



Departamento Regional de São Paulo

Tratamento térmico

Escola SENAI ""

**MÓDULOS ESPECIAIS
MECÂNICA**



Módulos especiais - Mecânica

*Material didático extraído do módulo “Tratamento térmico”
telecurso profissionalizante 2000.*

*Trabalho elaborado pela
Divisão de Recursos Didáticos da
Diretoria de Educação do
Departamento Regional do SENAI-SP*

Editoração eletrônica Cleide Aparecida da Silva

*CFP 5.02 - Escola SENAI “Luiz Scavone”
Rua Alfredo Massareti, 191
13251-360 - Itatiba - SP
Telefax: (011) 7806-2546 / 7805-0465
E-mail: senai.itatiba@uol.com.br*

Um problema

Por que todos os objetos de metal, como tesoura, grampeador, clipe, furador etc. exigem tratamento térmico em sua fabricação? A resposta a essa questão será dada nesta aula.

Origem do tratamento térmico

É bastante antiga a preocupação do homem em obter metais resistentes e de qualidade. O imperador romano Júlio César já afirmava, no ano 55 a.C., que os guerreiros bretões se defrontavam com o problema de suas armas entortarem após certo tempo de uso. Isso os obrigava a interromper as lutas para consertar suas armas de ferro.

Os romanos, por sua vez, já haviam descoberto que o ferro se tornava mais duro quando aquecido durante longo tempo num leito de carvão vegetal e resfriado, em seguida, em salmoura.

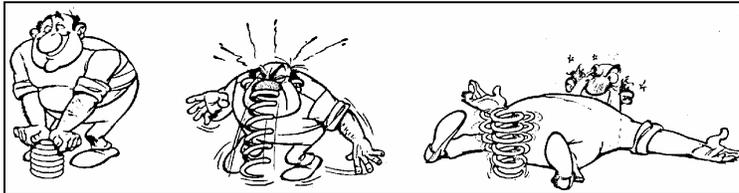
Esse procedimento pode ser considerado a primeira forma de tratamento térmico, pois permitia a fabricação de armas mais duras e mais resistentes.

Entretanto, foram necessários muitos anos para o homem aprender a lidar de modo mais eficiente com o calor e com os processos de resfriamento, para fazer tratamento térmico mais adequado dos metais.

Tratamento térmico do aço

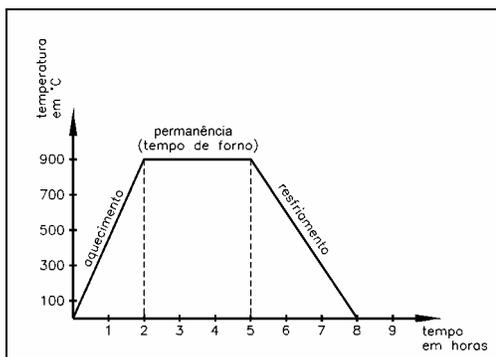
De modo geral, o tratamento térmico consiste em aquecer e resfriar uma peça de metal para que ela atinja as propriedades mecânicas desejadas como dureza, elasticidade, ductibilidade, resistência à tração, que são as chamadas **propriedades mecânicas** do metal. A peça adquire essas propriedades sem que se modifique o estado físico do metal.

Uma mola espiral, por exemplo, precisa ser submetida a tratamento térmico para ser usada no sistema de suspensão de um veículo. Ao ser comprimida, a mola acumula energia e, ao ser solta, ela se estende de forma violenta. Portanto, a mola deve ter dureza, elasticidade e resistência para suportar esses movimentos sem se romper. Isso é conseguido por meio do tratamento térmico.



Para o tratamento térmico de uma peça de aço, procede-se da seguinte forma:

- coloca-se a peça no forno com temperatura adequada ao tipo de material;
- deixa-se a peça no forno durante o tempo estabelecido;
- desliga-se o forno e retira-se a peça, com auxílio de uma tenaz;
- coloca-se a peça numa bancada;
- deixa-se a peça resfriar em temperatura ambiente.



O tratamento térmico provoca mudanças nas propriedades mecânicas do aço. Essas mudanças dependem de três fatores:

- temperatura de aquecimento;
- velocidade de resfriamento;
- composição química do material.

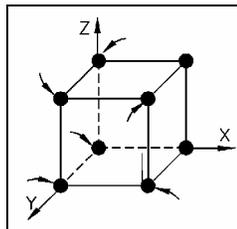
Portanto, antes do tratamento térmico, é preciso conhecer as características do aço, principalmente sua estrutura cristalina.

Estrutura cristalina

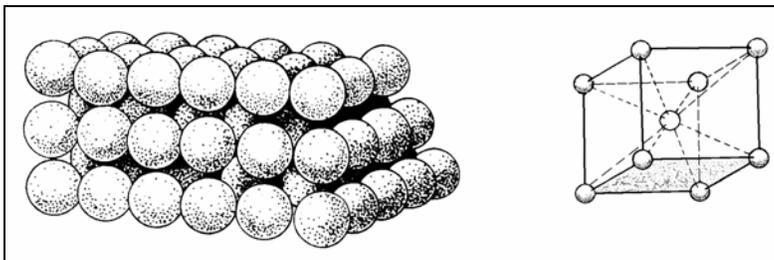
O aço se compõe de um aglomerado compacto de átomos arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina.

Na siderurgia, com a oxidação do ferro-gusa, produz-se o aço no estado líquido. Na passagem do estado líquido para o sólido, os átomos que compõem o aço vão se agrupando, à medida que a temperatura diminui. Nesse processo de agrupamento, os átomos vão se organizando de modo a assumir posições definidas e ordenadas, formando figuras geométricas tridimensionais que se repetem.

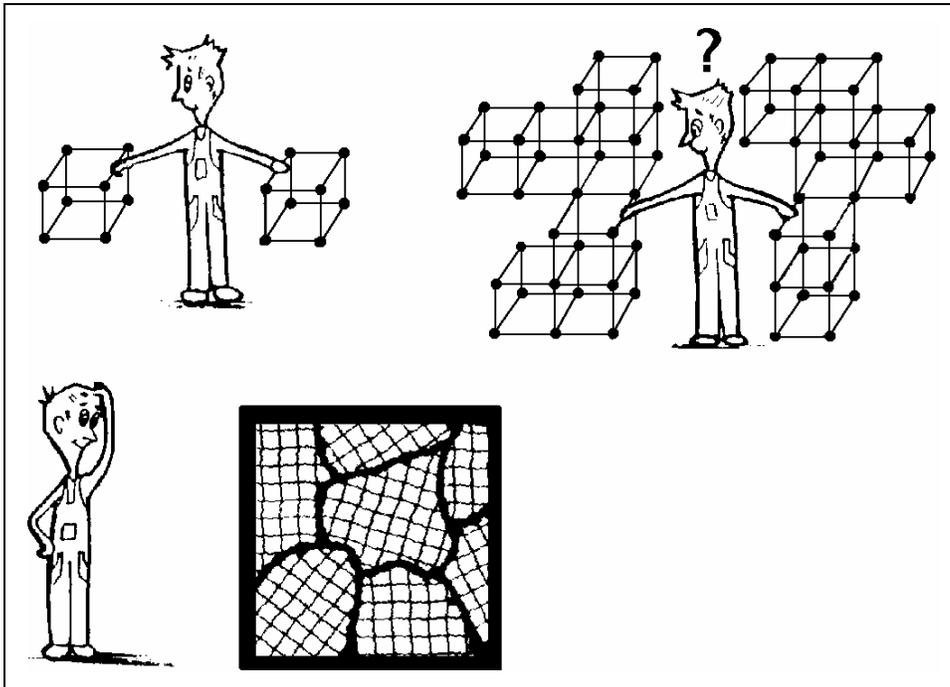
A esse conjunto de átomos, que ocupam posições fixas e formam uma estrutura, denominamos **célula unitária**.



Durante o processo de solidificação, as células unitárias vão se multiplicando, lado a lado, e formam uma rede cristalina.

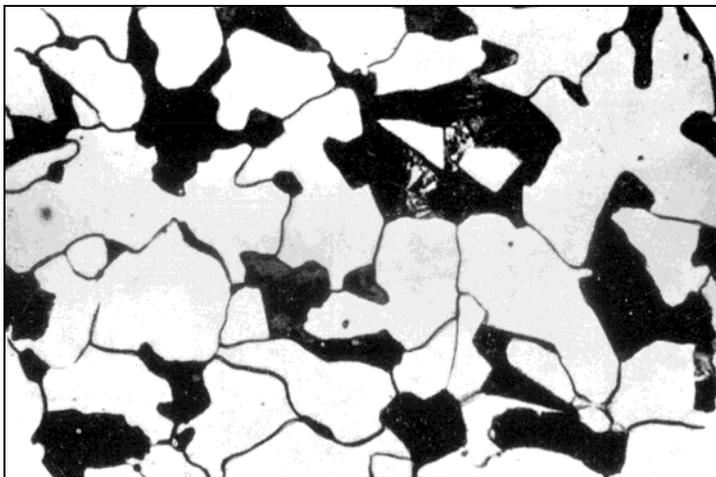


As células unitárias se organizam em três dimensões, apresentando um contorno de agregado de cristais irregulares. Esses cristais recebem o nome de **grãos**, que são formados por milhares de células unitárias.



Os grãos podem ser observados melhor com auxílio de um microscópio metalográfico. A figura, abaixo, ilustra uma peça de aço de baixo teor de carbono, com a superfície polida e atacada quimicamente ampliada muitas vezes.

As regiões claras e escuras, todas com contornos bem definidos como se fossem uma colmeia, são os grãos.



Sistema cristalino

No estado sólido, os átomos de um metal apresentam posições diferentes, com a aparência de uma figura geométrica regular. Cada metal tem uma estrutura específica. Mas pode acontecer de vários metais apresentarem a mesma estrutura. Entre as diversas formas de estrutura, vamos ver as três mais comuns.

- Reticulado cúbico de corpo centrado (CCC). Os átomos assumem uma posição no espaço, com forma de cubo. Oito átomos estão nos vértices e um, no centro do cubo. Exemplos: o sódio, o vanádio e o ferro (em baixa temperatura).
- Reticulado cúbico de face centrada (CFC). Os átomos ocupam os vértices e os centros das faces do cubo. Exemplos: o cálcio, o chumbo, o ouro e o ferro (em temperatura elevada).
- Reticulado hexagonal compacto (HC). Apresenta doze átomos nos vértices de um prisma de base hexagonal, dois átomos nos centros da base e mais três no seu interior. Exemplos: zinco e titânio.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. Um dos principais meios usados para modificar as propriedades do aço é:
 - a) força;
 - b) vapor;
 - c) calor;
 - d) água quente.

2. Para uma mola espiral suportar movimentos de compressão e de distensão é necessário que ela seja submetida a:
 - a) usinagem;
 - b) tratamento térmico;
 - c) fundição;
 - d) modelagem.

3. O tratamento térmico depende dos seguintes fatores:
 - a) temperatura, tempo, resfriamento;
 - b) resistência, calor, tempo;
 - c) resfriamento, tempo, dureza;
 - d) tempo, dureza, calor.

4. Na passagem do estado líquido para o sólido, os átomos dos metais formam uma figura geométrica chamada:
 - a) partícula unitária;
 - b) estrutura múltipla;
 - c) molécula irregular;
 - d) célula unitária.

5. Os cristais com contornos irregulares recebem o nome de:
 - a) rocha;
 - b) grão;
 - c) célula;
 - d) átomo.

Gabarito

1. c

2. b

3. a

4. d

5. b

Um problema

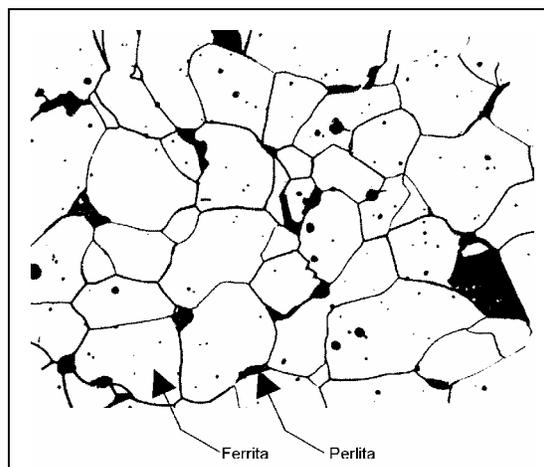
O aumento ou a redução da dureza do aço depende do modo como ele foi tratado termicamente. Uma fresa requer um tipo de tratamento térmico que a torne dura para a retirada de cavacos de um material. Outro exemplo: para que o aço adquira deformação permanente, como é o caso do forjamento, é necessário um tipo de tratamento térmico que possibilite a mais baixa dureza a esse aço.

Temos, assim, duas situações opostas de alteração das propriedades do aço. Tais situações mostram a necessidade de se conhecer bem os constituintes do aço, antes de submetê-lo a um tratamento térmico.

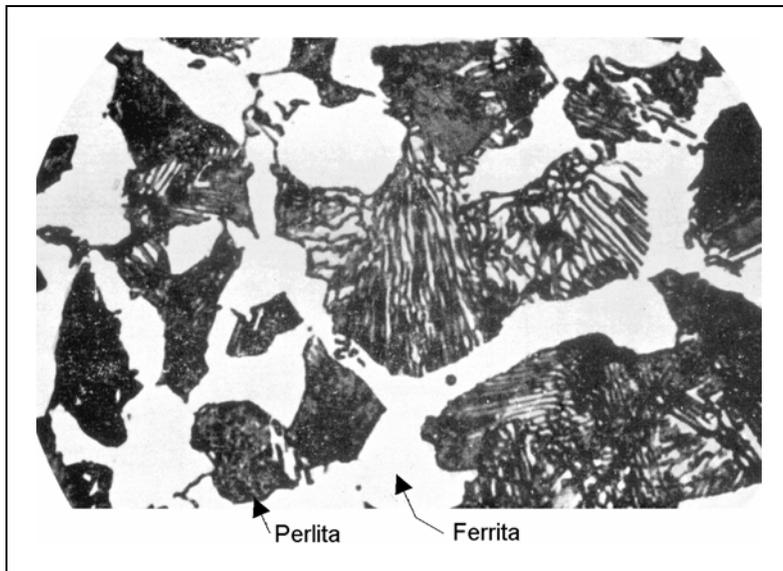
Constituintes do aço

Tomemos duas amostras de aço: uma com baixo teor de carbono (0,1%) e outra com teor médio de carbono (0,5%). Vamos examinar, com o auxílio de um microscópio metalográfico, a estrutura cristalina dessas duas amostras.

Ao observar a amostra de baixo carbono, distinguimos grãos claros, com pouco carbono, em maior quantidade, e grãos escuros com bastante carbono.

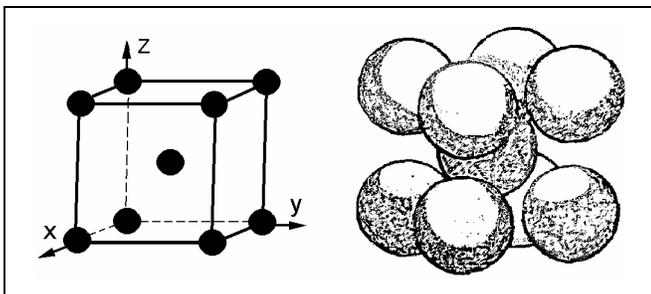


Ao observar a amostra de médio carbono, identificamos mais grãos escuros que claros. Portanto, essa amostra contém mais carbono. Os grãos escuros são mais duros e resistentes do que os grãos claros.



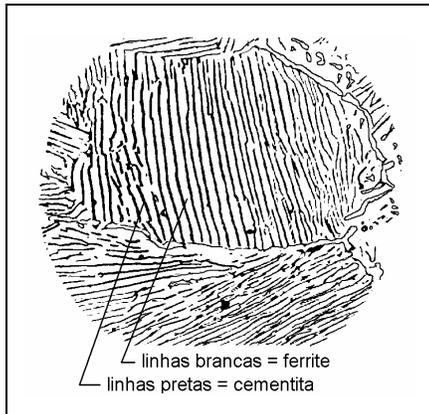
Com o auxílio de um microscópio metalográfico, identificamos dois constituintes da estrutura do aço: grãos claros, chamados **ferrita**, e grãos escuros, chamados **perlita**.

A ferrita (grãos claros) apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Os átomos que compõem essa estrutura se organizam bem juntos entre si, de modo que fica difícil a acomodação de átomos de carbono na rede cristalina. A estrutura da ferrita consegue acomodar, no máximo, 0,025% de átomos de carbono.



Ampliando várias vezes o tamanho do grão escuro, vemos uma seqüência de linhas ou lâminas claras e escuras. As lâminas cla-

ras são de ferrita e as lâminas escuras recebem o nome de **ce-
mentita**.



A estrutura da cementita constitui-se de 12 átomos de ferro e 4 átomos de carbono. É, portanto, um carboneto de ferro com dureza elevada, responsável pela dureza do aço. É representada por Fe_3C .

A perlita (grãos escuros) é formada de lâminas alternadas com 88% de ferrita e 12% de cementita.

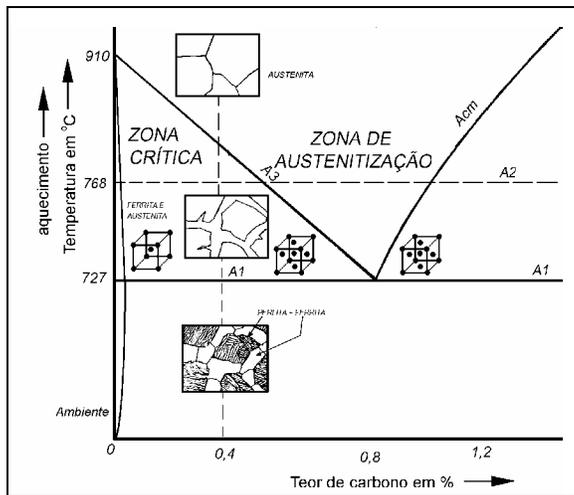
É possível melhorar as propriedades do aço, adicionando, durante sua fabricação, outros elementos químicos, como níquel, molibdênio, tungstênio, vanádio, cromo. Assim como um atleta necessita de vitaminas para melhorar seu desempenho, o aço precisa desses elementos químicos como “reforço vitamínico” para melhorar suas propriedades.

Aquecimento do aço

Até agora estudamos o aço na temperatura ambiente. Entretanto, o aço precisa ser colocado em forno para receber um tratamento térmico.

O que acontece com o aço ao ser aquecido? No caso de um aço que tenha, por exemplo, 0,4% de carbono, ocorre o seguinte:

- numa temperatura de 300°C, a estrutura do aço é igual à sua estrutura na temperatura ambiente: ferrita (cor branca) e perlita (cor preta);
- em temperatura de 760°C, inicia-se uma transformação na estrutura do aço: a perlita se transforma em austenita e a ferrita permanece estável;
- em temperatura de 850°C, toda a estrutura do aço se transforma em austenita.



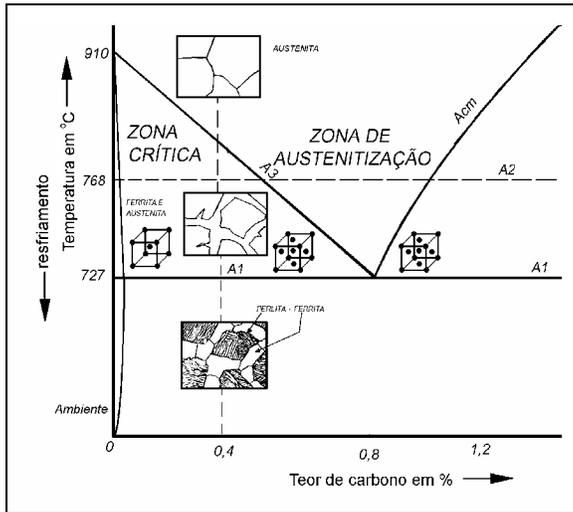
O gráfico ilustra uma região de mudança de fase num intervalo de temperatura: a ferrita e a perlita se transformam em austenita. Essa região é chamada **zona crítica**: área em que as células unitárias de CCC se transformam em CFC, durante o aquecimento do aço.

A austenita se forma na estrutura do aço submetido a temperatura elevada. Encontra-se na região acima da zona crítica, na zona de austenitização, conforme se pode observar no gráfico. A austenita tem uma estrutura cúbica da face centrada (CFC), apresentando menor resistência mecânica e boa tenacidade. Não é magnética.

Resfriamento do aço

Numa temperatura de 850°C, o aço apresenta um único constituinte, que é a austenita.

O gráfico, a seguir, ilustra o que ocorre quando o aço com 0,4% de carbono é retirado do forno e vai se resfriando lentamente até chegar à temperatura ambiente.



Como você pode observar, ocorre o seguinte:

- em temperatura de 850°C, a estrutura do aço é austenita;
- em temperatura de 760°C, parte da austenita desaparece, dando lugar à ferrita - permanecem, na estrutura, portanto, ferrita e austenita;
- em temperatura de 700°C, toda a austenita se transforma em ferrita e perlita - portanto, o aço volta à sua estrutura inicial;
- em temperatura ambiente, a estrutura continua ferrita e perlita.

Se o aço for resfriado bruscamente (por exemplo, na água), ele se transformará em **martensita**, um constituinte duro, que pode ser visto com auxílio de microscópio metalográfico.

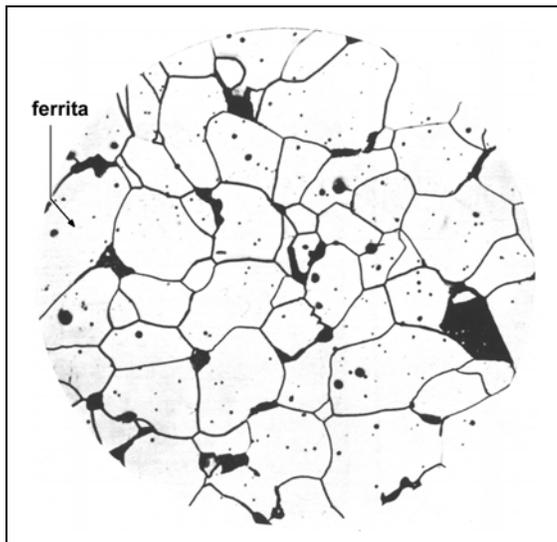
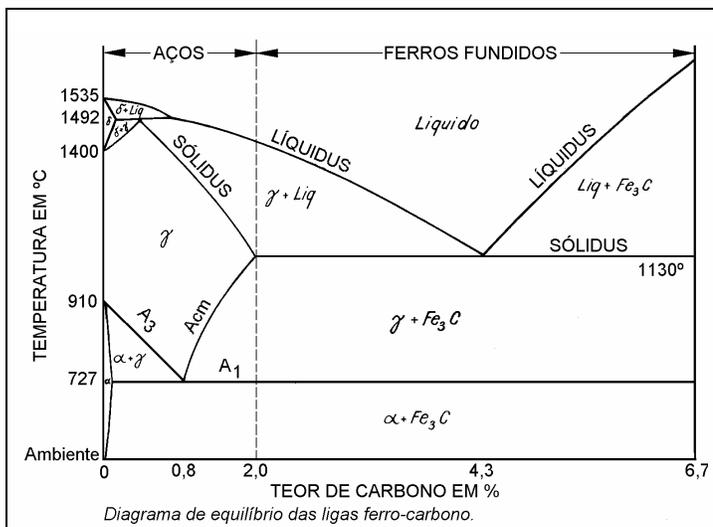


Diagrama de equilíbrio ferro-carbono

As explicações dadas nesta aula, a respeito do que ocorre em um tratamento térmico, basearam-se no **diagrama de equilíbrio ferro-carbono**, que você verá a seguir.



Descrição das linhas, zonas, variações térmicas, simbologia e outros itens empregados em nosso estudo.

Abcissa – Representa a escala horizontal, com a porcentagem de carbono - por exemplo: 1% de C (99% Fe).

Ordenada – Representa as várias temperaturas.

Linhas A₃ – Indica início da passagem da estrutura CFC para CCC durante o resfriamento.

Linha A_1 – Indica o limite da existência de austenita; abaixo dessa linha, não temos austenita.

Acm – Indica o limite da quantidade de carbono dissolvido na austenita;

Fe_3C – É a fórmula do carboneto de ferro, chamado cementita.

Letras gregas: γ (gama) – Símbolo de austenita.

α (alfa) – Símbolo de ferrita.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

- Podemos analisar a estrutura do aço com o auxílio de:
 - estetoscópio;
 - telescópio;
 - microscópio;
 - periscópio.
- Os grãos escuros de uma amostra de médio carbono contêm:
 - menos ferro;
 - mais carbono;
 - pouco carbono;
 - mais ferro.
- A estrutura do aço com 0,4% de carbono compõe-se de:
 - ferrita e perlita;
 - austenita;
 - cementita;
 - carboneto de ferro.
- As lâminas claras da perlita recebem o nome de:
 - ferrita;
 - cementita;
 - austenita;
 - cementita.

Gabarito

1. c

2. b

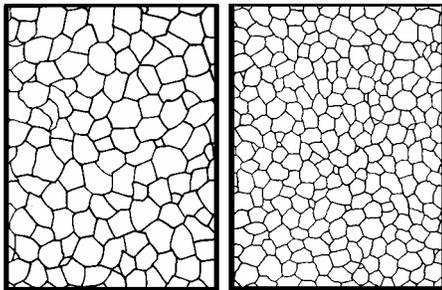
3. a

4. a

Um problema

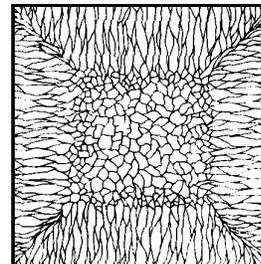
É comum pensar que, na fabricação de uma peça, o tratamento térmico é feito na fase final do processo. Nem sempre é assim. Dependendo do tipo de peça e dos fins a que ela se destina, precisamos, primeiro, corrigir a irregularidade da estrutura metálica e reduzir as tensões internas que ela apresenta.

Uma estrutura macia, ideal para a usinagem do material, já caracteriza um bom tratamento térmico. Os grãos devem apresentar uma disposição regular e uniforme.



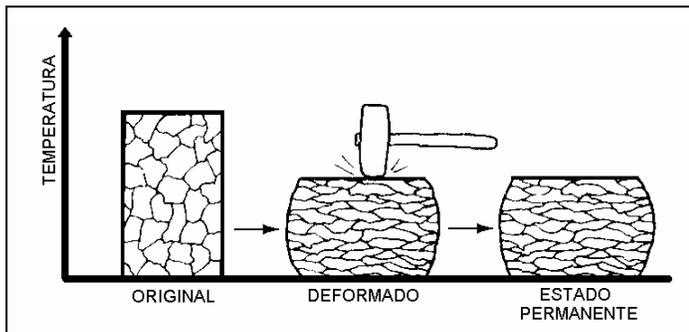
Tensões internas

As tensões internas da estrutura do aço decorrem de várias causas. Durante o processo de solidificação, a região da superfície do aço se resfria com velocidade diferente da região do núcleo. Essa diferença dá origem a grãos com formas também diferentes entre si, o que provoca tensões na estrutura do aço.



Também surgem tensões nos processos de fabricação a frio, ou seja, em temperatura ambiente. Quando se prensa uma peça, os grãos de sua estrutura, que estavam mais ou menos organizados, são deformados e empurrados pelo martelo da prensa.

Na laminação, os grãos são comprimidos uns contra os outros e apresentam aparência de grãos amassados. Em ambos os casos, isto é, na laminação e no forjamento, os grãos deformados não têm a mesma resistência e as mesmas qualidades mecânicas dos grãos normais.



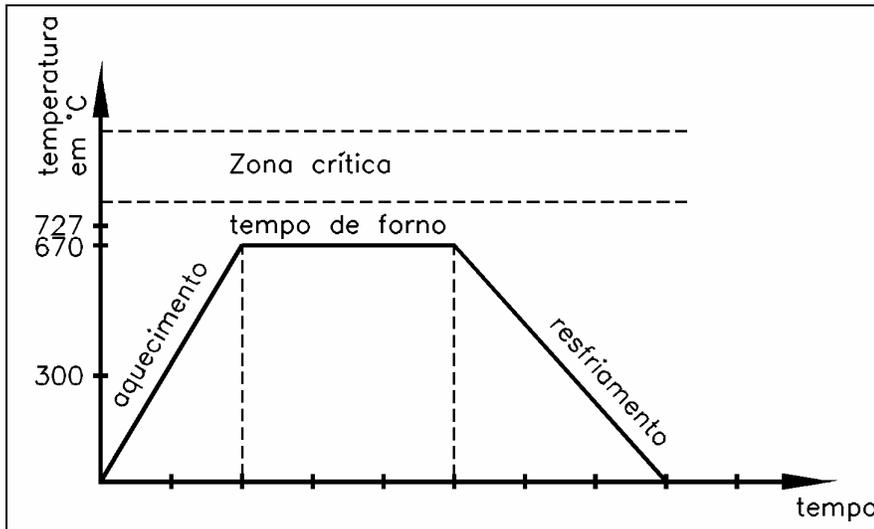
As tensões internas começam a ser aliviadas (diminuídas) quando o aço atinge a temperatura ambiente. Porém, esse processo levaria um longo tempo, podendo dar margem a empenamentos, rupturas ou corrosão. Para evitar que isso ocorra é preciso tratar o material termicamente.

Alívio de tensões

É necessário recozer o material para aliviar suas tensões, surgidas na solidificação e nos trabalhos de deformação a frio, soldagem ou usinagem.

No recozimento, a peça é aquecida lentamente no forno até uma temperatura abaixo da zona crítica, por volta de 570°C a 670°C, no caso de aços-carbono. Sendo um tratamento subcrítico, a ferrita e a perlita não chegam a se transformar em austenita. Portanto, aliviam-se as tensões sem alterar a estrutura do material.

Após um período que varia de uma a três horas, a partir do início do processo, o forno é desligado e a peça é resfriada no próprio forno. Esse processo é conhecido como recozimento subcrítico.



Normalização

Em temperatura elevada, bem acima da zona crítica, os grãos de austenita crescem, absorvendo os grãos vizinhos menos estáveis. Esse crescimento é tão mais rápido quanto mais elevada for a temperatura. Se o aço permanecer muitas horas com temperatura um pouco acima da zona crítica (por exemplo 780°C), seus grãos também serão aumentados.

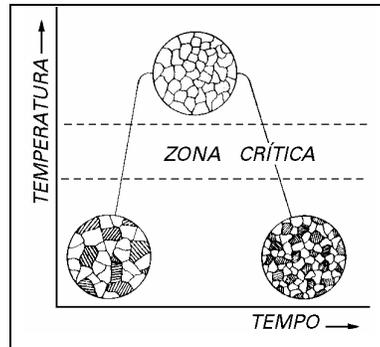
No resfriamento, os grãos de austenita transformam-se em grãos de perlita e de ferrita. Suas dimensões dependem, em parte, do tamanho dos grãos de austenita.

Uma granulação grosseira torna o material quebradiço, alterando suas propriedades mecânicas. As fissuras (trincas) também se propagam mais facilmente no interior dos grãos grandes. Por isso, os grãos mais finos (pequenos) possuem melhores propriedades mecânicas.

A normalização consiste em refinar (diminuir) a granulação grosseira da peça, de modo que os grãos fiquem numa faixa de tamanho considerada normal.

No processo de normalização, a peça é levada ao forno com temperatura acima da zona crítica, na faixa de 750°C a 950°C. O material se transforma em austenita. Depois de uma a três horas, o forno é desligado. A peça é retirada e colocada numa bancada, para se resfriar.

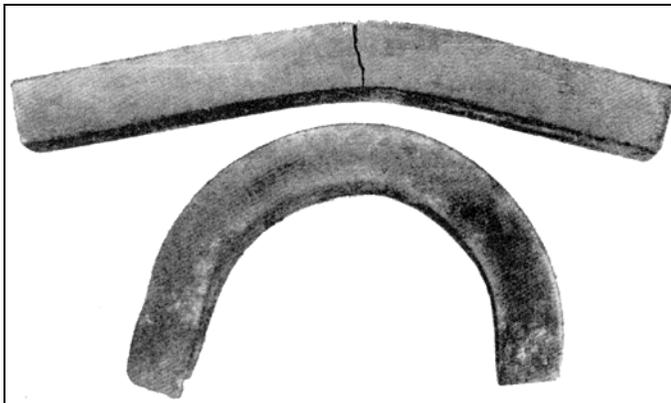
A estrutura final do aço passa a apresentar grãos finos, distribuídos de forma homogênea.



Recozimento pleno

Quando uma peça sai do processo inicial de fabricação - fundição, prensagem, forjamento, laminação - terá de passar por outros processos mecânicos antes de ficar pronta. Um eixo, por exemplo, precisa ser usinado, desbastado num torno, perfurado. O aço deve estar macio para ser trabalhado.

Por meio do recozimento pleno do aço é possível diminuir sua dureza, aumentar a ductibilidade, melhorar a usinabilidade e ajustar o tamanho do grão. Também são eliminadas as irregularidades resultantes de tratamento térmico ou mecânico, sofridas anteriormente.



O tratamento consiste em aquecer o aço num forno, numa temperatura acima da zona crítica. Após certo tempo, o forno é desligado e a peça é resfriada no seu interior.

Aços-carbono ABNT (AISI)	Temperatura de Austenização °C	Ciclo de resfriamento* de até		Faixa de dureza (Brinell)
1020	855° - 900°	855°	700°	111 - 149
1025	855° - 900°	855°	700°	111 - 149
1030	840° - 885°	840°	650°	126 - 197
1035	840° - 885°	840°	650°	137 - 207
1040	790° - 870°	790°	650°	137 - 207
1045	790° - 870°	790°	650°	156 - 217
1050	790° - 870°	790°	650°	156 - 217
1060	790° - 840°	790°	650°	156 - 217
1070	790° - 840°	790°	650°	167 - 229
1080	790° - 840°	790°	650°	167 - 229
1090	790° - 830°	790°	650°	167 - 229
1095	790° - 830°	790°	650°	167 - 229

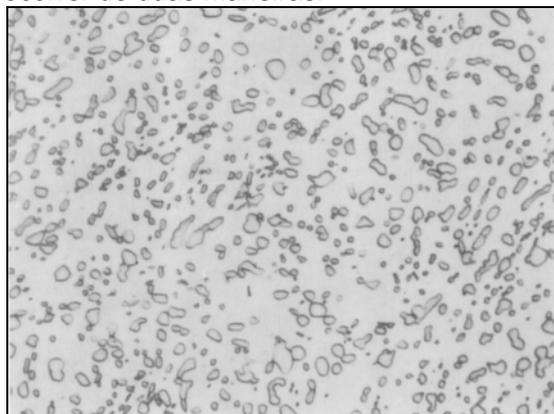
*Resfriamento a 25°C/h, no interior do forno.

Esferoidização

Esferoidização significa dar forma de esfera à cementita. Trata-se de um processo indicado para aços de alto teor de carbono, que têm mais cementita do que os aços de médio e baixo carbono. A cementita assume forma de glóbulos (esferas) que permitem reduzir bastante a dureza do aço. Desse modo, pode-se economizar material durante a usinagem de aços com elevado teor de carbono.

O processo de esferoidização pode ocorrer de duas maneiras:

- Aquecimento e resfriamento alternados entre temperaturas que estejam logo acima e logo abaixo da linha de transformação inferior da zona crítica.
- Aquecimento por tempo prolongado em temperatura logo abaixo da zona crítica.



Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. A presença de grãos com tamanhos e formas diferentes na estrutura do aço dá origem a:
 - a) rupturas;
 - b) rugosidade;
 - c) tensões internas;
 - d) desequilíbrio.

2. Para aliviar tensões internas do aço, usa-se o seguinte meio:
 - a) usinagem;
 - b) resfriamento;
 - c) prensagem;
 - d) recozimento.

3. Para refinar uma granulação grosseira, usa-se o seguinte procedimento:
 - a) raspagem;
 - b) normalização;
 - c) usinagem;
 - d) aquecimento.

4. O recozimento pleno consiste em aquecer o aço em temperatura:
 - a) abaixo da zona crítica;
 - b) no limite da zona crítica;
 - c) acima da temperatura ambiente;
 - d) acima da zona crítica.

Gabarito

1. c

2. d

3. b

4. d

Endurecimento do aço

Um problema

Várias brocas foram devolvidas ao fabricante porque elas haviam se desgastado no primeiro uso.

O supervisor da fábrica descobriu a falha da fabricação das brocas: elas não tinham recebido tratamento correto. O lote foi recolhido e retrabalhado, ficando evidente a importância do tratamento térmico.

Têmpera

Houve um grande avanço tecnológico quando o homem descobriu como conferir dureza ao aço. Os dentes da engrenagem, o engate do trem, o amortecedor do carro, as brocas devem ser fabricados com aço endurecido, para suportarem os esforços a que são submetidos.

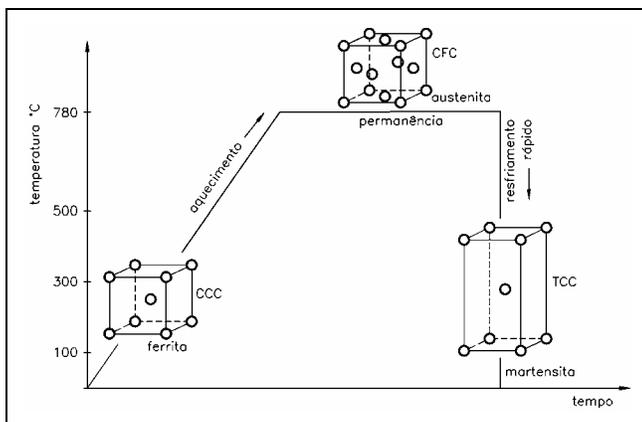
A têmpera é um processo de tratamento térmico do aço destinado à obtenção de dureza. Uma têmpera feita corretamente possibilita vida longa à ferramenta, que não se desgasta nem se deforma rapidamente.

O processo consiste em aquecer o aço num forno com temperatura acima da zona crítica. Para o aço-carbono, a temperatura varia de 750° a 900°C. A peça permanece nessa temperatura o tempo necessário para se transformar em austenita. O que distingue essa forma de tratamento é o seu processo de resfriamento. A peça é retirada do forno e mergulhada em água. A temperatura cai de 850°C para 20°C. Trata-se de um resfriamento brusco.

Quando a austenita é resfriada muito rapidamente, não há tempo para que se transforme em ferrita, cementita ou perlita. A austenita se transforma num novo constituinte do aço chamado **martensita**.

Vimos que ao aquecer o aço acima da zona crítica, o carbono da cementita (Fe_3C) dissolve-se em austenita. Entretanto, na temperatura ambiente, o mesmo carbono não se dissolve na ferrita. Isso significa que os átomos de carbono se acomodam na estrutura CFC de austenita, mas não se infiltram na estrutura apertada - CCC - da ferrita.

No resfriamento rápido em água, os átomos de carbono ficam presos no interior da austenita. Desse modo, os átomos produzem considerável deformação no retículo da ferrita, dando tensão ao material e aumentando sua dureza.



Vamos fazer uma experiência. Pegue um pedaço de aço, de qualquer tamanho, com espessura de 20mm, com teor de carbono entre 0,4% e 0,8%. Ligue um forno na temperatura de 850°C e aguarde. Enquanto isso, verifique a dureza do material, antes do tratamento.

Agora coloque a peça no forno e deixe-a por 40 minutos. Decorrido esse tempo, retire-a com uma tenaz e submeta-a a resfriamento imediato em água.

Verifique a dureza do material tratado. Percebeu a diferença? Pois bem, você realizou um tratamento de têmpera.

Cuidados no resfriamento

O resfriamento brusco provoca o que se chama de choque térmico, ou seja, o impacto que o material sofre quando a temperatura a que está submetido varia de um momento para outro, podendo provocar danos irreparáveis ao material. Mas o resfriamento brusco é necessário à formação da martensita. Assim, dependendo da composição química do aço, podemos resfriá-lo de forma menos severa, usando óleo ou jato de ar.

Revenimento

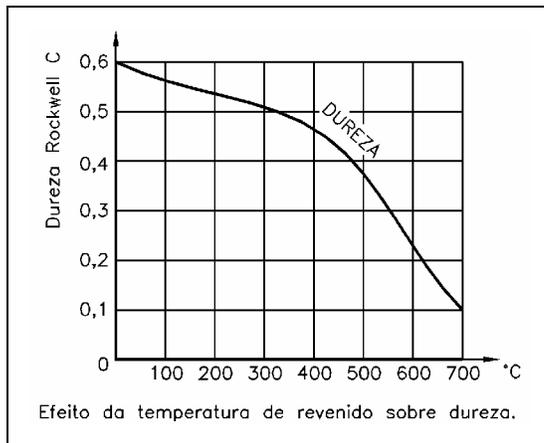
O tratamento de têmpera provoca mudanças profundas nas propriedades do aço, sendo que algumas delas, como a dureza, a resistência à tração, atingem valores elevados. Porém, outras propriedades, como a resistência ao choque e o alongamento, ficam com valores muito baixos, e o material adquire uma apreciável quantidade de tensões internas. Um aço nessa situação é inadequado ao trabalho.

Para corrigir suas tensões, é preciso revenir o material. O revenimento tem a finalidade de corrigir a dureza excessiva da têmpera, aliviar ou remover as tensões internas. O revenimento é, portanto, um processo sempre posterior à têmpera.

Logo após a têmpera, a peça é levada ao forno, em temperatura abaixo da zona crítica, variando de 100°C a 700°C, dependendo da futura utilização do aço. Decorrido algum tempo (de uma a três horas), retira-se a peça do forno e deixa-se que ela esfrie por qualquer meio.

Vamos fazer uma segunda experiência. Faça revenimento de dois aços já temperados, um a 150°C de temperatura e o outro a 550°C, ambos durante 2 horas no forno. Depois de retirar a peça do forno, vamos fazer o ensaio de dureza. O revenido da peça em baixa temperatura apresenta pequena diferença de dureza, comparada com o valor do temperado. Já o revenido na peça aquecida em alta temperatura apresenta grande queda de dureza. Isso

demonstra que quanto mais alta a temperatura de revenimento maior será a queda da dureza de têmpera.

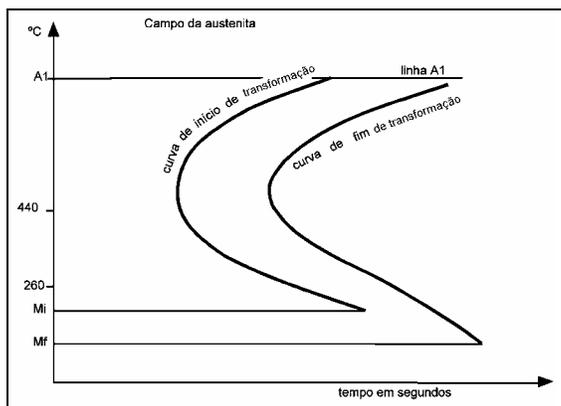


Tratamento isotérmico

Na aula anterior, vimos que as transformações da austenita em ferrita, cementita e perlita ocorriam numa velocidade muito lenta de esfriamento (ar ou forno). Entretanto, se aumentarmos essa velocidade, ocorrerá um atraso no início da transformação da austenita, devido à inércia própria de certos fenômenos físicos, mesmo que a temperatura esteja abaixo da linha A1 (abaixo da zona crítica).

O diagrama, a seguir, indica as transformações da austenita em diferentes velocidades de esfriamento.

Para ficar mais claro, vamos dar uma olhada no diagrama TTT - Tempo, Temperatura e Transformação.



A interpretação é a seguinte:

- curvas - representam o início e o fim de transformação da austenita.
- cotovelo - parte central das curvas com transformações abaixo do cotovelo, obtêm-se perlita, ferrita e cementita. Como transformações abaixo do cotovelo, obtêm-se bainita e martensita.

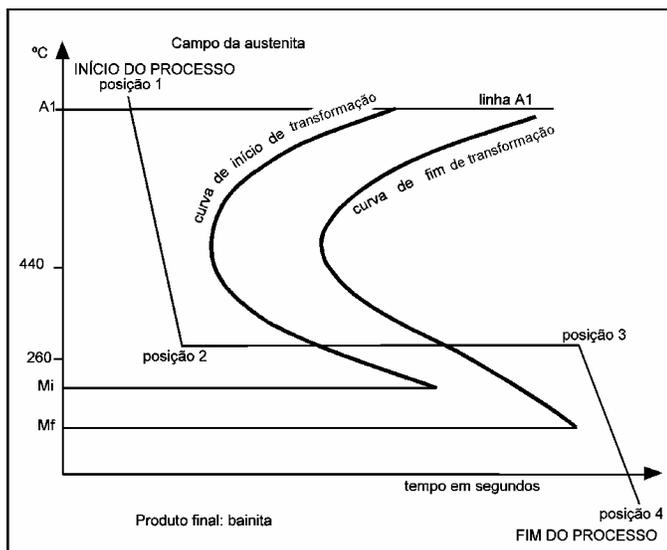
Austêmpera

Esse tratamento é adequado a aços de alta temperabilidade (alto teor de carbono).

A peça é aquecida acima da zona crítica, por certo tempo, até que toda a estrutura se transforme em austenita (posição 1). A seguir, é resfriada bruscamente em banho de sal fundido, com temperatura entre 260°C e 440°C (posição 2). Permanece nessa temperatura por um tempo, até que sejam cortadas as duas curvas (posição 3), ocorrendo transformação da austenita em bainita. Em seguida, é resfriada ao ar livre (posição 4).

A dureza da bainita é de, aproximadamente, 50 Rockwell C e a dureza da martensita é de 65 a 67 Rockwell C.

Para ficar mais claro o tratamento por austêmpera, segue o diagrama TTT - tempo, temperatura, transformação.

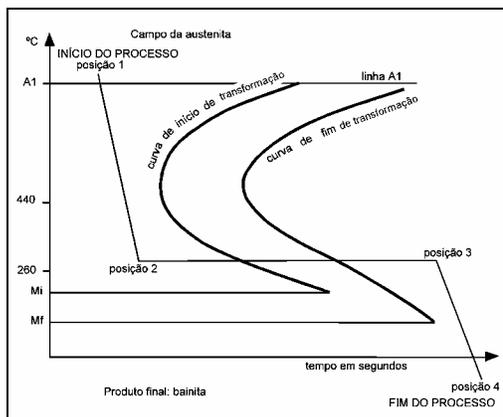


A interpretação é a seguinte:

- acima de 750°C: campo da austenita;
- curva à esquerda (i), curva de início de transformação da austenita em perlita ou bainita;
- curva à direita (f), curva de fim de transformação;
- Mi – início de transformação da austenita em martensita;
- Mf – fim de transformação.

Martêmpera

A martêmpera é um tipo de tratamento indicado para aços-liga porque reduz o risco de empenamento das peças. O processo é ilustrado no diagrama, a seguir.



A peça é aquecida acima da zona crítica para se obter a austenita (posição 1). Depois, é resfriada em duas etapas. Na primeira, a peça é mergulhada num banho de sal fundido ou óleo quente, com temperatura um pouco acima da linha Mi (posição 2). Mantém-se a peça nessa temperatura por certo tempo, tendo-se o cuidado de não cortar a primeira curva (posição 3). A segunda etapa é a do resfriamento final, ao ar, em temperatura ambiente (posição 4).

A martensita obtida apresenta-se uniforme e homogênea, diminuindo riscos de trincas.

Após a mantêmpera é necessário submeter a peça a revenimento.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. Para aumentar a dureza e a resistência à tração dos metais ferrosos, usa-se o tratamento térmico de:
 - a) () fundição;
 - b) () têmpera;
 - c) () aquecimento;
 - d) () resfriamento.

2. O processo da têmpera consiste em aquecer o aço à temperatura:
 - a) () normal, de 20°C;
 - b) () elevada, próxima a 100°C;
 - c) () acima da zona crítica;
 - d) () dentro da zona crítica.

3. Para corrigir a excessiva dureza do aço provocada pela têmpera, usa-se o processo de:
 - a) () martêmpera;
 - b) () austêmpera;
 - c) () normalização;
 - d) () revenimento.

4. O constituinte da têmpera é:
 - a) () perlita;
 - b) () cementita;
 - c) () martensita;
 - d) () ferrita.

5. Um aço endurecido por têmpera deve ser resfriado por meio de:
 - a) () ar;
 - b) () forno;
 - c) () água;
 - d) () cinzas.

Gabarito

1. b

2. c

3. d

4. c

5. c

Tratamento termoquímico

Um problema

Muitas vezes, peças como coroas, pinhões, rolamentos, eixos de deslizamentos e rotativos, dentes de engrenagem, ferramentas de corte e roscas sem-fim apresentam pouca resistência ao desgaste e vida útil curta porque não receberam um reforço de carbono durante a fabricação do aço.

Tratamento termoquímico

Vimos que os processos de tratamento térmico não alteram a composição química do aço, ou seja, o material inicia o tratamento com 0,6% de carbono e termina com 0,6% de carbono. Entretanto, às vezes, é necessário submeter o aço a modificações parciais em sua composição química para melhorar as propriedades de sua superfície. Essas modificações são obtidas por meio de tratamento termoquímico.

Esse tratamento tem como objetivo principal aumentar a dureza e a resistência do material ao desgaste de sua superfície e, ao mesmo tempo, manter o núcleo dúctil (macio) e tenaz.

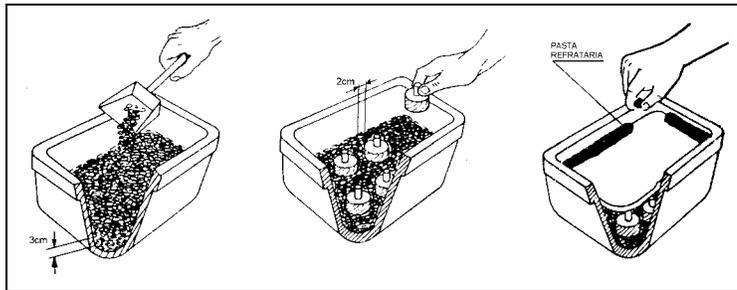
Cementação

A cementação consiste em introduzir maiores quantidades de carbono em superfícies de aço com baixos teores de carbono. Por isso, é indicada para aços-carbono ou aços-ligas cujo teor original de carbono seja inferior a 0,25%. A cementação aumenta esse teor até valores em torno de 1%, assegurando uma superfície dura e um núcleo tenaz.

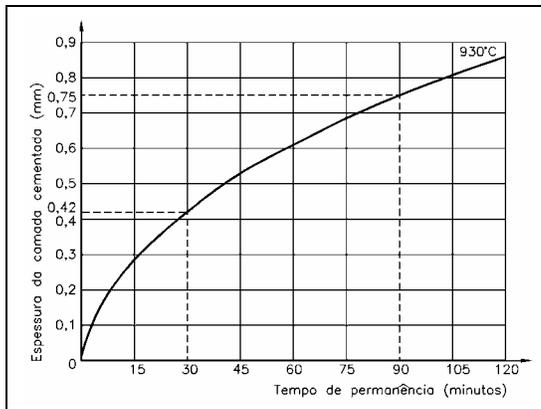
Peças fabricadas em aço com porcentagem média ou alta de carbono, e que vão sofrer operações severas de dobramento, tendem a se trincar. Porém, se elas forem confeccionadas com aço de baixo carbono (SAE 1010) e, depois, forem conformadas e cementadas, teremos um bom resultado sem que as peças corram o risco de se trincar. A cementação pode ser sólida, gasosa, líquida.

Cementação sólida

Nesse tipo de cementação, a peça é colocada em uma caixa de aço contendo substâncias ricas em carbono: carvão de lenha, coque, carbonato de cálcio e óleo de linhaça. Em seguida, a peça é levada ao forno, a uma temperatura em torno de 930°C, durante o tempo necessário para obtenção da camada desejada. Depois, submete-se a peça à têmpera para que ela adquira dureza.



O tempo de permanência no forno pode variar de uma a trinta horas, e a camada cementada varia de 0,3mm a 2,0mm.



Cementação gasosa

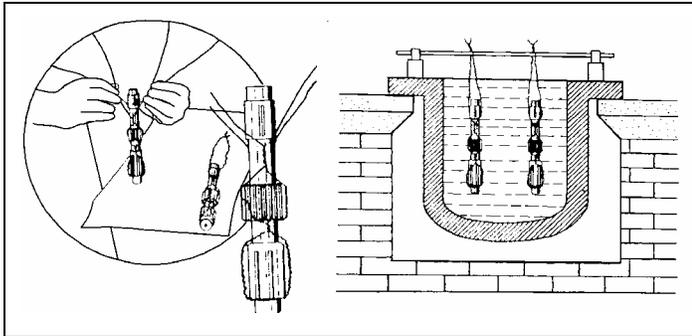
É o processo mais eficiente porque permite cementar as peças com maior uniformidade e com economia de energia. Utiliza gás propano (gás de cozinha) ou gás natural para a geração de car-

bono. A temperatura varia de 850°C a 950°C. Após a cementação, o aço é temperado em óleo.

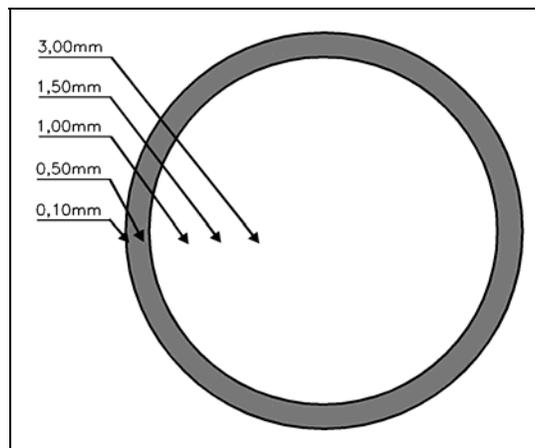
Cementação líquida

Nesse processo são utilizados sais fundidos, ricos em carbono, principalmente os sais à base de cianeto e de carbonato. A temperatura deve ser de 930°C a 950°C. Nessa temperatura, os sais se tornam líquidos, pois se fundem por volta de 650°C.

Em seguida, as peças preaquecidas a 400°C são mergulhadas em banho fundido. A função do preaquecimento é a de eliminar água e evitar choque térmico. A peça deve ser resfriada em salmoura com 10 a 15% de cloreto de sódio (ClNa), ou em óleo de têmpera.



Ensaio de microdureza com cinco pontos distintos, em um aço 1010, cementado e temperado.



Distância da superfície mm	Microdureza Vickers (0,5)	Dureza Rockwell convertida (HRC)
0,1	679	60
0,5	613	56
1,0	222	(16)
1,5	204	(12)
3,0	204	(12)

Nitretação

Certas peças que trabalham em atrito permanente correm o risco de se desgastar com facilidade. É o caso, por exemplo, do girabrequim, das camisas de cilindros, dos pinos, dos rotores, que precisam ter alta resistência ao desgaste sob temperatura relativamente elevada. A peça pode adquirir esse nível de resistência por meio da técnica chamada nitretação.

A nitretação é indicada na obtenção de peças com superfície de maior dureza, para aumentar a resistência do desgaste, à fadiga, à corrosão e ao calor. Os aços que melhor se prestam a esse tratamento são os *nitralloy steels*, que são aços que contêm cromo, molibdênio, alumínio e um pouco de níquel. Em geral, a nitretação é feita depois da têmpera e do revenimento. Assim, as peças nitretadas não precisam de qualquer outro tratamento térmico, o que contribui para um baixo índice de distorção ou empenamento.

A nitretação pode ser feita a gás ou em banho de sal.

Nitretação a gás

A temperatura conveniente para o trabalho é de 500°C a 530°C, e sua duração varia de quarenta a noventa horas. Nessa temperatura, a amônia (NH_3) é decomposta, e o nitrogênio, na camada superficial da peça, atinge uma profundidade de até 0,8mm.

A camada da superfície metálica passa a se constituir de nitretos de ferro, cromo, molibdênio, níquel, sendo que os nitretos têm elevada dureza.

Decorrido o tempo de aquecimento no forno, as peças são retiradas e resfriadas ao ar.

Nitretação em banho de sal

A nitretação também pode ser realizada em meio líquido. Nesse caso, as peças são mergulhadas num banho de sais fundidos, que são as fontes de nitrogênio. O processo é mais rápido que o anterior. As peças permanecem no banho apenas de duas ou três horas numa temperatura que varia de 500°C a 580°C.

Carbonitreção

Esse processo consiste em introduzir carbono e nitrogênio na superfície do aço. O processo pode ser realizado em fornos de banhos de sal ou de atmosfera controlada (a gás). A superfície da camada carbonitretada adquire dureza e resistência ao desgaste.

A temperatura do processo varia de 705°C a 900°C, com uma duração de duas horas. Após esse tempo, as peças são resfriadas em água ou óleo. Obtém-se uma camada com espessura de 0,07 a 0,7mm.

A carbonitreção é usada, geralmente, em peças de pequeno porte, como componentes de máquina de escrever, carburadores, relógios, aparelhos eletrodomésticos.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. O tratamento termoquímico tem como objetivo principal:
 - a) () dar ductibilidade ao aço;
 - b) () aumentar a dureza e a resistência ao desgaste;
 - c) () melhorar a usinabilidade;
 - d) () aumentar a resistência à tração.
2. A cementação é indicada para aços com teor de carbono inferior a:
 - a) () 0,75%;
 - b) () 0,45%;
 - c) () 0,05%
 - d) () 0,25%.

3. O material usado na cementação sólida contém:
- a) () carvão vegetal, coque, carbonato de cálcio, óleo de linhaça;
 - b) () carvão vegetal, alcatrão, cianeto de cálcio, óleo de linhaça;
 - c) () carvão vegetal, sal, óleo de linhaça, catalizador;
 - d) () carvão vegetal, óleo mineral, carbonato de cálcio, óleo de linhaça.
4. A cementação mais eficiente e com camada uniforme é:
- a) () líquida;
 - b) () sólida;
 - c) () gasosa;
 - d) () plasmática.
5. Na cementação líquida, o sal se funde, normalmente, a:
- a) () 1.000°C;
 - b) () 200°C;
 - c) () 100°C;
 - d) () 650°C.
6. Na nitretação a gás, usa-se como gerador de nitrogênio:
- a) () cianeto de sódio;
 - b) () ar;
 - c) () amônia;
 - d) () cianeto de potássio.

Gabarito

1. b

2. d

3. a

4. c

5. d

6. c

Endurecimento de superfícies metálicas

Um problema

Ao observarmos uma grande engrenagem em funcionamento, reparamos que seus dentes sofrem grandes desgastes e fortes compressões. Precisam, portanto, dureza e resistência ao desgaste. Como proceder para o aço obter essas propriedades? Se o núcleo da engrenagem não for tenaz e dúctil, não suportará o esforço, podendo trincar.

No endurecimento total, por meio de têmpera, o aço adquire dureza e resistência. Porém, ficam reduzidas sua ductilidade e tenacidade. Além disso, o aço apresenta tensões internas. É necessário, portanto, endurecer apenas a superfície do aço, deixando seu núcleo dúctil e tenaz. Para isso, é preciso uma têmpera superficial.

Têmpera superficial

Os processos usuais de têmpera superficial são desenvolvidos por chama ou por indução.

Têmpera por chama

Para que a têmpera por chama apresente bom resultado é necessário que o material passe, antes, por um tratamento de normalização. Assim, a peça terá uma granulação fina (grãos pequenos) e ficará homogênea.

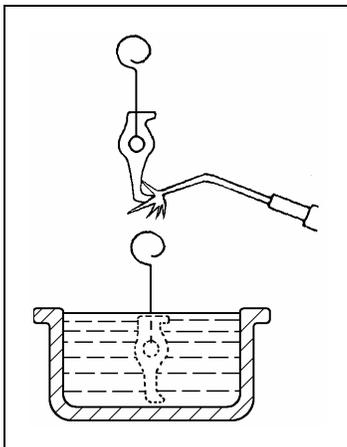
O tratamento aplica-se, geralmente, a peças de tamanho grande ou de formato complexo, que não podem ser temperadas em forno de câmara ou em banho de sal.

A principal característica desse tratamento é que o aquecimento se faz com maçarico oxiacetilênico com chama semicarburante. A temperatura deve ficar acima da zona crítica. Após o aquecimento, a peça é resfriada por jato d'água ou por imersão em óleo.

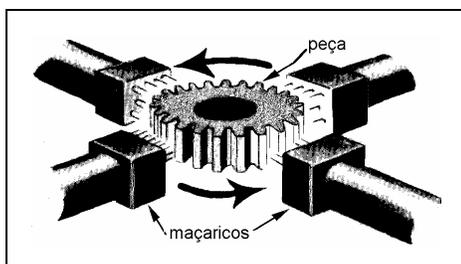
Um ensaio de dureza mostra a grande diferença de dureza entre a superfície e o núcleo. Também distinguimos, a olho nu, as duas regiões em estudo após polimento e ataque químico: a região temperada é escura e a não temperada é clara.

A têmpera superficial pode ser feita pelos métodos estacionário, progressivo ou combinado.

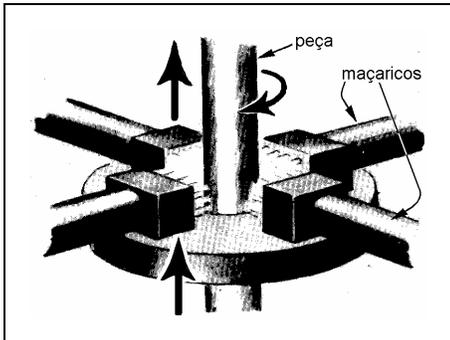
O **método estacionário** consiste em aplicar a chama na peça, até que ela alcance uma temperatura de cerca de 800°C. A chama move-se sobre a área que será endurecida. O resfriamento é imediato na água ou no óleo. Todo o processo é manual.



Com o **método progressivo**, a peça se move e o maçarico permanece fixo. O resfriamento é feito logo após a chama ter aquecido a superfície da peça.



No **método combinado**, a peça e o maçarico movem-se simultaneamente. Este método requer o uso de máquinas ou dispositivos especiais. É aplicado, geralmente, em peças cilíndricas e de grande tamanho.

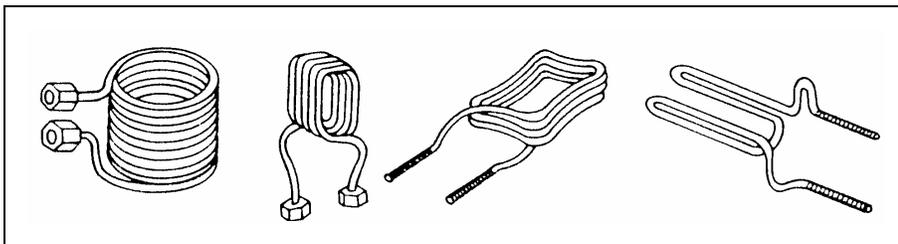


A dureza final obtida varia de 53 a 62 Rockwell C. A espessura da camada endurecida pode atingir até 10mm, dependendo da composição do aço e da velocidade de deslocamento da chama.

Têmpera por indução

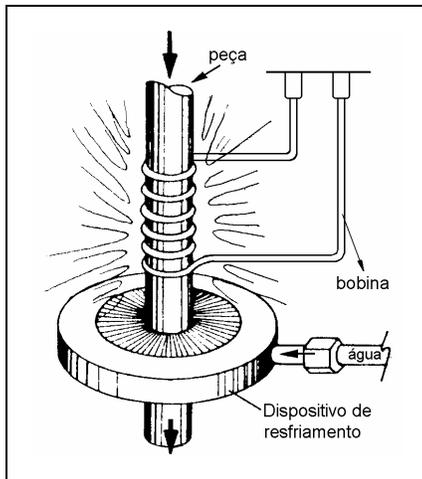
O aquecimento indutivo baseia-se no princípio da indução eletromagnética. Segundo esse princípio, um condutor de eletricidade (no caso, a peça metálica que será aquecida) é colocado sob a ação de um campo eletromagnético e desenvolve uma corrente elétrica induzida. O aquecimento é feito por meio da corrente que circula através da peça e da resistência que o material oferece à sua passagem.

Basicamente, uma unidade para aquecimento indutivo compõe-se de um aparelho de alta frequência e de uma bobina de trabalho. A bobina é feita de tubo fino de cobre, com uma ou mais espiras, e toma a forma da área da peça que se deseja aquecer.



A frequência da corrente alternada, aplicada à bobina de trabalho, influi no grau de aquecimento. Por exemplo: alta frequência, pequena profundidade; baixa frequência, grande profundidade. Na prática, emprega-se a frequência de 450 Khz na maioria das aplicações.

A peça é colocada numa bobina em que circula uma corrente elétrica de alta frequência. Dentro da bobina indutora, é gerado um forte campo eletromagnético. A resistência que a peça oferece à passagem desse campo provoca o aquecimento da superfície até uma temperatura acima da zona crítica. Imediatamente após o aquecimento, a peça é resfriada por jatos de água ou de óleo. Na superfície, forma-se martensita.



Após a têmpera superficial, é necessário revenir a camada endurecida. O revenimento pode ser feito, também, com aquecimento por indução, seguido de resfriamento lento.

A vantagem da têmpera por indução é que ela permite um controle bastante preciso da profundidade da camada que recebe o tratamento. Portanto, trata-se de um processo mais preciso e seguro do que o da têmpera por chama. É largamente empregado na fabricação de peças de grande responsabilidade, como eixos e engrenagens.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. A finalidade da têmpera superficial é:
 - a) () dar ductilidade ao aço;
 - b) () aliviar tensões;
 - c) () aumentar a resistência à corrosão;
 - d) () dar dureza ao aço.

2. Após sofrer tratamento de têmpera superficial, a região central da peça apresenta a característica de:
 - a) () dureza;
 - b) () ductibilidade;
 - c) () tensão;
 - d) () resistência.

3. O aquecimento por chama é empregado no tratamento de:
 - a) () peças delicadas;
 - b) () peças de grande tamanho;
 - c) () materiais tóxicos;
 - d) () materiais flexíveis.

4. O aquecimento indutivo baseia-se no princípio da indução:
 - a) () elétrica;
 - b) () eletrônica;
 - c) () eletromagnética;
 - d) () eletroquímica.

5. Para o aquecimento indutivo, são necessários:
 - a) () aparelho de alta frequência e bobina;
 - b) () bobina e aparelho de frequência reduzida;
 - c) () aparelho de baixa frequência;
 - d) () gerador de voltagem.

Gabarito

1. d

2. b

3. b

4. c

5. a

Um problema

Quando e por que é necessário medir a temperatura durante um tratamento térmico? Em várias atividades, as medições de temperatura são necessárias e devem ser constantes, como acontece na culinária, na saúde, no artesanato, na metalurgia.

Os efeitos da variação de temperatura provocam alterações internas nos materiais, modificando suas propriedades. Por isso, é necessário um rigoroso controle da temperatura durante o processo de tratamento térmico.

Conceitos

Para melhor entendimento, vamos examinar os conceitos de **temperatura e calor**.

Temperatura

Grandeza física que indica o estado de agitação das partículas de um corpo e seu nível térmico. A agitação das partículas aumenta à medida que o corpo vai ficando mais quente.

Calor

Energia térmica que flui entre dois corpos ou sistemas que apresentam temperaturas diferentes.

Vimos que, para mexer na estrutura cristalina do aço, precisamos aquecê-lo, sem, contudo, fundi-lo. Portanto, uma vez definida a temperatura de tratamento, vamos à oficina e ligamos o forno. Verificamos que o pirômetro, além de ligar o equipamento, mede as variações térmicas em seu interior.

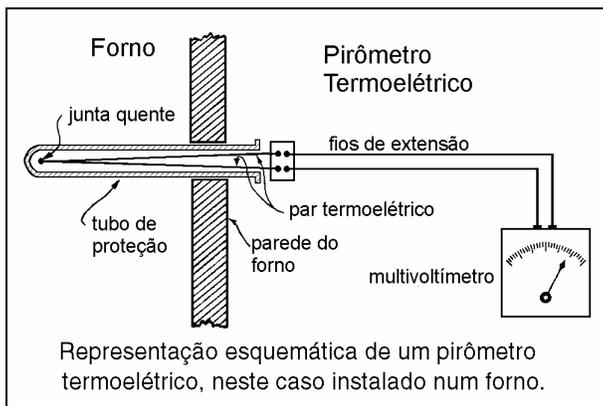
O **pirômetro** é uma espécie de termômetro que mede temperaturas elevadas. O pirômetro classifica-se em dois grupos: um que mantém uma de suas partes no interior do forno, portanto em contato com o meio; e outro que faz a medição à distância. O primeiro grupo é conhecido como **pirômetro termoelétrico** e o segundo grupo é conhecido como **pirômetro óptico e de radiação**.

A escala de pirômetros corresponde a um conjunto de valores numéricos, sendo que cada um desses valores está associado a uma temperatura. Esse equipamento pode ter sua escala em graus Celsius ou em graus Fahrenheit. Usamos a fórmula abaixo para passar de uma escala a outra:

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9}$$

Pirômetro termoelétrico

Quando dois fios de metais ou ligas diferentes estão soldados entre si por uma de suas extremidades, surge uma diferença de potencial entre as duas outras extremidades livres quando as extremidades soldadas sofrem o aquecimento. Os fios, assim soldados, denominam-se **par termoelétrico**.

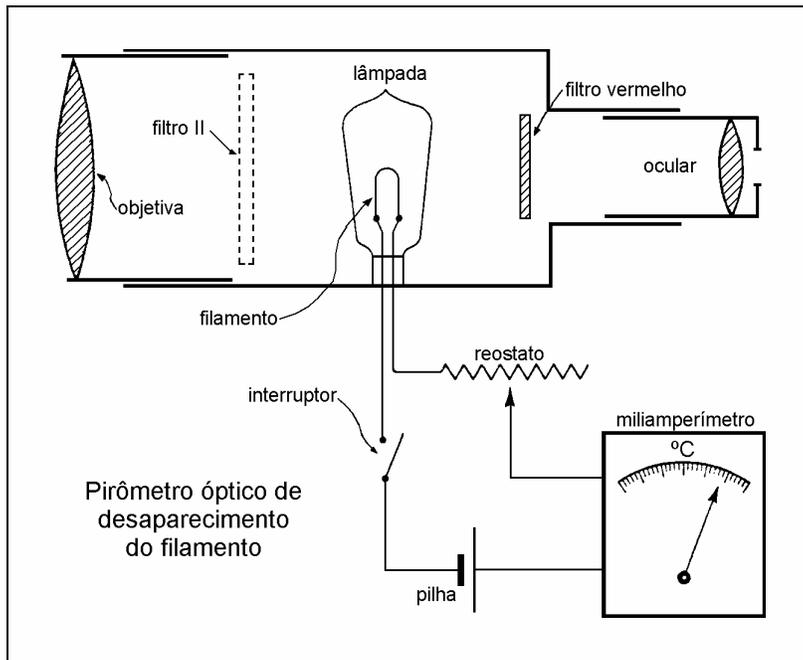


Devem-se empregar, portanto, fios de metais ou ligas que proporcionem uma grande diferença de potencial, a fim de facilitar a medida da temperatura. O quadro, a seguir, mostra os pares termoeletricos mais usados em pirometria.

Par termoeletrico	Faixa de uso	Composiçao quimica
Pt - Pt Rh	0 a 1500°C	platina - platina (90%) e ródio (10%)
Fe - Constantan	0 a 980°C	ferro - constantan (cobre e níquel)
Cu - Constantan	200 a 350°C	cobre - constantan (cobre e níquel)
Cromel - Alumel	200 a 1300°C	cromel (cromo e níquel) alumel (níquel, manganês, alumínio e silício)

Pirômetro óptico e de radiação

Muitas vezes, o operador de forno precisa verificar a temperatura do material no estado líquido (como, por exemplo, o ferro-gusa), antes ou após a corrida (vazamento). A medida da temperatura deve ser feita sem contato com o banho. Portanto, o pirômetro óptico é o instrumento mais indicado.

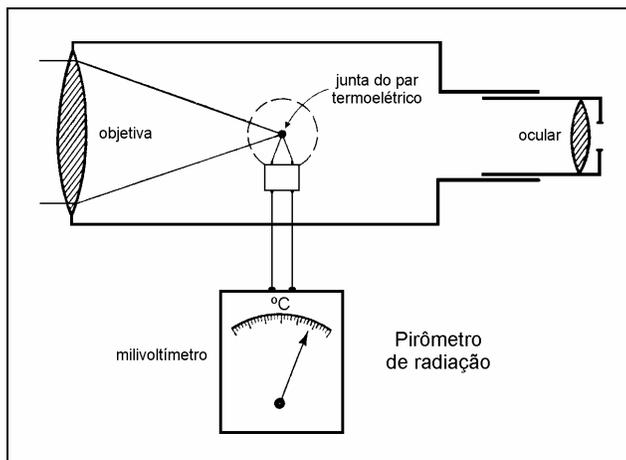


A verificação da temperatura consiste em comparar o brilho do filamento incandescente de uma lâmpada com o brilho do aço aquecido acima de 700°C.

A figura mostra, esquematicamente, o pirômetro óptico de desaparecimento do filamento. Para usá-lo, deve-se ajustar a ocular de modo que o filamento da lâmpada fique em foco. A seguir, focaliza-se o aço, ajustando a objetiva na temperatura que será determinada. Com auxílio do reostato, faz-se coincidir o brilho do filamento com o objeto enfocado, e lê-se o valor da temperatura.

Os pirômetros ópticos servem para medir temperaturas de 700 a 2.000°C. Abaixo de 700°C, tornam-se inúteis, pois a luz emitida pelo aço não é suficientemente visível para a medição.

Os pirômetros de radiação medem a temperatura do corpo a partir da intensidade da radiação que ele emite. Diferem dos pirômetros ópticos porque conseguem captar tanto a energia radiante visível quanto as radiações não visíveis.



Durante o uso do pirômetro óptico ou de radiação, deve-se considerar a possibilidade de erros devido a vários fatores que interferem na observação: a luz do ambiente, a casca de óxido que se forma no material, ou a escória, no caso de material líquido.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. É necessário medir temperaturas durante um tratamento térmico porque elas sofrem:
 - a) () quedas;
 - b) () variações;
 - c) () elevações;
 - d) () resfriamento.

2. À medida que um corpo vai ficando quente, ocorre:
 - a) () endurecimento das partículas;
 - b) () redução da agitação das partículas;
 - c) () precipitação das partículas;
 - d) () aumento da agitação das partículas.

3. Para medir temperatura elevada de aço, usa-se:
 - a) () termômetro;

- b) () potenciômetro;
 - c) () pirômetro;
 - d) () gasômetro.
4. Para medir temperaturas de 700°C a 2.000°C de material em estado líquido, usa-se:
- a) () pirômetro óptico;
 - b) () termômetro;
 - c) () pirômetro termoelétrico;
 - d) () pluviômetro.
5. Para medir temperaturas a partir de radiações emitidas por um corpo, usa-se o pirômetro:
- a) () óptico;
 - b) () termoelétrico;
 - c) () de radiação;
 - d) () termodinâmico.

Gabarito

1. b

2. d

3. c

4. a

5. c

Um problema

A descrição feita até aqui dos processos e dos equipamentos de tratamento térmico são passíveis de contínuas modificações, para serem aperfeiçoados de acordo com o desenvolvimento de novas tecnologias.

O avanço tecnológico, portanto, exige constante atualização teórica e prática na área de tratamento térmico. Essa atualização, por sua vez, requer conhecimento das novas tendências no campo da mecânica, em especial, na área de tratamento de materiais.

Tal avanço tecnológico, resultado de muita pesquisa, é próprio de qualquer nação que investe no futuro. Com o desenvolvimento tecnológico obtém-se melhoria de processos e formas de tratamento térmico, de modo que os materiais passem a apresentar novas propriedades, com qualidade. Cada vez mais utiliza-se a energia elétrica para os trabalhos e procura-se preservar o meio ambiente.

Tratamento térmico a vácuo e de nitretação a plasma

No final da década de 1970, surgiu o tratamento térmico a vácuo, chamado têmpera a vácuo, que passou a ser bastante usado devido à possibilidade que oferece de reduzir os problemas de distorção e de decarbonetação, ocorrências comuns no emprego de outros processos.

Têmpera a vácuo

Com a têmpera a vácuo, a superfície das peças ficam isentas de reações superficiais danosas que ocorrem no tratamento térmico

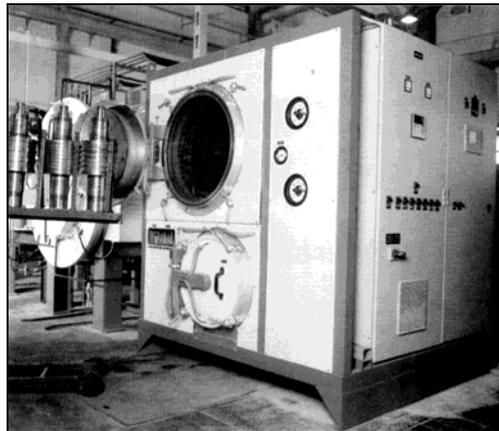
com banhos de sais. O vácuo reduz, também, a presença de qualquer impureza. O oxigênio restante reage ao grafite presente no sistema de aquecimento e de isolamento térmica, e forma monóxido de carbono (CO), que é eliminado.

O vácuo consiste num espaço vazio, sem gases, vapores ou partículas, sem a presença de pressão atmosférica que, ao nível do mar (altitude zero) é de 760mmHg, correspondente a 1 bar.

O processo de têmpera a vácuo se desenvolve num forno-câmara com temperatura de até 1.350°C e com vácuo de até 10^{-5} mbar. Adiciona-se um gás inerte para purificar o meio ambiente. O resfriamento da carga é feito com nitrogênio, podendo-se alcançar pressões de até 10 bar (pressão positiva). Todos os comandos do forno são controlados por microcomputador.

O tratamento térmico em forno a vácuo é indicado para temperar aços rápidos, aços para trabalho a frio ou a quente e aços inoxidáveis martensíticos.

Uma das características do forno a vácuo é que ele é intermitente e, portanto, está sempre pronto para o uso. Assim, ao encerrar um ciclo, o forno é desligado, a carga é retirada, e pode-se reiniciar um novo ciclo com nova carga.

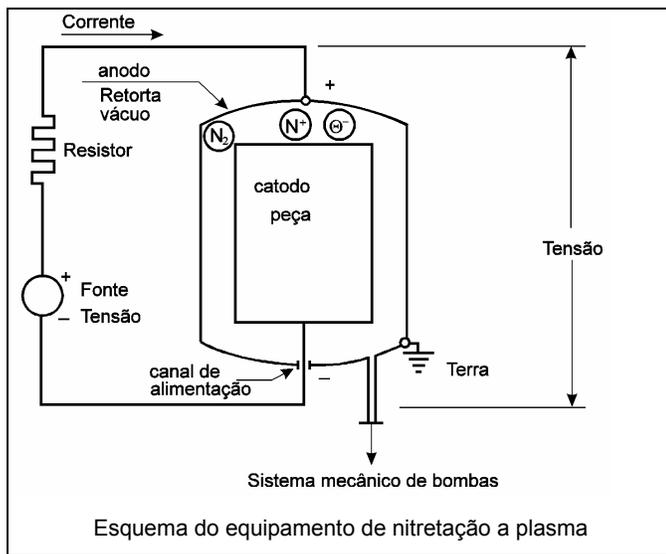


Nitreção a plasma

A nitreção a plasma é um novo processo que vem atender, com melhor eficiência, às inúmeras aplicações industriais em produtos de aço, ferro fundido e ferro sintetizado. Tem como característica principal a formação de uma camada nitretada, de espessura e composição definidas, que não ocorre com outros processos de nitreção.

O plasma pode ser descrito como uma mistura de partículas neutras, positivas e negativas (átomos, moléculas, íons, elétrons) num campo elétrico. O plasma é, pois, o meio de transporte do nitrogênio que torna possível a nitretação.

O tratamento consiste em submeter uma mistura de gases, num ambiente de vácuo, a uma tensão elétrica formada entre as peças, que constituem o pólo negativo (o cátodo), e a parede da retorta, que constitui o pólo positivo (o ânodo).



As peças são primeiramente temperadas e revenidas como na nitretação normal, e retificadas. A seguir, passam por uma boa limpeza. Já no forno, forma-se o vácuo e injeta-se o gás de tratamento (A_r , H_2 , CH_4 , N_2 , ou ar) em pressão baixa. O processo ocorre numa temperatura de 380°C a 650°C . De acordo com a mistura de gás, podemos nitretar, nitrocarbonetar ou oxinitrocarbonetar, conforme indica o quadro:

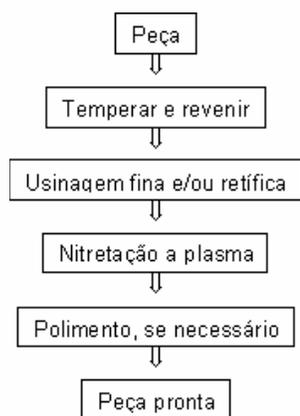
Mistura	Produto final
nitrogênio e hidrogênio	nitretado
nitrogênio, hidrogênio e metano	nitrocarbonetado
nitrogênio, hidrogênio, metano e ar	oxinitrocarbonetado

Um programa de computador controla e monitora os parâmetros do processo, como pressão, tempo, temperatura, tensão, corrente e composição dos gases.

A nitretação a plasma é aplicada em matriz de injeção para plástico, matriz para conformação a frio, engrenagens, anéis, virabrequins etc.

Além de ser realizado em baixa temperatura (360°C a 650°C), o processo permite controlar a espessura e a composição da camada de compostos, o que constitui uma das suas principais vantagens.

A seqüência do processo é a seguinte:



Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. Entende-se por vácuo:
 - a) presença de pressão;
 - b) ausência de potência;
 - c) ausência de oxigênio;
 - d) pressão atmosfera igual a zero (nula).

2. No processo de têmpera, cria-se vácuo de até:
 - a) 1 bar;
 - b) 0,1 bar;
 - c) 10^{-5} mbar;
 - d) 10 bar.

3. O processo de têmpera a vácuo é aplicado em aços:
 - a) para trilho;
 - b) especiais;
 - c) ao manganês;
 - d) inoxidáveis ferríticos.

4. Na nitretação a plasma, a tensão elétrica se forma entre:
 - a) a peça e os gases inertes;
 - b) os gases inertes e a parede da retorta;
 - c) a peça e a parede da retorta;
 - d) a parede da retorta e as resistências.

5. Para a realização da nitrocarbonetação, misturamos gases de:
 - a) N_2 , H_2 e ar;
 - b) H_2 , ar e CH_4 ;
 - c) ar, CH_4 e N_2 ;
 - d) N_2 , H_2 e CH_4 .

6. A principal vantagem do processo a plasma é:
 - a) limpeza dos processos;
 - b) controle da espessura e da composição da camada;
 - c) velocidade;
 - d) pouco consumo de sal.

Gabarito

1. d

2. c

3. b

4. c

5. d

6. b

Um problema

Além de conhecer as propriedades dos materiais e os processos de trabalho, um bom tratamento térmico requer equipamentos adequados à sua realização. Isso significa equipamentos modernos e em boas condições de funcionamento, decorrentes de manutenção periódica.

Encontramos equipamentos de tratamento térmico em laboratórios, oficinas e instalações industriais. Sua fonte de aquecimento provém do óleo, do gás, ou da energia elétrica.

Os fornos, de modo geral, são de fácil manipulação. Quando bem operados e assistidos com manutenção periódica, têm sua vida útil prolongada.

Ao usar um simples forno de câmara, em sua escola, o estudante estará aplicando conceitos teóricos e práticos. A indústria, que tem por objetivo investir em qualidade e preço, já parte para os modernos fornos a vácuo. Assim, de um simples forno manipulado diretamente ao forno mais complexo, comandado por um programa de computador, sempre obtemos resultados semelhantes.

Equipamentos de laboratório

As escolas técnicas, o SENAI e as universidades têm em seus laboratórios uma quantidade variada de estufas e fornos para

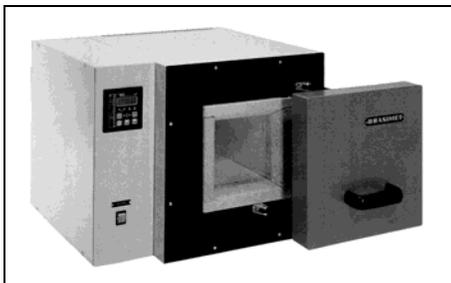
serem manipulados pelos alunos. São equipamentos de fácil operação, seguros e de manutenção econômica. Com um par de luvas, protetor facial e uma tenaz, temos acesso à câmara ou ao cadinho, carregando ou descarregando o material.

Veja, a seguir, a descrição de alguns equipamentos.

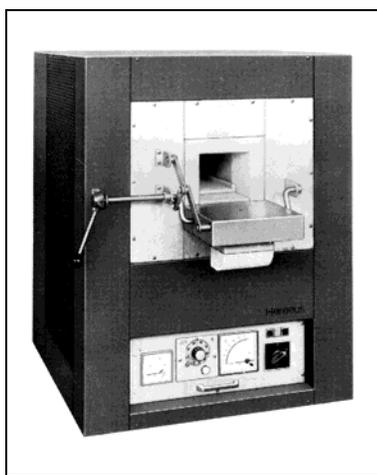
Estufa - trata-se de um modelo com aquecimento elétrico, para temperaturas de até 300°C. Tem aplicações no desenvolvimento de processos que exigem baixa temperatura como, por exemplo, no revenimento.



- **Forno de câmara com circulação de ar** - modelo com aquecimento elétrico, para temperaturas de até 1.300°C. Usado em diversos tratamentos térmicos.



- **Forno de câmara com porta versátil** - quando aberta, serve de plataforma de trabalho. É prático e seguro.



Todos os modelos têm uma carcaça construída com chapas de aço-carbono, com espessura variada. O isolamento da carcaça pode ser feito com lã de rocha ou com material cerâmico refratário, assegurando que o forno preserve o calor com um mínimo de perda. Ao se abrirem as portas, os circuitos de resistência desligam-se automaticamente, o que permite efetuar, com segurança, operações de carga e descarga.

Equipamentos de oficinas ou industriais

A empresa prestadora de serviço procura se servir de diferentes meios de trabalho para realizar o tratamento térmico. Mas a produção e a satisfação do cliente são alcançados de acordo com a disponibilidade econômica.

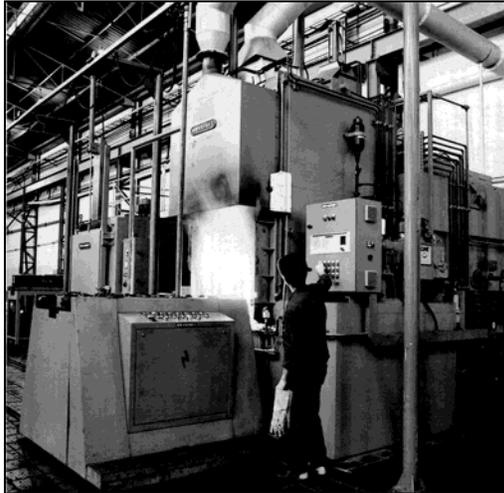
Em oficinas ou indústrias, são utilizados os seguintes modelos de fornos:

- com atmosfera controlada, protetora e/ou ativa;
- banhos de sal;
- a vácuo;
- de câmara sem atmosfera protetora.

Fornos com atmosfera controlada, protetora e/ou ativa

Esses fornos apresentam-se em três modelos: tipo de câmara, poço e contínuo. Funcionam com gás inerte e/ou ativo.

Os **foros de câmara**, automáticos, apresentam diversos acessórios em seu interior, o que permite que seu operador comande todo o tratamento por meio de um controlador instalado num painel externo.



Externamente, um carro de transferência carrega e descarrega o forno, e leva a carga para outro local. Desloca-se sobre trilhos, transversalmente, à frente da linha de fornos.

Esse forno é indicado para tratamento de cementação, carbonitreção e têmpera.

O **forno tipo poço** é usado para tratamento de peças volumosas ou engrenagens. Dispensa as instalações caras do forno anterior. Para resfriar a carga, necessita de um tanque de resfriamento a parte.

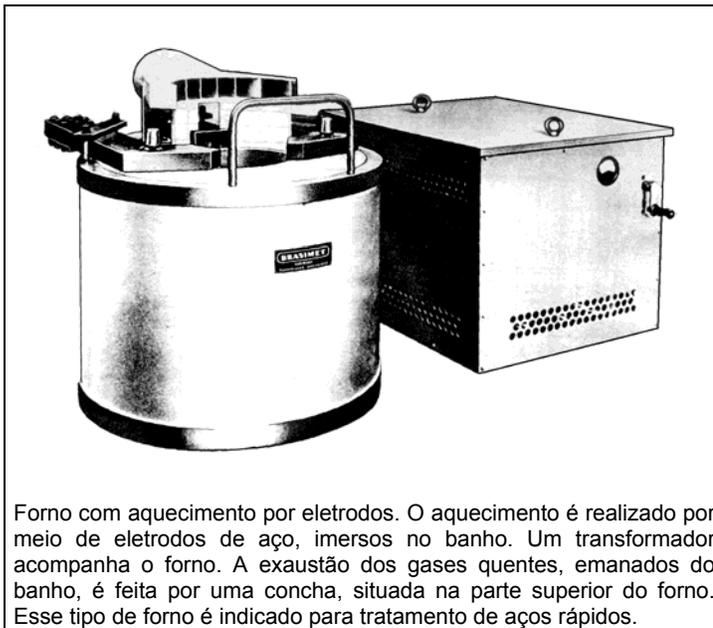
No **forno de modelo contínuo**, o material é acomodado em um transporte, que pode ser uma esteira. O transportador conduz a peça através do forno com velocidade predeterminada. No final do percurso, as peças são mergulhadas em óleo, para se fazer a têmpera. Outra esteira retira as peças do óleo e as conduz para outro forno, onde serão revenidas.

Fornos de banhos de sal

Os fornos de banhos de sal têm grande aplicação no tratamento de cementação e têmpera dos aços. Requerem aquecimento com resistências elétricas ou com queimador a gás ou óleo. Sua limitação está no diâmetro do cadinho, que pode variar de 220 a 700mm. Ou seja, peças volumosas ou grandes não podem ser submetidas a tratamento em banho de sal.



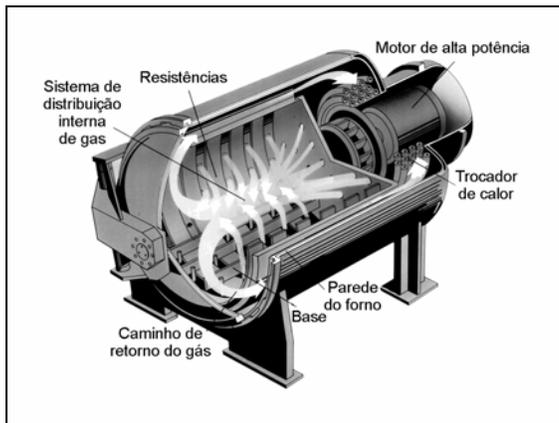
Forno elétrico de cadinho para nitretação em banho de sal.



Forno com aquecimento por eletrodos. O aquecimento é realizado por meio de eletrodos de aço, imersos no banho. Um transformador acompanha o forno. A exaustão dos gases quentes, emanados do banho, é feita por uma concha, situada na parte superior do forno. Esse tipo de forno é indicado para tratamento de aços rápidos.

Fornos a vácuo

O vácuo é o melhor recurso para evitar oxidação, uma vez que há ausência de atmosfera. O modelo de câmara é o mais indicado para o tratamento térmico. Cria-se o vácuo, e um programa de computador comanda todo o tratamento. Tem ampla aplicação no tratamento de aços especiais.



Forno de câmara sem atmosfera protetora

A indústria de fornos tem uma linha de fornos fora da produção em série que procura atender às necessidades específicas dos clientes. Peças de grandes dimensões requerem fornos com grandes câmaras, além de um sistema de transporte em trilho para carregar e descarregar o forno.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. Para prolongar a vida útil dos fornos, é necessário que eles sejam submetidos a:
 - a) () aquecimento contínuo;
 - b) () resfriamento esporádico;
 - c) () manutenção periódica;
 - d) () lavagem com água.

2. São considerados modernos os fornos:
 - a) () de cerâmica;
 - b) () úmidos;
 - c) () de câmara;
 - d) () a vácuo.

3. Para secar materiais e manter eletrodos, usa-se:
 - a) () forno elétrico;
 - b) () estufa;
 - c) () banho de sal;
 - d) () forno de câmara.

4. O forno com aquecimento elétrico, com temperatura de até 1.300°C, denomina-se:
 - a) () forno de câmara com circulação de ar;
 - b) () forno a gás;
 - c) () estufa para secagem;
 - d) () estufa elétrica.

5. Os fornos têm uma carcaça de chapa de:
 - a) () aço;
 - b) () carbono;
 - c) () tijolo;
 - d) () cobre.

6. O isolamento da carcaça pode ser feito com lã de rocha ou material:
- a) () ferroso;
 - b) () cerâmico refratário;
 - c) () platinado;
 - d) () plástico.
7. Os fornos com atmosfera controlada (a gás) podem ser dos tipos:
- a) () tanques, poço, contínuo;
 - b) () contínuo, câmara, tambor;
 - c) () poço, tanque, câmara;
 - d) () câmara, contínuo, poço.
8. Para tratamento de cementação e têmpera de aço, usa-se forno:
- a) () contínuo;
 - b) () poço;
 - c) () de banho de sal;
 - d) () de câmara.

Gabarito

1. c

2. d

3. b

4. a

5. b

6. d

7. a

Um problema

Após acumular determinada quantidade de resíduos de sais no fundo da empresa, em área desprotegida, uma empresa foi denunciada. O fiscal da Secretaria do Meio Ambiente, em sua visita, mostrou o perigo dos resíduos para o meio ambiente e orientou a maneira como eles deveriam ser acondicionados.

O tratamento dos resíduos de sais e efluentes líquidos é assunto desta aula.

Resíduos de sais

A norma brasileira NBR 10004, da ABNT, classifica os sais de têmpera como resíduos de classe I, que são perigosos. Não podem, portanto, ser jogados no solo ou na água. Além disso, requerem tratamento especial.

Se não se dispuser de uma unidade de tratamento de neutralização dos sais usados, é necessário que eles sejam armazenados temporariamente.

Os sais e seus resíduos devem ser estocados em tambores fechados e em boas condições. Nos tambores, deve haver identificação do conteúdo e da sua procedência.

Os resíduos sólidos e secos, provenientes dos diversos sais, devem ser acondicionados separadamente, conforme o grupo a

que pertencem. Por exemplo: grupo I - cianetos, bário etc., ou grupo II - nitritos, nitratos, soda cáustica na forma de grânulos ou pedaços, com dimensão de até 10 cm. Os resíduos devem estar livres de arames, peças metálicas e qualquer outro tipo de material. A separação dos resíduos vai facilitar um futuro tratamento e proporcionar segurança durante o armazenamento.

Recomenda-se o acondicionamento em tambores de aço, secos com capacidade de 200 litros. A carga precisa ser ensacada em plástico e colocada no tambor. Este deverá ser tampado e cintado, e conter dispositivo de segurança para evitar abertura acidental. As tampas não devem ser soldadas ao tambor.

A identificação deve ser feita na parte externa do tambor, com letras de 2,5 cm de altura. As letras devem ser escritas com tinta a óleo. Na identificação, deve ficar claro se os resíduos são do grupo I ou II, o nome da firma e o peso líquido. Os tambores devem ser pintados de vermelho com inscrições em cor branca para resíduos do grupo I, e de amarelo com inscrições em cor preta para resíduos do grupo II.

A área de armazenamento precisa ser coberta, bem ventilada, e seu piso deve ter uma base de concreto ou outro material que impeça a infiltração das substâncias no solo. Há necessidade, ainda, de um sistema de drenagem e de captação de líquidos para um tanque.

Efluentes líquidos

Os efluentes líquidos, provenientes dos processos de tratamento térmico e/ou termoquímico de metais, passam por uma **estação de tratamento de efluentes** (ETE). Depois, esses efluentes são descartados. Normalmente, eles são classificados em dois tipos: efluentes líquidos ácidos e efluentes líquidos alcalinos.

Esses dois tipos de efluentes podem ser gerados de forma contínua ou em batelada, sendo que os efluentes alcalinos podem ou não conter cianetos.

Os efluentes líquidos ácidos provêm de operações de decapagem e de lavagem posterior das peças. Os decapantes usuais são feitos à base de ácido clorídrico, contendo inibidores.

Os efluentes líquidos alcalinos provêm de tanques de desengra-xe, de tanques de lavagem de peças tratadas em banho de sal e de máquinas de lavagem.

Os efluentes líquidos ácidos e básicos são coletados e remetidos à ETE, separadamente. Essa medida é necessária para evitar a reação dos ácidos entre si, formando produtos gasosos tóxicos como, por exemplo, o gás cianídrico.

O processo de tratamento inicia-se com a oxidação dos cianetos contidos nos efluentes. Uma vez eliminado o cianeto, o efluente alcalino é neutralizado pelo efluente ácido até um pH que pode variar de 8 a 9. Nesta etapa, ocorre precipitação de íons de ferro, provenientes das peças metálicas submetidas a operações de decapagem.

O bário é precipitado na forma de sulfato ao receber pequenas quantidades de ácido sulfúrico ou sulfato de sódio.

Após a adição de um floculante, que tem a função de aglomerar melhor os flocos da lama formada, a suspensão é transferida para um tanque de adensador de lodo e, em seguida, o lodo aglomerado passa por um filtro-prensa.

A água filtrada é analisada e descartada, de acordo com a legislação pertinente. A lama, ou lodo, é acondicionada em tambores.

Teste sua aprendizagem. Faça os exercícios a seguir e confira suas respostas com as do gabarito.

Exercícios

Marque com **X** a resposta correta.

1. Os resíduos de sais de têmpera são do tipo:
 - a) () classe I - perigosos;
 - b) () classe II - não inertes;
 - c) () classe III - inertes;
 - d) () classe IV - pesados.

2. Os resíduos devem ser acondicionados da seguinte forma:
 - a) () enterrados em valas;
 - b) () ensacados em caixas plásticas;
 - c) () ensacados em caixa de madeira;
 - d) () ensacados em plástico e colocados em tambores de aço.

3. Os efluentes líquidos classificam-se em:
 - a) () alcalinos e metais pesados;
 - b) () ácidos e alcalinos;
 - c) () ácidos e hidróxidos;
 - d) () ferrosos e alcalinos.

4. O tratamento de efluentes inicia-se com a oxidação do:
 - a) () carbono;
 - b) () cianeto;
 - c) () ferro;
 - d) () carboneto.

Gabarito

1. a

2. d

3. b

4. b