF).

$$\%TF = \left(\frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \times 100 \quad (1.18)$$

Onde A_o é a área original da seção reta que experimenta a deformação e A_d é a área após a deformação (CALLISTER JR.; RETHWISH, 2012). A Figura 1.29 apresenta o aumento do LRT do aço 1040, latão e cobre com o aumento do trabalho a frio.

Figura 1.29 | Limite de resistência à tração em função do trabalho a frio



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 211).

Adicionalmente ao percentual de trabalho a frio, também é possível calcularmos o expoente de encruamento n , que quantifica o aumento da resistência ao escoamento devido ao fenômeno de encruamento. O expoente de encruamento é definido como o gradiente da curva de escoamento $\sigma = k \cdot \epsilon^n$ no ponto de carregamento máximo do ensaio de tração.

$$n = \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon} \right) F_{max} \quad (1.19)$$

Nesse ponto, a derivada da força é nula

$$dF = Ad\sigma + \sigma dA = 0 \quad (1.20)$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = - \frac{dA}{A} \quad (1.21)$$

A partir da definição do incremento de deformação real, temos:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon \text{ ou } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (1.22)$$

Dessa forma, no ponto de carga máxima, temos $\varepsilon = \varepsilon_u$. Assim, com $\sigma = k \cdot \varepsilon^n$, temos:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = kn\varepsilon_u^{n-1} \quad (1.23)$$

Como resultado, temos que $n = \varepsilon_u$, isto é, o expoente de encruamento é numericamente igual ao valor da deformação verdadeira no ponto de carga máxima. Assim, quando $\varepsilon = 1$, o valor da tensão de escoamento é igual ao valor do coeficiente de resistência k . O expoente de encruamento representa a medida da habilidade de um metal em ser submetido ao encruamento: quanto maior sua magnitude, maior o encruamento em uma determinada intensidade de deformação plástica.

O aumento da resistência por encruamento pode ser revertido quando o material é submetido a tratamentos térmicos apropriados. Dessa forma, o metal recupera suas propriedades originais. A restauração das propriedades originais é resultado dos processos de recuperação e recristalização que ocorrem em elevadas temperaturas e que podem ser seguidos por um crescimento de grão (CALLISTER JR.; RETHWISH, 2012).

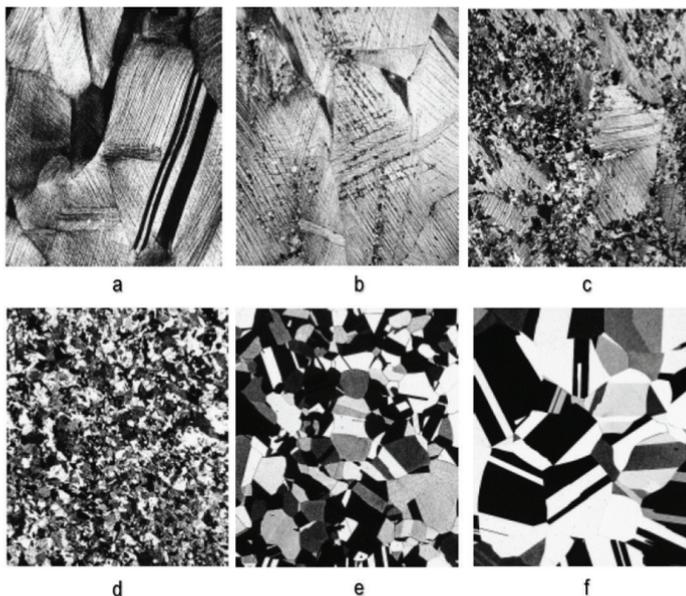


Assimile

Tratamento térmico é definido como o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas, a que os materiais são submetidos.

Quando um metal endurecido por encruamento é mantido em elevadas temperaturas, ocorre o aumento da difusão atômica, que libera parte da energia de deformação interna. A difusão aumenta rapidamente com o aumento da temperatura e isso permite que os átomos de regiões intensamente deformadas se movam para posições com menor grau de deformação. Em outras palavras, os átomos tornam-se livres para se movimentarem e recuperarem uma posição normal na estrutura de rede. Esse movimento é conhecido como recuperação, no qual as tensões residuais internas são reduzidas devido à redução no número de discordâncias e formação de baixa energia de deformação. Após o processo de recuperação, observa-se que os grãos ainda apresentam um estado de deformação relativamente elevado. Na recristalização ocorre a formação de um novo conjunto de grãos que substituem os grãos deformados por encruamento e as propriedades mecânicas retornam aos seus estados originais, isto é, o metal volta a ser mais dúctil e a apresentar menor resistência. A recristalização é um processo que depende da temperatura, da quantidade de tempo que o metal será mantido nessa temperatura e da quantidade de aumento de resistência por deformação que o material experimentou. Quanto mais endurecido o metal, mais baixa será a temperatura de recristalização. Além disso, é necessária uma quantidade mínima (tipicamente de 2% a 20%) de trabalho a frio para que ocorra qualquer quantidade de recristalização. O tamanho dos novos grãos também é dependente da quantidade do aumento da resistência. Assim, quanto maior o aumento da resistência, maior será a quantidade de novos núcleos e menor será o tamanho dos grãos resultantes. Por fim, após a recristalização completa, se o metal for deixado a uma temperatura elevada, os grãos continuarão crescendo devido à difusão que ocorre através dos contornos de grão e à menor superfície por unidade de volume dos grãos maiores. Assim, os grãos maiores perderão menores quantidades de átomos e o seu crescimento ocorrerá em função dos grãos menores. Como consequência, temos que os grãos maiores reduzirão a força e a dureza do material. A Figura 1.30 traz fotomicrografias mostrando alguns estágios da recristalização e do crescimento de grãos de latão.

Figura 1.30 | Fotomicrografias dos estágios da recristalização e do crescimento de grãos de latão



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 215).

Legenda: (a) grãos submetidos a 33%TF; (b) início da recristalização após aquecimento 3 s a 580 °C; (c) grãos recristalizados (4 s a 580 °C); (d) recristalização completa (8 s a 580 °C), (e) crescimento de grãos após 15 min a 580 °C; (f) crescimento de grãos após 10 min a 700 °C.

Um dos ensaios utilizados para aferir o aumento da resistência nos materiais são os ensaios de dureza. A dureza é a resistência de um material à deformação localizada. Nos metais, a deformação considerada é a deformação plástica da superfície. As medidas de dureza são amplamente utilizadas para o controle de qualidade de materiais porque são rápidas e consideradas como testes não destrutivos quando as marcas ou entalhes produzidos pelo teste estão em áreas de baixa tensão. Existe uma grande variedade de métodos usados para determinar a dureza de um material. Entre eles destacam-se: o ensaio de dureza Brinell, o mais antigo dos métodos de teste de dureza ainda hoje em uso, que utiliza uma máquina de mesa para aplicar uma carga especificada através de um indentador esférico de um diâmetro especificado. O número de dureza Brinell, ou simplesmente

o número de Brinell, é obtido dividindo-se a carga utilizada, em quilogramas, pela área de medição da indentação, em milímetros quadrados, deixada na superfície de ensaio. O ensaio Brinell é usado para determinar a dureza de peças forjadas e fundidas que apresentam uma estrutura de grãos maiores. Já o ensaio de dureza Rockwell também utiliza uma máquina para aplicar uma carga específica e, em seguida, mede-se a profundidade da impressão resultante. O indentador pode ser uma esfera de aço de diâmetro específico ou um cone esférico com ponta de diamante de ângulo de 120° e raio de ponta de 0,2 mm, denominado Brale. Nesse ensaio, uma pré-carga de 10 kg é aplicada pela primeira vez, o que causa uma pequena impressão inicial para acomodar o penetrador e remover os efeitos de quaisquer irregularidades superficiais. Em seguida, o mostrador é ajustado para zero e a carga principal é aplicada. Após a remoção da carga principal, a leitura da profundidade é tomada. O número de dureza pode então ser lido diretamente a partir da escala. O indentador e a carga de ensaio utilizados determinam a escala de dureza utilizada (A, B, C etc.).



Exemplificando

Para materiais macios, tais como ligas de cobre, aço macio e ligas de alumínio, uma bola de aço de $1/16$ de diâmetro é usada com uma carga de 100 quilos e a dureza é lida na escala B. Ao testar materiais mais duros, como muitas ligas de aço, um cone de diamante de 120° é usado com até uma carga de 150 kg e a dureza é lida na escala C. Existem várias escalas Rockwell que não as escalas "B" e "C" (que são denominadas escalas comuns). Um valor de Rockwell adequadamente relatado terá o número de dureza seguido de "HR" (dureza Rockwell) e a letra de escala. Por exemplo, 50 HRB indica que o material tem uma leitura de dureza de 50 na escala B.

O ensaio de dureza superficial Rockwell é usado para testar materiais finos, superfícies de aço levemente cementadas ou peças que podem dobrar ou deformar sob as condições do teste comum. Nesse teste utiliza-se os mesmos indentadores que no teste Rockwell padrão, mas as cargas são menores, sendo 3 kg a menor carga e a carga principal de 15 ou 45 kg, de acordo com o indentador utilizado. Por fim, os ensaios

de dureza Vickers e Knoop são usados para medir a dureza de finas películas e a dureza superficial. Nesses ensaios são utilizadas cargas de 10 g a 1.000 g e esses métodos são conhecidos como testes de microdureza, com base na carga e no tamanho do penetrador. Assim, os ensaios de dureza Vickers e Knoop são indicados para a medição da dureza em regiões pequenas e selecionadas de um corpo de prova.

Sem medo de errar

Chegamos ao final dos estudos desta unidade de ensino, e você, como um dos engenheiros mecânicos que trabalha em uma montadora de automóveis, está investigando as causas de um problema em um dos modelos recém-lançados. Além dos ensaios de tração e das curvas de tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira, a quais outros testes o material poderá ser submetido? Durante nossos estudos, aprendemos que existem diversos mecanismos de aumento de resistência de um metal, como a redução do tamanho de grão, solução sólida e o encruamento. O contorno dos grãos atua como uma barreira ao movimento das discordâncias, já a formação de uma solução sólida ocorre pela adição de impureza e, por fim, o encruamento pode ser definido como o aumento na dureza e na resistência de um metal à medida que ele é submetido à deformação plástica a uma temperatura inferior à sua temperatura de recristalização. Ao submeter os elementos de fixação a um ensaio de dureza Brinell, realizado com um durômetro Brinell, (Figura 1.31), obteve-se dureza igual a 135HB. Com o resultado do teste de dureza, é possível concluir que as buchas de fixação apresentam elevadas dureza e resistência mecânica, o que torna o material frágil, justificando a quebra desses elementos de fixação quando sujeitos às condições de uso.

Figura 1.31 | Durômetro Brinell digital



Fonte: <<http://www.importecnica.com.br/HB-3000C.jpg>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

Uma das causas prováveis é a utilização do tratamento térmico inadequado para os elementos de fixação. Dessa forma, faz-se necessária a divulgação do recall para que os clientes que adquirirem esse modelo de automóvel compareçam às concessionárias para substituição das peças.

Avançando na prática

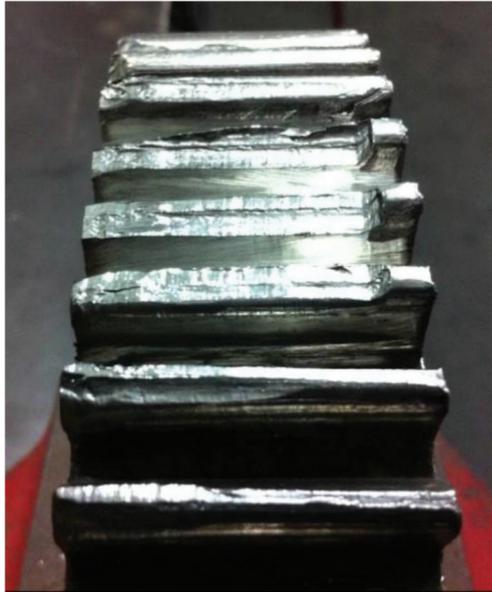
De olho no trator

Descrição da situação-problema

Como estudante de engenharia, todos os dias você procura inventar algo que ajude a rotina da família na pequena fazenda de seus pais. Recentemente, um dos trabalhadores pediu ajuda, pois o trator

estava com problema. Você identificou que o problema estava na engrenagem de transmissão. Ao retirar a engrenagem do trator, você verificou que os dentes estavam excessivamente desgastados (Figura 1.32).

Figura 1.32 | Dentes de engrenagens com desgaste excessivo



Fonte: <<https://i.ytimg.com/vi/3ckhhj-XDyY/maxresdefault.jpg>>. Acesso em: 8 dez. 2016.

Quais as possíveis causas desse desgaste nos dentes da engrenagem?

Resolução da situação-problema

O desgaste excessivo pode ser resultado de uma dureza inadequada, isto é, a superfície da engrenagem apresenta baixa dureza (mole) quando, na verdade, nesse tipo de elemento mecânico, o adequado é que as superfícies dos dentes da engrenagem apresentem dureza adequada para resistir ao desgaste. Nas engrenagens observa-se que a dureza superficial é maior que a dureza no centro da peça, já que uma dureza excessiva no centro torna a peça frágil.

Faça valer a pena

1. A capacidade de um material cristalino de se deformar plasticamente depende do movimento das discordâncias presentes no cristal. As características das discordâncias são importantes, pois influenciam as propriedades mecânicas dos materiais.

Sobre os metais, é correto o que se afirma em qual alternativa?

a) Quando sujeitos à deformação plástica, uma fração da energia de deformação é retida internamente, enquanto que o restante é dissipado em forma de calor.

b) Quando sujeitos à deformação plástica, toda energia de deformação é retida internamente e retida como calor.

c) Quando sujeitos à deformação elástica, os metais sofrem modificações nas estruturas permanentes devido ao calor dissipado.

d) Quando sujeitos à deformação elástica, uma fração da energia de deformação é retida, ocasionando a deformação plástica do material.

e) A maior parte da energia dissipada quando o material é deformado plasticamente consiste em uma energia que está associada às discordâncias.

2. Os sistemas de escorregamento dependem da estrutura cristalina do material, e o plano de escorregamento é aquele que apresenta a densidade de compactação atômica, da mesma forma que a direção de escorregamento nesse plano, que será aquela que apresenta a maior compactação atômica.

Dados os metais Cu, Ag e Au assinale a alternativa que apresenta a estrutura cristalina correta desses metais e a quantidade de sistemas possíveis de escorregamento.

a) CCC, 12.

b) CCC, 24.

c) CFC, 12.

d) CFC, 6.

e) HC, 3.

3. A dureza é a resistência de um material à deformação localizada. Nos metais, a deformação considerada é a deformação plástica da superfície. "O indentador pode ser uma esfera de aço de diâmetro específico ou um cone esférico com ponta de diamante de ângulo de 120° e raio de ponta de 0,2 mm, denominado Brale."

Assinale a alternativa que apresenta corretamente a qual(is) ensaio(s) de dureza refere(m)-se o trecho citado:

- a) Brinell.
- b) Rockwell.
- c) Vickers.
- d) Knoop.
- e) Vickers e Knoop.

Referências

ASKELAND; D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

BOYER, H. **Atlas of stress-strain curves**. 2. ed. Ohio: ASM International: Ohio, 1990.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

CALLISTER JR., W. D. Escorregamento em monocristais. In: _____. **Fundamento da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2006. p. 182-184.

CALLISTER JR., W.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

Diagramas e transformações de fases

Convite ao estudo

Alunos, bem-vindos a mais uma unidade da disciplina de *Materiais de construção mecânica*! Na unidade anterior, estudamos as principais propriedades mecânicas dos metais, como a ductilidade, a resiliência e a tenacidade. Compreendemos a importância do movimento das discordâncias e dos sistemas de escorregamentos. Você também aprendeu que o ensaio de tração é um ensaio mecânico destrutivo muito utilizado que nos fornece a curva tensão x deformação. Também estudamos alguns mecanismos de aumento de resistência dos metais, como o tamanho do grão, o encruamento e a formação de solução sólida. Você compreendeu que a formação de solução sólida ocorre a partir da adição de impurezas nas ligas metálicas, o que nos permite a obtenção de ligas metálicas com diferentes propriedades mecânicas.

A compreensão sobre a formação de soluções sólidas é imprescindível, pois a partir desse conceito iniciaremos os temas desta unidade, tais como o diagrama de fases e as transformações de fases.

Na Seção 2.1, vamos retomar alguns conceitos básicos, como o limite de solubilidade e o conceito de fases e de solução sólida. Também serão temas abordados nesta seção outros estudos, como a Regra de Gibbs, a microestrutura e fases em equilíbrio e o diagrama de fases unário de substâncias simples: água e ferro e polimorfismo.

Na Seção 2.2, estudaremos os sistemas isomorfos e análise dos diagramas, os sistemas anisomorfos ou de solubilidade limitada, as reações invariantes: eutetoide e os sistemas eutéticos: desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas.

Na terceira e última seção, finalizaremos nossos estudos com os conceitos sobre fases em equilíbrio metaestável, os diagramas de fases – ferro-carbono em equilíbrio e ferro-carbono metaestável, diagrama de equilíbrio com fases ou compostos intermediários, austenita, ferrita e cementita no diagrama de ferro metaestável – conceitos e estrutura, e o desenvolvimento da microestrutura em ligas ferro-carbono. Os temas abordados nesta unidade são importantes para que você conheça e compreenda a relação entre as propriedades e o comportamento dos materiais de construção mecânica com suas microestruturas. A partir do entendimento deste conteúdo, você será capaz de avaliar e selecionar diferentes tipos de materiais aplicados em projetos mecânicos.

Então, é hora de conhecermos o desafio desta unidade: como engenheiro mecânico de uma metalúrgica, é de sua responsabilidade garantir a composição e a qualidade das ligas de Fe-C que são fabricadas na empresa. Recentemente, uma vaga de estagiário foi preenchida no seu setor e você deverá auxiliá-lo. Quais são os conhecimentos básicos que o estagiário deverá ter para trabalhar no setor? Quando e como a composição de uma liga metálica poderá ser manipulada? Quais são as vantagens da manipulação? Como é possível prever as propriedades mecânicas dos metais a partir de sua composição? Os temas abordados nesta unidade serão fundamentais para responder a essas e a outras questões. Portanto, mãos à obra e bons estudos.

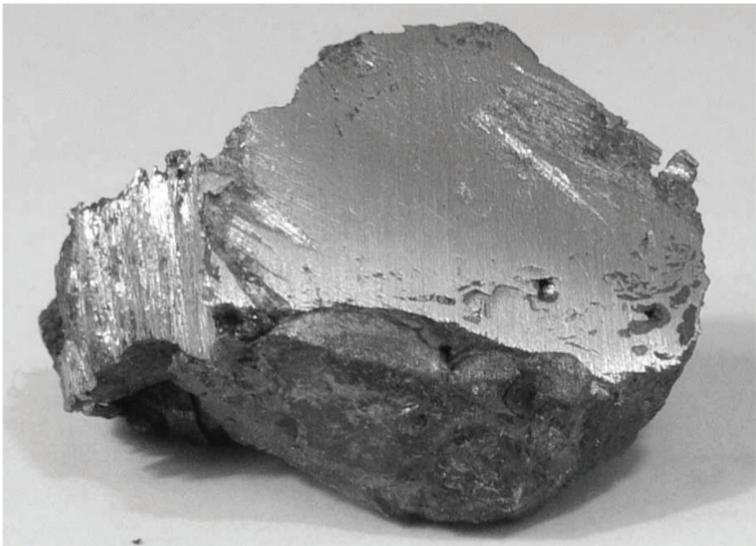
Seção 2.1

Conceitos básicos e diagrama de fases unários

Diálogo aberto

Atuando como engenheiro mecânico de uma metalúrgica, você é o responsável por garantir a composição e a qualidade das ligas de metais que são fabricadas na empresa. Além das suas atribuições diárias, nesta semana, um estagiário recém-contratado irá lhe ajudar em suas tarefas. Neste primeiro momento, você solicitou que ele analisasse uma amostra de ferro puro (Figura 2.1). Esse procedimento é importante para futuramente compreendermos as ligas metálicas. Ao submeter o ferro puro a elevadas temperaturas, quais são as transformações observadas durante o resfriamento? O metal apresenta as mesmas estruturas cristalinas em diferentes temperaturas? Quais transformações são observadas?

Figura 2.1 | Amostra de ferro puro



Fonte: <<http://www.meteorite-iron.narod.ru/photo/09.jpg>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

Nesta seção, vamos conhecer os principais termos utilizados nos estudos dos diagramas de fases, como o limite de solubilidade e o conceito de fases. Conheceremos a importância dos estudos do americano Josiah Willard Gibbs para a compreensão dos estudos de fases, assim como a definição de microestrutura e fases em equilíbrio. O estudo dos diagramas de fases será iniciado pela interpretação dos diagramas de fases unários, isto é, diagramas que possuem um único componente. Por fim, vamos compreender o fenômeno denominado alotropia. Esses estudos são importantes, pois a partir dos diagramas de fases podemos controlar e prever as propriedades dos materiais que estão diretamente relacionadas às microestruturas do material.

Não pode faltar

Na unidade anterior, vimos que uma solução sólida é definida como uma fase cristalina homogênea quando esta contém dois ou mais componentes químicos (CALLISTER; RETHWISH, 2012). Porém, o conhecimento de outros termos comumente utilizados no ensino de química é necessário para a interpretação correta dos diagramas de fases, tais como:

Componentes: espécies quimicamente reconhecíveis utilizadas para especificar uma composição. Exemplo: no aço, temos como componentes o ferro e o carbono.

As ligas metálicas são nomeadas de acordo com a quantidade de componentes, como binárias (dois componentes), terciárias (três componentes) e assim por diante.

Sistemas: são possíveis dois significados: (1) um corpo específico de material que está sendo considerado e (2) uma série de possíveis ligas que consistem nos mesmos componentes (CALLISTER; RETHWISH, 2012).

Soluto: um componente ou elemento de uma solução que está presente em menor concentração.

Solvente: componente de uma solução que está presente em maior quantidade.

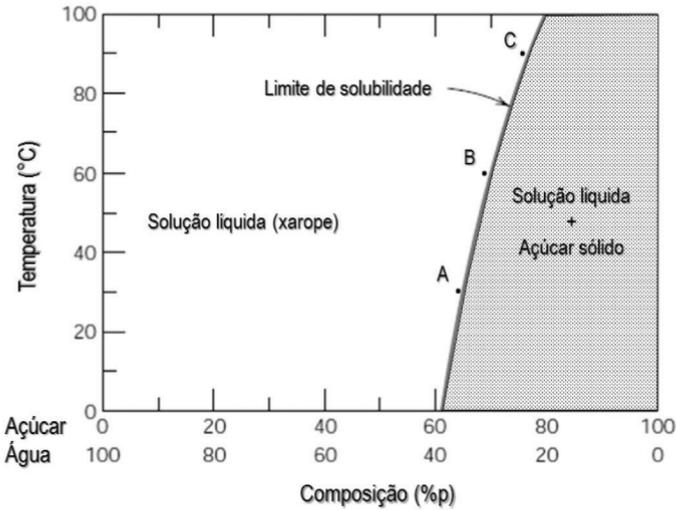
Fases: uma porção homogênea de um sistema que possui

características físicas e químicas uniformes. Duas fases distintas em um sistema têm características físicas e/ou químicas distintas (por exemplo, água e gelo, água e óleo) e são separadas uma da outra por limites de fases bem definidos. Uma fase pode conter um ou mais componentes. Um sistema com uma única fase, isto é, monofásico, é chamado de homogêneo, enquanto sistemas com duas ou mais fases são misturas ou sistemas heterogêneos. A maioria das ligas metálicas são heterogêneas e, geralmente, as fases interagem de tal maneira que a combinação das propriedades do sistema multifásico é diferente de qualquer uma das fases individuais e mais atrativas (CALLISTER; RETHWISH, 2012).

Limite de solubilidade: quantidade máxima de um soluto que pode ser dissolvida. Um exemplo clássico é a quantidade de açúcar (soluto) que pode ser dissolvido na água (solvente).

A Figura 2.2 apresenta a solubilidade do açúcar ($C_{12}H_{22}O_{11}$) em um xarope de açúcar-água. O limite de solubilidade é representado pela linha entre a solução líquida e a solução líquida com o açúcar no estado sólido. Na área branca da figura, em qualquer ponto de intersecção entre a composição e a temperatura dentro da região, sempre teremos a solução líquida, isto é, o xarope de água e açúcar **dissolvido** e uma única fase. Assumindo como referência a temperatura de 30 °C, teremos uma composição máxima de xarope de aproximadamente 63%p de açúcar e 37%p de água, que é dada pelo ponto A na figura. Se a essa composição do xarope adicionarmos qualquer quantidade de açúcar, será atingido o **limite de solubilidade** e ocorrerá a precipitação do açúcar e a formação de duas fases distintas: o xarope e o açúcar no estado sólido (região cinza). A essa concentração máxima de soluto dissolvida no solvente, sem a formação de uma nova fase, denominamos limite de solubilidade. É importante observar que o limite de solubilidade muda de acordo com a temperatura. O aumento da temperatura provoca o aumento do limite de solubilidade. Por exemplo: a 30 °C a concentração máxima de açúcar é de 63%p. A 60 °C ocorre um pequeno aumento para 69%p (ponto B) e a 90 °C para 76%p. (ponto C).

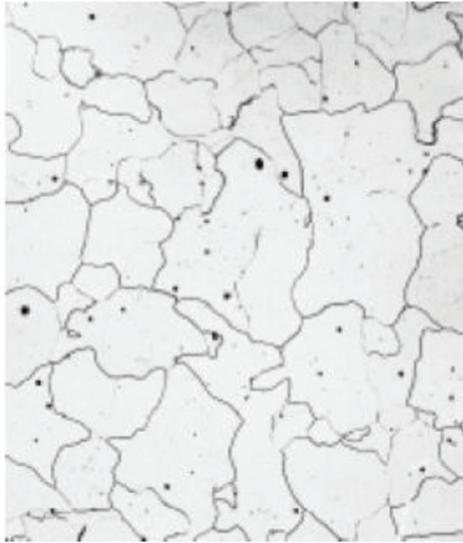
Figura 2.2 | Solubilidade do açúcar ($C_{12}H_{22}O_{11}$) em um xarope de açúcar-água



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 283).

Microestrutura: as propriedades de uma liga metálica não dependem apenas da composição das fases, mas da maneira em como as fases estão organizadas estruturalmente a nível microscópico. Assim, as microestruturas são especificadas pelo número de fases, suas proporções e seu arranjo no espaço. Na análise microscópica de uma liga binária, as fases apresentam colorações distintas, isto é, uma mais clara que a outra. Já para uma liga monofásica, a textura será uniforme, exceto pelo contorno de grãos, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 | Fotomicrografia da microestrutura monofásica (ferrita α)



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 304).

Equilíbrio de fases: um sistema encontra-se em equilíbrio quando sua energia livre atinge o menor valor possível em uma determinada combinação de temperatura, pressão e composição.

Josiah Willard Gibbs (1839-1903), físico norte-americano e pioneiro na utilização da termodinâmica para interpretar fenômenos físico-químicos, deduziu uma importante relação entre: o número de fases (P) que podem coexistir em equilíbrio em um dado sistema; o número mínimo de componentes (C) que podem ser usados para formar o sistema; e os graus de liberdade (F). Essa relação ficou conhecida como a Regra das Fases de Gibbs, e é representada matematicamente pela Equação 2.1:

$$P + F = C + 2 \quad (2.1)$$

Onde P é o número de fases, F é o número de graus de liberdade e C é o número de componentes. O número de componentes (C) em um sistema é o número mínimo de espécies independentes necessário para definir a composição de todas as fases presentes no sistema. Já os graus de liberdade são os números de variáveis que podem sofrer alterações como temperatura, composição e pressão sem alterar o número de fases de equilíbrio (ASKELAND; WRIGHT, 2014).



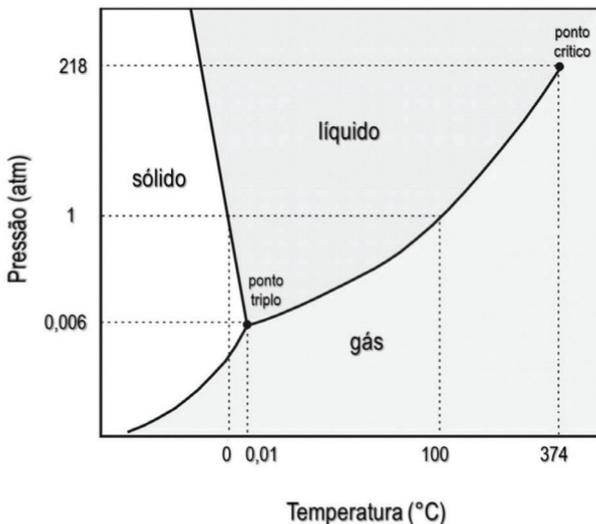
O canal Química Traduzida traz informações sobre o diagrama de fases.

O conteúdo traz algumas simulações que certamente irão lhe ajudar a compreender e a interpretar corretamente o digrama de fases da água. Não deixe de acessar! Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=j-3MCFDjsJc>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

Assim, o diagrama de fases em equilíbrio representa as relações entre a temperatura e as composições, e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio são úteis para prever as transformações de fases e as microestruturas resultantes, que podem apresentar uma natureza de equilíbrio ou de ausência de equilíbrio.

Nos chamados diagramas de fases unário ou sistemas unários (apresentam um único componente), somente a pressão e a temperatura poderão ser alteradas. A Figura 2.4 traz o diagrama de fases unário em que a água (H_2O) é o único componente.

Figura 2.4 | Diagrama de fases unário da água (H_2O)



Fonte: elaborada pelo autor.

No diagrama de fases unário da água estão presentes os três estados da matéria: líquido, sólido e gasoso. A água nos diferentes estados da matéria apresenta propriedades químicas e físicas distintas, como densidade, volume molar, presença ou ausência de estrutura cristalina, entre outros. Nesse diagrama existe um único ponto em que as três fases coexistem em equilíbrio, denominado ponto triplo ou ponto invariante, no qual o número de graus de liberdade é igual a zero.



Exemplificando

Como em um diagrama de fases unário o número de componentes é igual a um e o número de fases é igual a dois; temos apenas um grau de liberdade, pois:

$$F + P - = 2 \text{ ou } F = 1 + 2 - 2 = 1.$$

Dessa forma, temos um grau de liberdade, isto é, definida uma temperatura, haverá somente uma pressão na qual as duas fases estarão em equilíbrio.

Se as três fases (sólida, líquida e gasosa) estiverem em equilíbrio, ainda temos o número de componentes igual a um. Porém, o número de fases passa a ser igual a três. Assim, o grau de liberdade será igual a zero, pois:

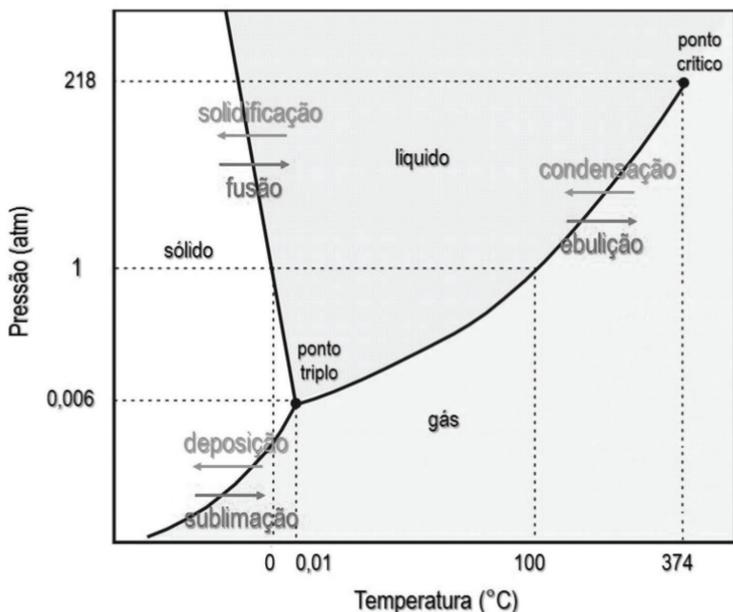
$$F = C + 2 - P$$

$$F = 1 + 2 - 3$$

$$F = 0.$$

No diagrama de fases, cada uma das curvas representa uma transformação de fase: de sólido a líquido (fusão/solidificação), de líquido a vapor (ebulição/condensação) e de sólido a vapor (sublimação/deposição), como mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 | Diagrama de fases da água (curvas de transformação de fases)



Fonte: elaborada pelo autor.

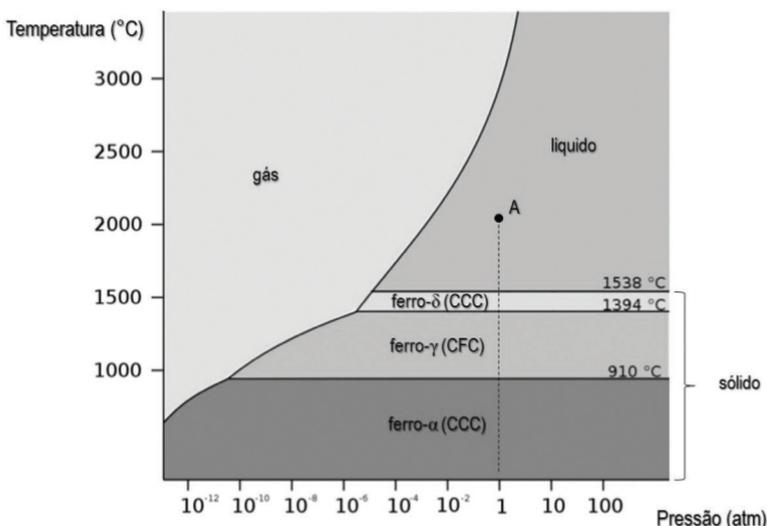
O fim da "curva de ebulição", que separa a transição de líquido para gás, é chamado de "ponto crítico". Essa é uma parte particularmente interessante do diagrama de fases porque as propriedades físico-químicas da água e do gás convergem e são idênticas. Dessa forma, a partir do ponto crítico, nós nos referimos a essa única fase como um "fluido supercrítico".

A Figura 2.6 traz o diagrama unário do ferro puro. Observa-se que a linha de equilíbrio líquido-sólido é quase horizontal: isso significa dizer que o ponto de fusão do metal é praticamente independente da pressão. Nota-se que a região onde o metal encontra-se no estado sólido é subdividida em três regiões.

Na linha de equilíbrio a **1394 °C** coexistem duas fases sólidas distintas: o ferro delta (ferro δ), que apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e o ferro gama (ferro γ), de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). O mesmo ocorre na linha de equilíbrio a **910 °C**: coexistem duas fases sólidas distintas, ferro γ e ferro α .

Assim, se uma amostra de ferro líquido à temperatura de 2000 °C e pressão igual a 1 atmosfera (ponto A) for resfriada lentamente sob condições de equilíbrio, a primeira fração de sólido (ferro δ) se formará a **1538 °C**, enquanto que as demais formações sólidas ocorrerão a 1394 °C (ferro γ) e a 910 °C (ferro α).

Figura 2.6 | Diagrama de fases unário do ferro puro



Fonte: adaptada de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_iron#/media/File:Pure_iron_phase_diagram_\(EN\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_iron#/media/File:Pure_iron_phase_diagram_(EN).svg)>. Acesso em: 21 dez. 2016.



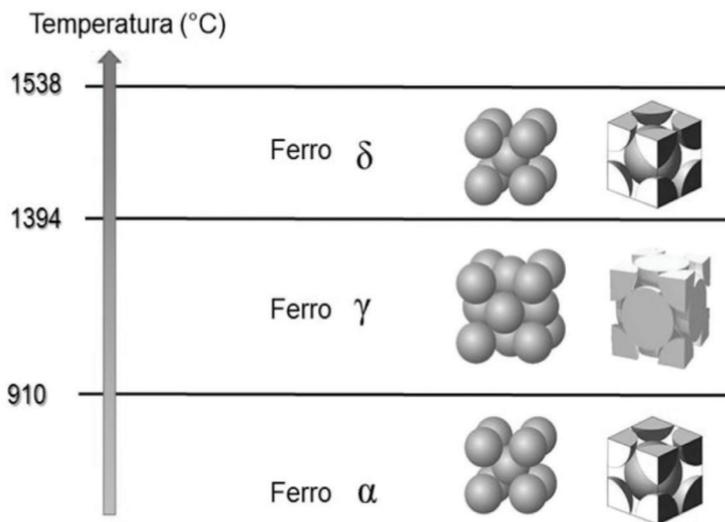
Refleta

Quando a amostra de ferro líquido à temperatura de 2000 °C e pressão igual a 1 atmosfera é resfriada e atinge a temperatura de 1538 °C, todo o material em estado líquido se solidifica instantaneamente? Vamos fazer uma analogia: quando colocamos água em forminhas de gelo, como ocorre a formação do gelo? O tempo é importante?

A existência do ferro no estado sólido em três formas (ferro δ , ferro γ e ferro α) é um fenômeno conhecido como polimorfismo ou alotropia. Nas transformações alotrópicas, todos os alotropos do ferro apresentam

a mesma composição, isto é, são compostos por ferro puro, porém os materiais apresentam propriedades drasticamente distintas devido aos diferentes arranjos atômicos em cada alótropo, isto é, aos diferentes sistemas cristalinos (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Por exemplo, o ferro é estável a temperaturas inferiores a 910 °C, possui estrutura cristalina de célula unitária CCC e, nessas condições, uma das principais características é ser ferromagnético. No entanto, em temperaturas acima de 910 °C até 1390 °C, o ferro não é mais estável. Ele transforma-se em ferro de célula unitária CFC. Em temperaturas acima de 1390 °C até atingir o ponto de fusão a 1539 °C, ocorre uma nova transformação para o ferro que possui célula unitária CCC, a mesma do ferro, porém, em temperaturas acima de 771 °C o ferro não apresenta mais a característica de ser ferromagnético e torna-se paramagnético. As transformações alotrópicas do ferro puro apresentam grande importância prática devido ao impacto nas propriedades de ligas que contêm este elemento. A Figura 2.7 apresenta um esquemático com as transformações alotrópicas do ferro puro, as linhas de equilíbrio e as respectivas células unitárias.

Figura 2.7 | Transformações alotrópicas do ferro puro



Fonte: elaborada pelo autor.

Para que essas transformações alotrópicas ocorram no equilíbrio, é necessário que não haja a variação de temperatura, isto é, devem ser transformações isotérmicas (ASKELAND; WRIGHT, 2014).



Assimile

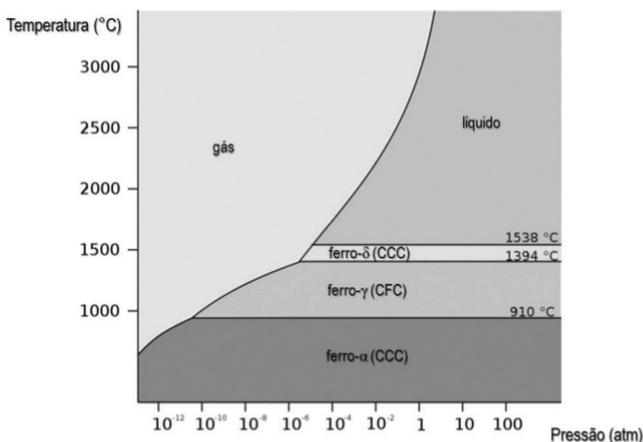
Para muitos sistemas e para uma determinada temperatura, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode ser dissolvida no solvente, formando uma solução sólida. Essa concentração máxima é chamada de *limite de solubilidade*.

Sem medo de errar

Trabalhando como engenheiro mecânico de uma metalúrgica, nesta semana você recebeu um estagiário recém-contratado que irá lhe ajudar em suas tarefas. Neste primeiro momento, você solicitou que o estagiário analisasse uma amostra de ferro puro. Ao submeter o ferro puro a elevadas temperaturas, quais são as transformações observadas durante o resfriamento? O metal apresenta as mesmas estruturas cristalinas em diferentes temperaturas? Quais transformações são observadas?

Foi dado o diagrama de fases unário do ferro puro (Figura 2.6).

Figura 2.6 | Diagrama de fases unário do ferro puro



Fonte: adaptada de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_iron#/media/File:Pure_iron_phase_diagram_\(EN\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_iron#/media/File:Pure_iron_phase_diagram_(EN).svg)>. Acesso em: 21 dez. 2016.

A partir do diagrama de fases unário do ferro puro, o estagiário foi capaz de concluir que o ferro puro, a uma pressão de 1 atmosfera, se encontra no estado líquido a temperaturas superiores a 1538 °C. Após garantir que a amostra do metal se encontrava totalmente no estado líquido, o estagiário resfriou a amostra de acordo com o diagrama de fases unário do ferro e concluiu que a 1394 °C coexistem duas fases sólidas distintas: o ferro δ (CCC) e o ferro γ (CFC). Dando continuidade ao resfriamento, ao atingir a temperatura de 910 °C, coexistem duas fases sólidas: o ferro γ (CFC) e o ferro α (CCC), que possui estrutura cristalina CCC. Como observado, o ferro encontra-se no estado sólido em diferentes temperaturas, no entanto, apresenta diferentes características.

Avançando na prática

Da grafita ao diamante

Descrição da situação-problema

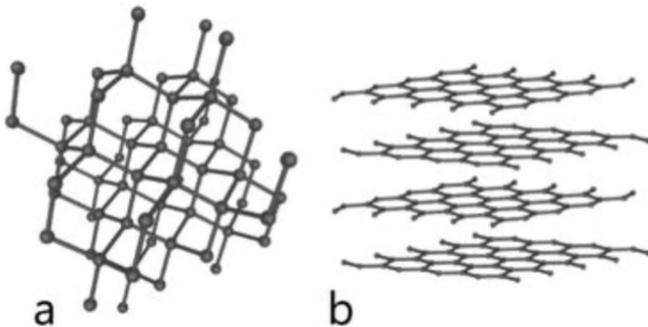
Os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois eles são muito simples de executar e não exigem nenhuma habilidade especial. É utilizado um penetrador cônico de diamante para aferição de materiais com elevada dureza. Como engenheiro mecânico em um laboratório de ensaios mecânicos, você acha que é possível substituir o penetrador cônico de diamante por um penetrador cônico com filme de grafita?

Resolução da situação-problema

O ferro possui alótropos em diferentes temperaturas. O carbono puro possui oito alótropos. As formas alotrópicas do carbono incluem o diamante (em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura tetraédrica), a grafita (em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede hexagonal), a lonsdaleita (os átomos encontram-se em um arranjo hexagonal), o grafeno (camadas soltas de grafite), os fulerenos (em que os átomos de carbono estão ligados em um conjunto esférico, tubular ou em formações elipsoidais) e, mais recentemente, foram descobertos outros alótropos: o buckminsterfulereno, também conhecido como *buckyball*

e os nanotubos de carbono. O buckminsterfulereno em um padrão bidimensional apresenta um padrão de 12 pentágonos regulares e 20 hexágonos regulares. Já os nanotubos de carbono são folhas de grafita, isto é, são grafenos enrolados em diferentes direções que produzem tubos com tampas hemisféricas de fullereno em suas extremidades (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Na transformação alotrópica, todos os alótropos do carbono apresentam a mesma composição, isto é, são de carbono puro. Porém, os materiais apresentam propriedades drasticamente distintas devido aos diferentes arranjos atômicos em cada alótropo, ou seja, aos diferentes sistemas cristalinos, o que inviabiliza a utilização de um penetrador cônico com filme de grafita. A Figura 2.8 mostra a representação da estrutura cristalina do diamante (a) e da grafita (b), alótropos do carbono puro.

Figura 2.8 | Representação da estrutura cristalina: (a) diamante e (b) grafita



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eight_Allotropes_of_Carbon.png>. Acesso em: 21 dez. 2016.

Faça valer a pena

1. A compreensão de diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura em uma liga está relacionado às características do seu diagrama de fases.

Associe as informações entre as colunas A e B:

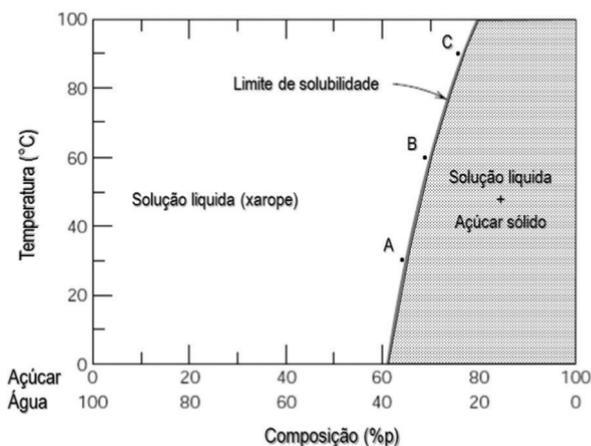
COLUNA A	COLUNA B
I. COMPONENTE	() Estado em que um sistema atinge o menor valor de energia livre em uma determinada combinação de temperatura, pressão e composição.
II. SOLVENTE	() Ocasionalmente, seus átomos são também chamados de átomos hospedeiros.
III. EQUILÍBRIO	() Metais puros e/ou compostos que compõem uma liga.
IV. SISTEMAS	() Uma série de possíveis ligas que consistem nos mesmos componentes

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta da coluna B:

- a) I, II, III e IV.
- b) II, III, IV e I.
- c) III, II, I e IV.
- d) IV, III, II e I.
- e) III, I, IV e II.

2. O limite de solubilidade é definido como a quantidade máxima de um soluto que pode ser dissolvida. Um exemplo clássico é a quantidade de açúcar (soluto) que pode ser dissolvida na água (solvente).

A figura a seguir apresenta a solubilidade do açúcar em um xarope de açúcar-água.



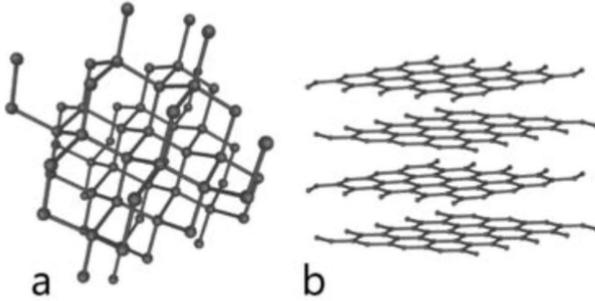
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 283).

A partir da análise do gráfico apresentado, assinale a alternativa correta:

- a) O aumento da temperatura provoca o aumento do limite de solubilidade somente para a composição no ponto A.
- b) O aumento da temperatura provoca a diminuição do limite de solubilidade de A para B.
- c) Na temperatura de 20 °C a composição 40%p de água e 60%p de açúcar é totalmente líquida.
- d) A 90 °C, uma composição de 90%p açúcar e 10%p água é totalmente sólida.
- e) À soma das concentrações dos componentes, qualquer composição será igual a 100%p, isto é, 50%p para cada um dos componentes.

3. A existência do ferro no estado sólido em três formas (ferro δ , ferro γ e ferro α) é um fenômeno conhecido como polimorfismo ou alotropia, fenômeno também encontrado no carbono.

Observe a figura a seguir:



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eight_Allotropes_of_Carbon.png>. Acesso em: 21 dez. 2016.

Assinale a alternativa que apresenta o alótropo do carbono e a estrutura cristalina que a figura se refere:

- a) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura tetraédrica.
- b) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura hexagonal.
- c) Trata-se da estrutura da grafita, em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede hexagonal.
- d) Trata-se da estrutura da grafita, em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede tetraédrica.
- e) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura cúbica.

Seção 2.2

Diagrama de fases binários em equilíbrio

Diálogo aberto

Como engenheiro mecânico de uma grande metalúrgica, você é o responsável por garantir a composição e a qualidade das ligas de metais que são fabricadas na empresa. Recentemente, um estagiário recém-contratado está trabalhando diretamente com você. Na primeira semana de trabalho, o estagiário foi capaz de analisar uma amostra de ferro puro e concluir que o ferro, ao ser submetido a diferentes processos, como o resfriamento ou o aquecimento, existe na forma sólida com diferentes estruturas cristalinas, e que esse fenômeno é conhecido como alotropia. Nesta semana, a metalúrgica foi procurada por jovens empreendedores do setor de fabricação de componentes eletrônicos com uma dúvida: qual liga metálica pode ser utilizada na solda dos componentes eletrônicos? Como um grande profissional é aquele que compartilha conhecimento e prepara as novas gerações, você chamou o estagiário, colocou-o a par da situação e deu-lhe algumas dicas para que ele auxiliasse os jovens:

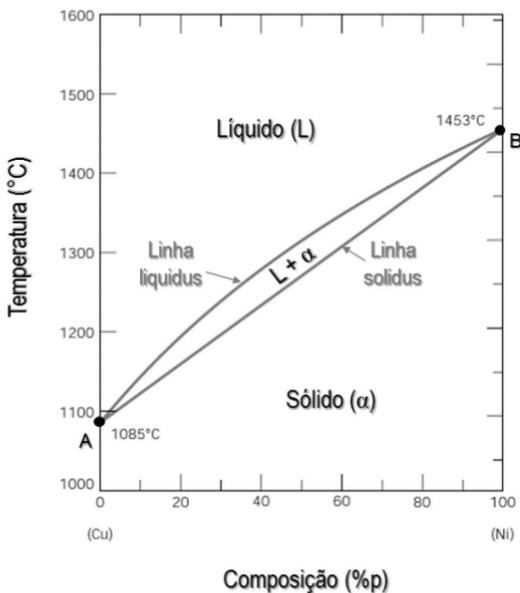
- A liga utilizada nessa aplicação deverá ser uma liga chumbo-estanho.
- A temperatura de fusão da liga deverá ser menor que a temperatura de fusão dos componentes isolados.

Qual é a composição da liga? Como essa liga é chamada? Quais transformações de fases ocorrem nessa liga metálica? Nesta seção, vamos estudar os sistemas isomorfos e anisomorfos, a importância do limite de solubilidade para as ligas metálicas e as principais reações invariantes. Um dos temas mais importantes abordados nesta seção é a compreensão dos diagramas de fases das ligas metálicas, que são úteis para o entendimento, desenvolvimento e preservação das estruturas metálicas. Portanto, bons estudos!

Não pode faltar

Na seção anterior, aprendemos que os diagramas de fases em equilíbrio representam as relações entre a temperatura, as composições e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio. São diversos os tipos de diagramas de fases, no entanto, para fins didáticos, os diagramas de fases binários são os mais utilizados devido à facilidade de compreensão e representação, e por terem apenas a temperatura e a composição como variáveis. Como o próprio nome sugere, um diagrama binário ou uma liga binária é aquela que possui dois componentes. Na prática, sabemos que uma liga metálica possui mais que dois componentes em sua composição. Porém, um diagrama de fases binário ilustra os princípios empregados para o controle das microestruturas. O sistema cobre-níquel é chamado de isomorfo devido à completa solubilidade dos dois componentes nos estados líquido e sólido. A Figura 2.9 traz o diagrama de fases do sistema cobre-níquel, um dos diagramas mais fáceis de serem interpretados.

Figura 2.9 | Diagrama de fases cobre-níquel



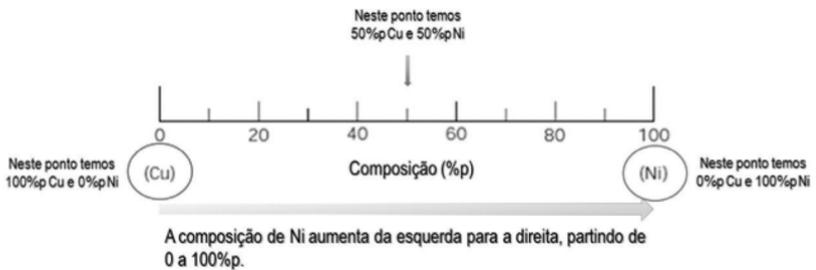
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).



Lembre-se de que fase é uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. Duas fases distintas em um sistema têm características físicas e/ou químicas distintas, por exemplo: a água e o gelo.

No diagrama de fases, os elementos são representados no eixo das abscissas, um dos elementos à esquerda do gráfico e o outro componente à direita. A Figura 2.10 apresenta de maneira sucinta a forma correta de interpretar as informações contidas no eixo das abscissas.

Figura 2.10 | Eixo das abscissas no diagrama de fases Cu-Ni

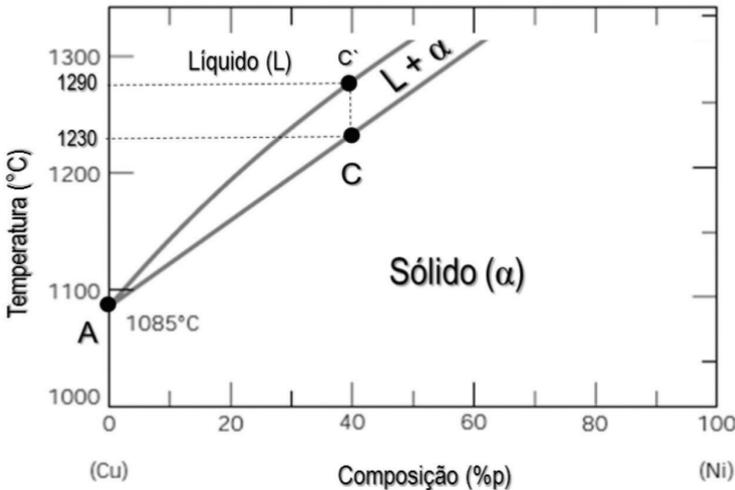


Fonte: elaborada pelo autor.

Em ligas metálicas, quaisquer soluções sólidas presentes no diagrama de fases são designadas por letras gregas (α , γ , δ , ...). No diagrama de fases Cu-Ni também verificamos as linhas de fronteiras entre as transformações de fases. A linha *liquidus* é a linha que separa a fase líquida e a região que apresenta líquido e o sólido α . A fase líquida está presente em todas as composições e temperaturas acima da linha *liquidus*. De maneira análoga, temos a linha *solidus*, que é a linha que separa a região que possui líquido e sólido α da que possui somente o sólido α . Portanto, abaixo da linha *solidus* existirá o sólido α em qualquer temperatura e composição desse diagrama. No diagrama de fases do sistema Cu-Ni, também é possível obter as temperaturas de fusão para os componentes puros, que são dadas pelos pontos em que as curvas *liquidus* e *solidus* se interceptam. O ponto A no diagrama corresponde

à temperatura de fusão do cobre puro, isto é, 100%p Cu e 0%p Ni igual a 1085 °C, enquanto que o ponto B corresponde à temperatura de fusão do níquel puro (0%p Cu e 100%p Ni) igual a 1453 °C. Já para as composições diferentes dos componentes puros, a fusão ocorrerá em uma faixa de temperatura em que as fases líquida e sólida encontram-se em equilíbrio. A Figura 2.11 traz um zoom do diagrama de fases do Cu-Ni para uma liga de 40%p Ni-60%p Cu.

Figura 2.11 | Diagrama de fases do Cu-Ni para uma liga de 40%p Ni-60%p Cu



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).

Ao aquecer uma liga 40%p Ni-60%p Cu, a fusão se inicia à temperatura aproximada de 1230 °C (ponto C). Nesse ponto, a quantidade de fase líquida aumenta continuamente com o aumento da temperatura até atingir a fusão completa da liga à temperatura de aproximadamente 1290 °C (ponto C'), isto é, à temperatura em que a liga fica completamente líquida.

Nos diagramas de fases em equilíbrio de um sistema binário com composição e temperatura existem três informações disponíveis e essenciais:

1. As fases que estão presentes.
2. A composição dessas fases.

3. A percentagem ou frações das fases.

A partir do diagrama de fases binário Cu-Ni, vamos compreender as informações disponibilizadas:

1) Para determinar as fases que estão presentes em uma liga metálica, basta definir o par **composição-temperatura** desejado. São dados os pontos 1, 2 e 3 no diagrama Cu-Ni (Figura 2.12). Na Figura 2.12a, a partir das linhas tracejadas dos pontos até o eixo das abscissas, determina-se a composição das ligas. Já na Figura 2.12b, a partir das linhas tracejadas dos pontos até o eixo das ordenadas, encontra-se a temperatura das ligas nos respectivos pontos. Assim, temos:

Ponto 1: 60%p Ni 40%p Cu à temperatura de 1100 °C.

Ponto 2: 30%p Ni 70%p Cu à temperatura de 1210 °C.

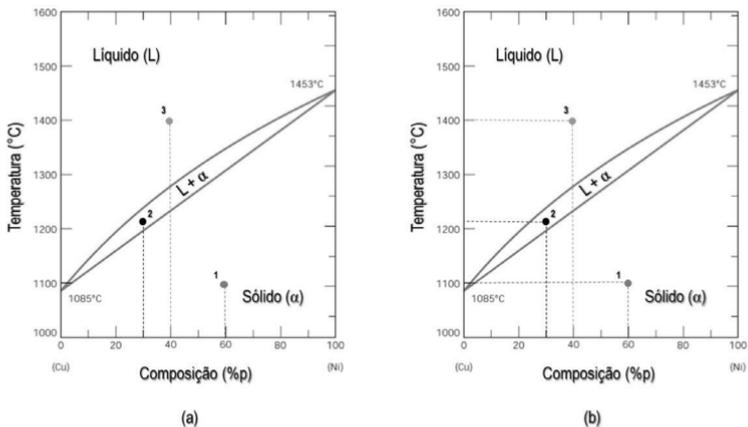
Ponto 3: 40%p Ni 60%p Cu à temperatura de 1400 °C.



Pesquise mais

O vídeo indicado apresenta a resolução de exercícios envolvendo diagramas de fases. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2V-DIBO75yQ>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

Figura 2.12 | Diagrama de fases cobre-níquel (pontos 1, 2 e 3)



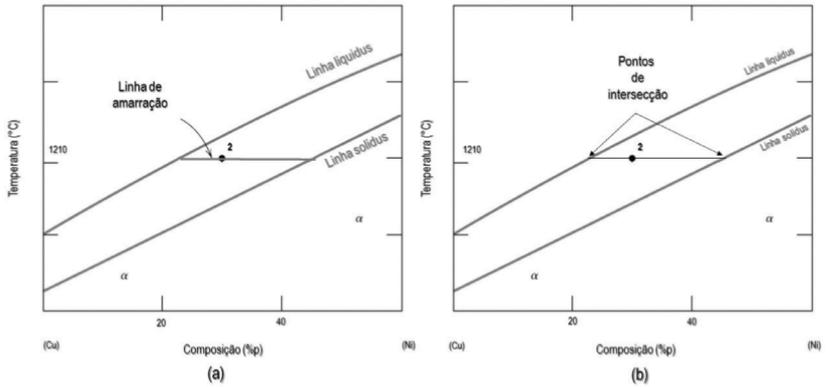
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).

A partir da definição de composição e temperatura, é possível definir as fases que estão presentes nas ligas: no ponto 1 temos uma única fase, a fase sólida. O ponto 2 encontra-se na região que temos o líquido e o sólido, portanto, nesta liga temos 2 fases, uma líquida e uma sólida. Por fim, no ponto 3 temos uma liga que apresenta somente uma fase, a fase líquida.

2) Em termos das concentrações dos componentes é que se determina a composição das fases. Se apenas uma fase está presente, a composição dessa fase é igual à composição global da liga. Por exemplo, nas ligas representadas pelos pontos 1 e 3 da Figura 2.12, determinamos que a composição das ligas são, respectivamente, fase sólida 60%p Ni 40%p Cu e fase líquida 40%p Ni 60%p Cu. Assim, a composição das fases em termos dos componentes também serão, respectivamente, 60%p Ni 40%p Cu e 40%p Ni 60%p Cu. No entanto, para ligas com composição e temperatura que se encontram em regiões bifásicas, como a representada na Figura 2.12 pelo ponto 2, utiliza-se outro método para a determinação da composição das fases:

- A. Localizada a temperatura da liga na região bifásica, traçar uma linha horizontal imaginária que se estende através da região bifásica e termina nas linhas de fronteiras *solidus* e *liquidus*. Essas linhas são conhecidas como linhas de amarração (Figura 2.13a).
- B. Anotar as intersecções da linha de amarração com as fronteiras entre as fases em ambas as extremidades (Figura 2.13b).

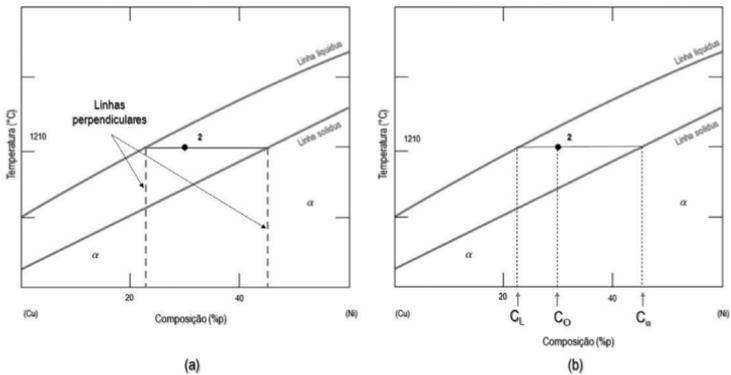
Figura 2.13 | Determinação da composição de fases de uma liga bifásica (etapas A e B)



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).

- C. Traçar linhas perpendiculares à linha de amarração a partir das intersecções até o eixo horizontal das composições (Figura 2.14a).
- D. Ler a composição em cada uma das respectivas fases, onde C_O é a composição global, C_L é a composição da fase líquida e C_α é a composição da fase sólida (Figura 2.14b).

Figura 2.14 | Determinação da composição de fases de uma liga bifásica (etapas C e D)



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).

Dessa forma, para a liga bifásica no ponto 2 temos:

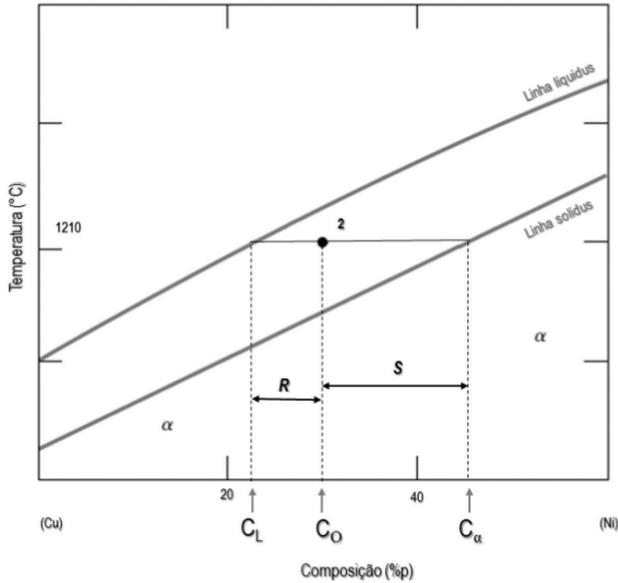
- Composição global (C_O): 30%p Ni 70%p Cu.
- Composição líquida (C_L): 22%p Ni 78%p Cu.
- Composição sólida (C_a): 45%p Ni 55%p Cu.

Após a determinação da composição das fases, é necessário determinar as quantidades ou frações das fases (W), isto é, o quanto existe de sólido (W_a) e líquido (W_L) em cada ponto da composição. Em regiões monofásicas, a solução é óbvia: a liga será composta totalmente por aquela fase e a fração será igual a 1 ou 100%, que é a representação percentual. Já para as ligas em regiões bifásicas, utiliza-se a linha de amarração em conjunto com a regra da alavanca. Dessa forma, para determinar as quantidades das fases devemos:

- A. Definir a linha de amarração.
- B. Localizar a composição global da liga (C_O).
- C. Calcular a fração de uma fase tomando-se o comprimento da linha de amarração desde a composição global até a fronteira entre as fases e, posteriormente, dividindo-se pelo comprimento total da linha de amarração.
- D. Obter a fração de outra fase de maneira análoga, no entanto, sabemos que a composição total de uma liga é igual a 1 ou 100%. Assim, basta calcular a diferença entre 1 e a fração da fase já calculada.

A Figura 2.15 traz o diagrama de fases Cu-Ni com a linha de amarração em conjunto com a regra da alavanca.

Figura 2.15 | Diagrama de fases Cu-Ni com a linha de amarração em conjunto com a regra da alavanca



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 287).

A partir da regra da alavanca, o valor da quantidade ou fração de líquido (W_L) pode ser calculado de acordo com a Expressão 2.2:

$$W_L = \frac{S}{S + R} = \frac{C_\alpha - C_0}{(C_\alpha - C_0) + C_0 - C_L} = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} \quad (2.2)$$



Exemplificando

Dessa forma, para a liga bifásica dada pelo ponto 2, temos:

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} = \frac{45 - 30}{45 - 22} = 0,65.$$

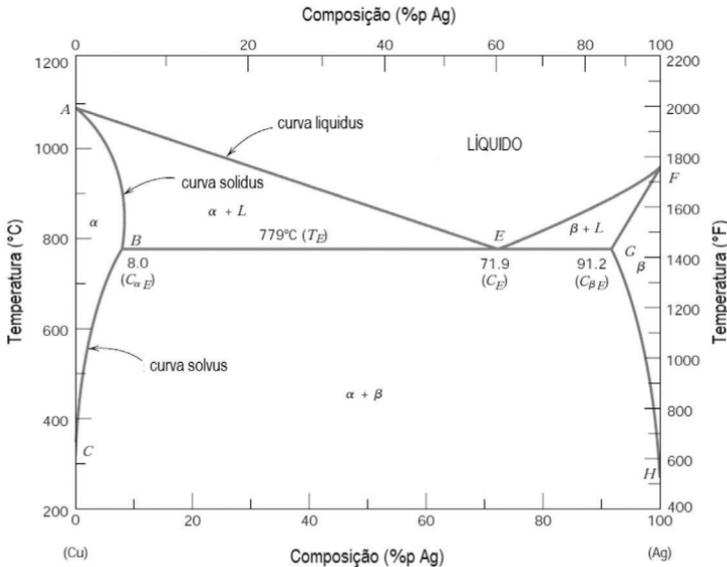
Para as frações em percentual, basta multiplicar o resultado obtido por 100. Portanto, a liga bifásica no ponto 2 do diagrama possui 0,65 (65%) de fase líquida e 0,35 (35%) de fase sólida.

É importante observar que calcula-se a fração de fases especificando-se somente as composições de um componente. No cálculo das frações no ponto 2, utilizou-se as composições do níquel.

Além dos diagramas de fases isomorfos, que estudamos até agora, outros sistemas estudados são os diagramas anisomorfos, que são caracterizados por formarem mais de uma fase no estado sólido. O diagrama de fases do sistema binário cobre-prata (Figura 2.16) é um exemplo de diagrama anisomorfo, que também é chamado de diagrama eutético binário. Esse diagrama apresenta algumas características importantes:

Existem três regiões monofásicas: líquida (L), sólida (α) e sólida (β). As fases sólidas são fases distintas uma da outra, sendo a fase α rica em cobre (solvente), e ela tem a prata como soluto. Essa fase possui estrutura cristalina CFC. Já a fase β é rica em prata (solvente) e tem o cobre como soluto. Assim como a fase α , a fase β também possui estrutura cristalina CFC. A solubilidade em cada dessas fases é limitada. Assim, o limite de solubilidade da fase α é dado pela linha de fronteira ABC, enquanto que o limite de solubilidade para a β é dado pela linha de fronteira FGH. Além das curvas *liquidus* e *solidus*, o diagrama de fases do sistema cobre-prata apresenta uma terceira curva, denominada *solvus*, que é a curva de fronteira do limite de solubilidade dos sólidos que separa as regiões de fases entre α e $\alpha + \beta$ e, também, β e $\alpha + \beta$.

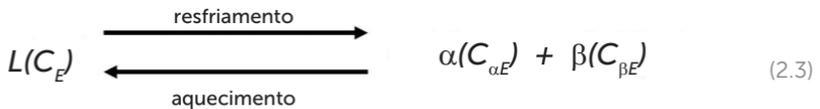
Figura 2.16 | Diagrama de fases para o sistema cobre-prata



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 293).

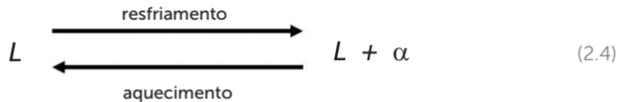
Além das regiões monofásicas, também existem três regiões bifásicas no diagrama de fases para o sistema cobre-prata: α + líquido; α + β ; e β + líquido. As composições e frações dessas fases podem ser obtidas utilizando-se as linhas de amarração e a regra da alavanca.

O ponto E no diagrama cobre-prata é chamado de **ponto invariante** ou **ponto eutético**, que é designado por uma temperatura T_E e composição C_E . No ponto eutético, o equilíbrio é invariante, isto é, as três fases coexistem em equilíbrio à temperatura T_E , e a composição das fases C_E são fixas. Ao atingir a temperatura T_E , ocorre uma reação muito importante nas ligas com composição C_E chamada **reação eutética**. Nessa reação, uma fase líquida sob condições de resfriamento é transformada em duas fases sólidas: α e β . De forma geral, uma reação eutética pode ser representada como:

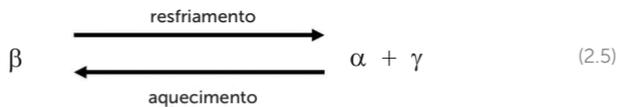


De maneira contrária, duas fases sólidas de composição eutética ($C_{\alpha E}$ e $C_{\beta E}$), ao serem submetidas ao aquecimento e atingirem a temperatura eutética, se transformarão em uma única fase líquida de composição C_E . Além da reação eutética e do sistema eutético, existem outras reações e sistemas anisomorfos muito importantes, tais como:

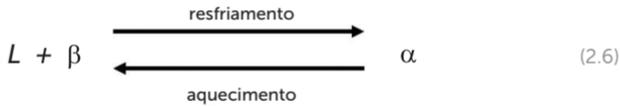
Monotético:



Eutetoide:



Peritético:



Peritetoide:



A partir dos diagramas de fases e das reações existentes nos sistemas anisomorfos, é importante analisar o desenvolvimento das microestruturas. No diagrama de fases do sistema chumbo (Pb)-estanho (Sn) (Figura 2.17), a composição 61,9%p Sn 38,1%p Pb é uma liga eutética. Se considerarmos essa liga eutética com temperatura inicial de 300 °C submetida ao resfriamento, nenhuma transformação ocorre até que a temperatura eutética de 183 °C seja atingida. Ao atingir essa temperatura, a fase líquida se transforma em duas fases sólidas $\alpha + \beta$ e, devido ao fenômeno da difusão atômica, ocorre a redistribuição dos componentes Pb e Sn. Assim, como produto da reação eutética, tem-se um arranjo característico das fases sólidas, isto é, a microestrutura do sólido é formada por camadas alternadas das fases α e β , que é denominada estrutura eutética.

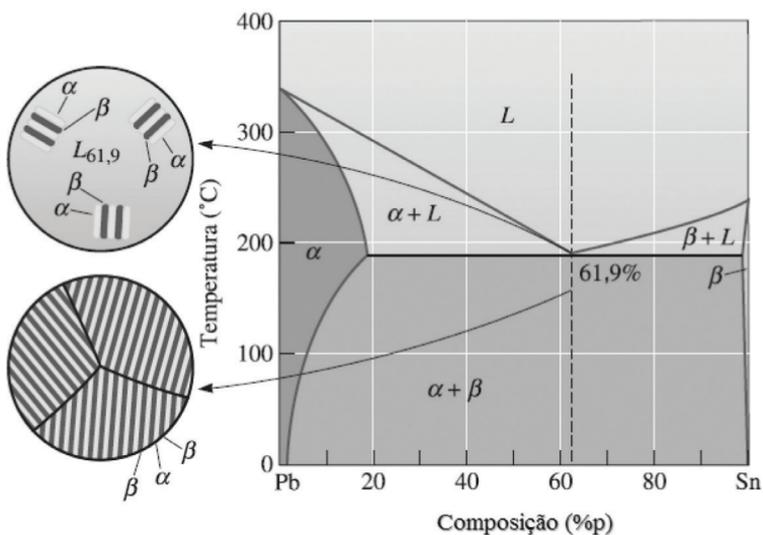
A Figura 2.17 apresenta uma representação esquemática da formação da estrutura eutética (a) e uma fotomicrografia da microestrutura (b), ambas para sistema chumbo-estanho.



Refleta

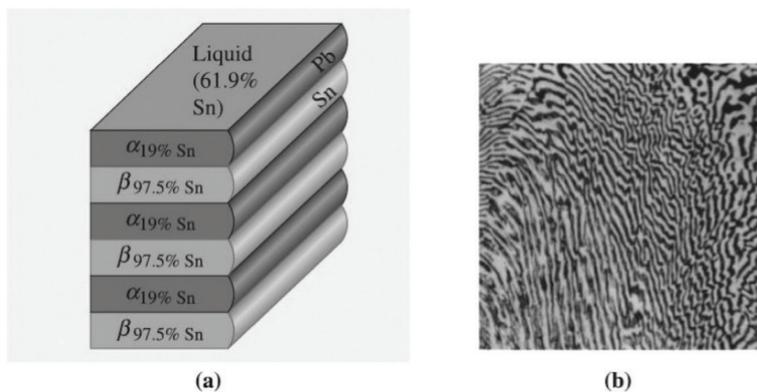
Como a disposição em camadas alternadas das fases sólidas interfere no movimento atômico dos átomos de chumbo e estanho?

Figura 2.17 | Desenvolvimento de microestruturas de um sistema eutético Pb-Sn



Fonte: Askeland, Fulay e Wright (2011, p. 423).

Figura 2.18 | Representação esquemática da formação da estrutura eutética (a) e (b) fotomicrografia da microestrutura para sistema chumbo-estanho.



Fonte: Askeland, Fulay e Wright (2011, p. 424).

Sem medo de errar

Recentemente, a metalúrgica foi procurada por jovens empreendedores do setor de fabricação de componentes eletrônicos com uma dúvida: qual liga metálica pode ser utilizada na solda dos componentes eletrônicos? Você, como engenheiro mecânico da metalúrgica, chamou o estagiário, colocou-o a par da situação e deu algumas dicas:

- A liga utilizada na aplicação deverá ser uma liga chumbo-estanho.
- A temperatura de fusão da liga deverá ser menor que a temperatura de fusão dos componentes isolados.

A partir das dicas, o jovem estagiário chegou às seguintes conclusões: utilizando um diagrama de fases do sistema Pb-Sn, a liga de composição 61,9%p Sn 38,1%p Pb apresenta temperatura de fusão igual a 183 °C, enquanto os componentes isolados, chumbo e estanho, apresentam a temperatura de fusão igual a 327 °C e 232 °C, respectivamente. Essa liga é denominada eutética do sistema chumbo-estanho.

Na temperatura de 183 °C, denominada temperatura eutética, ocorre a reação denominada eutética, que é caracterizada por uma fase líquida sob condições de resfriamento, que é transformada em duas fases sólidas: α e β . Uma reação eutética pode ser representada como:



A fotomicrografia da Figura 2.19 apresenta a microestrutura da liga eutética chumbo-estanho.

Figura 2.19 | Microestrutura da liga eutética chumbo-estanho



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 292).

A microestrutura de fases alternadas consiste em uma solução sólida rica na fase α com elevada concentração de chumbo (camadas escuras) e uma solução sólida rica na fase β com elevada concentração de estanho (camadas claras).

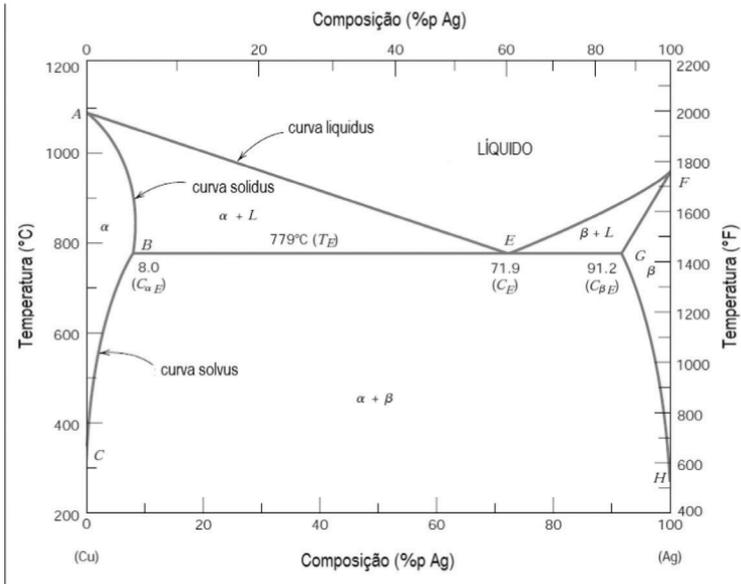
Avançando na prática

Diagrama de fases binários em equilíbrio

Descrição da situação-problema

Ao desenvolver seu trabalho como engenheiro mecânico em um laboratório de análises, você e o químico responsável receberam o diagrama de fases do cobre-prata (Cu-Ag) para desenvolver ligas metálicas. A partir do diagrama da Figura 2.20, qual é a temperatura de fusão dos componentes puros? Neste diagrama existe alguma composição eutética? Em caso afirmativo, qual é a composição e a temperatura?

Figura 2.20 | Diagrama de fases do Cu-Ag



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 293).

Resolução da situação-problema

A partir da interpretação do diagrama de fases cobre-prata concluiu-se que a temperatura do cobre puro e da prata pura é, respectivamente, 1085 °C e 961,8 °C. De acordo com o diagrama de fases do sistema cobre-prata, a composição eutética é igual a 71,9%p Ag 28,1%p Cu, enquanto que a temperatura eutética é igual a 779 °C.

Faça valer a pena

1. Os diagramas de fases em equilíbrio representam as relações entre a temperatura, as composições e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio.

Com base no contexto, analise as afirmações a seguir:

- I. O sistema cobre-níquel é chamado de isomorfo devido à completa solubilidade dos dois componentes nos estados líquido e sólido.
- II. Para as composições diferentes dos componentes puros, a fusão ocorrerá em uma faixa de temperatura em que as fases

líquida e sólida encontram-se em equilíbrio.

III. Para determinar as fases que estão presentes em uma liga metálica, basta definir o par composição-concentração desejado.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Somente em I e II.
- c) Somente em I e III.
- d) Somente em II e III.
- e) Somente em II.

2. Um diagrama de fases é um “mapa” que mostra quais fases são as mais estáveis nas diferentes composições, temperaturas e pressões.

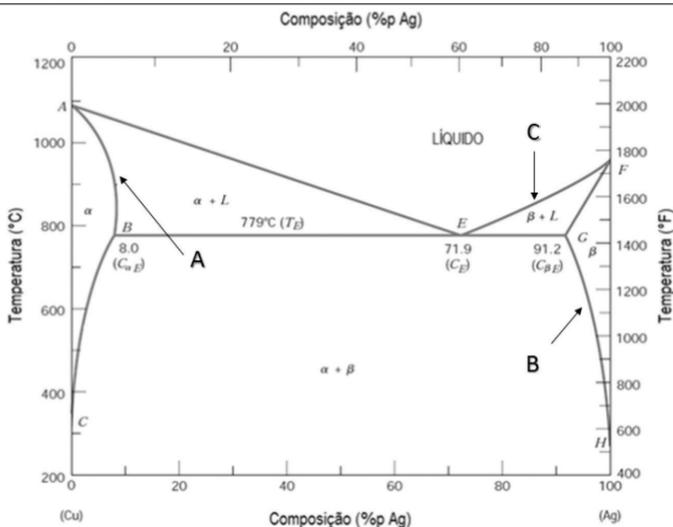
No ponto _____ o equilíbrio é invariante, portanto, o equilíbrio entre três fases ocorre a uma determinada temperatura e as composição das três fases são fixas.

Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna:

- a) Monotético.
- b) Eutético.
- c) Eutetoide.
- d) Peritético.
- e) Peritetoide.

3. Um tipo comum e relativamente simples de diagrama de fases encontrado para ligas binárias é o diagrama para o sistema cobre-prata. Esse diagrama de fases é conhecido como diagrama de fases eutético binário.

A figura a seguir apresenta o diagrama de fases para o sistema cobre-prata.



Assinale a alternativa que apresenta, corretamente, a que os pontos A, B e C correspondem no diagrama de fases:

- a) Curva *liquidus*, curva *solidus*, curva *solvus*.
- b) Ponto eutético, temperatura eutética, curva *liquidus*.
- c) Curva *solidus*, curva *solvus*, curva *liquidus*.
- d) Curva *solvus*, ponto eutético, curva *liquidus*.
- e) Curva *liquidus*, curva *solvus*, ponto eutético.

Seção 2.3

Diagrama de fases: sistema ferro-carbono

Diálogo aberto

Ao longo de sua vida profissional trabalhando como engenheiro mecânico de uma metalúrgica, você já se habituou aos desafios diários, sendo responsável por garantir a qualidade e a composição das ligas metálicas que são comercializadas pela empresa. Recentemente, um estagiário foi contratado para o setor que é de sua responsabilidade e, como um bom profissional, você tem compartilhado muito dos seus conhecimentos. Em muitos desafios você tem deixado o estagiário contextualizado para que a cada dia ele tenha um novo aprendizado. O recém-contratado já passou por situações em que teve que analisar uma amostra de ferro puro e aprendeu que em determinadas temperaturas o ferro experimenta transformações alotrópicas. Posteriormente, jovens empreendedores do setor de componentes eletrônicos procuraram a metalúrgica atrás de uma liga que pudesse ser utilizada como solda e, com suas orientações, o estagiário foi capaz de identificar que para essa aplicação é indicada a liga eutética de chumbo-estanho, que apresenta a temperatura de fusão menor que a dos componentes no estado puro.

Agora, vamos para o nosso último desafio desta unidade: você explicou ao estagiário que os aços e ferros fundidos são os metais mais consumidos devido à sua importância tecnológica e também devido ao fato que uma determinada liga metálica produzida na metalúrgica apresenta baixa resistência mecânica. A partir do diagrama de fases ferro-carbono de ferro, como seria possível aumentar a resistência dessa liga a partir da presença de uma determinada fase? Quais são as transformações de fases que ocorrem em uma liga de composição eutetoide?

Nesta seção, vamos estudar o conceito sobre fases em equilíbrio metaestável e compreender o diagrama de fases ferro-carbono em equilíbrio e ferro-carbono metaestável. O sistema ferro-carbono, é talvez, o sistema mais importante dentro da metalurgia devido à grande

aplicabilidade. Iremos estudar como se desenvolvem as microestruturas nas ligas ferro-carbono.

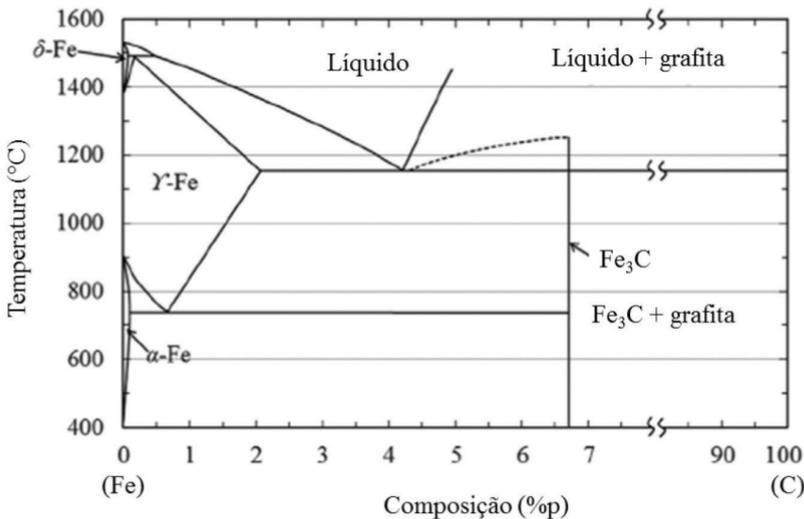
Por meio da compreensão desses temas, você será capaz de avaliar e selecionar diferentes tipos de materiais aplicados em projetos mecânicos, assim como compreender a relação entre as propriedades e o comportamento dos materiais de construção mecânica com suas microestruturas.

Não pode faltar

Entre todos os sistemas binários, o sistema ferro-carbono é o mais importante. Os aços e ferros fundidos são os principais materiais estruturais e são compostos essencialmente por ferro e carbono. Existem dois tipos de diagramas do sistema ferro-carbono:

O diagrama de fases Fe-C estável, que apresenta o equilíbrio entre o ferro e a grafita, como mostra a Figura 2.21.

Figura 2.21 | Diagrama de fases ferro-carbono (grafita) estável



Fonte: adaptada de <https://www.researchgate.net/profile/Changlei_Xia2/publication/277961789/figure/fig7/AS:280108591009805@1443794500856/fig-8-The-equilibrium-iron-carbon-phase-diagram.png>. Acesso em: 30 dez. 2016.

Os diagramas de fases em equilíbrio referem-se a condições de resfriamento que ocorrem muito lentamente, isto é, o equilíbrio entre as fases é mantido continuamente. Como vimos na Figura 2.21, os diagramas de fases em equilíbrio não apresentam a formação de fases que ocorre fora do equilíbrio, em composições e quantidades de fases fora do equilíbrio nem as formações de fases em condições denominadas metaestáveis.

Segundo Callister e Rethwish (2012), metaestável é definido como o estado fora do equilíbrio que pode persistir durante um tempo muito longo. Assim, devido à diferença entre as condições de equilíbrio e as elevadas velocidades de resfriamento utilizadas nos tratamentos térmicos dos metais, adotou-se o diagrama de fases do sistema ferro-carbeto de ferro ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$), metaestável para o estudo de aços e ferros fundidos. A Figura 2.22 apresenta o diagrama de fases para o sistema $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$.

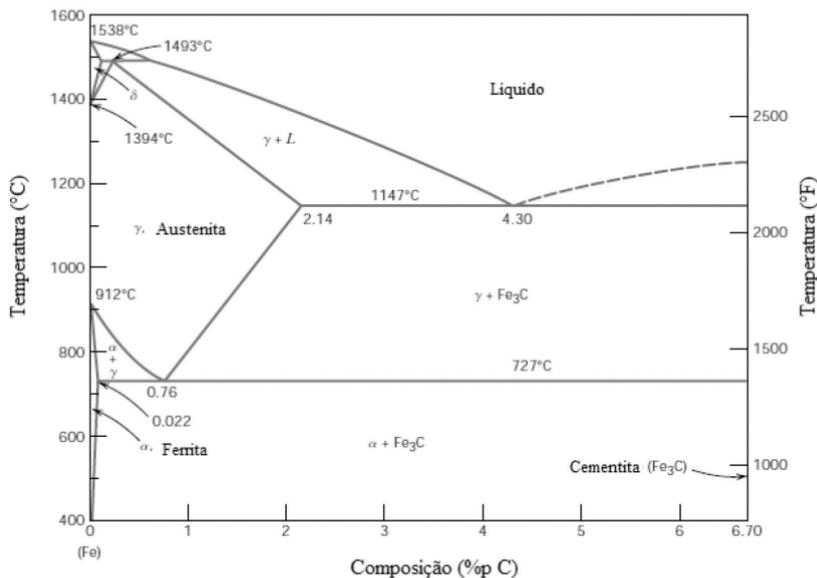


Assimile

No diagrama de fases do sistema ferro-carbeto de ferro ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$), o eixo das composições se estende somente até 6.7%p C. Nessa concentração, ocorre a formação do carbeto de ferro, ou cementita (Fe_3C). Por convenção, no diagrama de fases para o sistema $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$, o eixo das abscissas é dado em função da composição percentual de carbono.



Figura 2.22 | Diagrama de fases para o sistema Fe-Fe₃C



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 303).

Como vimos anteriormente, o ferro puro, ao ser submetido a diferentes temperaturas, experimenta transformações alotrópicas, isto é, o ferro no estado sólido existe com diferentes estruturas cristalinas. À temperatura ambiente, o ferro puro, também chamado de ferrita ou ferro α possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), que é estável até atingir a temperatura de 912 °C, quando experimenta sua primeira transformação alotrópica para austenita, também chamada de ferro γ , que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e é estável na faixa de temperatura de 912 °C a 1394 °C, quando novamente passa por outra transformação alotrópica de austenita para ferrita δ , que apresenta estrutura cristalina CCC e é estável até 1538 °C, que é a temperatura de fusão do ferro. Acima dessa temperatura, a ferrita δ se torna amorfa, isto é, sem ordenação atômica, o que caracteriza o ferro no estado líquido. Por sua vez, o ferro no estado líquido é estável até a temperatura de 2880 °C, na qual passa para a fase vapor (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Adicionalmente, na interpretação do diagrama de fases Fe-Fe₃C, é importante saber que os aços e ferros fundidos possuem teores

inferiores a 6,7% em peso de carbono. O ferro puro, por exemplo, apresenta teores inferiores a 0,008%p de carbono. Os aços contêm de 0,008% a 2,11%p de carbono, e os ferros fundidos, de 2,11 a 6,7%p C.

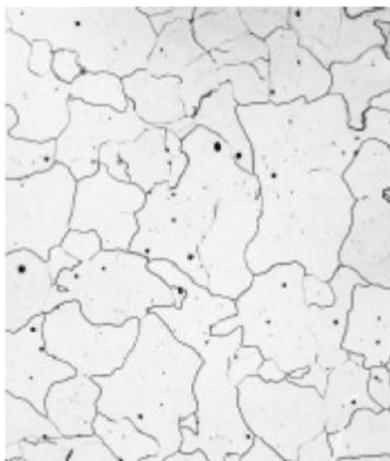


Reflita

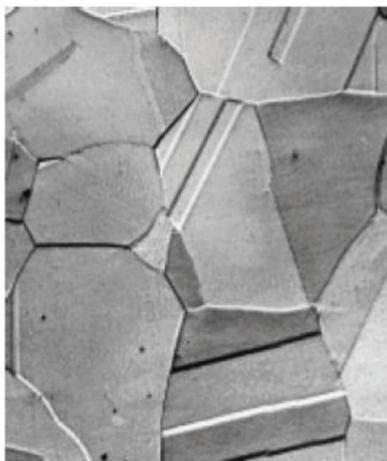
Utilizando os diagramas de fases Fe-Fe₃C e Fe-C, podemos dizer que ocorrem transformações de fases importantes acima de 6,7%p de carbono?

O carbono atua como impureza intersticial no ferro, formando uma solução sólida com os alótropos do ferro (ferrita α , ferrita δ e austenita), caracterizada pelas regiões monofásicas. Na ferrita α (Figura 2.23a), a solubilidade máxima de carbono é de 0,022%p C à temperatura de 727 °C. Essa fase é mole, isto é, apresenta baixa resistência mecânica (aproximadamente 300 Mpa), é magnética, apresenta elevada tenacidade e boa ductilidade. Outra solução sólida intersticial formada entre o carbono e o ferro é a austenita (Figura 2.23b), que é estável acima de 727 °C. A solubilidade máxima de carbono nesta fase é de 2,14%p C à temperatura de 1147 °C. A austenita apresenta elevada ductilidade e tenacidade e baixa resistência mecânica (150 Mpa).

Figura 2.23 | Fotomicrografia da (a) ferrita α e da (b) austenita



(a)



(b)

Fonte: Callister Jr. (2001, p. 304).

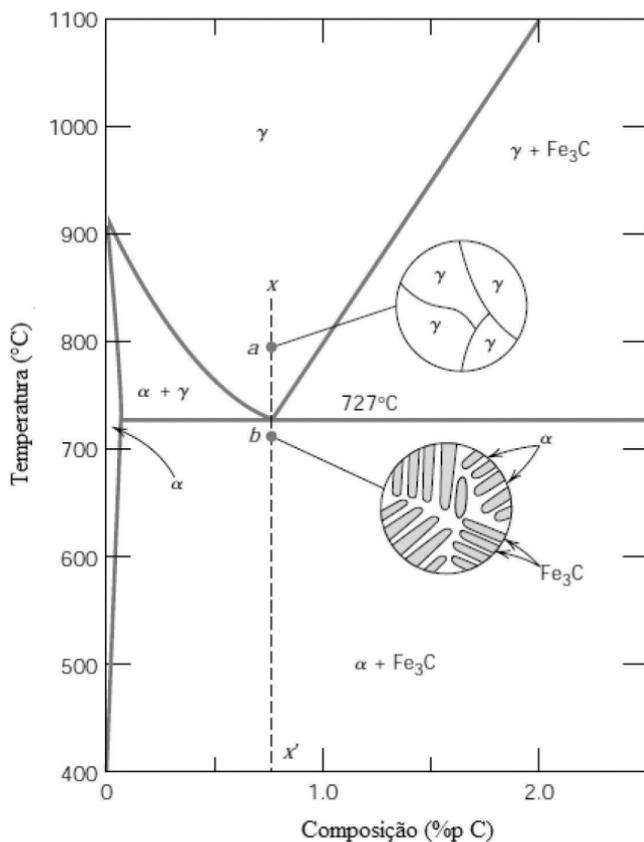


Acesse o site indicado. Nele você encontra diagramas de fases animados, sendo importantes para a compreensão do tema. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=13&top=114>>. Acesso em: 23 jan. 2016.

A ferrita δ pode ser considerada virtualmente a mesma que a ferrita α , exceto pela faixa de temperatura em que ocorre (CALLISTER; RETHWISH, 2012). Por ser estável somente em temperaturas muito elevadas, essa fase não apresenta qualquer importância tecnológica. Por fim, a cementita, ou carbeto de ferro (Fe_3C), é composta por 6,7%p de carbono e possui estrutura cristalina ortorrômbica. É um metal que apresenta elevada dureza, baixa tenacidade e ductilidade. De maneira análoga, a cementita tem as mesmas propriedades mecânicas que um material cerâmico puro. Em muitos aços, a presença da cementita aumenta substancialmente a resistência mecânica.

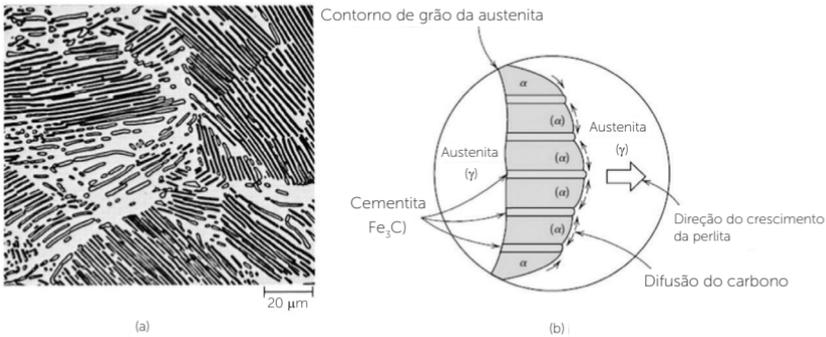
Nas ligas de aço, muitas são as microestruturas que podem ser formadas e, a partir da composição eutetoide (0,76%p C), as mudanças de fases que ocorrem com o resfriamento lento da fase austenita para as fases $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ são relativamente complexas. A Figura 2.24 traz a representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono com composição eutetoide, acima e abaixo da temperatura eutetoide de 727 °C. À medida que uma liga de composição eutetoide (ponto a) é resfriada lentamente, ao atingir a temperatura eutetoide até o ponto b, é formada a microestrutura perlita, que consiste em camadas alternadas ou lamelas compostas por ferrita α e cementita. A perlita existe como grãos denominados colônias, onde as camadas estão orientadas todas na mesma direção. A Figura 2.25a apresenta a microestrutura da perlita, onde a ferrita α é a fase clara e a cementita, a fase escura. Já a Figura 2.25b traz a representação esquemática da formação da perlita a partir da austenita, na qual a direção da difusão do carbono é representada por setas.

Figura 2.24 | Microestruturas para uma liga ferro-carbono com composição eutetoide



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 304).

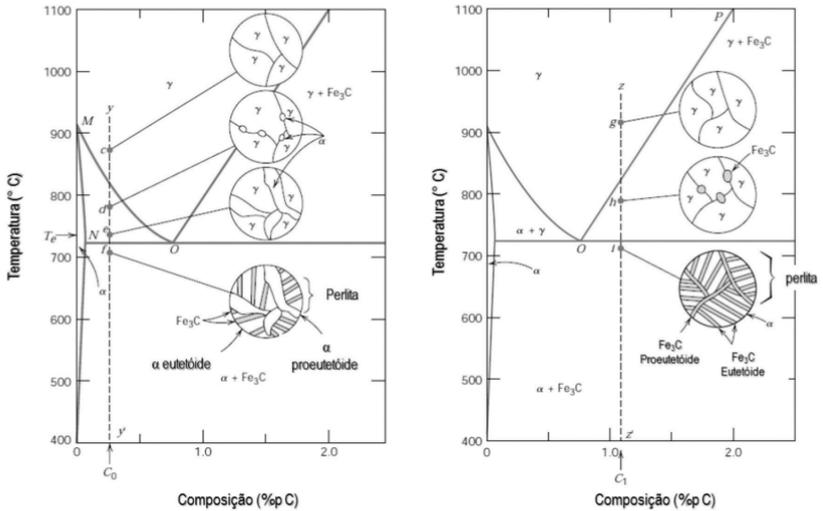
Figura 2.25 | (a) Fotomicrografia de um aço eutetoide; (b) Representação esquemática da formação da perlita a partir da austenita



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 307).

Além da composição eutetoide, no diagrama de fases Fe-Fe₃C existem as ligas hipoeutetoide, isto é, ligas que apresentam composição entre 0,022 e 0,76%p C e as ligas hipereutetoide, que contêm de 0,76 a 2,14%p C. Partindo do resfriamento de uma liga hipoeutetoide dada na Figura 2.26 (ponto c), observa-se que a 775 °C coexistirão as fases α e γ (ponto d). No resfriamento do ponto d para o ponto e, ocorre o crescimento da fase α . Ao atingir a temperatura eutetoide, toda a austenita restante transforma-se em perlita. Assim, a fase ferrita que está presente na perlita e na fase que se resfriava ao longo da região α e γ é chamada de ferrita proeutetoide. Já para as ligas hipereutetoide, partindo do resfriamento do ponto g, inicialmente, existe apenas austenita, como o resfriamento até a fase $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ (ponto h), em que inicia-se a formação de cementita, que é chamada de cementita proeutetoide. A Figura 2.26 apresenta, respectivamente, as representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição (a) hipoeutetoide e (b) hipereutetoide.

Figura 2.26 | Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição (a) hipoeutetoide e (b) hipereutetoide



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 307).



Exemplificando

A composição da ferrita e cementita na composição (C_1) para uma liga hipereutetoide pode ser calculada por:

$$\% \alpha \text{ (ferrita)} = \frac{6,7 - 1,2}{6,7 - 0} \cdot 100 = 82,10\% \text{ de } \alpha \text{ (ferrita)}$$

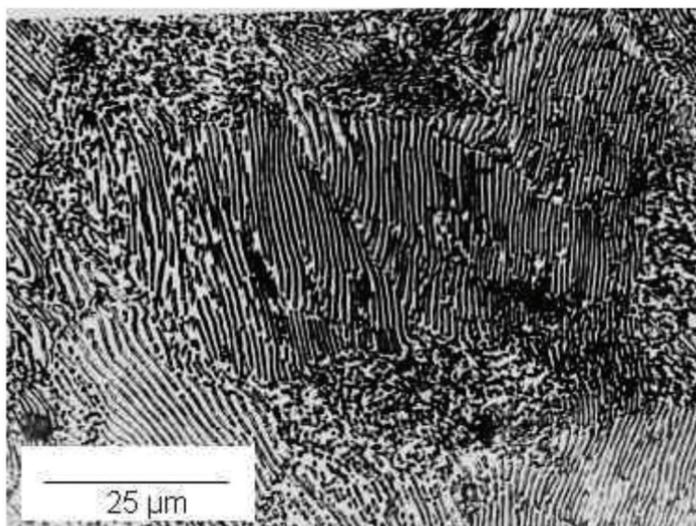
$$\% Fe_3C \text{ (cementita)} = \frac{1,2 - 0}{6,7 - 0} \cdot 100 = 17,9\% \text{ de C (cementita)}$$

Sem medo de errar

A partir da importância dos aços e ferros fundidos, você questionou o estagiário sobre como seria possível aumentar a resistência mecânica de uma liga metálica a partir das transformações de fases observadas em um sistema ferro-carbeto de ferro. Como isso seria possível? Quais são as transformações de fases observadas em uma liga de composição eutetoide?

Nas ligas de aço, muitas são as microestruturas que podem ser formadas a partir da composição eutetoide (0,76%p C). À medida que a liga é resfriada lentamente até atingir a temperatura eutetoide, forma-se a microestrutura perlita, que consiste em camadas alternadas ou lamelas compostas por ferrita α e cementita. A cementita é uma fase composta por 6,7%p de carbono, de estrutura cristalina ortorrômbica e em muitos aços. A presença da cementita aumenta substancialmente a resistência mecânica. A Figura 2.27 apresenta uma fotomicrografia da perlita, que é formada essencialmente por camadas alternadas de austenita e perlita.

Figura 2.27 | Microestrutura da perlita



Fonte: <<http://www.threeplanes.net/images/pearlite.jpg>>. Acesso em: 2 jan. 2017.

Avançando na prática

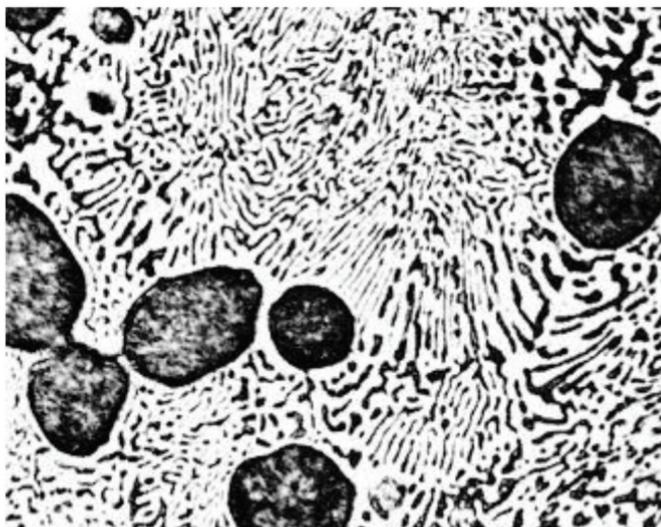
Soldas

Descrição da situação-problema

O sistema chumbo-estanho é a base de muitas ligas utilizadas para uma soldagem branda. Uma amostra chumbo-estanho foi identificada com a composição de 1%p Sn 99%p Pb, isto é, praticamente uma

amostra de chumbo puro. No entanto, junto à amostra foi recebida a seguinte fotomicrografia (Figura 2.28):

Figura 2.28 | Fotomicrografia amostra 1%p Sn 99%p Pb



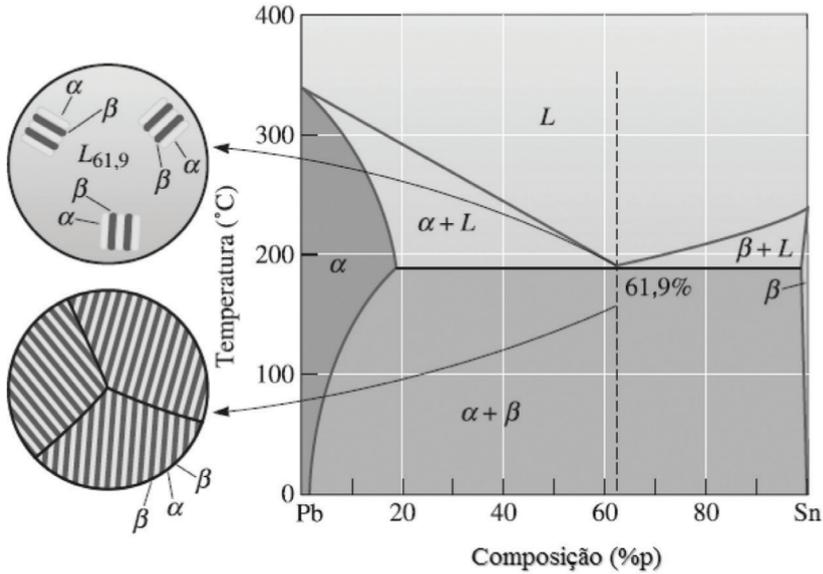
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 297).

A partir da sua inspeção sobre a amostra, ela deveria ser liberada e comercializada?

Resolução da situação-problema

A partir do diagrama de fases chumbo-estanho com o desenvolvimento das microestruturas, é possível afirmar que a fotomicrografia não corresponde a uma liga 1%p Sn 99%p Pb. No diagrama de fases Pb-Sn, essa composição está dentro da região monofásica, isto é, deveria ser encontrada apenas uma fase (Figura 2.29).

Figura 2.28 | Fotomicrografia amostra 1%p Sn 99%p Pb



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 297).

No entanto, a fotomicrografia apresenta uma microestrutura com a presença de duas fases. A fase escura refere-se a uma fase α rica em chumbo, enquanto que as camadas claras consistem de uma fase β rica em estanho.

Faça valer a pena

1. Os diagramas de fases em equilíbrio representam as relações entre a temperatura, as composições e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio. São diversos os tipos de diagramas de fases.

Com base no contexto, analise as seguintes afirmações:

- I. O diagrama de fases Fe-C estável apresenta o equilíbrio entre o ferro e o carvão de ferro.
- II. Os diagramas de fases em equilíbrio não apresentam a formação de fases que ocorre fora do equilíbrio.
- III. O ferro puro, ao ser submetido a diferentes temperaturas, experimenta transformações alotrópicas, isto é, o ferro no estado sólido existe com diferentes estruturas cristalinas.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Apenas I e II.
- c) Apenas I e III.
- d) Apenas II e III.
- e) Somente em II.

2. O ferro puro ao ser submetido a diferentes temperaturas, experimenta transformações alotrópicas, isto é, o ferro no estado sólido existe com diferentes estruturas cristalinas.

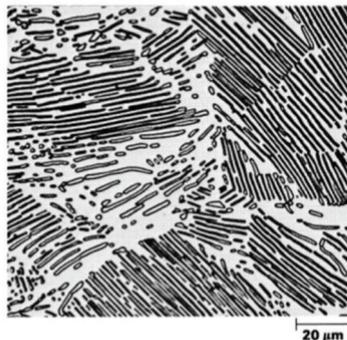
Nessa fase, a solubilidade máxima de carbono é de 0,022%p C à temperatura de 727 °C e, entre suas propriedades, destacam-se a baixa resistência mecânica, elevada tenacidade e boa tenacidade.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente a qual alótropo o trecho se refere:

- a) Ferrita α .
- b) Ferrita β .
- c) Ferrita δ .
- d) Ferrita γ .
- e) Cementita γ .

3. Nas ligas de aço, muitas são as microestruturas que podem ser formadas e, a partir da composição eutetoide (0,76%p C), as mudanças de fases que ocorrem com o resfriamento lento da fase austenita para as fases α + Fe₃C são relativamente complexas.

A figura a seguir apresenta a fotomicrografia de um aço do sistema ferro-carbono:



Assinale a alternativa que apresenta corretamente o tipo da composição do aço e a microestrutura presente.

- a) Aço eutetoide, ferrita α .
- b) Aço proeutetoide, perlita.
- c) Aço eutético, ferrita α .
- d) Aço eutetoide, perlita
- e) Aço eutético, cementita.

Referências

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The science and engineering of materials**. 6. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012.

Tratamentos térmicos

Convite ao estudo

Olá, aluno. Seja bem-vindo à terceira unidade da disciplina de *Materiais de construção mecânica*. Na unidade anterior, estudamos os conceitos básicos dos diagramas de fases e também compreendemos a importância do limite de solubilidade, solução sólida e Regra de Gibbs. Posteriormente, estudamos as microestruturas e fases em equilíbrio, assim como os sistemas anisomorfos. Finalizamos os estudos da unidade anterior com as reações invariantes: eutéticas e eutetoides; e o diagrama de fases - ferro carbono em equilíbrio e ferro carbono metaestável. Nesta terceira unidade, vamos estudar os tratamentos térmicos.

Vamos iniciar a unidade dando continuidade aos estudos das transformações de fases, partindo da reação eutetoide do sistema ferro-carbono de ferro, agora em condições de aquecimento ou resfriamento, isto é, estudaremos as transformações que acontecem nessas ligas metálicas quando submetidas aos diferentes tratamentos térmicos. A partir dos estudos desse tema, você será capaz de relacionar as microestruturas com os diferentes tipos de tratamentos térmicos utilizados.

Nesta unidade também vamos estudar sobre os tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera, revenimento, martêmpera, austêmpera e os tratamentos termoquímicos de superfície, como a cementação e a nitretação.

Então, vamos ao nosso desafio desta unidade: você foi contratado(a) como engenheiro(a) mecânico(a) em uma empresa especializada em tratamentos térmicos com mais de 13 anos no mercado. A empresa é prestadora de serviços para indústrias de diversos segmentos, como automotivo, siderúrgico, sucroalcooleiro,

mecânica e de mineração. Como parte do corpo técnico da empresa, você e sua equipe de trabalho terão como objetivo desenvolver melhores soluções para as necessidades de cada cliente, já que a seleção correta da liga metálica e o tratamento térmico adequado são imprescindíveis para se atingir o máximo de rendimento dos produtos comercializados. Mas quais são os tratamentos térmicos existentes? Todos os metais podem ser submetidos a um mesmo tratamento térmico? Quando utilizar um tratamento térmico em detrimento de outro?

Nesta unidade de ensino, vamos trabalhar com diversos temas, e você compreenderá que cada tratamento térmico tem um objetivo único para uma determinada liga metálica. Alguns tratamentos são eficientes para uma liga metálica e inviáveis para outras.

Assim, lhe desejamos um excelente autoestudo e muita persistência. Nossa vida profissional é repleta de desafios e precisamos nos motivar para encontrarmos as soluções adequadas para cada um deles. Uma formação acadêmica sólida é o alicerce necessário para o desenvolvimento de uma brilhante carreira no mercado de trabalho, e esse alicerce depende muito da sua dedicação aos estudos. Portanto, novamente lhe desejamos sucesso e bons estudos!

Seção 3.1

Recozimento e normalização

Diálogo aberto

Como engenheiro(a) mecânico(a) integrante do corpo técnico de uma empresa prestadora de serviços especializada em tratamentos térmicos, você e sua equipe vão prestar serviço a uma empresa do setor de aviação. Os diversos componentes e partes de uma aeronave são unidos, formando subconjuntos, e a união desses vários subconjuntos formam estruturas de maiores dimensões, que são instaladas nas aeronaves (Figura 3.1).

Figura 3.1 | Estrutura rebitada de uma aeronave



Fonte: <https://cdn.pixabay.com/photo/2014/09/21/02/08/technology-454587_960_720.jpg>. Acesso em: 26 jan. 2017.

Essas uniões são realizadas através de juntas estruturais, responsáveis por transferir carga de um elemento estrutural a outro. Mecanicamente, a maioria dessas juntas são unidas por rebites ou parafusos. Na fixação de estruturas de alumínio, a empresa contratante utilizava o rebite 2117-T. Porém, devido a um problema com fornecedores, passou a utilizar rebites 2017-T e 2024-T. No entanto, a empresa de aviação requer que os atuais rebites apresentem maior resistência mecânica do que a verificada em rebites 2117-T, mas com a mesma dimensão. Como você e sua equipe vão atender a esse

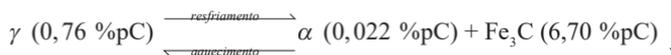
cliente? É possível submeter o material a tratamentos térmicos que aumentem a resistência mecânica dos 2017-T e 2024-T acima da resistência mecânica de rebites 2117-T?

Nesta seção, vamos aprender um pouco mais sobre as transformações de fases em ligas sujeitas ao aumento ou diminuição da temperatura, e vamos explorar os tratamentos térmicos de recozimento e normalização. Bons estudos!

Não pode faltar

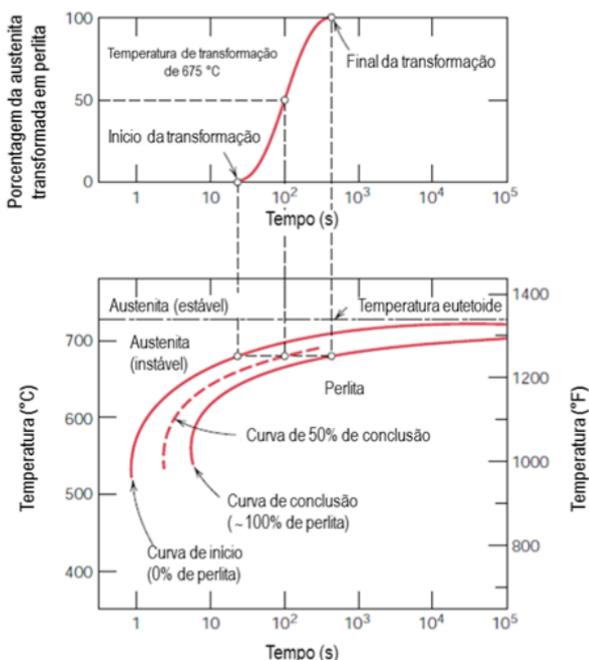
A expressão tratamento térmico é utilizada para descrever todas as operações controladas de aquecimento e resfriamento de um material no estado sólido que tem como objetivo alterar a sua microestrutura e/ou suas propriedades. Muitas transformações de fases são importantes no processamento dos materiais, principalmente as transformações do sistema ferro-carbeto de ferro.

A reação eutetoide do sistema ferro-carbeto de ferro é fundamental para a compreensão e desenvolvimento das microestruturas em ligas de aço. A reação eutetoide desse sistema é dada pela expressão a seguir:



A austenita (γ), ao ser resfriada, se transforma em duas novas fases sólidas: a ferrita (α) e a cementita (Fe_3C). Essa microestrutura, formada pelo resfriamento lento de um aço eutetoide, composta por camadas alternadas de ferrita (α) e cementita (Fe_3C), é conhecida como perlita, e a temperatura desempenha um papel fundamental na transformação da austenita em perlita. A Figura 3.2 traz uma maneira simples de analisar a relação de dependência entre a formação de novas microestruturas com a temperatura.

Figura 3.2 | Análise do diagrama de fases para uma transformação isotérmica



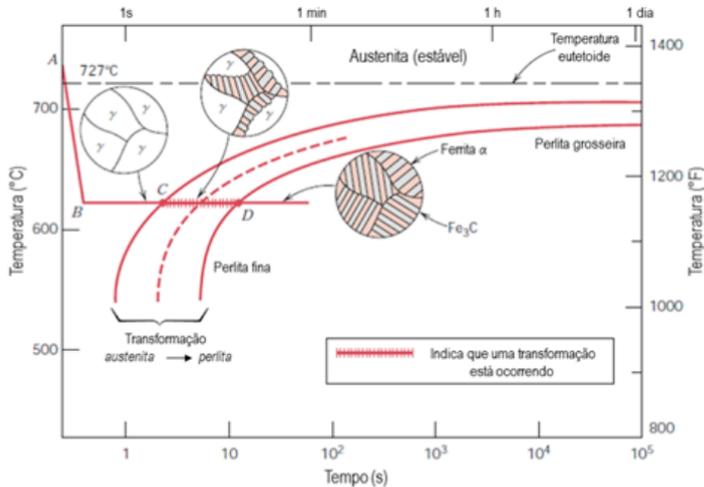
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 329).

Na Figura 3.2, duas linhas contínuas são traçadas: uma das curvas representa o tempo necessário a uma determinada temperatura para o início da transformação, e a outra curva representa o final da transformação. Entre as duas linhas contínuas existe uma linha tracejada, que corresponde ao estado de 50% da transformação concluída (CALLISTER JR., 2006). No diagrama de transformação de fases, a temperatura eutetoide é representada por uma linha horizontal. A transformação de austenita em perlita ocorre quando uma liga de composição eutetoide é super-resfriada abaixo da temperatura eutetoide. Assim, a partir da curva de início de transformação, é possível determinar o tempo necessário para que essa transformação tenha início e fim. É importante observar que à esquerda da curva de início de transformação e abaixo da temperatura eutetoide, a única fase presente é a austenita instável, enquanto que à direita da curva de conclusão de transformação existe apenas perlita. Assim, entre o início e término

da transformação coexistirão as duas fases, isto é, austenita e perlita. A utilização do gráfico apresentado na Figura 3.2 é válida somente para ligas de ferro-carbeto de ferro de composição eutetoide e para condições de temperatura constante do início ao final da reação. Essas condições de temperatura constante são denominadas isotérmicas. Assim, a Figura 3.3 é conhecida como diagrama de transformações isotérmicas e gráfico transformação tempo-temperatura (TTT).

A Figura 3.3 apresenta a curva real de um tratamento térmico isotérmico superposta ao diagrama de transformação isotérmica para uma liga ferro-carbono com composição eutetoide.

Figura 3.3 | Diagrama de transformação isotérmica para uma liga Fe-C com composição eutetoide e curva de tratamento térmico isotérmico (ABCD)

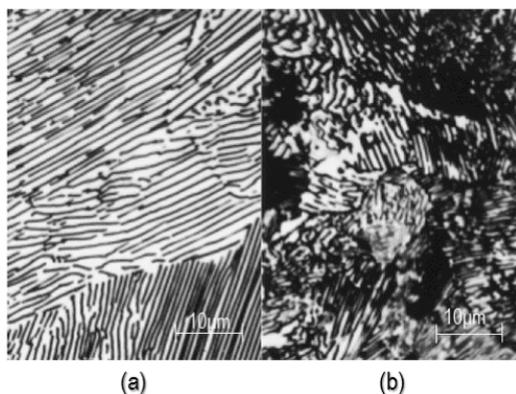


Fonte: Callister Jr. (2001, p. 330).

A partir do diagrama da Figura 3.3, observa-se que partindo-se da temperatura de 727 °C, a liga de composição eutetoide é formada totalmente por austenita instável (ponto A). A austenita é submetida a um resfriamento muito rápido, isto é, resfria de 727 °C a 620 °C em apenas 0,3 segundos. Essas condições são indicadas pelo trecho AB da curva de tempo-temperatura. A 620 °C a liga é mantida nessa temperatura, como indicado pela reta horizontal BCD. Em aproximadamente 3,5 segundos inicia-se a transformação da austenita

em perlita, isto é, nesse momento, podemos considerar que temos 100% de austenita. Por volta de 8,5 segundos já ocorreu 50% da transformação da austenita em perlita. Assim, temos 50% de austenita e 50% de perlita. Em 15 segundos, a transformação é concluída, isto é, a austenita foi totalmente transformada em perlita e, nesse ponto, temos 100% de perlita. Se a transformação da austenita em perlita ocorrer em temperaturas logo abaixo da temperatura eutetoide, serão formadas camadas espessas de ferrita e cementita, e essa microestrutura é conhecida como perlita grosseira. Nas temperaturas em que ocorrem a formação da perlita grosseira, as taxas de difusão são relativamente elevadas, permitindo que os átomos de carbono se difundam em longas distâncias, resultando na formação de grossas camadas. Já em temperaturas relativamente mais baixas, a taxa de difusão do carbono é menor. Conseqüentemente, ocorre a formação de camadas cada vez mais finas. A estrutura composta por camadas finas de ferrita e cementita é denominada perlita fina, que é produzida por volta de 540 °C. As Figuras 3.4(a) e 3.4(b) apresentam, respectivamente, as fotomicrografias da perlita grosseira e da perlita fina para uma liga de composição eutetoide.

Figura 3.4 | Fotomicrografias de (a) perlita grosseira, (b) perlita fina: ampliação de 3000 x



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 331).

Outra transformação característica da austenita é na microestrutura conhecida como bainita, que consiste em fases de ferrita e cementita obtidas pelo processo de difusão. A bainita possui forma de placas

ou agulhas, de acordo com a temperatura de transformação, e se forma em temperaturas inferiores às quais se forma a perlita. Assim, as curvas de transformação de início, 50% e conclusão são apenas uma extensão das curvas da transformação perlítica. Enquanto a perlita se forma na faixa de temperatura de 540 °C a 727 °C, a bainita se forma entre 215 °C e 540 °C. Se a transformação da austenita para bainita ocorrer em temperaturas superiores a 300 °C, ocorre a formação da bainita superior. Se ocorrer a formação da bainita em temperaturas inferiores a 300 °C, haverá a formação da bainita inferior. É importante destacar que a transformação das microestruturas depende da presença da austenita, isto é, para que seja formada a perlita e a bainita, necessariamente deverá existir uma quantidade de austenita.

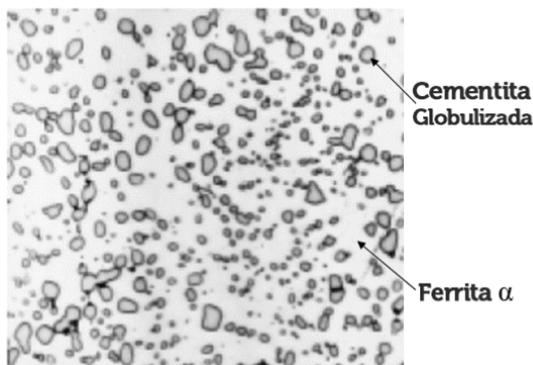


Exemplificando

Se uma determinada liga de composição eutetoide for resfriada e toda austenita for transformada em perlita, mesmo que a liga seja resfriada, interceptando a curva de transformação da bainita, não ocorrerá a formação dessa última microestrutura.

Adicionalmente, se uma liga de aço que apresenta as microestruturas perlita e bainita forem aquecidas e mantidas a uma temperatura abaixo da temperatura eutetoide durante um longo período de tempo (18 a 24 horas), ocorrerá a formação de uma nova microestrutura, denominada cementita globulizada, em que a fase cementita possui forma de partículas esféricas no interior de uma matriz contínua de fase ferrita α . Essa transformação ocorre devido à difusão adicional de carbono. A Figura 3.5 traz a fotomicrografia de um aço que apresenta a microestrutura cementita globulizada.

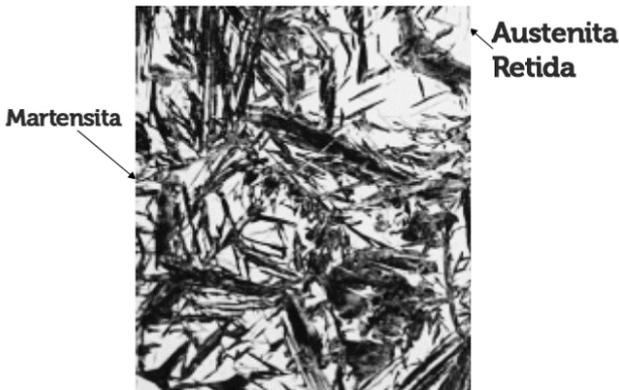
Figura 3.5 | Fotomicrografia de um aço que apresenta a microestrutura cementita globulizada



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 334).

Outra microestrutura formada a partir do resfriamento da austenita é a martensita. A martensita é formada a partir do resfriamento rápido de ligas ferro-carbono submetidas a resfriamentos rápidos até a temperaturas relativamente baixas, próximas à temperatura ambiente. Segundo Callister Jr. (2006), a transformação da martensita ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para impedir a difusão do carbono. Já que a formação da martensita não envolve a difusão, os grãos de martensita nucleiam e crescem a uma taxa muito elevada. Assim, considera-se que a transformação da martensita independe do tempo. A Figura 3.6 traz a fotomicrografia da microestrutura martensítica, que apresenta a aparência de placas ou agulhas (fase escura), e a fase branca consiste em austenita retida durante o resfriamento rápido.

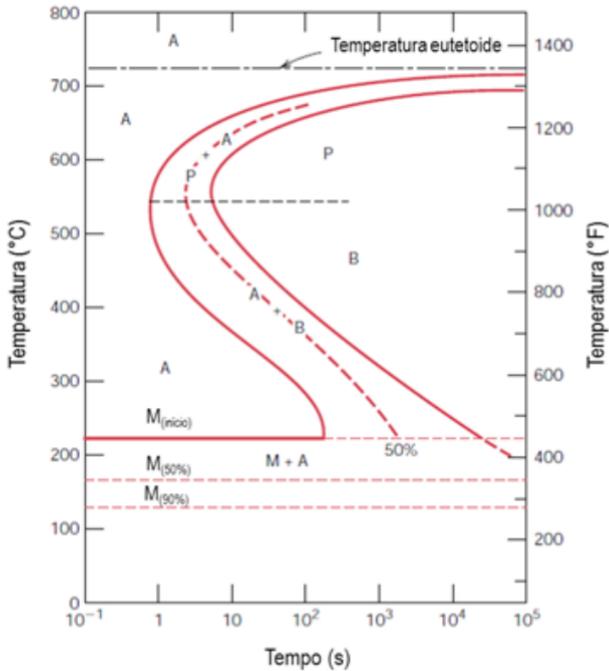
Figura 3.6 | Fotomicrografia da microestrutura martensítica



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 336).

Por se tratar de uma fase fora do equilíbrio, o diagrama de fases ferro-carbeto de ferro não apresenta a região de formação da martensita. A transformação da martensita é representada por linhas horizontais. O início de transformação da martensita é representado por uma linha horizontal M (início). As linhas tracejadas e identificadas como M (50%) e M (90%) indicam os respectivos percentuais de transformação. Para fins didáticos, muitas vezes, em vez de se considerar M (90%), considera-se M (final), isto é, 100% de formação martensítica. As transformações que independem do tempo são conhecidas como transformações atérmicas. A Figura 3.7 traz o diagrama de transformação isotérmica completo para uma liga ferro-carbono com composição eutetoide, onde A, B, M e P referem-se, respectivamente, a austenita, bainita, martensita e perlita.

Figura 3.7 | Diagrama de transformação isotérmica completo para uma liga ferro-carbono com composição eutetoide



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 336).

A presença de elementos de ligas, além do carbono, causa alterações significativas nas posições e formas das curvas nos diagramas de transformação isotérmica. Na prática, os tratamentos térmicos isotérmicos não são os mais fáceis de serem conduzidos. A maioria dos tratamentos térmicos envolvem o resfriamento contínuo de uma amostra até a temperatura ambiente. Dessa forma, os tempos de início e fim de transformação no resfriamento contínuo são retardados. Assim, as curvas isotérmicas são deslocadas para tempos mais longos e para temperaturas mais baixas.

O gráfico que contém as curvas modificadas para início e término de uma reação é conhecido como diagrama de transformação por resfriamento contínuo (TRC) ou ainda CCT (*continuous cooling transformation*). No geral, os diagramas de transformação isotérmica e por resfriamento contínuo podem ser considerados como diagramas

de fases em que o parâmetro tempo é introduzido. Esses diagramas permitem prever a microestrutura após um dado intervalo de tempo em processos de tratamento térmico conduzidos a uma temperatura constante e com resfriamento contínuo, respectivamente.

A microestrutura martensítica formada a partir da austenita apresenta elevada dureza e grande fragilidade, inviabilizando sua utilização em diversas aplicações. Dessa forma, a ductilidade e tenacidade da martensita podem ser melhoradas através do tratamento térmico denominado recozimento, que visa a aumentar a usinabilidade, reduzir a dureza ou obter as microestruturas desejadas.



Assimile

A usinabilidade pode ser definida como a facilidade com que um material pode ser torneado, furado ou cortado sem que haja alterações em suas propriedades mecânicas.

O recozimento, ou recozimento pleno, consiste em aquecer o aço até uma temperatura superior ou dentro da zona crítica, seguido de resfriamento lento. Para Colpaert (2008), o recozimento é utilizado para "apagar" as estruturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos aos quais o metal foi submetido anteriormente ou para refinar e/ou homogeneizar estruturas brutas de fusão.

O ciclo do recozimento é composto por três estágios:

Recuperação: realizado em temperaturas mais baixas que a eutetoide. Nesse estágio, a mobilidade atômica reduz a presença de defeitos pontuais e permite a movimentação de discordâncias para estágios de menor energia. Como resultado, ocorre a redução da dureza.

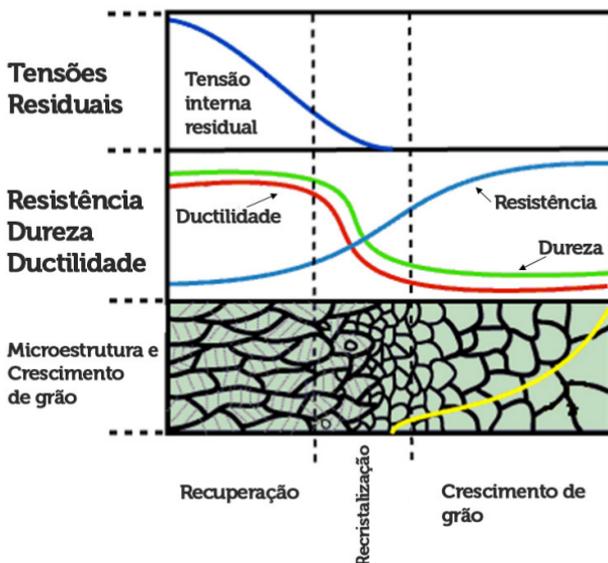
Recristalização: em temperaturas mais elevadas, ocorre a nucleação e o crescimento de novos grãos, isentos de deformação no interior e nos contornos de grãos pré-deformados, alterando a microestrutura e as propriedades mecânicas do metal.

Crescimento de grão: após a completa recristalização, os grãos recristalizados crescem devido à absorção dos grãos menores. Assim,

a formação de grãos com maiores dimensões acarreta a diminuição da dureza e da resistência mecânica do metal.

A Figura 3.8 apresenta a representação esquemática do ciclo de recozimento.

Figura 3.8 | Representação esquemática do ciclo de recozimento



Fonte: Colpaert (2008, p. 389).

Alguns cuidados são importantes no ciclo térmico de recozimento, como:

- O **aquecimento**, que deve ser uniforme, e a temperatura de patamar do tratamento térmico deve ser homogênea, evitando-se que a peça não apresente distorções ou frature.

- A **temperatura de recozimento**, que deve ser de 20 °C a 50 °C acima do limite superior da zona crítica para aços hipoeutetoides.

Já para aços hipereutetoides, o tratamento deverá ser realizado entre as temperaturas A_1 (indica uma "pausa" durante a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ em 727 °C) e A_{cm} (indica a transformação $\gamma \rightarrow Fe_3C$). O **tempo de manutenção à temperatura de patamar** deve ser suficiente para garantir a formação e homogeneidade da austenita.

Existem outros tratamentos térmicos que são classificados como recozimento, em que a temperatura máxima do tratamento é inferior ao intervalo crítico.

Os principais são:

- **Recozimento de esferoidização**, no qual o objetivo é a obtenção de uma estrutura de carbeto esferoidizados dispersos em uma matriz ferrítica.

- **Recozimento para alívio de tensões**, que tem por objetivo a eliminação e redução de tensões residuais, e é normalmente utilizado após a soldagem de alguns aços, solidificação de alguns fundidos e após usinagem.

- **Recozimento para redução do teor de hidrogênio**, que visa a reduzir a quantidade de hidrogênio, pois o excesso desse elemento químico no aço causa fragilidade e a formação de bolhas ou vazios em peças.

Como dito anteriormente, o recozimento de restauração e de recristalização são utilizados para restaurar parcialmente ou totalmente as propriedades físicas e mecânicas do material ou alterar suas estruturas.



Pesquise mais

O artigo *Evolução da textura cristalográfica de chapas de aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 430 durante laminação a frio, recozimento e estampagem* traz um estudo sobre a evolução das texturas em aço ferrítico submetido ao tratamento térmico de recozimento.

Disponível em: <http://www.academia.edu/3852910/Evolu%C3%A7%C3%A3o_da_textura_cristalogr%C3%A1fica_de_chapas_de_a%C3%A7o_inoxid%C3%A1vel_ferr%C3%ADtico_do_tipo_AISI_430_durante_lamina%C3%A7%C3%A3o_a_frio_recozimento_e_estampagem>. Acesso em: 21 fev. 2017.

Outro tratamento térmico é a normalização, que tem por objetivo refinar, uniformizar e diminuir o tamanho do grão. Na normalização, o aço é aquecido acima da temperatura crítica (região que tenha apenas austenita), seguido do resfriamento no ar. São formadas as microestruturas ferrita e perlita para aços com menos de 0,8 %pC, apenas perlita para aços com 0,8 %pC e perlita e cementita (Fe_3C) para aços com mais de 0,8 %pC.

A normalização é um tratamento térmico muito aplicado em peças laminadas e forjadas, e ainda muito utilizado como tratamento preliminar à têmpera. Na normalização, dependendo do aço, as microestruturas formadas são a ferrita e perlita fina ou a cementita e perlita fina. Em alguns aços, eventualmente, pode-se formar a bainita.

No planejamento da normalização, a principal preocupação é garantir a homogeneização, portanto, no aquecimento, para a conformação a quente, algumas vezes são utilizadas temperaturas mais elevadas. No entanto, a temperatura excessiva resulta em desvios importantes e irrecuperáveis, como o superaquecimento, em que ocorre o crescimento excessivo de grãos austeníticos, que comprometem a tenacidade e ductilidade do material. Do mesmo modo, pode ocorrer a utilização do tratamento térmico de normalização em temperaturas excessivamente elevadas.

Temos também o inverso, quando a normalização ocorre em temperaturas insuficientes, também conhecidas como tratamentos intercríticos, nas quais o aquecimento insuficiente pode resultar na formação de microestruturas indesejáveis. Nas temperaturas em que ocorrem os tratamentos térmicos que compreendem a austenitização do aço, os átomos de carbono apresentam elevada mobilidade. Assim, é importante tomar cuidados especiais para que durante o tratamento térmico não ocorra a descarbonetação do aço, isto é, a perda de carbono. Entre esses cuidados destacam-se a utilização de atmosferas controladas, em que o potencial químico do carbono é ajustado para estar em equilíbrio com o aço, com a utilização de banhos de sal e com pinturas especiais.



Todos os metais, ao serem submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento ou de normalização, são compostos pelas mesmas microestruturas?

Sem medo de errar

Como integrante do corpo técnico de uma empresa prestadora de serviços especializada em tratamentos térmicos, você e sua equipe estão trabalhando para uma empresa do setor da aviação que utilizava na fixação de estruturas de alumínio rebites 2117-T. Porém, devido a um problema com fornecedores, a empresa passou a utilizar rebites 2017-T e 2024-T. No entanto, a empresa de aviação requer que os atuais rebites apresentem maior resistência mecânica do que a verificada em rebites 2117-T, **mas** com a mesma dimensão. É possível submeter o material a tratamentos térmicos que aumentem a resistência mecânica dos 2017-T e 2024-T acima da resistência mecânica de rebites 2117-T?

O rebite 2117-T é o mais utilizado na indústria aeronáutica na rebiteagem de estruturas de liga de alumínio, pois é um rebite pronto, isto é, para sua utilização não é necessário nenhum tipo de tratamento térmico. Os rebites 2017-T e 2024-T também são utilizados para o mesmo fim. No entanto, para obter maior resistência quando comparados ao 2117-T, é necessário submeter os rebites 2017-T e 2024-T ao tratamento térmico de recozimento. Primeiramente, esses rebites são recozidos e, posteriormente, são mantidos refrigerados até o momento de utilização. A Figura 3.9(a) apresenta o estágio inicial da aplicação de rebites em uma aeronave e a Figura 3.9(b) mostra o resultado final.

Figura 3.9 | Rebites em aeronaves



a

b

Fonte:

(a) <<https://goo.gl/EmKnIm>>. Acesso em: 1 fev. 2017.

(b) <<http://aerobravo.com.br/site/images/savannah/02-novas-kitsava.jpg>>. Acesso em: 1 fev. 2017.

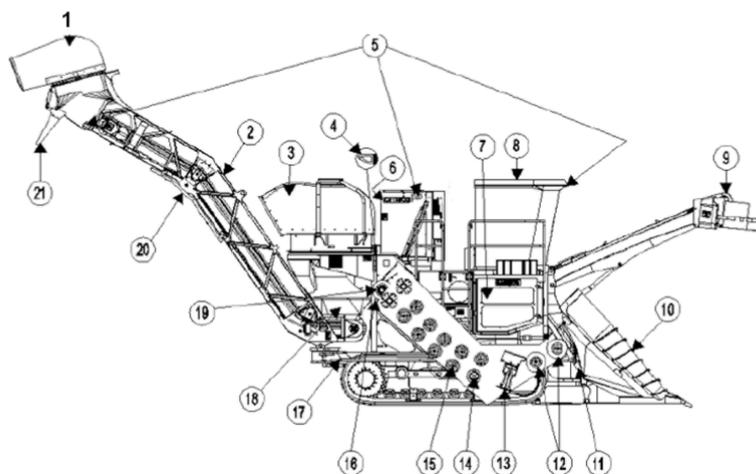
Avançando na prática

E se não fosse a cana?

Descrição da situação-problema

Uma empresa fabricante de colheitadeiras de cana-de-açúcar utiliza o aço AISI/SAE 1045 na fabricação do eixo dos facões. No entanto, alguns clientes reclamaram que o eixo dos rolos de linha que tem como função auxiliar na separação linhas da cana-de-açúcar deitadas ou embaraçadas quebraram em menos de seis meses de uso. Ao analisar a microestrutura dos eixos, percebeu-se que o material utilizado não apresentava a microestrutura adequadamente homogênea. Para evitar novos problemas, qual procedimento deve ser utilizado para garantir a homogeneidade do aço AISI/SAE 1045 utilizado na fabricação do eixo dos rolos de linha? A Figura 3.10 apresenta um esquemático dos principais componentes de uma colheitadeira de cana-de-açúcar.

Figura 3.10 | Componentes de uma colheitadeira de cana-de-açúcar



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/dT5D5W>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Legenda da Figura 3.10 – Componentes de uma colheitadeira de cana-de-açúcar:

- 1 – Extrator secundário
- 2 – Elevador
- 3 – Extrator primário
- 4 – Apoio de levante
- 5 – Luzes (3 áreas)
- 6 – Telas de entrada de ar
- 7 – Compartimento do motor
- 8 – Cabine
- 9 – Cortador de pontas
- 10 – Divisores/rolos de linhas
- 11 – Orifício de amarração (transporte)

12 – Rolo tombador (2)

13 – Cortador de base

14 – Rolo levantador

15 – Rolos alimentadores

16 – Caixa do picador

17 – Ganchos de reboque

18 – Cesto

19 – Volante do picador

20 – Resguardo da carreta

21 – Aba do cesto

Resolução da situação-problema

Ao analisar a microestrutura dos eixos, percebeu-se que o material utilizado não apresentava a microestrutura adequadamente homogênea. Assim, uma maneira de garantir a homogeneidade da microestrutura do aço AISI/SAE 1045 é a utilização do tratamento térmico de normalização, que também auxilia na eliminação das tensões internas da peça quando conformadas, por exemplo, por forjamento. Além de garantir a homogeneidade da microestrutura, a normalização aumenta a estabilidade dimensional da peça.

Faça valer a pena

1. Os tratamentos térmicos podem ser definidos como o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos metais e suas ligas sob condições controladas. Nesse tratamento térmico, um metal previamente submetido a um trabalho a frio é amolecido mediante a sua recristalização.

Assinale a alternativa que apresenta o tratamento térmico ao qual o trecho se refere:

- a) Normalização.
- b) Recozimento.
- c) Revenido.
- d) Têmpera.
- e) Têmpera por indução.

2. A normalização é um tratamento térmico muito aplicado em peças laminadas e forjadas, e ainda muito utilizado como tratamento preliminar à têmpera.

Sobre a normalização, analise as afirmações a seguir:

I. Na normalização, o aço é aquecido acima da temperatura crítica (região onde haja apenas austenita), seguido do resfriamento no ar.

II. No tratamento térmico são formadas as microestruturas ferrita e perlita para aços com menos de 0,8 %pC.

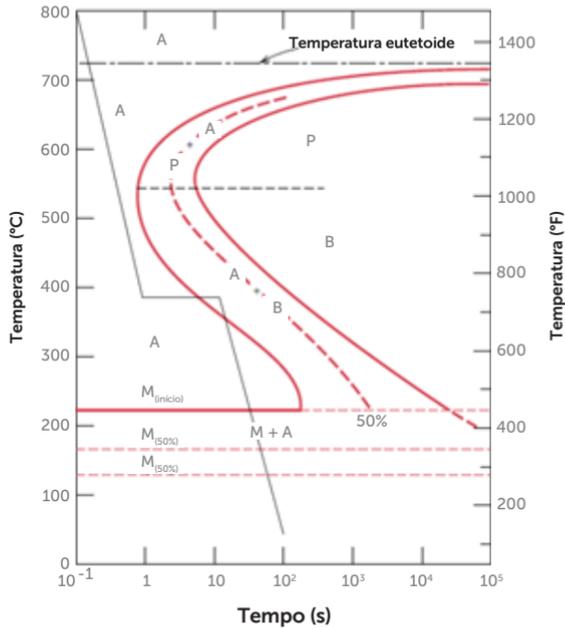
III. Na normalização, dependendo do aço, as microestruturas formadas são a ferrita e perlita fina ou a cementita e perlita fina. Em alguns aços, eventualmente, pode-se formar a bainita.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Em I e II.
- c) Em I e III.
- d) Apenas em II.
- e) Apenas em III.

3. Uma amostra de uma liga ferro-carbono com composição eutetoide a 800 °C, totalmente formada por austenita, foi submetida às seguintes condições de resfriamento térmico: resfriamento rápido até 400 °C em um segundo, manutenção nesta temperatura por aproximadamente 12 segundos, seguida de resfriamento rápido em 100 segundos até a temperatura ambiente.

A partir do diagrama de TTT, quais são as microestruturas formadas para a liga ferro-carbono com composição eutetoide?



Assinale a alternativa que apresenta o percentual e as microestruturas formadas nessas condições de resfriamento:

- a) 15% bainita e 85% martensita.
- b) 50% bainita e 50% martensita.
- c) 85% bainita e 15% martensita.
- d) 25% bainita e 75% perlita.
- e) 75% bainita e 25% perlita.

Seção 3.2

Têmpera e revenimento

Diálogo aberto

Como engenheiro(a) mecânico(a) de uma empresa especializada em tratamentos térmicos com mais de 13 anos no mercado, você e sua equipe de trabalho têm o desafio constante de propor as melhores soluções para as necessidades dos clientes. Recentemente, vocês auxiliaram uma empresa do setor aeronáutico que substituiu um rebite muito utilizado por outros dois tipos. No entanto, era necessário que os novos rebites exibissem resistência mecânica superior ao antigo rebite utilizado na indústria. Esse objetivo foi alcançado submetendo-se os novos rebites ao recozimento: solução acertada!

Mas a rotina de uma equipe de engenharia dentro de qualquer empresa é a de solucionar problemas, e você e sua equipe já têm um novo problema à espera: desta vez, é o de uma indústria automotiva que, durante a revisão programada de 50.000 km de um determinado veículo, constatou problemas nas molas de suspensão, como pontos de ferrugens, regiões com trincas, perda de altura do veículo e batente danificado.

As molas são componentes que fazem parte do sistema de suspensão dos automóveis. Elas são responsáveis pela sustentação do veículo através da absorção do impacto com o solo, contraindo ou distendendo de acordo com a superfície. De acordo com o fornecedor das molas, o material utilizado foi o aço 6150. Mas o que significa aço 6150? Esse aço é ideal para a fabricação de molas? Pode ser submetido a tratamentos térmicos? Qual é a possível causa dos defeitos verificados nas molas?

Figura 3.11 | Localização das molas de suspensão em automóveis



Fonte: <http://ubicandoando.com/wp-content/uploads/2016/05/audi_tt_2007_cutaway.jpg> e <<http://www.dinamicarpneus.com.br/wp-content/uploads/2014/08/Para-que-servem-as-molas-do-seu-carro.jpg>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

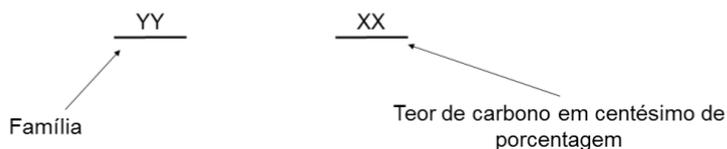
Essas são algumas questões que você conseguirá responder ao final do estudo desta seção. Nela, vamos conhecer o sistema de classificação ABNT para aços de construção mecânica; a definição de têmpera, temperabilidade e quais são as condições de operações desse tratamento térmico; e o tratamento térmico conhecido como revenimento. Portanto, seja perseverante. A perseverança é uma das características mais importantes para os profissionais que buscam a todo momento soluções para problemas.

Bons estudos!

Não pode faltar

Os principais sistemas de classificação dos aços são: AISI (*American Iron and Steel Institute*), SAE (*Society of Automotive Engineers*: SAE J404) e DIN (*Deutsches Institut für Normung*). No Brasil, a ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*) segue basicamente os sistemas AISI e SAE. Nesses sistemas, os aços são classificados em grupos principais, que são subdivididos em famílias de características semelhantes, que são designadas por um conjunto de algarismos, como mostra a Figura 3.12.

Figura 3.12 | Representação esquemática da classificação de aços segundo a ABNT



Fonte: Colpaert (2008, p. 280).



Exemplificando

Um aço 1020 pertence à família 10, isto é, um aço carbono com 20 centésimos de porcentagem de carbono (0,20 %C).

As principais famílias de aços, de acordo com a classificação da ABNT, são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 | Principais famílias de aços de acordo com a ABNT

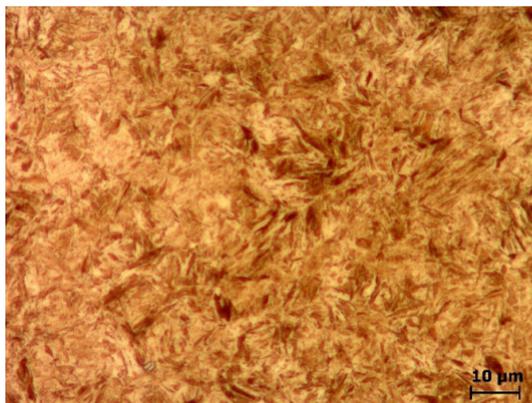
Aços Carbono	10xx	Aços carbono
	11xx	Aço carbono resulfurado (corte fácil)
	12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)
Aços de baixa liga (construção mecânica)	13xx	Mn 1,75%
	23xx	Ni 3,5%
	25xx	Ni 5,0%
	31xx	Ni 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	Ni 3,50%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	43xx	Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
	46xx	Ni 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	Ni 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% a 1,05%
	5xxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
	87xx	Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%
	92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%
	93xx	Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%
	98xx	Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%

Fonte: Colpaert (2008, p. 281).

Adicionalmente, para a classificação das famílias, é usual utilizar a letra H, que indica temperabilidade, após os quatro algarismos, como no aço 8620H. A letra B, entre os quatro algarismos, é utilizada para indicar a presença de boro, como no aço 10B46. Assim, com esses dois exemplos, conclui-se que o aço 8620H responde ao tratamento térmico de maneira mais consistente quando comparado ao aço 8620. De maneira análoga, a presença de boro faz com que o aço 10B46 apresente melhor temperabilidade quando comparado ao aço 1046. O conhecimento das composições químicas dos metais e suas ligas é fundamental para a aplicação de tratamentos térmicos.

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais importantes utilizados em aços com mais de 0,3 %pC de carbono. A têmpera consiste no aquecimento do aço acima da temperatura crítica, garantindo apenas a presença da microestrutura austenita com posterior resfriamento rápido em meios como água, óleo, salmoura ou ar, dependendo do aço utilizado. Esse tratamento térmico tem como finalidade aumentar a dureza e resistência mecânica do metal através da formação de uma microestrutura denominada martensita. A martensita apresenta-se na forma de agulhas, como mostra a micrografia de uma amostra do aço AISI/SAE 4140 resfriada em óleo (Figura 3.13).

Figura 3.13 | Martensita



Fonte: elaborada pelo autor.

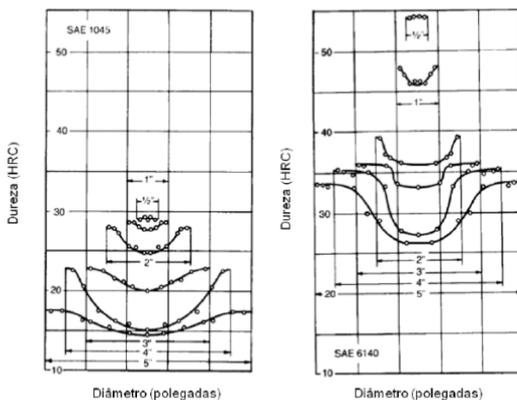
A profundidade de endurecimento e a distribuição da dureza ao longo da seção em uma peça após a têmpera dependem da temperabilidade do aço, das dimensões da peça, da temperatura

de austenitização e do meio de têmpera (COLPAERT, 2008). A temperabilidade é definida como a habilidade do aço de adquirir dureza pela formação de martensita em determinadas profundidades após tratamentos térmicos de têmpera, isto é, a temperabilidade é a capacidade de um determinado aço formar martensita e, portanto, à velocidade crítica de têmpera.

Para que um aço seja considerado temperado, é necessário que ocorra, no mínimo, a transformação de 50% em estrutura martensítica no centro da peça. Dois métodos importantes são utilizados para a medida e quantificação da temperabilidade dos aços: o método do diâmetro crítico e o ensaio Jominy (este último, veremos logo adiante nesta mesma seção).

No método do diâmetro crítico, também conhecido como método de Grossmann, barras cilíndricas com diâmetros crescentes são temperadas para determinar o diâmetro em que se obtêm 50% de martensita no centro da barra: esse é o chamado diâmetro crítico. A avaliação do percentual de martensita é realizada por análise metalográfica ou por medidas de dureza. Após a têmpera, as barras são seccionadas e é aferida a dureza, desde a sua superfície até o centro da barra cilíndrica. O método de distribuição de dureza é denominado curvas em U. A Figura 3.14 apresenta a distribuição de dureza das barras cilíndricas dos aços AISI/SAE 1045 e 6140 temperadas em óleo.

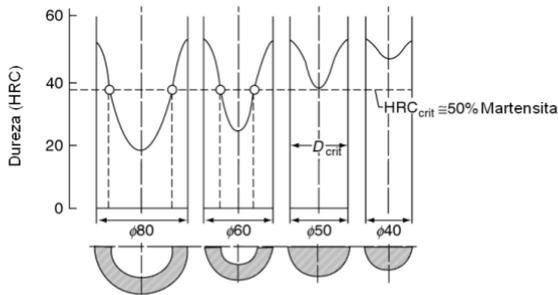
Figura 3.14 | Curvas em U dos aços AISI/SAE 1045 e 6140 temperados em óleo



Fonte: Krauss (1989, p. 154).

A Figura 3.15 traz a relação entre o diâmetro crítico em diferentes barras e a dureza.

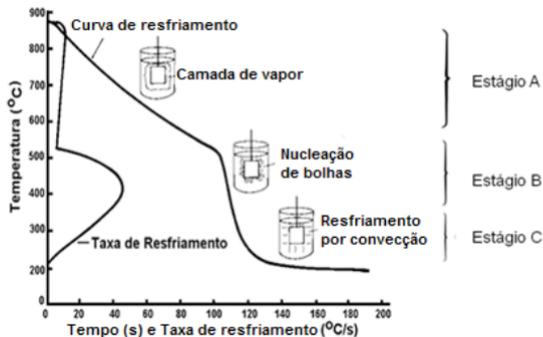
Figura 3.15 | Relação entre o diâmetro crítico e dureza



Fonte: Liscic (2006, p. 214).

A eficiência da têmpera depende de alguns fatores, como a geometria da peça, a temperabilidade do aço e o meio de resfriamento utilizado. Os meios de resfriamentos mais rápidos promovem a maior formação de martensita em maiores profundidades. Os aços austenitizados, ao serem submetidos a têmpera em meios líquidos voláteis, estão sujeitos a três estágios básicos de transferência de calor (estágios A, B e C), como indica a Figura 3.16.

Figura 3.16 | Estágios de transferência de calor durante a têmpera



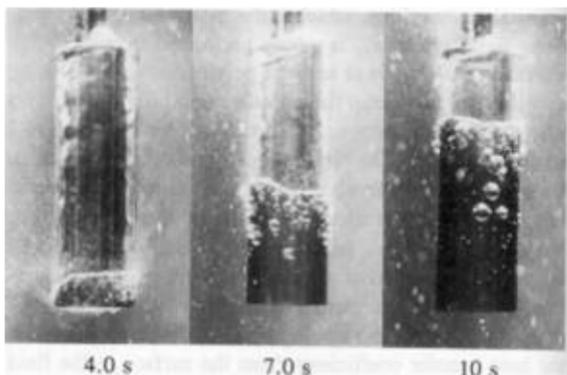
Fonte: Liscic (2006, p. 225).

Na fase de camada de vapor (estágio A), observa-se a formação de um filme de vapor estável ao redor do metal quente. Nesse estágio, a condutividade térmica relativamente baixa do vapor impede que o aço seja resfriado rapidamente.

Posteriormente, é iniciada a nucleação de bolhas (estágio B), que é caracterizada pela ebulição violenta na interface do material devido ao rompimento da camada de vapor, fazendo com que o fluido entre em contato com o metal quente. No estágio B, observam-se transferências de calor mais intensas. A temperatura de transição do estágio A para B é denominada temperatura de Leidenfrost (T_{A-B}), que independe da temperatura inicial da têmpera para um mesmo meio de resfriamento.

Por fim, o estágio C, ou fase de resfriamento por convecção, é iniciado quando o metal atinge uma temperatura abaixo da temperatura de ebulição do meio de resfriamento. Em casos práticos, os três estágios podem coexistir sobre a superfície do metal durante a têmpera. A Figura 3.17 apresenta os três estágios de transferência de calor observados em uma sonda cilíndrica temperada em água.

Figura 3.17 | Estágios de transferência de calor durante têmpera



Fonte: Totten, Bates e Clinton (1993, p. 189).

Grossmann introduziu o conceito de severidade de têmpera, também conhecido como fator H , para quantificar a eficiência do meio de têmpera:

$$H = \frac{h}{2k}$$

onde: h = coeficiente de transferência de calor (W/m^2K); e k = condutividade térmica do material (W/mK).

Assim, o resfriamento rápido ideal é aquele representador por $H = \infty$.

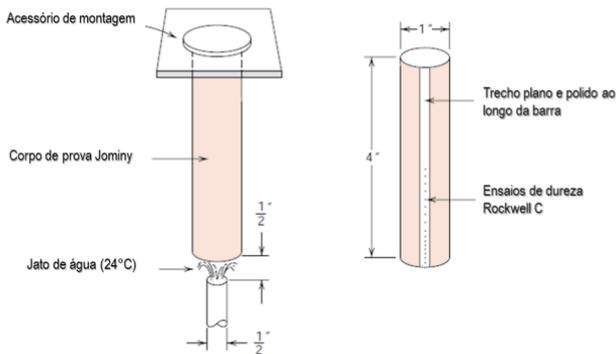


Assimile

Entre os fluidos utilizados na têmpera dos metais destacam-se água; salmoura; óleos animais, vegetais e minerais; e soluções de polímeros orgânicos.

Além do método de Grossmann, o ensaio Jominy é outra maneira de aferir a temperabilidade dos aços. O ensaio Jominy consiste em resfriar a extremidade de um único corpo de prova por um jato de água em condições controladas, obtendo-se uma ampla faixa de velocidades de resfriamento. Dessa forma, cada posição da superfície do corpo de prova resfria-se com uma velocidade diferente, resultando em diferentes transformações e, conseqüentemente, em durezas diferentes. As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam, respectivamente, o esquemático do ensaio Jominy e a correlação da dureza e resfriamento contínuo.

Figuras 3.18 | Esquemático do ensaio Jominy



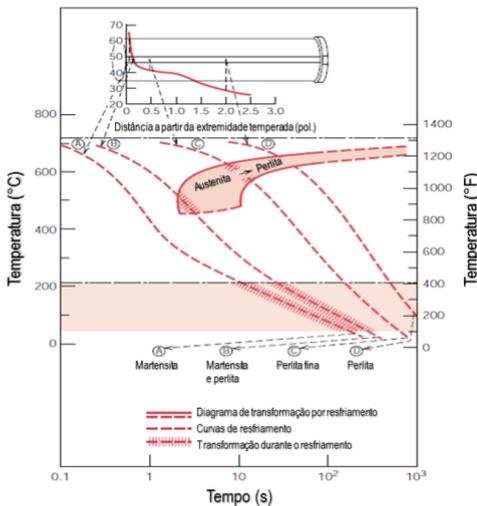
Fonte: Callister Jr. (2001, p. 128).



O arquivo *Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas* utiliza o ensaio Jominy para avaliar a temperabilidade do aço inoxidável martensítico (% peso).

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000100018&lng=e>. Acesso em: 22 fev. 2017.

Figura 3.19 | Correlação da dureza e resfriamento contínuo



Fonte: Callister Jr. (2001, p. 129).

Na têmpera, os desvios mais comuns ocorrem na austenitização e no resfriamento. Na austenitização, mesmo que a temperatura tenha sido adequada em um pequeno período em temperaturas inferiores, por exemplo 700 °C, inicia-se a transformação da austenita em ferrita. De maneira análoga, condições inadequadas de resfriamento promovem a formação de outras microestruturas indesejadas. Já um aquecimento insuficiente para a têmpera resulta na austenita não homogênea, assim como a dissolução incompleta das fases.

Durante a têmpera, é comum a ocorrência de tensões decorrentes da heterogeneidade de temperatura na peça, da dilatação ou da

expansão térmica (COLPAERT, 2008). Nos resfriamentos rápidos, o efeito da superposição das tensões térmicas às tensões de transformação martensítica introduz um nível significativo de tensões, que podem originar trincas de têmpera. No entanto, a presença de camadas espessas de óxido no interior da trinca ou a evidência de descarbonetação indicam que não se trata de uma trinca de têmpera recente.

Normalmente, um tratamento térmico que acompanha a têmpera é o revenimento, que tem por objetivo corrigir a excessiva dureza e fragilidade do material após a têmpera, aumentando a ductilidade do material. De forma geral, no revenimento, o aço martensítico é aquecido até uma temperatura abaixo da temperatura eutetoide (entre 250 °C e 650 °C) durante um período de tempo específico. O revenimento, além de produzir alterações microestruturais, promove o alívio das tensões decorrentes da têmpera.

Como dito anteriormente, a martensita revenida é composta por partículas de cementita extremamente pequenas, uniformemente dispersas, encerradas no interior de uma matriz contínua de ferrita. No revenimento, diversos são os fenômenos que podem causar fragilidade ao revenido. Um deles é a diminuição da tenacidade para aços submetidos ao revenimento em temperaturas entre 230 °C e 370 °C. Essa fragilidade ocorre devido à formação de uma película que envolve a estrutura martensítica. Outra fragilidade do revenido é a chamada fragilidade Krupp: quando os aços são mantidos ou resfriados lentamente, em temperaturas entre 400 °C e 500 °C. Durante o revenimento, alguns fenômenos podem ser observados, como a precipitação de carbonetos na austenita retida, que reduz seu teor de carbono e aumenta, conseqüentemente, as temperaturas de início e fim de transformação martensítica.

O duplo revenimento é uma aplicação utilizada para muitos aços-ferramenta e aços de alto teor de carbono, e tem por objetivo garantir a tenacidade e a estabilidade dimensional do aço.

Alguns aços com teores elevados de carbono podem apresentar uma quantidade significativa de austenita retida, devido à baixa temperatura de final de transformação martensítica. Por essa razão, os aços de altos teores de carbono utilizados em ferramentas, rolamentos

e calibres são submetidos a tratamentos térmicos subzero, isto é, utiliza-se temperaturas abaixo de zero para que a austenita retida seja transformada em martensita. Algumas vezes, é possível avaliar aproximadamente a temperatura máxima que o aço atinge a partir de sua coloração através das chamadas de cores de revenido, que muitas vezes são utilizadas em oficinas de têmpera, onde utilizam-se o revenido à baixa temperatura. A Tabela 3.1 apresenta as temperaturas e as cores observadas nos aços.

Tabela 3.1 | Cores do revenido

CORES DO REVENIDO	TEMPERATURA (°C)
Amarelo-claro	220
Amarelo-ouro	240
Pardo-avermelhado	260
Roxo	280
Azul	300
Azul-claro	320

Fonte: Colpaert (2008, p. 311).



Refleta

Será sempre possível distinguir as estruturas micrográficas dos aços revenidos entre 300 °C e 500 °C?

Sem medo de errar

Como engenheiro(a) mecânico(a) de uma empresa especializada em tratamentos térmicos com mais de 13 anos no mercado, você e sua equipe estão atendendo a uma indústria automotiva que, durante a revisão programada de 50.000 km de um determinado veículo, constatou problemas nas molas de suspensão, como pontos de ferrugens, regiões com trincas, perda de altura do veículo e batente danificado.

As molas são componentes que fazem parte do sistema de suspensão dos automóveis. Elas são responsáveis pela sustentação do veículo através da absorção do impacto com o solo, contraindo ou distendendo de acordo com a superfície. De acordo com o fornecedor das molas, o material utilizado foi o aço 6150. Mas o que

significa aço 6150? Esse aço é ideal para a fabricação de molas? Pode ser submetido a tratamentos térmicos? Qual é a possível causa dos defeitos verificados nas molas?

Durante os estudos desta seção, aprendemos que os aços são classificados de acordo com a AISI, SAE e DIN. No Brasil, a ABNT segue basicamente os sistemas AISI e SAE. Nesses sistemas, os aços são classificados em grupos principais, que são subdivididos em famílias de características semelhantes, que são designadas por um conjunto de algarismos, assim o aço denominado 6150 é um aço da família 61xx com composição Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo e apresenta 0,50% de carbono. Esse aço é utilizado na fabricação de molas e apresenta elevada temperabilidade, baixa soldabilidade e boa ductilidade. A elevada temperabilidade garante que esse aço responda bem aos tratamentos térmicos. Na fabricação das molas, o aço SAE 6150 pode ter sido utilizado apenas na condição laminado ou trefilado sem tratamentos térmicos posteriores, o que é facilmente identificado através de uma análise microestrutural. Esse aço, ao ser submetido à têmpera e ao revenimento, apresenta alta resistência mecânica e elevada resistência à fadiga. No caso de o aço ter sido submetido à têmpera, sem posterior revenimento, a formação de trincas pode ser devido à ocorrência de tensões residuais.

Avançando na prática

Fabricação de molas

Descrição da situação-problema

Ao detectar o problema com as molas, a empresa automobilística entrou imediatamente em contato com o fornecedor do produto para relatar o problema. A partir de análises, foi detectado que um lote de molas fabricadas com o aço SAE 6150 apresentou defeitos, como trincas antes do previsto. A princípio, o aço possui a composição química de acordo com a ABNT. No entanto, seria possível utilizar outro aço? Qual é a família e a composição desse aço? É possível submetê-lo a tratamentos térmicos? As propriedades do novo aço justificam sua utilização na fabricação de molas?

Resolução da situação-problema

A escolha de um novo aço deve atender às características do projeto. Outro aço também utilizado na fabricação de molas é o aço AISI/SAE 5160, que pertence à família dos aços 51xx com composição de Cr 0,80 a 1,05%. Assim como o aço SAE 6150, o aço 5160 apresenta alta temperabilidade e boa ductilidade. Na condição beneficiada, apresenta alta resistência mecânica e boa resistência à fadiga. A Figura 3.20 apresenta molas fabricadas com o aço SAE 5160.

Figura 3.20 | Molas fabricadas com o aço SAE 5160



Fonte: <<http://www.acosporte.com.br/imagens/servicos/aco-sae-5160-01.jpg>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Faça valer a pena

1. Os principais sistemas de classificação dos aços são: AISI (*American Iron and Steel Institute*), SAE (*Society of Automotive Engineers*: SAE J404) e DIN (*Deutsches Institut für Normung*). No Brasil, a ABNT segue basicamente os sistemas AISI e SAE.

Os aços são classificados em grupos principais, que são subdivididos em famílias de características semelhantes, que são designadas por um conjunto de algarismos. Sobre a composição do aço 4340, assinale a alternativa correta:

- a) O aço 4340 é composto quimicamente por Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%.
- b) O aço 4340 é classificado como aço carbono com 43% de carbono em sua composição.
- c) O aço 4340 é composto por Ni 0,55%, Cr 0,50% , Mo 0,25% e 40% de carbono.

d) O aço 4340 é composto quimicamente por Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25% e 40% C.

e) O aço 4340 é composto por Ni 0,55%, Cr 0,50% , Mo 0,25% e 0,4% de carbono.

2. A eficiência da têmpera depende de alguns fatores, como a geometria da peça, a temperabilidade do aço e o meio de resfriamento utilizado. Os meios de resfriamentos mais rápidos promovem a maior formação de martensita em maiores profundidades.

Os aços austenitizados, ao serem submetidos a têmpera em meios líquidos voláteis, estão sujeitos a três estágios básicos de transferência de calor.

Com base nesse contexto, analise as afirmações a seguir:

I. Na fase de camada de vapor, a condutividade térmica relativamente baixa do vapor impede que o aço seja resfriado rapidamente.

II. O estágio dois é caracterizado pela ebulição violenta na interface do material devido ao rompimento da camada de vapor, fazendo com que o fluido entre em contato com o metal quente.

III. O terceiro estágio é iniciado quando o metal atinge uma temperatura abaixo da temperatura de ebulição do meio de resfriamento.

É correto o que se afirma:

a) Em I, II e III.

b) Em I e II.

c) Em I e III.

d) Em II e III.

e) Apenas em II.

3. A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais importantes utilizados em aços com mais de 0,3 %pC de carbono. A têmpera consiste no aquecimento do aço acima da temperatura crítica, garantindo apenas a presença da microestrutura austenita com posterior resfriamento rápido em meios como água, óleo, salmoura ou ar, dependendo do aço utilizado.

Esse tratamento térmico tem como finalidade _____ a dureza e _____ do metal através da formação da microestrutura denominada _____.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

a) aumentar, resistência mecânica, martensita

- b) diminuir, resistência mecânica, perlita
- c) aumentar, ductilidade, martensita
- d) diminuir, ductilidade, ferrita
- e) aumentar, tenacidade, perlita

Seção 3.3

Martêmpera, austêmpera e tratamentos termoquímicos

Diálogo aberto

Você é um(a) engenheiro(a) mecânico(a) de uma empresa especializada em tratamentos térmicos reconhecida pela qualidade do seu trabalho. Faz parte do seu dia a dia encontrar a solução dos mais variados problemas. No último trabalho, você e sua equipe solucionaram o problema de uma indústria automotiva que detectou que as molas da suspensão dos automóveis quebravam com pouco tempo de uso. Identificou-se que após a fabricação das molas, o aço SAE 6150 pode ter sido utilizado apenas na condição laminada ou trefilada, sem tratamentos térmicos posteriores, o que é facilmente identificável por uma análise microestrutural.

Cliente satisfeito, é hora de mais um desafio. Uma empresa fabricante de motores de engrenagens utiliza o aço AISI/SAE 4320 na fabricação das engrenagens. No entanto, para se adquirir resistência ao desgaste, as peças devem ser submetidas a tratamentos térmicos, trabalho realizado pela empresa na qual você trabalha. Qual é o tratamento indicado para essa aplicação? Esse aço é indicado para a fabricação de engrenagens? Nesta seção, vamos aprender qual é o tratamento utilizado para proporcionar dureza superficial adequada nos dentes da engrenagem.

Figura 3.21 | Motores de engrenagem



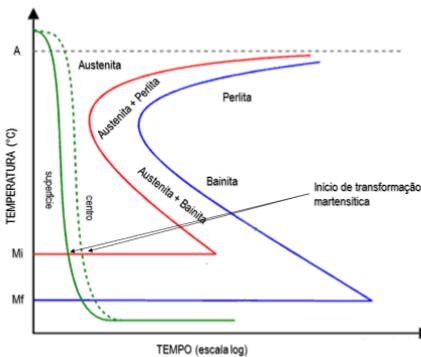
Fonte: <<http://www.mecanicaindustrial.com.br/wp-content/uploads/2012/01/Motores-de-engrenagens.jpg>>. Acesso em: 5 fev. 2016.

Bons estudos!

Não pode faltar

Como vimos na seção passada, os tratamentos térmicos são utilizados para promover alterações microestruturais dos aços ou para aliviar/eliminar a superposição da transformação martensítica e das tensões térmicas, que são as responsáveis pela formação de trincas e distorções no aço durante a têmpera. Assim, em aços que apresentam temperabilidade suficiente, é possível realizar a têmpera com um estágio de homogeneização da temperatura da peça antes de atingir a têmpera inicial de transformação martensítica (Mi). O tratamento térmico que envolve o estágio de homogeneização da temperatura da peça antes do início da transformação martensítica é conhecido como martêmpera. Na têmpera, a superfície atinge a temperatura de início de transformação martensítica antes que o núcleo da peça, isto é, a superfície e o núcleo da peça atingem a transformação martensítica em momentos diferentes (Figura 3.22).

Figura 3.22 | Diagrama TTT para têmpera



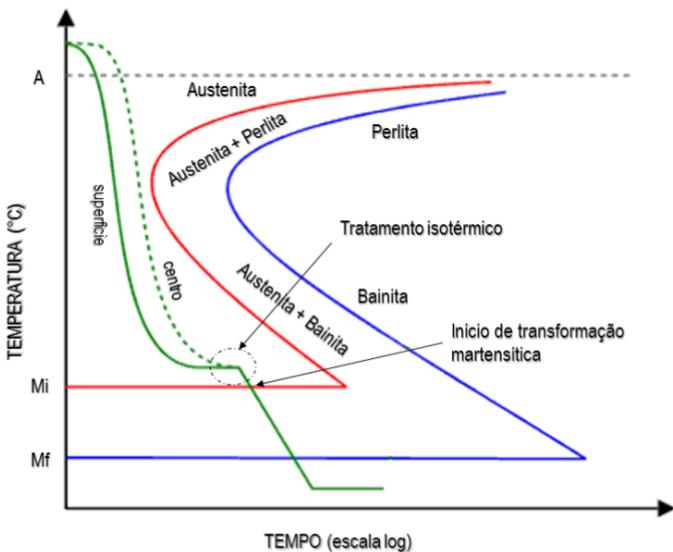
Fonte: adaptada de <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/im01/aco203.gif>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

Já na martêmpera, antes que seja atingido o início da transformação martensítica, um rápido tratamento isotérmico permite que a temperatura da superfície e do centro da peça seja igual. Conseqüentemente, a peça atinge o início da transformação martensítica no mesmo momento, como observa-se no diagrama TTT para o tratamento térmico de martêmpera (Figura 3.23).



Não se esqueça que tratamento isotérmico pode ser definido como a operação ou conjunto de operações realizadas na peça no estado sólido, que compreendem aquecimento, permanência em determinada temperatura e posterior resfriamento, em condições controladas, realizados com a finalidade de dar ao material determinadas características devido às alterações nas suas propriedades.

Figura 3.23 | Diagrama TTT para a martêmpera



Fonte: adaptada de <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/im01/aco204.gif>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

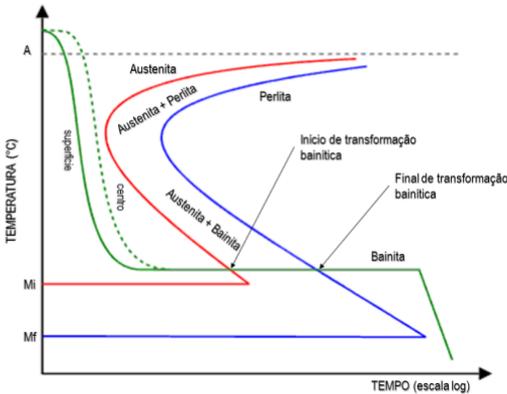
Na martêmpera, a homogeneização da temperatura da peça reduz sensivelmente o risco de formação de trincas e distorções, o que não dispensa o revenimento. Além da martêmpera, outro tratamento térmico importante é a austêmpera, que é um tratamento isotérmico em que ocorre a transformação da austenita em bainita (COLPAERT, 2008). Após ser submetido à austêmpera, o revenimento não é mais necessário. A austêmpera é o tratamento térmico que consiste no resfriamento rápido do metal até a temperatura de transformação bainítica.



A têmpera é o tratamento térmico utilizado para proporcionar dureza no metal pela formação da martensita. Então, quando devemos utilizar a austêmpera?

Na Figura 3.24 observa-se que o metal composto por apenas austenita sofre resfriamento até a temperatura de formação da bainita, próxima à temperatura de início de transformação martensítica. Ao atingir a temperatura de patamar de transformação bainítica, o metal é mantido nessa temperatura até a transformação total em bainita e, posteriormente, em resfriamento rápido.

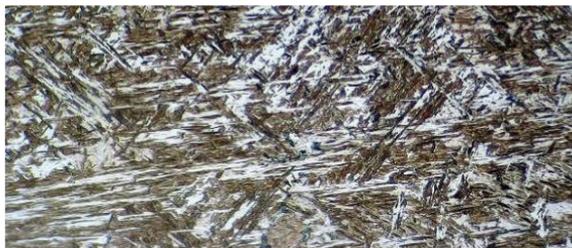
Figura 3.24 | Diagrama TTT para a austêmpera



Fonte: adaptada de <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/im01/aco203.gif>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

A Figura 3.25 apresenta a microestrutura bainita formada na austêmpera.

Figura 3.25 | Bainita



Fonte: <<http://www.manutencaoessuprimentos.com.br/imagens/aparencia-da-bainita-sob-o-microscopio.jpg>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

Em algumas aplicações, os tratamentos térmicos não são indicados, pois alteram a microestrutura e as propriedades de toda peça ou aço. Muitas vezes, são desejadas apenas alterações das propriedades superficiais das peças. Nessas situações, são indicados os tratamentos termoquímicos, que têm por objetivo modificar as propriedades superficiais do aço. Normalmente, esses tratamentos são utilizados quando é desejada a combinação de uma superfície com elevada resistência ao desgaste e um núcleo tenaz (COLPAERT, 2008). Engrenagens, pinos móveis e eixos de comandos são alguns exemplos de aplicações que requerem essa combinação. Na maioria dos tratamentos termoquímicos é utilizada a adição de carbono e/ou nitrogênio para modificar as propriedades dos metais. O carbono e o nitrogênio atuam como solutos intersticiais e se difundem com elevada rapidez no aço. Entre os tratamentos termoquímicos, destacam-se a cementação e a nitretação.



Pesquise mais

Quer aprender mais sobre os tratamentos térmicos e os tratamentos termoquímicos? Não deixe de assistir ao vídeo *Ciência dos materiais - aula 08 - Tratamentos térmicos e tratamentos termoquímicos nos aços*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5XYbfGbiTFM>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

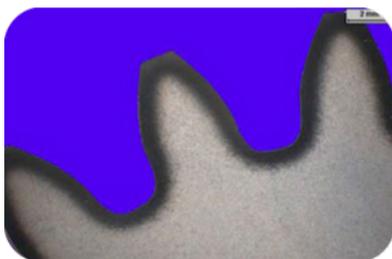
Na cementação, o carbono é introduzido na superfície do aço em temperaturas acima de 900 °C, e dois aspectos importantes influenciam esse processo: o meio em que o aço é carbonetado e o processo de difusão do carbono. A cementação pode ser realizada em meios líquido, gasoso e sólido, sendo o potencial químico do carbono nesses meios

o fator determinante do teor de carbono na superfície da peça. Já o processo de difusão do carbono da superfície da peça depende da temperatura e da composição química do aço. Nos aços cementados, os núcleos contêm de 0,15% a 0,25% de carbono, enquanto na superfície essa concentração é ajustada entre 0,8% e 1,0%. Os aços AISI/SAE 5120, 8620, 4620 e 4023 são exemplos de aços utilizados na fabricação de engrenagens e submetidos a cementação (COLPAERT, 2008).

A cementação sólida é o processo mais antigo de cementação existente e consiste no aquecimento do metal acima da zona crítica, na qual a solubilidade do carbono no aço é elevada, e há a utilização de cimentos sólidos, como carvão de madeira moída e carbonatos, que atuam como catalisadores, aumentando a proporção de CO em relação ao CO_2 . Porém, na cementação sólida é praticamente impossível manter o controle dos resultados, podendo ocorrer a cementação excessiva, o que pode acarretar a formação de trincas e a escamação da camada cementada. Normalmente, após a cementação sólida, é necessário submeter o metal a um tratamento térmico posterior, como a normalização, para refinar o tamanho do grão.

Além da cementação sólida, outro tipo de cementação é a gasosa. Ela é principalmente utilizada na indústria. Na cementação gasosa é possível controlar o potencial de carbono através da utilização de gases como CO, CO_2 , H_2 , H_2O e CH_4 . No entanto, além do controle do potencial de carbono, também é necessário o controle do potencial de oxigênio. Para garantir a distribuição adequada de carbono após a cementação, é realizado um tratamento de difusão de carbono no campo austenítico (COLPAERT, 2008). A formação da microestrutura, resultado da cementação, depende de dois fatores: composição química e velocidade de resfriamento. Dessa forma, haverá diferentes microestruturas na superfície da peça cementada. A Figura 3.26 mostra os dentes de uma engrenagem cementados.

Figura 3.25 | Bainita



Fonte: <<http://www.manutencao.esuprimentos.com.br/imagens/aparencia-da-bainita-sob-o-microscopio.jpg>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

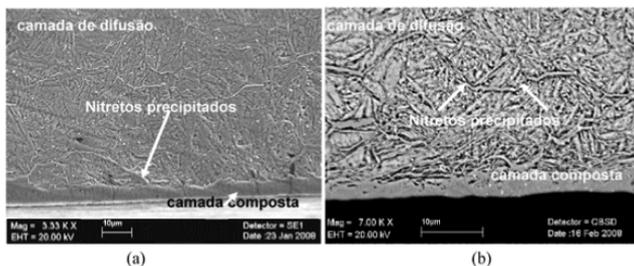


Exemplificando

A cementação promove o aumento da dureza superficial, além da resistência ao desgaste e à fadiga. Quanto às propriedades químicas, a cementação promove o aumento do teor de carbono na superfície da peça.

Outro tratamento termoquímico de superfícies é a nitretação, que consiste na difusão do nitrogênio em temperaturas relativamente baixas, com formação de uma camada rica em nitretos próxima à superfície da peça, comumente conhecida como “camada branca”. As camadas obtidas pela nitretação são menos espessas que as obtidas pela cementação e apresentam um resultado com menores distorções. A Figura 3.27 apresenta a micrografia da camada nitretada do aço AISI H10, em que é possível observar a camada composta, os nitretos precipitados e a camada de difusão após nitretação em banho de sal (Figura 3.27(a)) e após nitretação a plasma (Figura 3.27(b)).

Figura 3.27 | Micrografia da camada nitretada do aço AISI H10



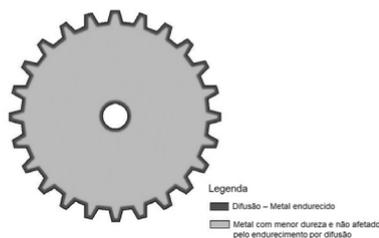
Fonte: <<http://www.scielo.br/img/revistas/rmat/v14n2/a05fig03.gif>>. Acesso em: 5 fev. de 2017.

Sem medo de errar

Uma empresa fabricante de motores de engrenagens utiliza o aço AISI/SAE 4320 na fabricação das engrenagens. No entanto, para adquirirem resistência ao desgaste, as peças devem ser submetidas a tratamentos térmicos, trabalho realizado pela empresa na qual você trabalha como engenheiro(a) mecânico(a). Qual é o tratamento indicado para essa aplicação? Esse aço é indicado para a fabricação de engrenagens?

O aço AISI/SAE 4320 é um aço da família 43xx, possui 0,20% de carbono em sua composição química e apresenta elevada temperabilidade, boa forjabilidade e boa soldabilidade. O aço AISI/SAE 4320 é adequado para a fabricação de engrenagens, pinhões, coroas, acoplamentos, pinos e componentes de máquinas em que há exigência de alta dureza superficial. Devido à natureza dessas aplicações, uma engrenagem deve ter a superfície com elevada dureza superficial com um núcleo tenaz. Essas características podem ser obtidas submetendo-se as peças ao tratamento químico conhecido como cementação. Na cementação, o carbono é introduzido na superfície do aço em temperaturas acima de 900 °C, elevando a dureza superficial. A Figura 3.28 apresenta uma figura com o corte esquemático de uma engrenagem metálica com superfície endurecida por difusão de carbono, isto é, a dureza superficial é elevada por cementação.

Figura 3.28 | Corte esquemático de uma engrenagem metálica com superfície endurecida



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_hardening#/media/File:GearDiagram.jpg>. Acesso em: 5 fev. 2017.

Virabrequins

Descrição da situação-problema

O virabrequim é o eixo central de um motor de automóvel. Esse componente recebe a força dos pistões. A inversão do sentido de movimento da biela é a responsável por gerar e enviar ao sistema de transmissão, torque, força e rotação do motor. Uma empresa fabricante de virabrequins utiliza dois processos de fabricação para esse componente: por fundição e forjamento. No entanto, para vender o lote produzido, é necessário que as peças adquiram resistência ao desgaste e elevada dureza. Você, como responsável técnico da empresa fabricante dos virabrequins, solicitou um tratamento em que a camada superficial não seja muito espessa. Qual tratamento poderá ser utilizado?

Resolução da situação-problema

Após o processo de fundição ou de forjamento de virabrequins, é necessário submeter as peças a tratamentos que alterem a dureza superficial da peça, aumentando a resistência ao desgaste. Entre os diferentes tratamentos, a nitretação é realizada sob baixas temperaturas, promovendo o maior controle dimensional das peças. A nitretação é o tratamento termoquímico que consiste no aumento da dureza superficial pela difusão do nitrogênio em temperaturas relativamente baixas com formação de uma camada rica em nitretos próxima à superfície da peça, comumente conhecida como “camada branca”.

A nitretação aumenta significativamente a resistência ao desgaste, à corrosão, à fadiga e ao engripamento. A Figura 3.29 apresenta um virabrequim após nitretação e polimento.

Figura 3.29 | Virabrequim nitretado e polido



Fonte: <<http://www.kuir.com.br/img/773401/virabrequim-nitretado-a-gas-e-polido.jpg>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

Faça valer a pena

1. Os tratamentos térmicos são utilizados para promover alterações microestruturais dos aços ou para aliviar/eliminar a superposição da transformação martensítica e das tensões térmicas.

Assinale a alternativa que apresenta o nome do tratamento térmico que possui o estágio de homogeneização da temperatura da peça antes do início da transformação martensítica:

- a) Austêmpera.
- b) Têmpera.
- c) Martêmpera.
- d) Cementação.
- e) Nitretação.

2. Em algumas aplicações, os tratamentos térmicos não são indicados, pois alteram a microestrutura e as propriedades de toda peça ou aço. Muitas vezes, são desejadas apenas alterações das propriedades superficiais das peças. Nessas situações, são indicados os tratamentos termoquímicos, que têm por objetivo modificar as propriedades superficiais do aço.

Com base neste contexto, são dadas as afirmações a seguir:

I. Nos tratamentos termoquímicos, o carbono e o nitrogênio atuam como solutos intersticiais e se difundem com elevada rapidez no aço.

II. A formação da microestrutura, resultado da cementação, depende de dois fatores: composição química e velocidade de resfriamento.

III. A nitretação consiste na difusão do nitrogênio em temperaturas

relativamente baixas, com formação de uma camada rica em nitretos próxima à superfície da peça.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Em I e II.
- c) Em II e III.
- d) Apenas em I.
- e) Apenas em III.

3. Na cementação, o carbono é introduzido na superfície do aço em temperaturas acima de 900 °C e dois aspectos importantes influenciam esse processo: o meio em que o aço é carbonetado e o processo de difusão do carbono.

A _____ consiste no aquecimento do metal acima da zona crítica, na qual a solubilidade do carbono no aço é elevada, e há a utilização de _____, como carvão de madeira moída e _____, que atuam como _____, aumentando a proporção de CO em relação ao CO₂.

- a) cementação sólida - cimentos sólidos - carbonatos - catalisadores
- b) cementação gasosa - cimentos sólidos - nitratos - solventes
- c) cementação líquida - cimentos líquidos - nitratos - catalisadores
- d) cementação gasosa - cimentos gasosos - carbonatos - solventes
- e) cementação sólida - cimentos sólidos - nitratos - catalisadores

Referências

- CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2006.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 ed. São Paulo: LTC, 2012.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- HUBERTUS, C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- KRAUSS, G. **Steels: heat treatment and processing principles**. Ohio: ASM International, 1989. p. 154.
- LISCIC, B. Hardenability. In: TOTTEN, G. E. (Ed.). **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. CRC Press, 2006, p. 213 - 276.
- MARIANO, N. A. et al. Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas. **Rem: Revista Escola de Minas**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000100018&lng=e>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. **Handbook of quenchant and quenching technology**. Ohio: ASM International, 1993.

Conformação e materiais de construção mecânica

Convite ao estudo

Caro aluno, seja bem-vindo à nossa última unidade de ensino da disciplina de *Materiais de construção mecânica*. Nas unidades anteriores, estudamos as propriedades mecânicas e os mecanismos de aumento de resistência dos materiais metálicos e como essas características são importantes para projetarmos uma peça ou até mesmo um novo equipamento. Posteriormente, conhecemos os diagramas e as transformações de fases. Você compreendeu que os diagramas de fases são ferramentas importantes para prevermos as transformações que ocorrerão em ligas metálicas quando submetidas ao aquecimento e resfriamento. Você entendeu as diferenças entre o diagrama de fases unários e o diagrama de fases binários em equilíbrio e aprendeu que o diagrama de fases – sistema ferro-carbono é um dos diagramas mais importantes no estudo dos metais, pois todos os aços e ferros fundidos possuem concentração dentro do percentual máximo de peso de carbono apresentado nesse diagrama. Durante as transformações de fases, ocorrem a formação de microestruturas com propriedades distintas, e você passou a conhecer as microestruturas: austenita, bainita, perlita e martensita. Por fim, conhecemos alguns tratamentos térmicos como o recozimento, a normalização, a têmpera, o revenimento, a martêmpera e a austêmpera. Aprendemos que cada tratamento térmico é utilizado para uma determinada transformação ou objetivo distinto. A têmpera, por exemplo, é utilizada quando o objetivo é aumentar a dureza de uma peça ou de um metal através da formação da martensita. Já a normalização é utilizada para refinar, uniformizar e diminuir o tamanho de grão. No entanto, compreendemos que, para algumas aplicações, os tratamentos térmicos não são os mais adequados, como no caso de engrenagens que precisam exibir elevada dureza superficial com um núcleo tenaz. Nessas aplicações,

os tratamentos mais adequados são os termoquímicos, como a cementação ou a nitretação.

Nesta última unidade, vamos estudar sobre o efeito da temperatura na conformação dos metais, isto é, a conformação a quente e o trabalho a frio. Por fim, vamos conhecer os principais materiais de construção mecânica: os aços e ferros fundidos. Assim, no final destes estudos, você será capaz de relacionar as microestruturas com o tipo de processamento utilizado.

Então, vamos ao nosso desafio desta unidade: após trabalhar como engenheiro(a) mecânico(a) em uma empresa prestadora de serviços, especificamente em tratamentos térmicos, você recebeu uma proposta de trabalho para atuar como engenheiro(a) mecânico(a) de uma indústria que fabrica diversas peças para a indústria automobilística, de bielas a virabrequins. Mas você já se perguntou como são fabricadas essas peças? Quais são os metais utilizados na fabricação? A temperatura influencia os processos de fabricação? Pois bem, nesta unidade você será desafiado através da rotina de trabalho de uma grande empresa do ramo automobilístico. Os conteúdos abordados nesta unidade serão o seu “alicerce” para encontrar a solução para os diversos problemas aqui sugeridos. É hora de iniciar os seus estudos! A colaboração e o compartilhamento de ideias com outras pessoas podem abrir um leque de resoluções de problemas que muitas vezes não enxergamos sozinhos.

Bons estudos!

Seção 4.1

Conformação a quente

Diálogo aberto

A empresa na qual você está trabalhando fabrica diversos componentes e peças de automóveis, com destaque para a fabricação de bielas de motores que são ligadas ao êmbolo. A biela tem a função de transmitir ou transformar o movimento retilíneo em circular contínuo. A Figura 4.1 apresenta uma biela de um motor de automóvel.

Figura 4.1 | Biela de um motor de automóvel



Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Biela#/media/File:Kolben-Pleuel.jpg>>. Acesso em: 23 fev. 2017.

No entanto, com a mudança de alguns colaboradores nesse setor, tem ocorrido a constante parada do equipamento utilizado na fabricação das bielas, e uma porcentagem considerável de peças tem apresentado alguns defeitos. Como são fabricadas as bielas? Quais são os defeitos identificados na peça final? Quais as causas desses defeitos? Ao longo desta seção, vamos ver o que é a conformação a quente e também aprenderemos sobre a influência da temperatura na fabricação de peças metálicas. Adicionalmente, vamos conhecer os defeitos causados quando a temperatura de processamento não é adequada. Assim, ao final desta seção, você será capaz de identificar os defeitos de uma peça submetida a processamentos mecânicos a partir

do estudo de suas microestruturas. Novamente, será necessária a sua dedicação e perseverança em seus estudos.

Boa sorte e vamos lá!

Não pode faltar

A fabricação de peças e componentes metálicos envolve a utilização de processos nos quais os metais são submetidos à conformação mecânica e, assim, ocorre a mudança de sua forma, de suas dimensões e de sua estrutura em diversas escalas (COLPAERT, 2008). Em outras palavras, os processos de conformação dos metais são aqueles que modificam a forma inicial de um corpo metálico para uma nova forma já definida.

A Figura 4.2 apresenta as peças conformadas após os estágios de forjamento, que é um processo de conformação mecânica.

Figura 4.2 | Peças conformadas após os estágios de forjamento



Fonte: <<http://www.dema.ufscar.br/termomec/images/Artigos/Sequencia%20de%20passos%20forjamento-1.png>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

A temperatura na qual os processos de conformação são realizados é uma variável importante, assim como a taxa de deformação do material. Normalmente, a conformação mecânica é classificada em deformação a quente (trabalho a quente), deformação a frio (trabalho a frio) e deformação a morno (trabalho a morno). Uma maneira simplista de compreender a classificação das temperaturas de conformação é considerar a temperatura de fusão como referencial. Assim, para temperaturas de deformações maiores que 0,6 da temperatura de fusão, considera-se trabalho a quente; para temperaturas de

deformações inferiores a 0,3 da temperatura de fusão, considera-se trabalho a frio; e para temperaturas de deformações na faixa de 0,3 a 0,6 da temperatura de fusão, considera-se trabalho a morno.

Nos produtos de metais conformados a trabalho a quente, além de serem observados os processos de recuperação ou recristalização, as peças experimentam oxidação superficial e distorções, que estão associadas às variações de temperatura. O trabalho de conformação a quente normalmente é a primeira etapa na conformação de lingotes e produtos de lingotamento contínuo, já que o aumento da temperatura diminui a resistência mecânica do metal e, conseqüentemente, a energia necessária para a deformação. Dessa forma, os equipamentos de conformação a quente necessitam de menor potência, pois temperaturas elevadas aumentam a trabalhabilidade do metal. O lingote é um bloco de metal fundido que é posteriormente utilizado na conformação.



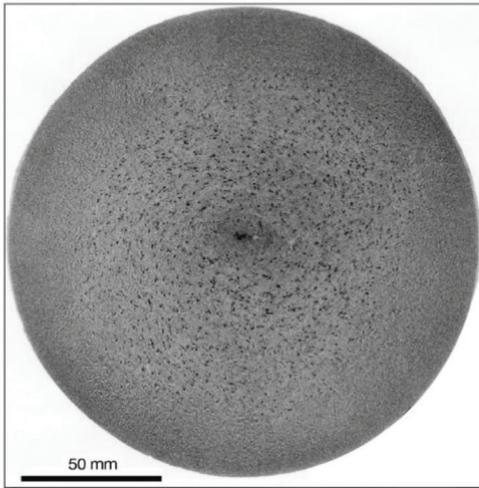
Assimile

Trabalhabilidade pode ser definida como a capacidade com que o metal pode ser preparado e utilizado. Já lingote é um bloco de metal fundido que é utilizado posteriormente na conformação.

Além de promover o aumento da trabalhabilidade do metal, o trabalho em temperaturas elevadas favorece a difusão no metal, reduzindo a heterogeneidade química do lingote causada durante a segregação de solidificação. No trabalho a quente, a alteração de forma e a redução das dimensões ao sentido de deformação dos produtos (exemplo: a espessura em produtos planos e o diâmetro em produtos cilíndricos) provocam a redução dos espaços entre os braços das dendritas originadas no processo de solidificação, o que favorece o processo de difusão.

O efeito do trabalho a quente sobre as segregações presentes nos lingotes pode ser observado macroscopicamente, como mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 | Seção transversal de eixo ferroviário

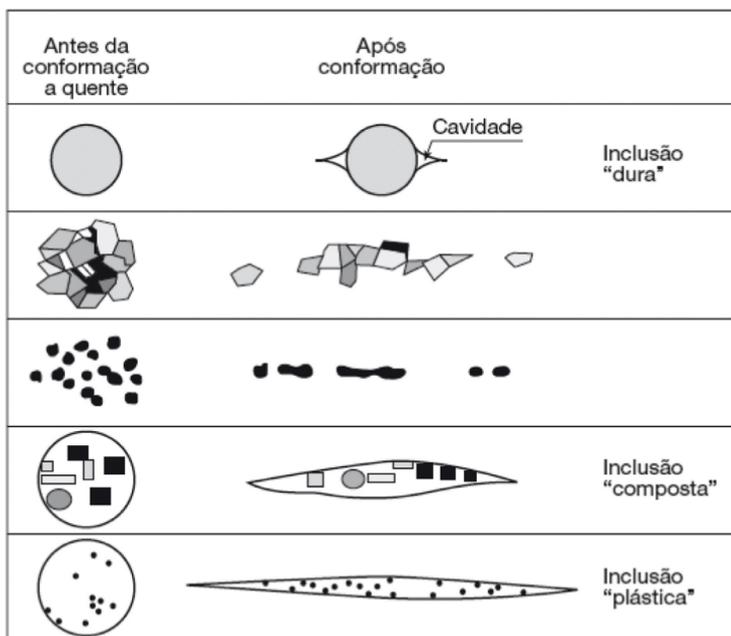


Fonte: Colpaert (2008, p. 337).

Na figura, nas regiões segregadas aparecem pontos escuros. Já a região mais externa do eixo apresenta elevada homogeneidade da estrutura. No centro do eixo, por sua vez, observa-se a presença de resíduos da estrutura dendrítica. No entanto, por ser a última região a ser resfriada, o centro apresenta uma quantidade menor de deformações.

Na conformação a quente, as fases insolúveis nos metais, por exemplo, os carbetos primários em aços rápidos e as inclusões não metálicas, têm sua forma e distribuição modificadas de acordo com a deformação a quente à qual o material foi submetido. A Figura 4.4 apresenta o efeito da plasticidade relativa da inclusão sobre sua deformação em relação ao aço, nas condições iniciais e após o processamento.

Figura 4.4 | Efeito da plasticidade da inclusão sobre sua deformação em relação ao aço

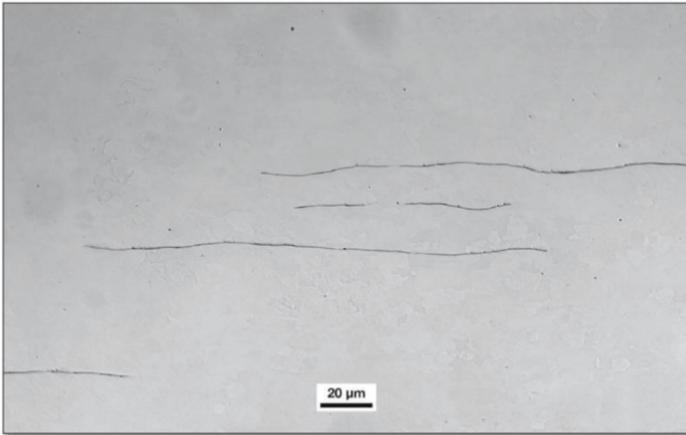


Fonte: Colpaert (2008, p. 346).

Na Figura 4.4 observa-se que, de acordo com o trabalho a quente, as inclusões plásticas tornam-se alongadas; já as inclusões duras permanecem inalteradas ou quebram-se, ocorrendo a redistribuição no produto. As inclusões não metálicas influenciam diretamente nas propriedades dos aços, como a ductilidade, alongamento, tenacidade na região da fratura dúctil, resistência a fadiga e resistência à corrosão. A compreensão dos efeitos das inclusões não metálicas é importante, pois permite a alteração manipulada das propriedades dos materiais de acordo com as características desejadas. Os sulfetos de manganês, por exemplo, são inclusões plásticas em temperaturas elevadas que se alongam na deformação a quente (Figura 4.5). A Figura 4.5 apresenta as inclusões de sulfeto de manganês que foram alongadas no sentido longitudinal da deformação a quente em uma chapa de aço estrutural. A presença das inclusões não metálicas em aços de corte fácil, por exemplo, facilita a quebra dos cavacos durante o processo e usinagem, além ter um efeito lubrificante (COLPAERT, 2008).

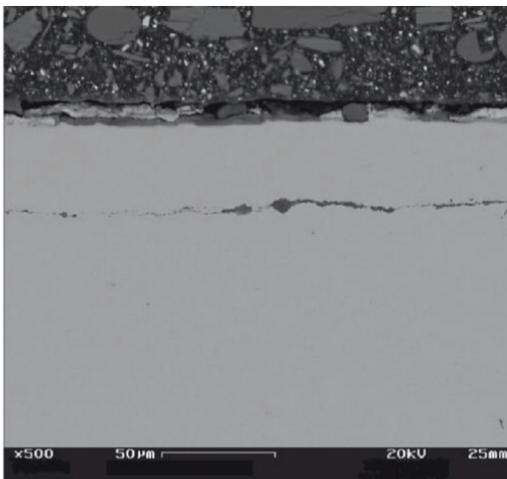
Já a Figura 4.6 traz a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção longitudinal de chapas que apresentam grandes quantidades de inclusões de alumina, que foram fragmentadas e distribuídas durante o processo de laminação a quente, cerca de 30 μm abaixo da superfície da chapa.

Figura 4.5 | Sulfeto de manganês alongado após conformação a quente



Fonte: Colpaert (2008, p. 348).

Figura 4.6 | Inclusões de alumina fragmentadas e distribuídas após laminação a quente



Fonte: Colpaert (2008, p. 351).



Qual é o efeito final da presença de inclusões não metálicas em aços de corte fácil para a vida útil da ferramenta utilizada na usinagem?

Devido à importância da presença das inclusões não metálicas, diversos métodos podem ser utilizados para a quantificação das inclusões. A maneira mais simples é apresentada pela norma ASTM E45 da American Society for Testing and Materials (ASTM), que envolve a comparação entre figuras padronizadas. No entanto, não é possível aplicar essa técnica para diversos produtos siderúrgicos.

Outros métodos de quantificação das inclusões são dados pelas normas ASTM E1245 e ASTM E2283. A presença em concentrações elevadas de elementos que formam carbonetos e nitretos provoca a formação de estruturas em que os carbonetos e nitretos são estáveis até a fusão do material, isto é, não são completamente dissolvidos.

Assim, quando ocorre a formação de uma rede de carbonetos durante a solidificação, o trabalho a quente promove uma redistribuição dessas partículas. Consequentemente, ocorre o aumento da homogeneização do material, já que a heterogeneidade do produto solidificado tem influência direta nos resultados obtidos com a conformação a quente. A redistribuição dessas inclusões e a homogeneização do material reflete nas propriedades do material. Dessa forma, quanto maior a homogeneidade e a densidade do produto inicial, menor será o efeito benéfico da conformação a quente.

Assim, estabeleceu-se uma regra geral: uma redução mínima por trabalho a quente de 4/1 para garantir propriedades satisfatórias. Porém, se o lingote for de baixa qualidade, esse grau de deformação pode ser insuficiente, e o grau de deformação calculado pela variação das dimensões do produto não é garantia de deformação uniforme ao longo de toda a seção transversal (COLPAERT, 2008).

Em casos nos quais os produtos apresentam elevada heterogeneidade e são praticamente isentos de vazios, pode-se utilizar o grau de redução 3/1, desde que a qualidade da peça seja comprovada por ensaios e outras técnicas.

A Figura 4.7 traz a macrografia da seção longitudinal em anel de aço AISI/SAE 8630 modificado, produzido por forjamento (redução de 2:1), posteriormente submetido a laminação com redução total aproximada do anel de 4:1, em que se observa que as regiões próximas às superfícies cilíndricas (esquerda e direita da macrografia) apresentam dendritas deformadas resultantes da deformação a quente. E com relação à região central do anel, praticamente não se verifica deformação.

Figura 4.7 | Macrografia da seção longitudinal em anel de aço AISI/SAE 8630 modificado



Fonte: Colpaert (2008, p. 356).



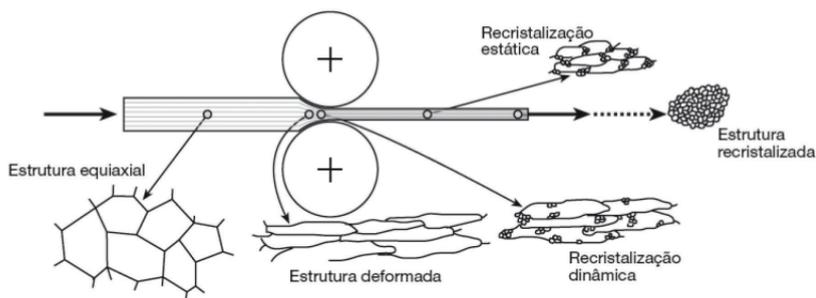
Exemplificando

É possível forjar peças de grandes dimensões em prensas de baixa capacidade sem produzir deformação no núcleo da peça, já que a penetração da deformação depende da "mordida" no forjamento, que é limitada pela capacidade da prensa.

Durante a conformação a quente, podem ocorrer algumas alterações microestruturais e no tamanho de grãos, devido à recristalização. Essas mudanças ocorrem quando a energia de deformação armazenada no material atinge um determinado patamar, que depende da temperatura e do material, dando origem à nucleação

de novos grãos não deformados e à eliminação do aumento da resistência mecânica por encruamento. Como vimos anteriormente, esse processo é denominado *recristalização*. A Figura 4.8 apresenta um esquema ilustrativo das alterações microestruturais observadas durante o processo de laminação a quente.

Figura 4.8 | Esquema ilustrativo das alterações microestruturais observadas durante o processo de laminação a quente



Fonte: Colpaert (2008, p. 357).

Como consequência do processo de *recristalização*, observa-se uma redução do tamanho de grão da austenita, quando comparado ao produto fundido.

Entre os diversos processos de conformação, o processo de forjamento em matriz fechada é um dos mais comuns quando o objetivo é fabricar peças de aço com as dimensões muito próximas às das peças acabadas. No forjamento em matriz fechada, o material é forçado a fluir através da deformação plástica para dentro de uma matriz com o formato da peça desejada (COLPAERT, 2008). O forjamento em matriz fechada pode ser realizado com ou sem excesso de material, denominado *rebarba*. Nesse tipo de forjamento, é predeterminada uma região na matriz para receber o excesso do material que é forjado para essa cavidade extra e, posteriormente, o material é eliminado.

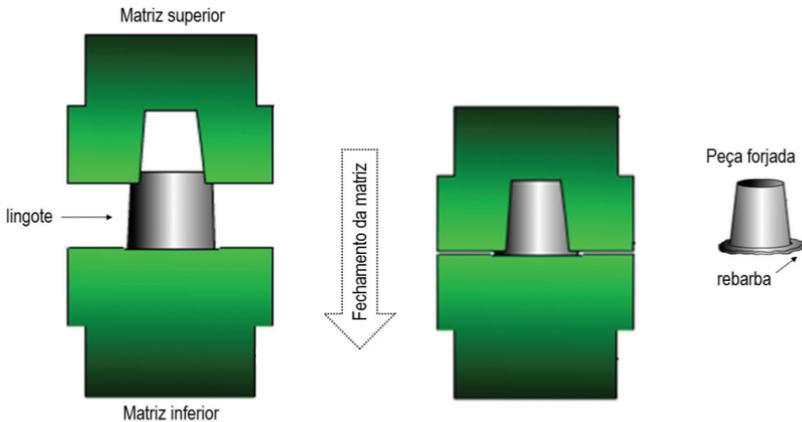
Segundo Colpaert (2008), para que a linha de *rebarba* não seja um ponto fraco da peça, é necessário considerar sua posição em relação às solicitações de trabalho da peça e à aplicação de medidas que melhorem a resistência à fadiga dessas regiões, como o controle da rugosidade, *jateamento* e/ou *shot-peening*.



Quer aprender mais sobre o processo de forjamento? Na internet é possível encontrar diversas simulações e vídeos de práticas reais de indústrias que utilizam o forjamento em matriz fechada na fabricação de peças. Então, faça uma pesquisa com o termo forjamento em matriz fechada. Aqui vai uma dica importante: muitos vídeos trazem áudios em outros idiomas, no entanto, mesmo que você não compreenda todas as palavras que são ditas, é possível entender o processo como um todo! Seja persistente e não perca essa oportunidade de aprendizado.

A Figura 4.9 apresenta uma ilustração do processo de obtenção de uma peça forjada em matriz fechada com dimensões próximas ao produto acabado e com a presença de excesso de material (rebarba).

Figura 4.9 | Forjamento em matriz fechada



Fonte: elaborada pelo autor.

Alguns defeitos podem ocorrer durante a conformação a quente de peças, como trincas e dobras. Caso não sejam corretamente identificados e removidos, esses erros dão origem a defeitos na peça acabada durante um tratamento térmico subsequente ou durante a sua utilização.

Outro problema encontrado na conformação a quente é o superaquecimento do material. A utilização de temperaturas

elevadas no início da conformação a quente, com a combinação de segregações, pode resultar em um aquecimento próximo ou superior à linha *solidus*. Assim, o material submetido a essas temperaturas, em geral, não é recuperável.

Adicionalmente, o superaquecimento favorece a oxidação acelerada e a contaminação do material com outros elementos, dependendo do combustível utilizado no forno. Quando, durante o trabalho a quente, ocorre a fusão e oxidação dos contornos de grãos austeníticos, o material é chamado de "queimado" (*burned*) e torna-se sucata, sem possibilidade de recuperação.

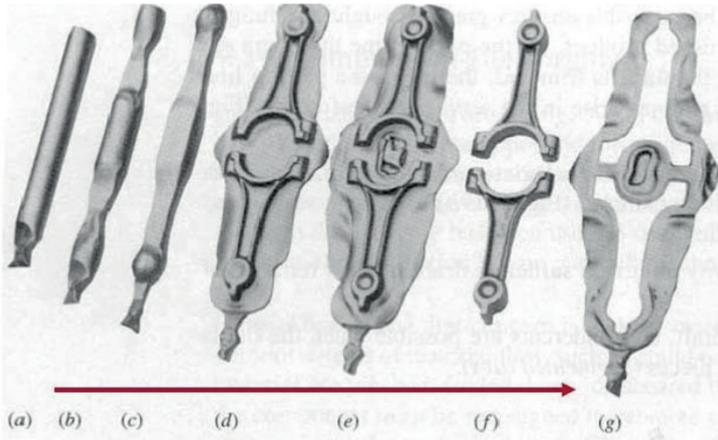
O superaquecimento é observado na conformação a quente por diversos fenômenos, como a dissolução e reprecipitação de sulfetos de manganês. A reprecipitação desses sulfetos em contornos de grãos austeníticos causam a fragilidade do material. Nos aços hipereutetoides, o superaquecimento causa dissolução e reprecipitação em rede de carbonetos estáveis termodinamicamente, isto é, dificilmente esses carbonetos reprecipitados são solúveis, o que diminui a trabalhabilidade do material.

Sem medo de errar

Atuando em uma empresa fabricante de peças automotivas, você ficou responsável pelo processo de fabricação de diversos componentes. A empresa possui uma elevada demanda na fabricação de bielas de motores. No entanto, com a mudança de alguns colaboradores no setor, a parada de equipamentos tem sido constante e a fabricação das peças com defeitos também. Como são fabricadas as bielas? Quais são os defeitos identificados na peça final? Quais são as causas desses defeitos?

As bielas utilizadas em motores de automóveis são fabricadas a partir do forjamento em matriz fechada, um método de conformação que utiliza o trabalho a quente. A Figura 4.10 apresenta a sequência desde o forjamento do tarugo até a peça acabada.

Figura 4.10 | Forjamento de biela em matriz fechada



Fonte: <<http://wiki.ued.iplleiria.pt/wikiEngenharia/images/4/4d/Biela.png>>. Acesso em: 27 fev. 2017.

A constante quebra do equipamento pode estar relacionada à utilização inadequada da temperatura de trabalho. Temperaturas muito elevadas (superaquecimento) promovem um aquecimento próximo ou superior à linha *solidus*, tornando o metal irrecuperável. O superaquecimento favorece a oxidação acelerada e a contaminação do material com outros elementos, dependendo do combustível utilizado no forno. Além dos defeitos ocasionados pelo superaquecimento, também existem os defeitos mecânicos, como as dobras e trincas, que, se não eliminadas, inviabilizam ou diminuem o tempo de vida útil da peça. Assim, é necessário verificar as condições do equipamento; as condições do forjamento, como força de compressão utilizada na forja; o alinhamento das matrizes; e a quantidade de material.

Avançando na prática

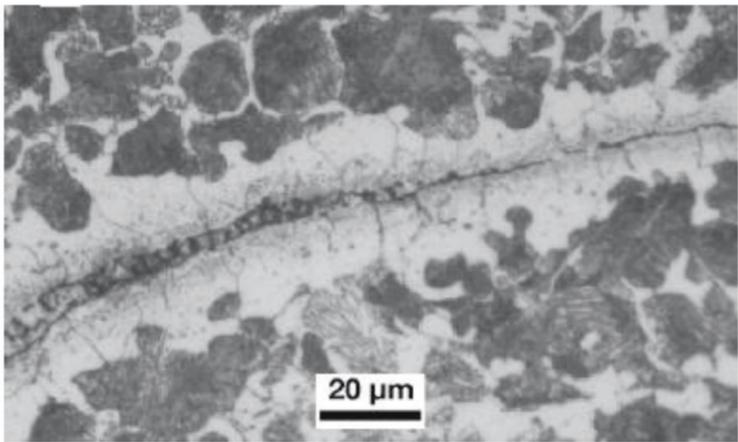
Sempre presente

Descrição da situação-problema

Para um engenheiro mecânico que trabalha em uma empresa automobilística, sempre aparece um velho conhecido: o virabrequim! Você já sabe que esse componente essencial no motor recebe a força

dos pistões e a inversão do sentido de movimento da biela, além de ser o responsável por gerar e enviar torque, força e rotação ao sistema de transmissão. Quando você trabalhava na área de tratamentos térmicos, você e sua equipe prestaram consultoria para uma empresa fabricante de virabrequins. Hoje, atuando nessa nova empresa, você resolveu utilizar seu *networking* e encomendou um lote de virabrequins dessa mesma empresa. No entanto, ao receber o lote, você verificou que as peças apresentavam alguns defeitos aparentes e solicitou uma análise da microestrutura do material, como apresentada na Figura 4.11.

Figura 4.11 | Micrografia do aço utilizado nos virabrequins



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 371).

A partir da micrografia do aço utilizado na fabricação dos virabrequins, quais foram os problemas identificados?

Resolução da situação-problema

Analisando a micrografia do aço utilizado na fabricação dos virabrequins, foi possível identificar que ocorreu um extenso processo de descarbonetação do aço, isto é, a perda de carbono. Dessa forma, você concluiu que as peças, durante o processo de forjamento com trabalho a quente, foram expostas a temperaturas elevadas e a atmosferas oxidantes.

Faça valer a pena

1. O trabalho de conformação a quente, normalmente, é a primeira etapa na conformação de lingotes e produtos de lingotamento contínuo, já que o aumento da temperatura afeta diretamente as propriedades mecânicas do metal.

Além de promover _____ da trabalhabilidade do metal, o trabalho em temperaturas _____ favorece a difusão no metal, _____ a heterogeneidade química do lingote causada durante a segregação de solidificação.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

- a) o aumento, elevadas, reduzindo.
- b) o aumento, baixas, aumentando.
- c) o aumento, elevadas, aumentando.
- d) a diminuição, elevadas, reduzindo.
- e) a diminuição, baixas, aumentando.

2. A fabricação de peças e componentes metálicos envolve a utilização de processos nos quais os metais são submetidos à conformação mecânica e, assim, ocorre a mudança de sua forma, de suas dimensões e de sua estrutura em diversas escalas (COLPAERT, 2008).

Analise as seguintes afirmações:

I. A temperatura na qual os processos de conformação são realizados é uma variável importante, assim como a taxa de deformação do material.

II. Para temperaturas de deformações maiores que 0,6 da temperatura de fusão, considera-se trabalho a quente.

III. Em produtos de metais conformados a trabalho a quente se observa os processos de recuperação ou recristalização.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Em I e II.
- c) Em I e III.
- d) Em II e III.
- e) Somente em I.

3. Entre os diversos processos de conformação, o processo de forjamento em matriz fechada é um dos mais comuns quando o objetivo é fabricar peças de aço com as dimensões muito próximas às das peças acabadas.

Assinale a alternativa correta quanto ao processo de conformação conhecido por forjamento em matriz fechada:

a) No forjamento em matriz fechada, o material é forçado a fluir através da deformação plástica para dentro de uma matriz com o formato da peça desejada.

b) O forjamento em matriz fechada é realizado somente com o excesso de material denominado rebarba, para garantir as dimensões da peça acabada.

c) Para que a linha de rebarba não seja um ponto fraco da peça, é necessário considerar uma quantidade extra de material que é forçada pela cavidade extra da matriz.

d) No forjamento em matriz fechada, o material é forçado a fluir através da deformação elástica para dentro de uma matriz com o formato da peça desejada.

e) O forjamento em matriz fechada é realizado somente com a quantidade exata do material, não sendo necessário material em excesso para garantir as dimensões da peça acabada.

Seção 4.2

Trabalho a frio

Diálogo aberto

Atuando como engenheiro(a) mecânico(a) em uma indústria automobilística diariamente, você é desafiado a encontrar soluções para diversos problemas. No primeiro momento, você foi capaz de identificar que o superaquecimento na conformação a quente favorece a oxidação acelerada e a contaminação do material com outros elementos, dependendo do combustível utilizado no forno. Mas hoje é um novo dia, vamos ao nosso desafio: na fabricação de elementos de fixação com parafusos, a empresa utiliza-se do processo de usinagem na fabricação das roscas desses elementos. No entanto, na avaliação do processo, foi constatado que aproximadamente 20% desses elementos foram descartados devido a irregularidades e defeitos. É possível otimizar o processo? Quais são os processos envolvidos na conformação dos parafusos? E na fabricação das roscas desses elementos, é possível utilizar um processo melhor que a usinagem?

Nesta seção, vamos estudar o trabalho a frio e o efeito da temperatura no processo de fabricação de diversas peças. Você compreenderá qual é a melhor faixa de temperatura de conformação de acordo com o produto final e sua respectiva aplicação. Portanto, é hora de iniciarmos nossos estudos!

Bons estudos, e persistência!

Não pode faltar

Os metais são submetidos a processos de conformação quando a finalidade é a obtenção de produtos finais com especificações de dimensões, forma, condições superficiais e propriedades mecânicas específicas. Além da conformação a quente, estudada anteriormente, outros processos de conformação mecânica são realizados com trabalho a frio. O trabalho a frio é caracterizado pela temperatura de deformação inferior a 0,3 da temperatura de fusão. Diferentemente

do trabalho a quente, no trabalho a frio não ocorrem os processos de recuperação ou recristalização. Na conformação a frio se observa o aumento da resistência mecânica a partir do encruamento, que consiste no aumento da densidade de discordâncias no material a partir da deformação a frio. Além do aumento da resistência mecânica, tanto do limite de ruptura como do limite de escoamento, ocorre a diminuição da ductilidade, que é medida através da redução de área, do alongamento ou da tenacidade à fratura. A Figura 4.12 demonstra que o aumento do trabalho a frio provoca o aumento do limite de escoamento para o aço, o latão e o cobre. A Figura 4.13a mostra como o aumento do trabalho a frio aumenta o limite de resistência à tração para esses metais, enquanto a Figura 4.13b mostra como o aumento do trabalho a frio diminui sensivelmente a ductilidade.



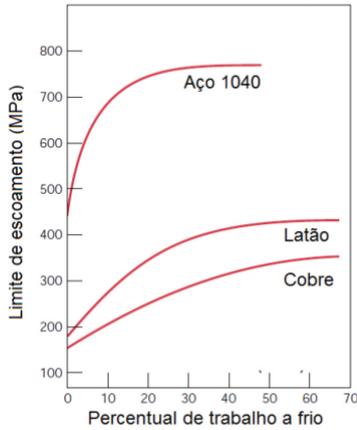
Assimile

Em algumas situações, é conveniente representar o grau de deformação plástica como um percentual de trabalho a frio, e não como uma deformação. O percentual de trabalho a frio (%TF) é definido pela expressão:

$$\% \text{ TF} = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

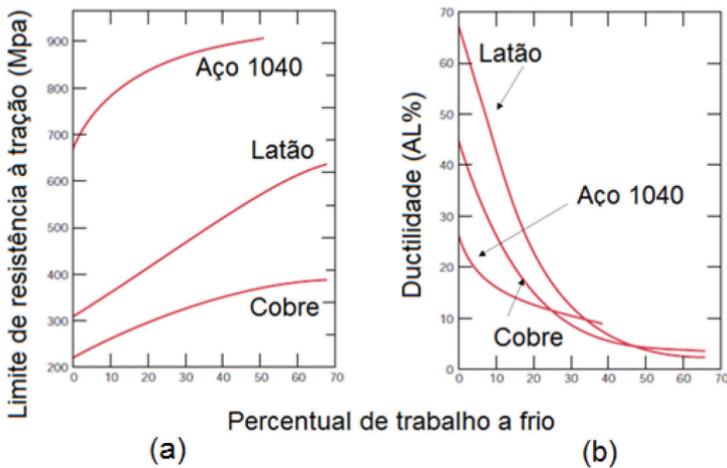
Em que A_0 é a área original da seção reta que experimenta deformação, e A_d representa a área depois da deformação.

Figura 4.12 | Limite de escoamento versus percentual de trabalho a frio



Fonte: adaptada de Callister Jr. (2001, p. 211).

Figura 4.13 | (a) Limite de resistência à tração de escoamento versus percentual de trabalho a frio; (b) ductilidade versus percentual de trabalho a frio



Fonte: adaptada de Callister Jr. (2001, p. 211).

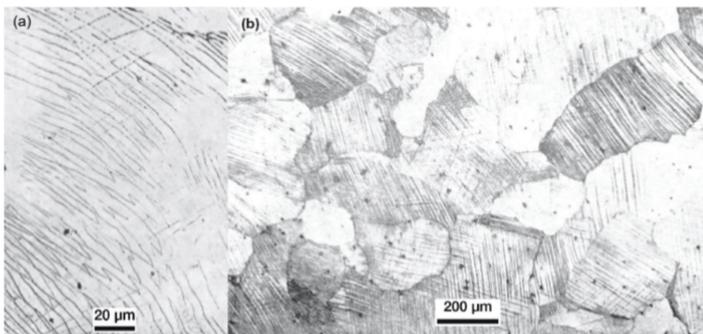


Se o encruamento consiste no aumento da densidade de discordâncias e é utilizado frequentemente para aprimorar as propriedades mecânicas dos metais, comercialmente, qual é o melhor momento para se utilizar esse fenômeno?

Normalmente, os valores da tensão de escoamento e da tensão de ruptura após o trabalho a frio excedem os valores de limite de ruptura obtidos no ensaio de tração do material antes da deformação a frio. Essa constatação decorre do fato de que a tensão de ruptura de um corpo de prova antes do encruamento é calculada a partir da seção transversal original (tensão de engenharia), e ela não é a tensão real obtida no início do empensoamento.

A ferrita e a austenita se deformam, preferencialmente, por deslizamento, como mostram as Figuras 4.14a e 4.14b.

Figura 4.14 | Linhas de deslizamento no interior de: (a) grãos de ferrita submetida à deformação a frio; (b) aço ao manganês austenítico levemente deformado a frio



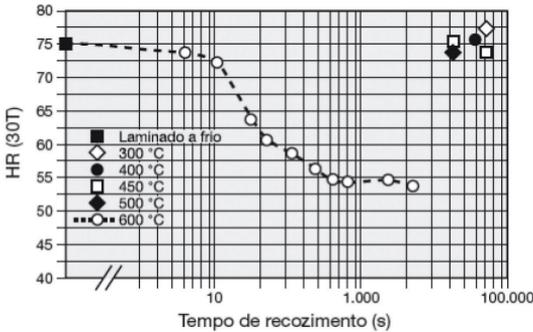
Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 385-386).

Em materiais policristalinos, a deformação por deslizamento não ocorre igualmente em todos os grãos, pois ela depende da orientação do grão em relação à aplicação da força.

Como vimos anteriormente, o recozimento é o tratamento térmico utilizado para “apagar” as estruturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos aos quais o metal foi submetido anteriormente. Dessa

forma, a Figura 4.15 traz um gráfico que mostra o efeito do tempo e da temperatura de recozimento sobre a dureza de um aço de baixo carbono submetido à redução de 84% por laminação a frio.

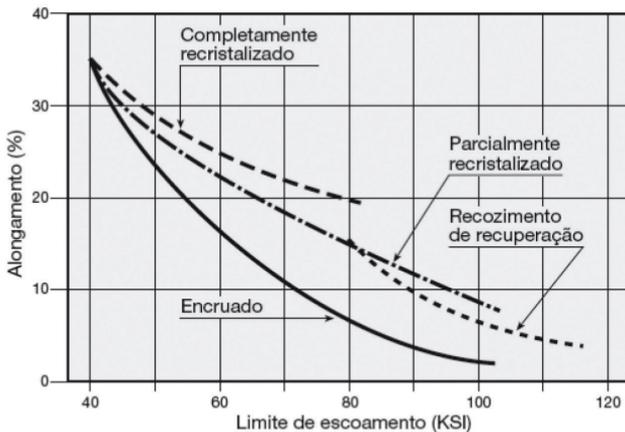
Figura 4.15 | Efeito do tempo e temperatura de recozimento sobre a dureza



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 385-386).

Em temperaturas inferiores a 500 °C, a dureza é praticamente insensível às alterações de estrutura para um tempo longo de tratamento (COLPAERT, 2008). A combinação entre a deformação a frio e o recozimento resulta numa ampla gama de propriedades mecânicas possíveis, tornando esse processamento fundamental na produção de aços planos para diversas aplicações (Figura 4.16).

Figura 4.16 | Efeito da conformação a frio e do recozimento subcrítico sobre as propriedades dos aços de baixo carbono

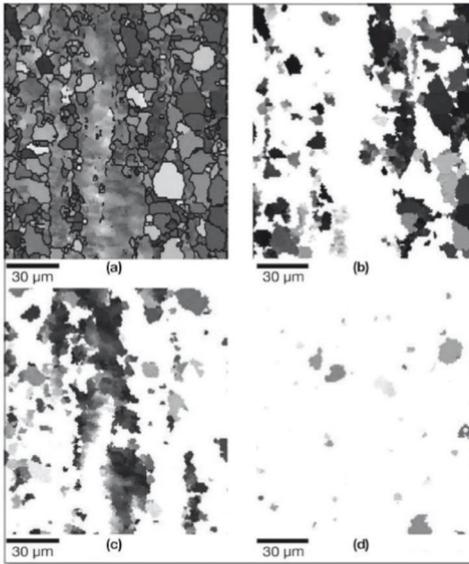


Fonte: Colpaert (2008, p. 392).

A textura cristalográfica é formada por componentes, e um desses componentes é representado por uma determinada orientação, em torno da qual os cristais se alinham. Para os produtos planos, essa orientação é dada pelo plano cristalográfico paralelo à superfície de laminação, e a textura é representada pela denominação {001}. Já para produtos com simetria axial, como os arames e fios, a textura "de fibra" é caracterizada pela direção cristalográfica alinhada ao eixo do produto (COLPAERT, 2008). A textura cristalográfica é importante para as propriedades mecânicas, pois garante uma deformação homogênea no plano da chapa com o mínimo de redução de espessura. Para medir e avaliar as orientações cristalográficas, é utilizada a técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD), que permite avaliar as diferenças cristalográficas entre os grãos, caracterizando e quantificando a textura cristalográfica.

A Figura 4.17 apresenta resultados obtidos por EBSD do aço de extrabaixo carbono encruado e recozido a 540 °C. Em geral, o mapa obtido por essa técnica emprega cores que permitem identificar a orientação cristalográfica de cada grão separadamente. Nos mapas apresentados em tons de cinza, as linhas escuras referem-se a contornos de grãos de alto ângulo. Na Figura 4.17b, vemos a orientação $\{111\}\langle uvw \rangle$; na 4.17c, a orientação $\{001\}\langle uvw \rangle$; e na 4.17d, orientação $\{101\}\langle uvw \rangle$. Nas regiões recristalizadas, ocorre a predominância da orientação $\{111\}\langle uvw \rangle$, enquanto nas regiões encruadas, é predominante a orientação $\{001\}\langle uvw \rangle$.

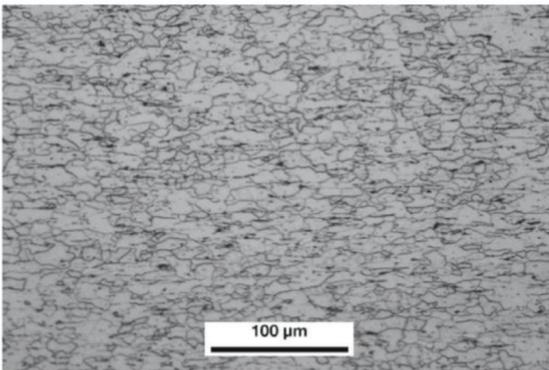
Figura 4.17 | Mapa de orientação EBSD do aço de extra baixo carbono encruado



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 394).

A difração de elétrons retroespalhados também permite acompanhar o processo da recristalização da folha metálica após encruamento intenso, em que também é possível observar a redistribuição da cementita após a conformação a frio (Figura 4.18).

Figura 4.18 | Recristalização e cementita alinhada



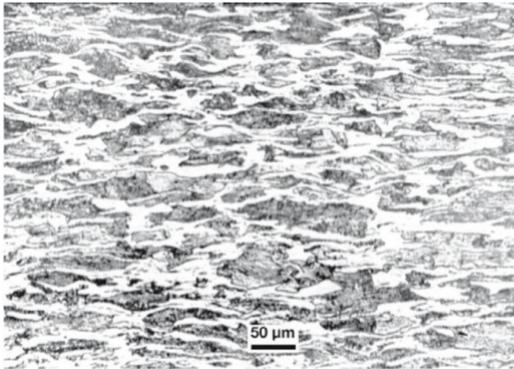
Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 396).



Vamos aprofundar nossos estudos e conhecer mais a técnica EBSD? Leia-a e conheça mais sobre a difração de elétrons retroespalhados. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/antschip/Difra%E7%E3o%20de%20el%E9trons.pdf>>. Acessado em 06 abr 2017

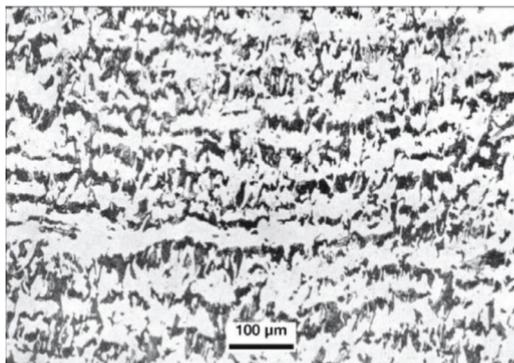
Já o efeito do trabalho a frio em aço médio carbono resulta na deformação da ferrita e perlita, o que pode ser observado nas Figuras 4.19 e 4.20.

Figura 4.19 | Seção longitudinal em aço de médio carbono fortemente deformado a frio



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 403).

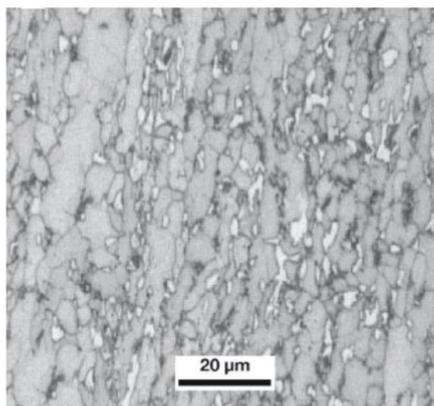
Figura 4.20 | Seção transversal de barra de aço de médio carbono comprimida axialmente a frio (direção vertical na foto)



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 403).

Outra faixa de temperatura utilizada na conformação de metais ocorre entre 0,3 e 0,6 da temperatura de fusão, e denomina-se trabalho a morno. Na conformação morna, o material é aquecido abaixo da temperatura de fusão e, apesar de não ocorrer a recristalização, ocorre uma recuperação dinâmica, isto é, durante a deformação plástica, as tensões geradas nos grãos são aliviadas (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Dessa maneira, a conformação a morno associa as vantagens do trabalho a frio, como a precisão dimensional e bom acabamento superficial, com as vantagens do trabalho a quente, tais como a conformação de formas complexas de baixos níveis de tensões internas sem oxidação excessiva. A Figura 4.21 apresenta o resultado da deformação a morno em um aço de baixo carbono, seguido de recozimento. As regiões cinza são ferrita, enquanto a perlita, ou carbonetos, aparecem em tons escuros.

Figura 4.21 | Deformação a morno em um aço de baixo carbono



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 407).

Diversos componentes obtidos a partir da conformação a frio apresentam como vantagens sobre o trabalho a quente melhor precisão dimensional do produto acabado, melhor acabamento superficial e ausência de formação de óxidos. Muitos elementos de fixação são obtidos a partir da conformação a frio, como a formação da cabeça de fixadores utilizados na indústria automobilística e as roscas em fixadores, denominadas roscas roladas, que utilizam ferramentas chamadas de pentes de laminar roscas. Esse tipo de rosca não provoca a interrupção do fibramento e não dá origem a irregularidades superficiais, comuns em roscas usinadas. Na rolagem de roscas pode ocorrer a formação de

dobras e, de acordo com algumas normas de fixadores, essas dobras são aceitáveis até uma determinada profundidade ou quando estão próximas à crista da rosca.



Exemplificando

Os pregos também são elementos obtidos a partir da conformação a frio de arames.

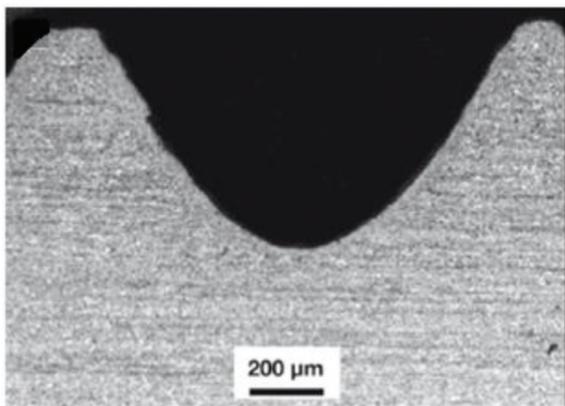
A ocorrência de fratura durante a conformação a frio é mais comum quando comparada à conformação a quente, devido às condições mais severas. Assim, a presença de inclusões não metálicas de dimensões e plasticidade inadequadas tem efeitos graves no desempenho do material.

Sem medo de errar

Como engenheiro(a) mecânico(a) em uma indústria automobilística, você ficou encarregado de avaliar a fabricação de elementos de fixação, como os parafusos. A empresa utiliza-se do processo de usinagem na fabricação das roscas desses elementos. No entanto, na avaliação do processo, foi constatado que aproximadamente 20% desses elementos foram descartados devido a irregularidades e defeitos. É possível otimizar o processo? Quais são os processos envolvidos na conformação dos parafusos? E na fabricação das roscas desses elementos, é possível utilizar um processo melhor que a usinagem?

Na conformação de elementos de fixação, como os parafusos, é empregada a conformação a frio, na qual utiliza-se temperaturas inferiores a 0,3 da temperatura de fusão. No trabalho a frio não ocorrem os processos de recuperação ou recristalização, e se observa o aumento da resistência mecânica a partir do encruamento, que consiste no aumento da densidade de discordâncias no material a partir da deformação a frio. As roscas por usinagem apresentam interrupções do fibramento, o que dá origem a superfícies irregulares, como se observa na Figura 4.22.

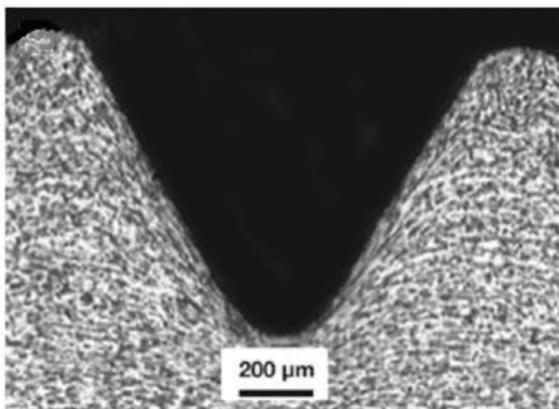
Figura 4.22 | Irregularidades superficiais decorrentes da usinagem



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 408).

Além do processo de usinagem, pode-se utilizar a laminação de rosca em fixadores, denominadas rosca rolada, que fazem uso de ferramentas chamadas pentes de laminar rosca, que apresentam qualidade superior à das rosca usinadas. A Figura 4.23 apresenta a seção longitudinal da região roscada de fixadores por laminação a frio.

Figura 4.23 | Rosca rolada



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 408).

Assim, a escolha de rosca rolada minimiza irregularidades e defeitos encontrados nas rosca obtidas pelo processo de usinagem.

O botijão de gás

Descrição da situação-problema

Atuando como engenheiro(a) mecânico(a) em diversas indústrias, você já conquistou ao longo de sua carreira uma vasta experiência, e é natural trazermos nossa experiência para o ambiente familiar. Fazendo o almoço no final de semana, você verificou que o gás de cozinha estava acabando e solicitou a entrega de um novo botijão. Mas como são fabricados os botijões de gás? A temperatura é considerada na fabricação desse objeto?

Resolução da situação-problema

O botijão de gás é fabricado a partir da conformação a frio de chapas metálicas, em que primeiramente são cortadas em três discos por uma prensa. Uma segunda prensa prende esses discos enquanto um molde em forma de cilindros os empurra para cima, formando uma concha. Cada concha corresponde a uma metade do botijão, e é submetida a uma máquina de corte, na qual uma lâmina produz uma borda perfeita. Utiliza-se o processo de soldagem automática entre as conchas e a rosca superior (onde será inserida a válvula), de maneira que a solda seja perfeita e capaz de resistir à pressão interna. Filetes de aço são conformados a frio em forma de aros e furados por uma única prensa. Esses aros são utilizados como o “pé” do botijão, isto é, a base inferior de apoio, e são posteriormente soldados na parte inferior do botijão. As peças inferiores e superiores são montadas e encaminhadas a um torno de soldagem automatizado, que tem como função fundir e unir as peças com precisão. No entanto, esse processo endurece o aço, o que é uma característica não desejada, pois o botijão deve se contrair ou se expandir para receber o gás pressurizado. Assim, as peças são submetidas ao forno para redução da dureza. Amostras do lote são testadas, como a região da solda, e também são realizados testes de pressão interna dos botijões. Somente após a aprovação desses testes o lote é encaminhado para a pintura eletrostática a pó na região externa. Por fim, os botijões passam por inspeções de qualidade e são inseridas as válvulas. Assim, o botijão está preparado para receber o gás e seguir todo caminho até chegar em nossas casas.

O link indicado a seguir apresenta o processo de fabricação de um botijão de gás, e é muito interessante conhecermos todos os processos envolvidos. O áudio está em português de Portugal. Por isso, é possível compreendermos e visualizarmos todo o processo integralmente. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YWWbTaPBwvI>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

Faça valer a pena

1. Os metais são submetidos a processos de conformação quando a finalidade é a obtenção de produtos finais com especificações de dimensões, forma, condições superficiais e propriedades mecânicas específicas.

Analise as seguintes afirmações:

I. O trabalho a frio é caracterizado pela temperatura de deformação inferior a 0,3 da temperatura de fusão.

II. No trabalho a frio não ocorrem os processos de recuperação ou recristalização.

III. Na conformação a frio se observa o aumento da resistência mecânica a partir do encruamento, que consiste no aumento da densidade de discordâncias no material a partir da deformação a frio.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Em I e II.
- c) Em I e III.
- d) Em II e III.
- e) Somente em III.

2. O recozimento é o tratamento térmico utilizado para “apagar” as estruturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos aos quais o metal foi submetido.

Com relação ao efeito do tempo e da temperatura de recozimento sobre a dureza de um aço de baixo carbono, assinale a alternativa correta.

- a) A dureza do aço de baixo carbono diminui com o tempo e a temperatura.
- b) A dureza do aço de baixo carbono aumenta com o tempo e a temperatura.

- c) A dureza do aço de baixo carbono permanece inalterada após o recozimento.
- d) A dureza do aço de baixo carbono aumenta devido ao processo de encruamento provocado durante o recozimento.
- e) A dureza do aço de baixo carbono diminui devido ao processo de conformação a frio.

3. A textura cristalográfica é formada por componentes, e um desses componentes é representado por uma determinada orientação, em torno da qual os cristais se alinham. Para os produtos planos, essa orientação é dada pelo plano cristalográfico paralelo à superfície de laminação.

Enunciado: A textura cristalográfica é importante para as propriedades mecânicas, pois garante uma deformação _____ no plano da chapa com o _____ de redução de _____ .

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas.

- a) Homogênea, mínimo, espessura.
- b) Homogênea, máximo, espessura.
- c) Homogênea, mínimo, largura.
- d) Heterogênea, mínimo, espessura.
- e) Heterogênea, máximo, largura.

Seção 4.3

Aços e ferros fundidos utilizados na construção mecânica

Diálogo aberto

Como engenheiro(a) mecânico(a) de uma indústria que fabrica diversas peças para a indústria automobilística, você desenvolve diversas funções. A empresa é pioneira na fabricação de bielas, eixos, virabrequins e outras peças com alta exigência de sollicitação mecânica na indústria automotiva. No entanto, um cliente devolveu um lote de engrenagens, pois durante a manutenção desses elementos, constatou-se um baixo nível de soldabilidade. A avaliação da microestrutura foi enviada junto às peças (Figura 4.24).

Figura 4.24 | Microestrutura do aço



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 495).

A partir da análise microestrutural, é possível identificar o aço utilizado? Esse aço é adequado para a fabricação de engrenagens? Como solucionar o problema do cliente?

Nesta última seção, vamos estudar os principais aços utilizados na construção mecânica e compreender as diferenças entre aços temperados, aços revenidos, aços de diferentes teores de carbono,

aços inoxidáveis e, por fim, os ferros. Assim, ao final dos seus estudos, você será capaz de identificar os tipos de aços a partir da análise microestrutural. Bons estudos e parabéns por estar dando mais um passo rumo à sua formação acadêmica!

Não pode faltar

Anteriormente, você compreendeu a classificação de aços para construção mecânica, e viu que esses aços são escolhidos com base em sua temperabilidade, podendo ser empregados nas condições temperado e revenido. Nessas condições, as microestruturas desses aços são muito parecidas, e as diferenças significativas estão ligadas ao teor de carbono do aço, à temperatura de revenido e ao tamanho de grão austenítico (COLPAERT, 2008). Os aços da família AISI/SAE 43xx apresentam a mesma composição-base e diferentes teores de carbono. Dessa forma, observa-se que as mudanças nas microestruturas desses metais estão diretamente relacionadas ao teor de carbono. Em aços com baixo teor de carbono, a morfologia da estrutura martensítica é diferente daquela observada nos aços com teores de carbono mais elevado. Por exemplo, em aços que apresentam concentração de teor acima de 0,8%, a temperatura M_f é inferior à temperatura ambiente. Dessa forma, não ocorre a transformação de toda a austenita em martensita durante a têmpera, sendo possível observar uma fração de austenita retida.

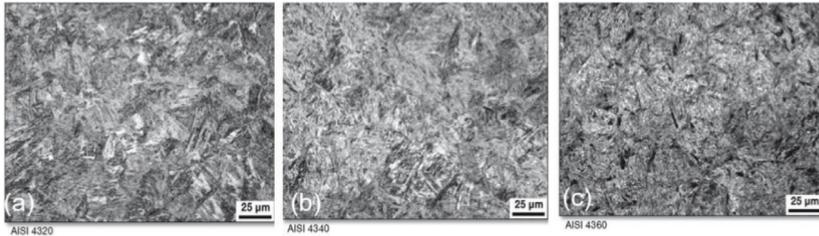


Assimile

A temperatura M_f refere-se à temperatura final de transformação em martensita.

A microestrutura dos aços da família AISI/SAE 43xx apresenta a microestrutura composta por martensita revenida. A Figura 4.25 mostra, respectivamente, as microestruturas dos aços AISI/SAE 4320, 4340 e 4360, que apresentam diferentes teores de carbono. Os aços foram submetidos ao tratamento térmico de revenimento à temperatura de 200 °C.

Figura 4.25 | Microestrutura dos aços AISI/SAE (a) 4220; (b) 4340 e (c) 4360



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 495).

O revenimento a 200 °C promove a precipitação de alguns carbonetos nessa austenita, reduzindo o teor de carbono e facilitando a formação de nova martensita durante o resfriamento do aço após o revenimento.

Devido à presença da austenita retida em aços com elevado teor de carbono, como os aços AISI/SAE 4390 e 43100, é indicado o duplo revenimento. No entanto, a temperatura do revenimento é um fator importante, já que o aumento da temperatura dificulta a percepção em microscopia ótica das diferenças microestruturais entre aços com diferentes teores de carbono. Em aços temperados e revenidos, é comum obter microestruturas complexas e faz-se necessária a utilização de diferentes reagentes para revelar as estruturas desses aços.

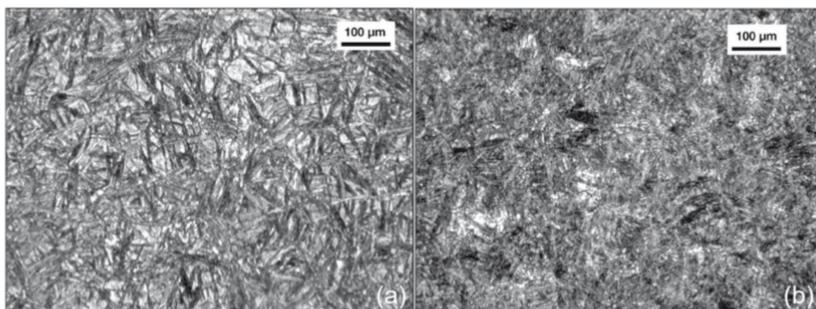


Refleta

Como o teor de carbono afeta a temperabilidade dos diferentes aços?

A Figura 4.26a traz a microestrutura do aço 300 M resfriado a 10 K/s, revelada com o ataque de Nital 2%, em que não é possível caracterizar a martensita e a bainita, nem diferenciar a presença da ferrita de austenita retida. Já a Figura 4.46b traz a microestrutura do mesmo aço revelada pelo ataque com metabissulfato de sódio, com destaque para as áreas de austenita retida. Nesse ataque, todas as demais fases são reveladas por cores, devido ao reagente.

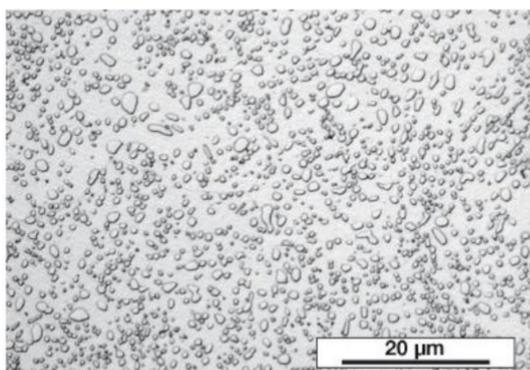
Figura 4.26 | (a) Microestrutura do aço 300 M revelado Nital 2%; (b) metabissulfato de sódio



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 498-499).

Outro aço de construção mecânica é o aço AISI 52100, que apresenta 1% de carbono e 1,5% de cromo. Esses aços são utilizados principalmente na fabricação de rolamentos, devido à microestrutura completamente martensítica, conferindo ao material elevada resistência mecânica e elevada resistência à fadiga, propriedades desejáveis para rolamentos. No entanto, para utilização em ambientes com umidade elevada, esse aço com estrutura martensítica sofre corrosão sob tensão, causada por hidrogênio (COLPAERT, 2008). Dessa forma, utiliza-se o aço AISI 52100 com a microestrutura formada por bainita inferior, que, em ambientes úmidos, apresenta melhor resistência à fadiga. Normalmente, os aços para rolamentos são submetidos aos tratamentos de homogeneização e recozimento, visando à esferoidização da microestrutura, como mostra a Figura 4.27.

Figura 4.27 | Aço AISI/SAE 52100 esferoidizado



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 501).

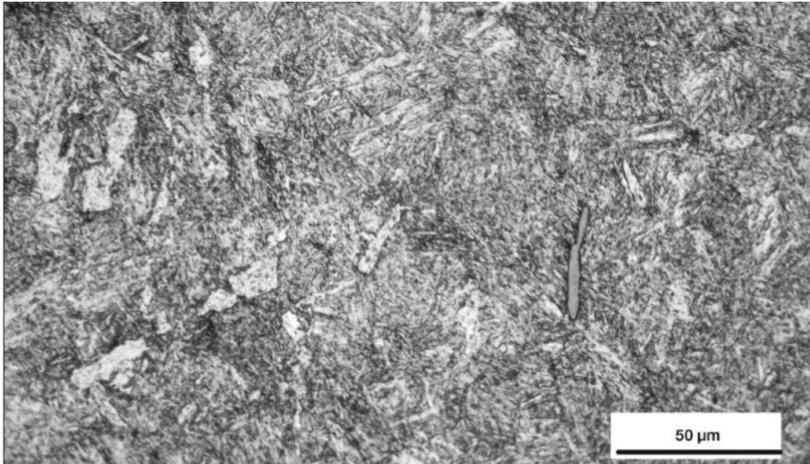


Exemplificando

Uma amostra imediatamente temperada após a austenitização apresenta parte da cementita dissolvida na austenita, e esta, no resfriamento, transformou-se em martensita. Observe que foi a austenita residual que transformou-se em martensita.

O aço AISI/SAE 4145 é outro aço muito comum utilizado nos equipamentos de colunas de perfuração de poços de petróleo na condição temperado e revenido. A Figura 4.28 traz a microestrutura do aço AISI/SAE 4145 temperado e revenido, evidenciando a martensita revenida.

Figura 4.28 | AISI/SAE 4145 temperado e revenido



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 505).

Um aço muito utilizado em seções espessas de forjados para aplicações em completação de poços de petróleo é o aço AISI/SAE 8630 modificado.



Assimile

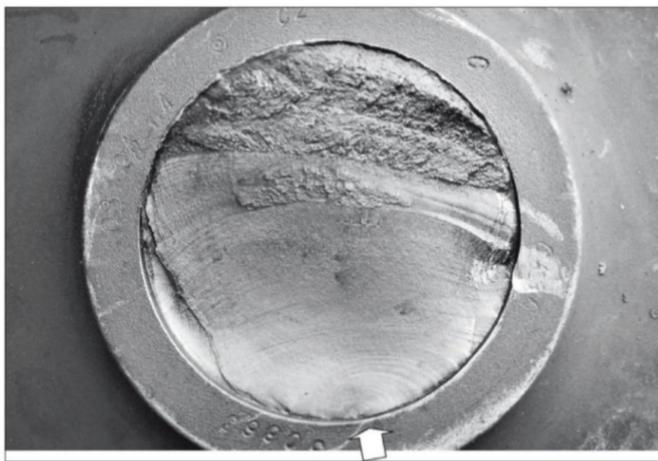
Um "aço modificado" é aquele aço básico ao qual foram acrescentados elementos de liga por processos termomecânicos, que alteram as propriedades do material-base (COSTA, 2013).

Esse aço com menos de 1% de níquel e uma determinada composição pode apresentar elevada temperabilidade e uma boa relação entre dureza e resistência mecânica, sendo possível atingir uma classe de 85 ksi de limite de escoamento sem ultrapassar 22 HRC (Hardness Rockwell C – Scale). Deixemos claro que ksi é uma unidade inglesa que equivale a 1000 libras por polegada quadrada. As características do aço AISI/SAE 8630 modificado são essenciais para garantir a resistência à corrosão sob tensão em meios contendo sulfeto de hidrogênio (H₂S).

Os aços de médio e alto carbono são utilizados em implementos agrícolas e ferramentas de moagem. Os aços eutetoides e hipereutetoides são utilizados na fabricação de trilhos e rodas ferroviárias (COLPAERT, 2008).

Os aços AISI/SAE 1050 e 1060 após tratamentos térmicos apresentam elevada resistência mecânica e boa resistência ao desgaste. Apesar de esses aços serem adequados na fabricação de eixos ferroviários, são necessários alguns cuidados. Esses aços, por apresentarem elevada dureza e temperabilidade, não são soldados, sendo necessários procedimentos adequados de aquecimento que permitam a sua soldabilidade, já que a falta desses cuidados resulta na falha prematura apresentada pela Figura 4.29, na qual observa-se uma falha iniciada no ponto indicado pela seta.

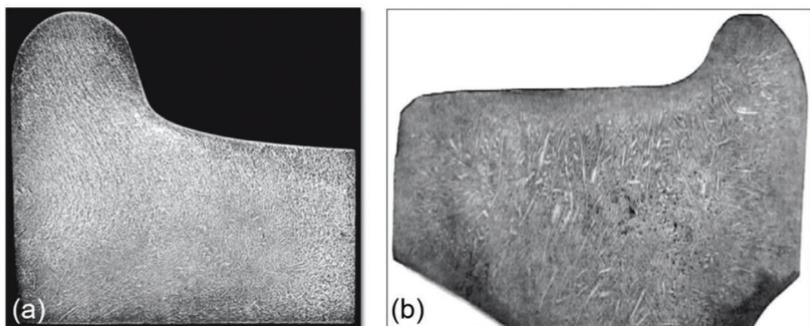
Figura 4.28 | AISI/SAE 4145 temperado e revenido



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 505).

Os aços próximos à composição eutetoide são utilizados na produção de rodas e trilhos ferroviários. Na fabricação de rodas ferroviárias, além do forjamento (Figura 4.30a) ou da obtenção por fundição (Figura 4.30b), ocorre a etapa de tratamento térmico, na qual após a austenitização, a pista de rolamento é submetida a um resfriamento acelerado por jato de água, resultando na formação de perlita fina e no estado de tensões com compressão na direção tangencial da roda. Na Figura 4.30a verifica-se o fibramento característico da deformação a quente, enquanto na Figura 4.30b é possível observar a estrutura dendrítica. As zonas escurecidas referem-se à região submetida ao resfriamento acelerado durante o tratamento térmico.

Figura 4.30 | Macrografia de regiões de uma roda ferroviária fabricadas: (a) forjamento; (b) fundição



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 513).

Dessa maneira, a composição química e os tratamentos térmicos dessas rodas são ajustados com o objetivo de se obter perlita em espaçamento interlamelar muito fino. Além dos aços de composição próximos a eutetoide, o aço inoxidável é outra classe de metais de construção mecânica.

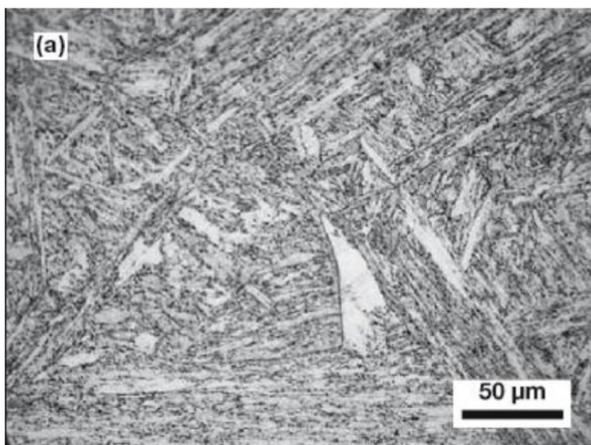
O termo aço inoxidável é o termo genérico utilizado para uma família de aços com elevada resistência à corrosão e oxidação. Esses aços possuem teores superiores a 12% de cromo.

Essa resistência ao ataque é devida ao filme de óxido rico em cromo de ocorrência natural formado na superfície do aço. Embora extremamente fino, esse filme invisível e inerte protege o metal em

uma ampla gama de ambientes corrosivos. Os aços inoxidáveis são comumente classificados em:

Martensíticos: são ligas de ferro e cromo (11-18%) muito semelhantes aos aços de baixa liga ou de carbono. Devido à adição de carbono, eles podem ser endurecidos e reforçados por tratamento térmico, de forma semelhante aos aços carbono. Incluem-se nessa família os aços AISI 403; 410; 414; 416; 420; 431; 440A, B e C; e 501. A Figura 4.31 apresenta a microestrutura do aço martensítico AISI 410 temperado e revenido.

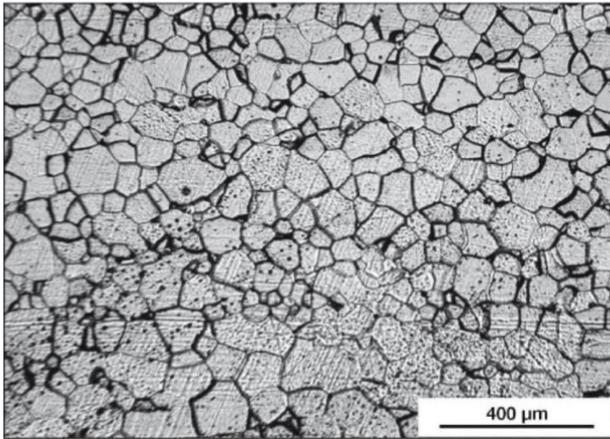
Figura 4.31 | Microestrutura do aço martensítico AISI 410 temperado e revenido



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 524).

Ferríticos: são ligas de ferro e cromo essencialmente ferríticas a todas as temperaturas e que não endurecem por têmpera. Normalmente, apresentam teores mais elevados de cromo e menores teores de carbono, quando comparados aos aços martensíticos. Nessa família incluem-se os aços AISI 405; 430; 430F; 446; e 502. A Figura 4.32 apresenta a microestrutura do aço ferrítico 409A.

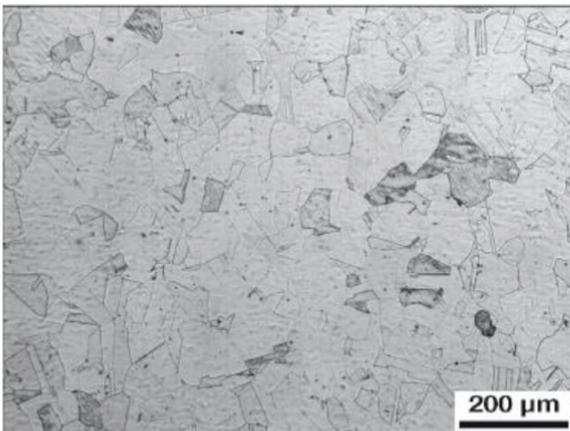
Figura 4.32 | Microestrutura do aço ferrítico AISI 409A laminado a frio e recozido



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 528).

Austeníticos: são ligas de ferro e cromo (16-30%) e níquel (8-35%) predominantemente austeníticos após tratamentos térmicos e apresentam, em geral, teores de carbono inferiores a 0,08%. Fazem parte dessa família os aços AISI 301; 302; 304; 304L; 308; 310; 316L; 317; 321; e 347 (COLPAERT, 2008). A Figura 4.33 apresenta a microestrutura do aço austenítico AISI 304.

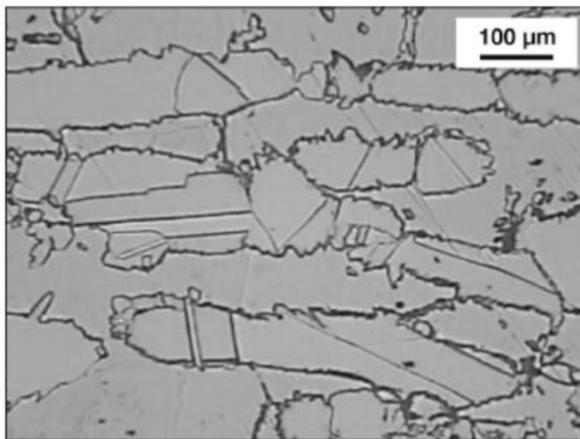
Figura 4.33 | Microestrutura do aço austenítico AISI 304



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 529).

Ferrítico-austeníticos (dúplex): apresentam microestrutura austenita e ferrita nas mesmas proporções em que são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos, como o nitrogênio. Nessa família incluem-se os aços AISI 329; UNS S32304 e S31803. A Figura 4.34 apresenta a microestrutura do aço *dúplex* ASTM A182 F53.

Figura 4.34 | Microestrutura do aço dúplex ASTM A182 F53



Fonte: Colpaert (2008, p. 539).

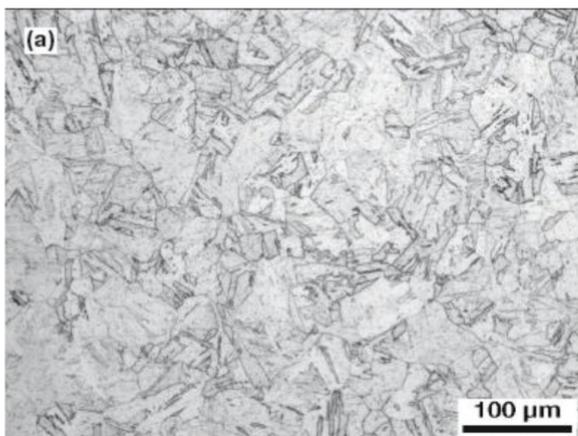
Endurecidos por precipitação: são ligas de ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%) e molibdênio (0-2%) com adições que endurecem a martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos intermediários intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio). A Figura 4.35 apresenta a microestrutura do aço AISI/SAE 630 solubilizado a 1040 °C/1h seguido de resfriamento em água, endurecido por precipitação e formação de martensita de baixo carbono.



Pesquise mais

Quer saber sobre uma aplicação de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação? Leia o artigo intitulado *Desenvolvimento de aço com usinabilidade melhorada e aços endurecíveis por precipitação para moldes de plástico*. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/2492.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2017.

Figura 4.35 | Microestrutura do aço AISI/SAE 630 endurecido por precipitação

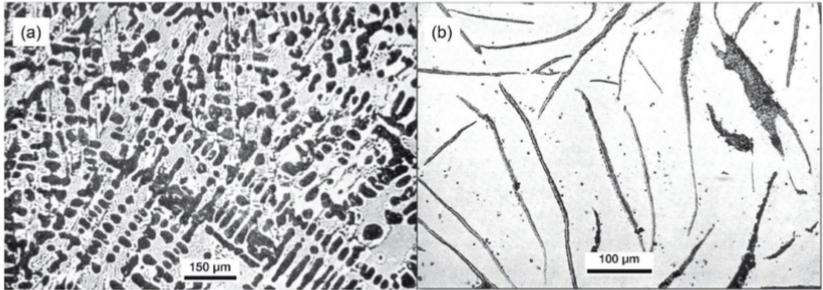


Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 544).

Adicionalmente aos aços, os ferros fundidos comuns são metais importantes na construção mecânica. Os ferros fundidos são ligas à base de ferro com composição química próxima ao eutético ferro-carbono. Os ferros fundidos contêm o teor de carbono na faixa de 2-4% em peso, com concentrações elevadas de silício e uma maior concentração de impurezas quando comparados aos aços. O ponto eutético ajuda a distinguir os ferros cinzentos, que esfriam em uma microestrutura contendo grafita, e os ferros brancos, nos quais o carbono está presente principalmente como cementita. Uma elevada taxa de resfriamento associada ao baixo teor de carbono favorece a formação de ferro fundido branco (Figura 4.36a), enquanto uma baixa taxa de resfriamento promove a formação do ferro cinzento com veios de grafita relativamente grandes e com inclusões não metálicas visíveis (Figura 4.36b).

Na Figura 4.36a observa-se a microestrutura para um ferro fundido branco hipoeutetoide, em que as dendritas de austenita transformaram-se em perlita (escura). A ledeburita transformada entre as dendritas é composta por cementita (branca) e perlita (escura, pequenos pontos) (COLPAERT, 2008).

Figura 4.36 | (a) Ferro branco; (b) Ferro cinzento

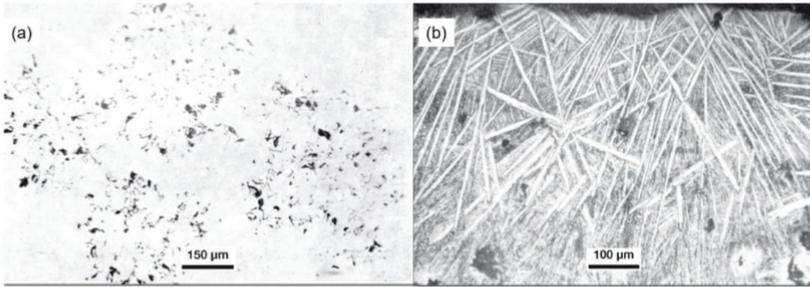


Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 561 e 565).

Durante a solidificação, a maior proporção do carbono precipita sob a forma de grafita ou cementita. Já no resfriamento, a concentração de carbono da austenita diminui à medida que mais cementita ou grafita precipitam a partir de uma solução sólida. Em ferros fundidos comuns, a austenita se decompõe em perlita à temperatura eutetoide. No entanto, em ferros fundidos cinzentos, se a taxa de resfriamento através da temperatura eutetoide for suficientemente lenta, obtém-se uma matriz completamente ferrítica com o excesso de carbono e precipitação da grafita já existente. Os ferros fundidos brancos são duros, quebradiços e não são usinados facilmente. Os ferros fundidos cinzentos, por sua vez, são mais macios. Entre as condições de resfriamento e as composições químicas intermediárias que levam à formação dos ferros fundidos brancos e cinzentos contendo grafita, existe a formação de microestruturas complexas, como os carbetos de solidificação. O resfriamento acelerado e o molde fabricado com material que apresenta elevada condutividade térmica favorecem a formação dos chamados aços fundidos mesclados e coquilhados.

A Figura 4.37a apresenta a microestrutura do ferro fundido mesclado, em que o agrupamento de grafita é destacado pelas regiões acinzentadas, e a regiões sem grafita correspondem às áreas brancas. Já a Figura 4.37b apresenta a microestrutura da região coquilhada junto à superfície de ferro cinzento hipereutetoide, com agulhas brancas de cementita sobre fundo de ledeburita. As regiões escuras referem-se às áreas com ocorrência de precipitação de grafita (COLPAERT, 2008).

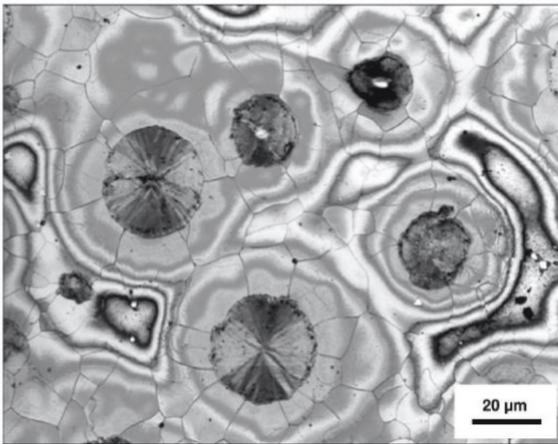
Figura 4.37 | (a) Microestrutura do ferro fundido mesclado; (b) microestrutura da região coquilhada junto à superfície de ferro cinzento hipereutetoide



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 590 e 593).

Os ferros fundidos nodulares combinam as propriedades interessantes dos ferros fundidos e dos aços. Suas características fundamentais são o ajuste da composição química e a inoculação do metal líquido, que favorece a formação de grafita em nódulos, em vez de veios, como mostra a Figura 4.38.

Figura 4.38 | Ferro fundido nodular, recozido



Fonte: Colpaert (2008, p. 599).

Na produção do ferro fundido maleável de núcleo branco, o ferro é fundido como um ferro branco que possui cementita eutética e perlita. Posteriormente, o ferro é descarbonetado durante o tratamento térmico. Como resultado, os ferros apresentam fratura de aspecto

claro no centro da peça e são, por isso, chamados de ferros fundidos maleáveis de núcleo branco.

Já o ferro fundido maleável de núcleo preto é produzido de forma a solidificar a peça ao longo de toda a seção. Posteriormente, é tratado termicamente de forma a decompor a cementita, precipitando grafita.

Sem medo de errar

Como engenheiro(a) mecânico(a) de uma indústria fabricante de peças para a indústria automobilística, você está verificando junto à sua equipe o motivo de um dos clientes ter devolvido um lote de engrenagem que apresentou baixo nível de soldabilidade durante a manutenção. O aço utilizado na fabricação apresenta a microestrutura anteriormente apresentada na Figura 4.24.

Figura 4.24 | Microestrutura do aço



Fonte: Colpaert (2008, p. 495).

A partir da análise microestrutural, qual foi o aço utilizado? Esse aço é adequado para a fabricação de engrenagens? Como solucionar o problema do cliente?

A partir da análise de microestrutura, você e sua equipe concluíram que o aço utilizado pertence à família dos aços AISI/SAE 43xx, que apresenta microestrutura composta por martensita revenida. Por comparação de microestrutura, foi possível concluir que trata-se

especificamente do aço AISI/SAE 4340, que é um aço de elevada temperabilidade e boa forjabilidade, porém com baixo nível de usinabilidade e soldabilidade, comumente utilizado na fabricação de eixos, bielas, virabrequins e peças com exigência de alta solicitação mecânica. Na fabricação de engrenagens é indicado o aço AISI/SAE 4320, que é um aço de elevada temperabilidade, boa forjabilidade e boa soldabilidade, destinado à fabricação de peças que necessitam de endurecimento superficial por cementação.

Avançando na prática

Instrumentos cirúrgicos

Descrição da situação-problema

A fabricação de instrumentos cirúrgicos requer a utilização de metais que não sejam facilmente oxidados. Atuando em uma indústria fabricante de instrumentos hospitalares, você é o(a) responsável pela aquisição dos metais da nova linha de produção de bisturis e pinças. Qual aço é indicado na fabricação desses instrumentos cirúrgicos? Que propriedades esses aços devem exibir para serem empregados nessa linha de produção?

Resolução da situação-problema

Após trabalhar por anos com materiais metálicos, você identificou que na fabricação de instrumentos cirúrgicos é necessária a utilização de aços inoxidáveis, que se dividem em austeníticos, ferríticos, ferrítico-austeníticos (*dúplex*), martensíticos e endurecidos por precipitação. Os aços inoxidáveis são utilizados na fabricação de instrumentos cirúrgicos devido a propriedades como alta resistência à corrosão, baixa rugosidade, facilidade de limpeza, material inerte, facilidade de conformação, relação custo/benefício, entre outros. Para tomar sua decisão, você pesquisou em fontes confiáveis e aprendeu que no Brasil as classificações AISI 303 e AISI 304 descrevem os aços inoxidáveis com diferentes teores de carbono, que devem ser utilizados na fabricação de instrumentos cirúrgicos. Atualmente, o aço inoxidável F899 é o aço mais comum utilizado nessa aplicação, e a norma ASTM F899 (*Standard Specification for Stainless Steel for Surgical Instruments*) recomenda 15 aços inoxidáveis martensíticos que podem ser utilizados

na fabricação de diversos instrumentos cirúrgicos, entre eles bisturis e pinças cirúrgicas (Figura 4.39).

Figura 4.39 | Instrumentos cirúrgicos



Fonte: <http://www.sandinox.com.br/images/produtos/Aco_Inoxidavel_F899_440C.jpg>. Acesso em: 7 mar. 2017.

Faça valer a pena

1. A partir da classificação de aços para construção mecânica e com base em sua temperabilidade, os diversos aços podem ser empregados nas condições temperado e revenido. No entanto, nessas condições, as microestruturas desses aços são muito parecidas.

Assinale a alternativa que apresenta duas evidências sobre as diferenças significativas entre os aços nas condições temperado e revenido.

- a) Teor de carbono e temperatura de revenido.
- b) Contorno de grão e temperatura de têmpera.
- c) Tamanho de grão austenítico e morfologia da microestrutura.
- d) Morfologia da microestrutura e teor de carbono.
- e) Tamanho de grão martensítico e temperatura do revenido.

2. Aço inoxidável é o termo genérico utilizado para uma família de aços com elevada resistência à corrosão e oxidação. Esses aços possuem teores superiores a 12% de cromo.

Analise as afirmações a seguir:

I. A elevada resistência à corrosão e oxidação dos aços inoxidáveis ocorre devido ao filme de óxido rico em cromo, de ocorrência natural, formado na superfície do aço.

II. Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser endurecidos e reforçados por tratamento térmico, de forma semelhante à dos aços carbono.

III. Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de ferro e cromo (16-30%) e níquel (8-35%) predominantemente austeníticos após tratamentos térmicos.

É correto o que se afirma:

- a) Em I, II e III.
- b) Em II e III.
- c) Em I e II.
- d) Em I e III.
- e) Somente em III.

3. Os ferros fundidos comuns são metais importantes na construção mecânica. Os ferros fundidos são ligas à base de ferro com composição química próxima ao eutético ferro-carbono.

O ponto _____ ajuda a distinguir os ferros cinzentos, que esfriam em uma microestrutura contendo _____, e os ferros brancos, nos quais o carbono está presente principalmente como _____.

- a) Eutético, grafita, cementita.
- b) Eutetoide, martensita, perlita.
- c) Peritético, cementita, bainita.
- d) Peritetoide, ferrita, bainita.
- e) Monotético, perlita, cementita.

Referências

ASTM. E1245 03 – **Standard practice for determining the inclusion or second-phase constituent content of metals by automatic image analysis**. Disponível em: <<http://wenku.baidu.com/view/7c6a6d10cc7931b765ce1511.html>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

ASTM. F899 – **Standard specification for wrought stainless steels for surgical instruments**. Pensilvânia: ASTM International, 2011.

BESWICK, J. M. ASTM E2283 – **Standard practice for extreme value analysis of nonmetallic inclusions in steel and other microstructural features**. In: _____. **Bearing steel technology**. Pensilvânia: ASTM, 2017.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

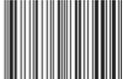
COSTA, E. C. da. **Caracterização do aço SAE 8630 modificado e amanteigado com Inconel 625 pelo processo de soldagem MIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5356/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 7 mar. 2020.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de aço com usinabilidade melhorada e aços endurecíveis por precipitação para moldes de plástico. **Tecnologia em metalurgia e materiais**. São Paulo, v. 1, n. 4, p. 11-15, abr./jun. 2005. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/2492.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2017.

TSCHIPTSCHIN, A. P. Difração de elétrons retroespalhados. **Caderno Técnico**. Metalurgia e materiais. fev. 2002. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/antschip/Difra%E7%E3o%20de%20el%E9trons.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2017.

ISBN 978-85-8482-849-4



9 788584 828494 >