TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE SUPERFÍCIE

PMR 2202

Profa. Izabel F. Machado

Índice

1.IMPORTÂNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS 2
2 TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS. 4
2.1 Tratamento térmico de recozimento. 4
2.2 Tratamentos Térmicos de Materiais Ferrosos. 6
2.2.1. Recozimento. 8
2.2.2. Normalização. 8
2.2 3. Têmpera 9
2.2.4. Revenimento 9
2.3 Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos. 11
2.3.1. Solubilização. 11
2.3.2. Envelhecimento 11
2.3.3. Homogeneização. 11
2.3.4. Recozimento. 11
3.TRATAMENTOS SUPERFICIAIS 13
3.1. Cementação. 13
3.2. Nitretação. 13
3.3. Carbonitretação. 14
3.4. Banhos de sal (Cianetos). 14
3.5. Têmpera superficial. 14
3.5.1 Chama. 14
3.5.2 Indução. 14
3.6. Jateamento com Granalhas. 14
4. EXERCÍCIOS. 15
5. BIBLIOGRAFIA 16
ANEXO 17

1.IMPORTÂNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados. De forma simplificada os tratamentos térmicos podem ser descritos por são ciclos de aquecimento e resfriamento controlados em material metálico (metal ou liga) que causam modificações na microestrutura do mesmo. Essas modificações têm por conseqüência alterações nas propriedades mecânicas e no comportamento em serviço. A **figura 1** ilustra ciclos de aquecimento e resfriamento correspondentes a tratamentos térmicos.

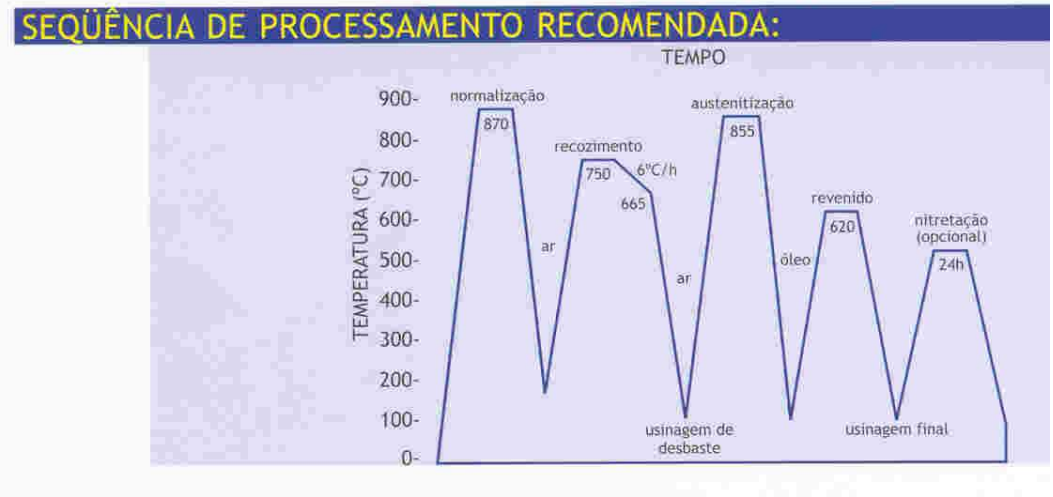


Figura 1. Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para o aço 4140.

A **figura 2** ilustra o efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de um aço AISI 1040. Observa-se que em um único aço, isto é, com a mesma composição química, podem ser obtidas propriedades mecânicas muito diferentes realizando-se .tratamentos térmicos distintos.

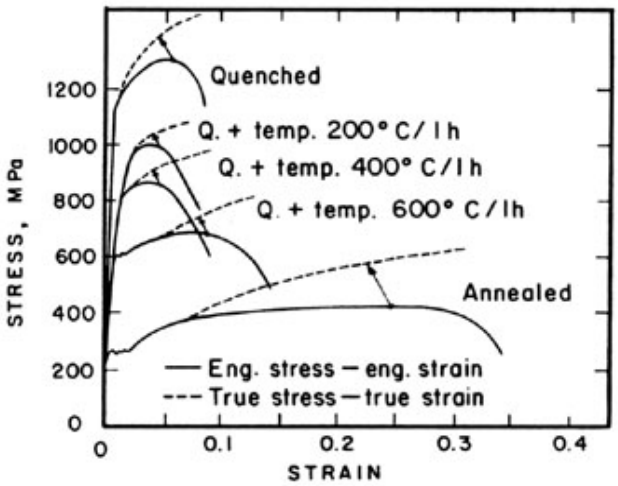


Figura 2. Aço 1040 submetido a diferentes tratamentos térmicos.Tratamentos térmicos: Quenched (têmpera), tempered (revenimento), annealed (recozimento).

A **figura 3** mostra as alterações na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço submetido a diferentes tratamentos térmicos.

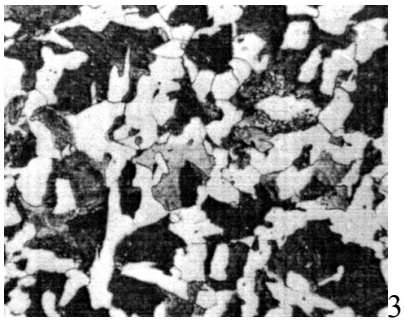
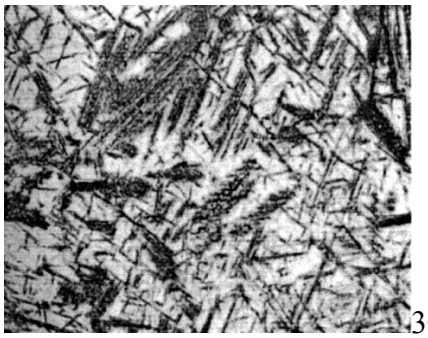
Aço 1045 Fe-(043-0,50)%C-(0,60-0,90)%Mn-(0,040máx)%P-(0,040máx)%S	**Aço 4140** Fe-(0,38-0,43)%C-(0,75-1,00)%Mn-(0,035máx)%P-(0,040 máx)%S-(0,20-0,35)%Si-(0,80-1,10)%Cr-(0,15-0,25)%Mo.
Normalizado Dureza: 15 HRC  300X	Normalizado Dureza: 30 HRC 300X
Temperado Dureza: 55HRC  300X	Temperado Dureza: 59 HRC 500X

Figura 3. Diferentes microestruturas resultantes de tratamentos térmicos. Tratamentos térmicos de têmpera e de normalização.

Os fatores que determinam os tipos de tratamentos térmicos são: temperatura, taxas de aquecimento e resfriamento, tempo de permanência em uma determinada temperatura. A escolha adequada desses elementos está diretamente relacionada com a estrutura das ligas. Esquematicamente, a estrutura das ligas e os tratamentos térmicos relacionados com essas ligas são apresentados a seguir.

Metal puro + Elemento de Liga = Liga

Ligas Ferrosas Aços Ferros fundidos **Toto: têmpera, recozimento, normalização, revenimento.**	Ligas Não-ferrosas e Aços Inoxidáveis **Toto: solubilização, envelhecimento e recozimento.**

2 TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS.

2.1 Tratamento térmico de recozimento.

Durante o processo de deformação mecânica, não só as dimensões do material são alteradas, mas também a microestrutura resultante no material deformado. Embora, a maior parte da energia gasta nos processos de conformação a frio seja perdida na forma de calor e apenas 2 a 10% dessa energia é armazenada na forma de defeitos cristalinos, esses defeitos causam um aumento de dureza significativo no material metálico. A esse fenômeno de aumento de dureza e resistência mecânica com o processo de deformação plástica ou mecânica é dado o nome de encruamento. A **figura 4** mostra os efeitos do encruamento (deformação plástica) na resistência mecânica de algumas ligas. A **figura 5 (b)** ilustra a microestrutura de um material encruado.

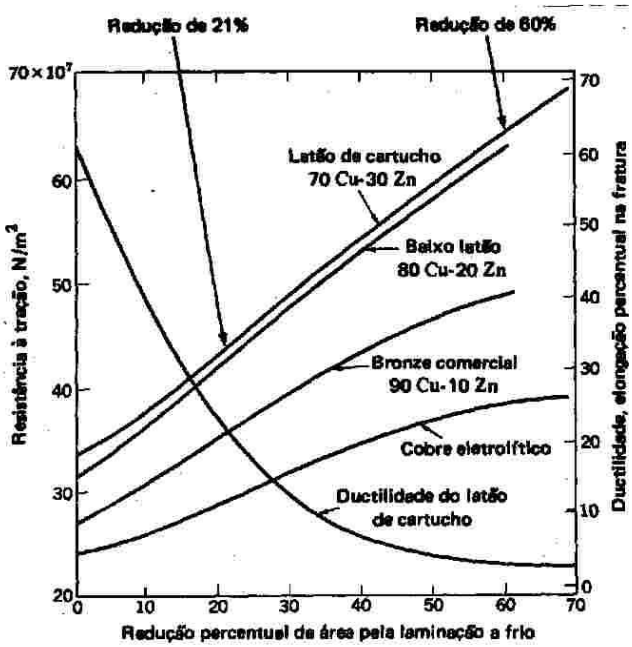


Figura 4. Aumento da resistência à tração e diminuição de ductilidade de chapas de cobre e ligas de cobre após encruamento.

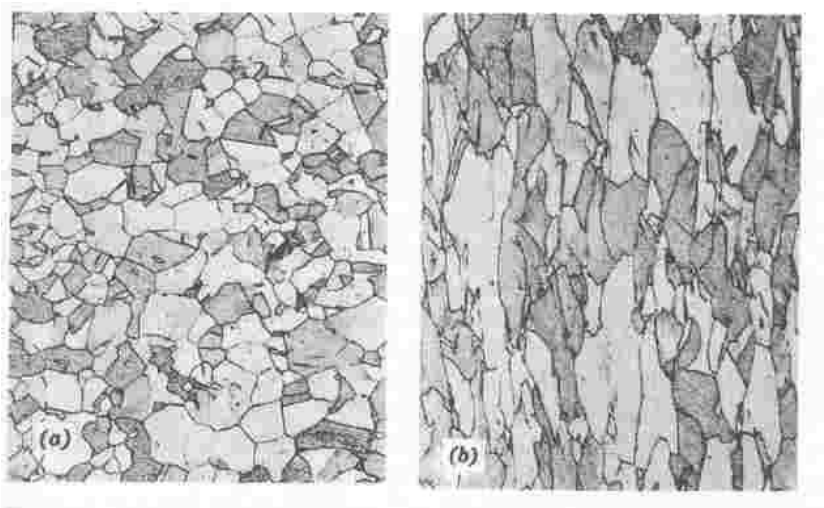


Figura 5. (a) Microestrutura de um material policristalino antes da deformação plástica (encruamento). (b) Microestrutura de material policristalino encruado, observa-se um alongamento dos grãos na direção de deformação.

A eliminação e o rearranjo de defeitos cristalinos são processos termicamente ativados, isto é, são favorecidos em temperaturas mais elevadas onde a difusão dos átomos é maior. Portanto, se for conveniente eliminar ou diminuir o encruamento de um material deformado a frio pode ser realizado um tratamento térmico. Durante esse tratamento térmico ocorrem mudanças microestruturais e diminuição de dureza. Esse tratamento térmico é conhecido como **recozimento**. O recozimento consiste em colocar o material em uma temperatura acima da temperatura de recristalização por períodos de tempo que vão de minutos a poucas horas. O esquema da **figura 6** ilustra o que ocorre durante o tratamento térmico de recozimento.

Os materiais metálicos também podem ser deformados a quente. Durante o processo de deformação a quente os defeitos são criados e logo após são rearranjados e/ou eliminados. De forma bastante simplificada pode-se dizer que pode-se obter durante o processo de deformação a quente uma microestrutura semelhante à microestrutura do material que não sofreu deformação plástica. A deformação a quente é caracterizada por ser realizada acima da temperatura de recristalização. Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação a quente da deformação a frio.

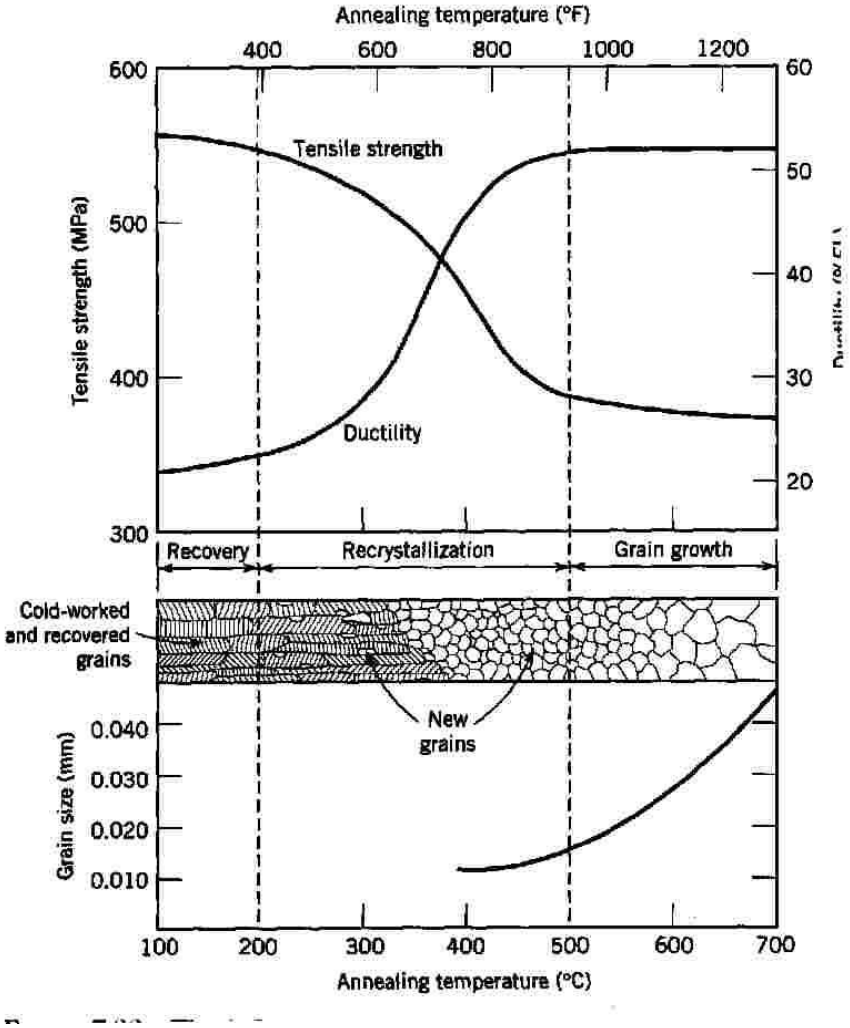


Figura 6. Influencia da temperatura do tratamento térmico na resistência na ductilidade de um latão. Recovery (recuperação)=rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura, mas com restauração parcial das propriedades do material, Recrystallization (recristalização)=ocorre eliminação de defeitos cristalinos pela migração de contornos de grão e grain growth (crescimento de grão).

A temperatura de recristalização, citada anteriormente, caracteriza-se por ser a temperatura na qual é necessária 1 hora para que o processo de recristalização se inicie e termine em um metal

ou liga. As temperaturas típicas de recristalização para metais e ligas estão entre 1/3 e ½ do ponto de fusão dos mesmos. É importante ressaltar que essa temperatura de recristalização depende de vários fatores tais como: pureza da liga (a recristalização ocorre mais rapidamente em metais puros do que em ligas), grau de deformação (energia armazenada na forma de defeitos cristalinos).

2.2 Tratamentos Térmicos de Materiais Ferrosos.

As ligas ferrosas são os materiais compostos a base de ferro. Essas ligas são os **aços** e os **ferros fundidos**.

Tanto os aços como os ferros fundidos têm como composição base o ferro e carbono. Definem-se aços como sendo ligas compostas por ferro e teores de carbono de até 2% em peso. Já os ferros fundidos, possuem teores acima de 2% em peso de carbono. Usualmente os teores de carbono são sempre inferiores a 2% nos aços e superiores a 2% nos ferros fundidos. A **figura 7** mostra um diagrama Fe-C, com algumas microestruturas características.

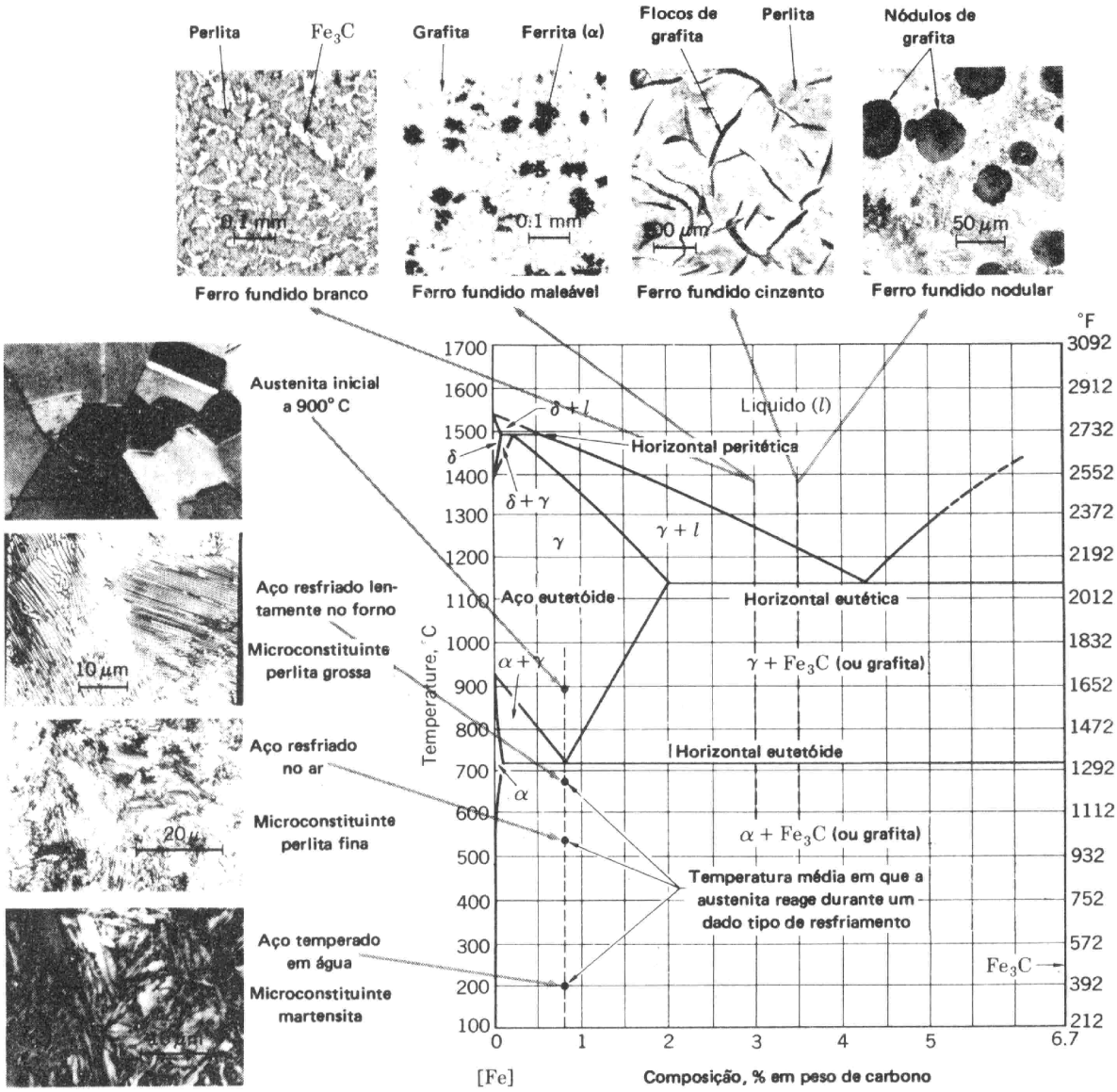
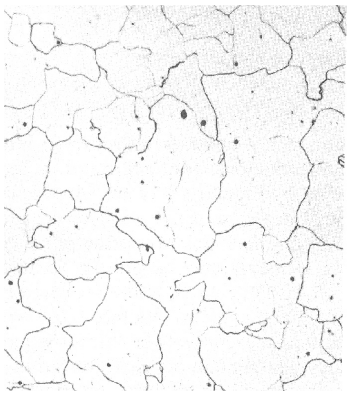


Figura 7. Diagrama Fe-C, com algumas microestruturas representativas de aços e ferros fundidos.

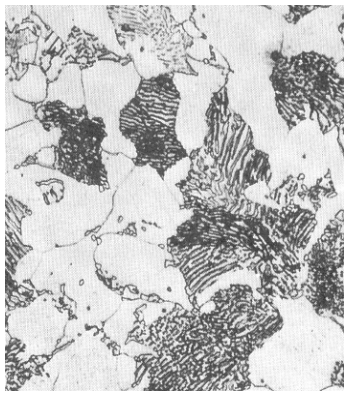
Existem vários tipos de aços. Dentre eles estão os:

1. Aços carbono (não possuem elementos de liga, além do carbono).
2. Aços baixa liga (possuem elementos de liga para melhorar a temperabilidade ou propriedades mecânicas).
3. Aços ferramenta (são aços que possuem elevados teores de elementos de liga, principalmente formadores de carbonetos e nitretos).
4. Aços inoxidáveis (apresentam elevados teores de elementos de liga, sua principal propriedade é a resistência à corrosão. O principal elemento de liga dos aços inoxidáveis é o cromo. A resistência à corrosão desses aços é promovida pela formação de óxidos de cromo na superfície do metal. Esses óxidos formam uma película aderente e contínua, semelhante à formada no alumínio).

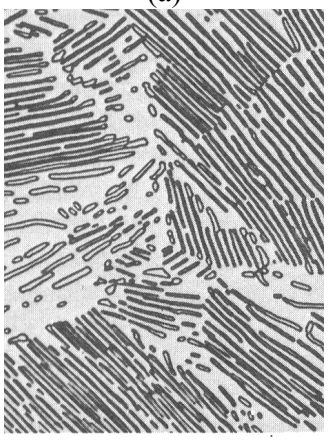
A **figura 8** mostra microestruturas características de aços para construção mecânica (aços carbono e baixa liga). As regiões escuras da **figura 8** correspondem a um composto chamado perlita e as regiões claras correspondem a uma fase chamada ferrita. A ferrita tem estrutura cristalina CCC e tem baixa solubilidade do carbono. Já a perlita, é composta de 2 fases (ferrita e cementita). A cementita é um carboneto de ferro (Fe_3C), o qual é uma fase dura e frágil. A ferrita e cementita na perlita estão dispostas na forma de lamelas, como mostra de maneira detalhada a **figura 8 (c)** e esquematicamente a **figura 8 (d)**.



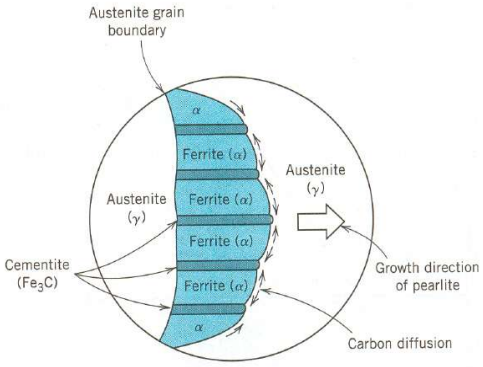
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8. Microestruturas características de aços para construção mecânica. (a) aço doce, (b) aço1020, (c) aço 1080 (eutetóide) e (d) ilustração esquemática de reação eutetóide, formação da perlita.

A primeira diferenciação que se faz dos aços neste texto é pela composição química. Os elementos de liga, bem como a quantidade de elementos de liga adicionada, vão depender da aplicação do aço, isto é, do requisito mais importante a ser levado em conta no projeto. Este requisito pode ser mecânico, econômico ou ligado ao ambiente (aços inoxidáveis). A outra diferenciação que deve ser feita, quanto se pensa em aços, é com relação ao tratamento térmico

realizado. Uma fase também muito importante que se forma nos aços é a martensita. Ela foi ilustrada na **figura 3** (tratamento de têmpera). Essa fase resulta da transformação da austenita, que não é estável na temperatura ambiente, durante o resfriamento rápido dos aços. Cabe aqui uma observação, a maioria dos tratamentos térmicos realizados em aços parte da existência de austenita. Austenita é uma fase CFC, que está presente nos aços carbono acima de 723º C (eutetóide). Em análise bastante simplificada descreve-se que o resfriamento lento a partir da austenita resulta em ferrita e perlita (diagrama de equilíbrio apresentado na **figura 7**) e o resfriamento rápido a partir da austenita resulta em martensita. Essa fase não é descrita no diagrama de equilíbrio (diagrama de fases). Na verdade, existem produtos e resultados intermediários, como a formação de bainita, os quais não serão discutidos neste texto. São necessários outros tipos de diagrama para mostrar as trasformações fora da condição de equilíbrio, que são os digramas de tempo-temperatura-tranformação e de resfriamento contínuo. Algumas formas de tratamentos térmicos, que podem ser realizados nos aços, são apresentadas em curvas de resfriamento contínuo e tempo-temperatura-transformação (TTT) apresentadas nas **figura 9**.

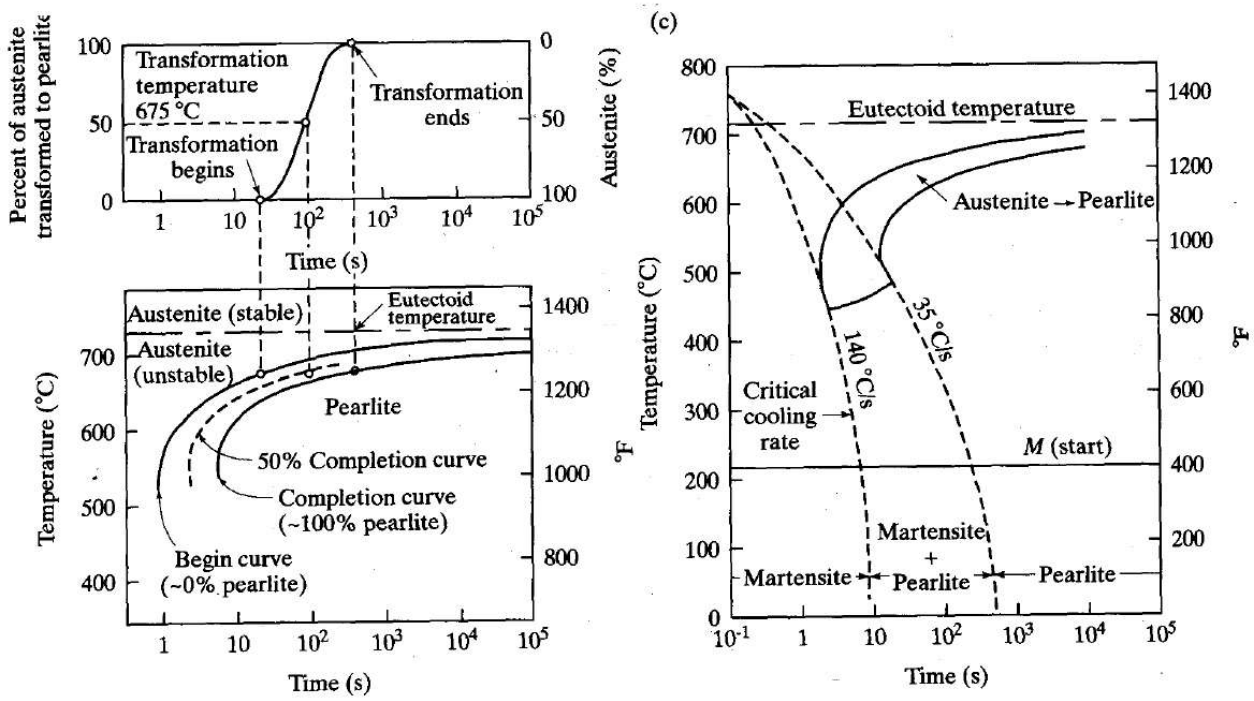


Figura 9. Curvas de tempo-temperatura-transformação (TTT) e de resfriamento contínuo.

Os tratamentos térmicos mais comumente realizados nos aços são:

2.2.1. Recozimento. Os tratamentos térmicos de recozimento podem objetivar a diminuição do encruamento e causar uma diminuição de dureza do material metálico. No caso específico dos aços o recozimento também caracteriza-se por um resfriamento lento (algumas horas, dependendo do tamanho da peça) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita. Essa temperatura dependerá da composição do aço. O produto dessa reação é a formação de ferrita e de perlita. Existe também uma outra forma de tratamento térmico de recozimento, que na verdade é a chamada esferoidização da perlita. Esse tratamento consiste em tratar termicamente o aço em uma temperatura em torno da temperatura eutetóide (723ºC) por várias horas.

A tensão de resistência de um material recozido (em kgf/mm^2) pode ser calculada de maneira aproximada pela seguinte relação:

$$\text{Tensão de resistência} = \frac{28{,}1\%\ \text{ferrita} + 84{,}4\%\ \text{perlita}}{100}$$

2.2.2. Normalização. O tratamento térmico de normalização é realizado de forma semelhante ao tratamento térmico de recozimento. A normalização caracteriza-se por um resfriamento do aço feito ao ar a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço. O produto dessa reação é a formação de ferrita e de perlita. As porcentagens de ferrita e de perlita dependerão da composição do aço.

2.2 3. Têmpera. A têmpera, ao contrário do recozimento e da normalização, objetiva a formação de uma fase chamada martensita, que é dura e frágil. A têmpera caracteriza-se por um resfriamento rápido (alguns segundos) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço. A têmpera é habitualmente realizada utilizando água, salmora ou óleo. Isso dependerá da composição do aço.

2.2.4. Revenimento. O revenimento é um tratamento térmico realizado logo após a têmpera. Esse tratamento térmico causa alívio de tensões na peça temperada, que tem por conseqüência uma diminuição de resistência de mecânica e também um aumento na ductilidade e na tenacidade. As temperaturas nas quais são realizados os tratamentos térmicos de revenimento estão sempre abaixo da temperatura crítica (temperatura onde se inicia a formação de austenita). No entanto, existem algumas faixas de temperatura "proibidas" em função da fragilização de alguns tipos de aços. Essas temperaturas estão em torno de 300ºC e de 550ºC.

A **tabela 1** a apresenta as durezas de aços recozidos, normalizados e temperados.

Tabela 1. Dureza de aços recozidos, normalizados e temperados.

Aço %Carbono	Dureza Brinell Aço Recozido	Dureza Brinell Aço Normalizado	Dureza Brinell Aço Temperado
0,01	90	90	90
0,20	115	120	229
0,40	145	165	429
0,60	190	220	555
0,80	220	260	682
1,00	195	295	Acima de 682 + formação de trincas
1,20	200	315	Acima de 682 + formação de trincas
1,40	215	300	Acima de 682 + formação de trincas

A **figura 9** apresentou curvas de resfriamento contínuo, com diferentes taxas de resfriamento. A tendência para a formação de martensita em um aço pode ser medida utilizando diferentes taxas de resfriamento. O ensaio Jominy é um dos ensaios que e é utilizado para avaliar a temperabilidade do aço. Temperabilidade é capacidade que um aço tem de formar martensita, que é uma fase dura e frágil. Quanto maior a fração volumétrica de martensita, mais duro será o aço. Quanto maior o teor de carbono também será maior a temperabilidade do aço (a adição de elementos de liga também pode favorecer um aumento da temperabilidade do aço, acentuando o efeito do carbono). A temperabilidade de um aço pode também pode ser avaliada pelo valor da dureza HRC ou pelo valor da dureza ao longo de uma dada distância no ensaio Jominy.A norma **ASTM A 255** descreve todo o procedimento para a realização do ensaio Jominy. O corpo de prova de ensaio Jominy é colocado no forno em uma temperatura em torno de 900º C por cerca de 30 minutos. Após esse tempo o corpo de prova é retirado rapidamente do forno e colocado em um dispositivo onde ocorrerá o resfriamento do mesmo. Esse dispositivo é composto por um suporte para o corpo de prova na parte superior e por um sistema de resfriamento com água na parte inferior. Esse dispositivo de resfriamento propicia que as diferentes regiões do corpo de prova tenham também diferentes taxas de resfriamento (**figura 11).** A base do corpo de prova será resfriada rapidamente pela água

corrente, o que não ocorre com o topo do mesmo. Após o resfriamento do corpo de prova, este é retificado e são feitas medidas de dureza ao longo de seu comprimento. A medida de dureza feita é Rockwell C (**HRC**). A dureza é sempre maior dureza junto à base do corpo de prova, onde as taxas de resfriamento são mais elevadas. Se o aço apresentar dureza elevada, mesmo em taxas de resfriamento mais baixas, significa que o aço apresenta elevada temperabilidade. Os resultados do ensaio permitem comparar a temperabilidade de diferentes aços e também servem como uma maneira de avaliar o aço recebido (controle de qualidade). A **figura 10** mostra esquematicamente o dispositivo para produzir um corpo de prova de ensaio Jominy. A **figura 11** ilustra o corpo de prova de ensaio Jominy e o que ocorre ao longo do corpo de prova.

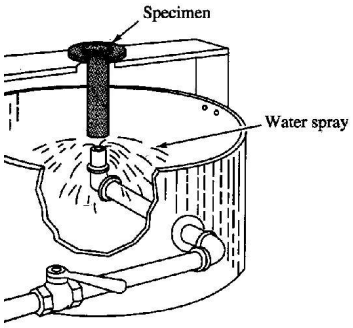


Figura 10. Dispositivo para produzir um corpo de prova de ensaio Jominy.

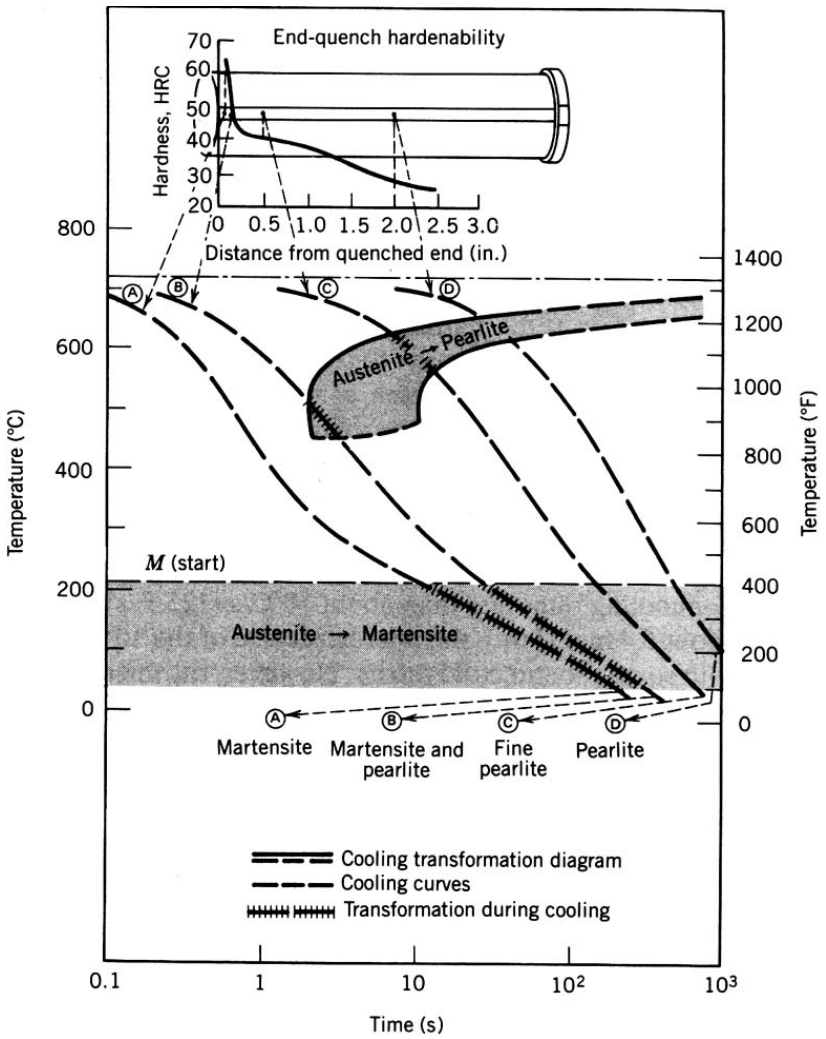


Figura 11. Curvas de resfriamento contínuo, com diferentes taxas de resfriamento em um corpo de prova de ensaio Jominy.

2.3 Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos.

De um modo geral, os materiais não-ferrosos são bem descritos, em termos de transformações de fase pelos diagramas de equilíbrio. Podem não ser necessários diagramas de resfriamento contínuo, como no caso dos aços. Os materiais não-ferrosos são utilizados tanto como metais, como na forma de ligas. Por exemplo, o alumínio e o cobre. As ligas de materiais não-ferrosos endurecíveis por precipitação são bastante utilizadas em processos onde existe necessidade de conformação mecânica e/ou tratamentos térmicos. Já as ligas eutéticas são muito utilizadas em fundição. As ligas eutéticas não apresentam em geral boa conformabilidade, mas apresentam baixo ponto de fusão, o que facilita sua fundição.

Os tratamentos térmicos realizados em materiais não-ferrosos são um pouco diferentes dos que são realizados nos aços. Elevadas taxas de resfriamento não levam à formação de uma fase dura e frágil, como a martensita como no caso dos aços, mas sim a um "congelamento" da microestrutura de elevada temperatura. A explicação para isso está relacionada com a presença do carbono nos aços, que é um elemento de liga intersticial e não substitucional. A exceção nas ligas ferrosas está aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, nos quais são feitos tratamentos térmicos semelhantes aos dos materiais não-ferrosos. Os tratamentos térmicos que são realizados nos materiais não-ferrosos e nos aços inoxidáveis são:

2.3.1. Solubilização. Esse tratamento térmico visa a eliminação de precipitados no material. Esse tratamento é freqüentemente realizado em aços inoxidáveis, embora seja uma liga ferrosa. As temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização são elevadas e mais próximas do ponto de fusão das ligas, em regiões onde existe apenas uma fase (digramas de equilíbrio).

2.3.2. Envelhecimento. Esse tratamento visa o oposto da solubilização. O tratamento térmico de envelhecimento (ou recozimento isotérmico) visa a formação de precipitados que aumentam resistência do material. Esses tratamentos são realizados em temperaturas onde o diagrama de equilíbrio mostra a presença de pelo menos duas fases. A **figura 12** ilustra um ciclo completo dos tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento.

2.3.3. Homogeneização. Esse tratamento térmico visa homogeneizar a composição química do material. Esse tratamento é comumente realizado em peças fundidas e seu tempo de duração é bastante longo, podendo chegar a dias. As temperaturas dos tratamentos térmicos de homogeneização são próximas das temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização.

2.3.4. Recozimento. Os tratamentos térmicos de recozimento levam a diminuição do encruamento e causam uma diminuição de dureza do material metálico. Esse tratamento também é conhecido como alívio de tensões e visa eliminar tensões residuais, causadas por diferentes motivos (soldagem, conformação mecânica) e é comum aos materiais ferrosos e não-ferrosos.

Para ilustrar melhor a seqüência de tratamentos térmicos dos materiais não-ferrosos são apresentadas designações de tratamentos para o alumínio e suas ligas: H1 = somente encruado; H2 = encruado e parcialmente recozido; T1 = trabalhado a quente + envelhecimento natural (temperatura ambiente); T2 = trabalhado a quente + encruamento + envelhecimento natural; T3 = solubilizado + encruamento + envelhecimento natural; T4 = solubilizado + envelhecimento natural; T5 = trabalhado a quente + envelhecimento artificial (forno); T6 = solubilizado + envelhecimento artificial; T7 = solubilização + estabilização (superenvelhecimento); T8 = solubilização + encruamento + envelhecimento artificial; T9 = solubilização + envelhecimento artificial + encruamento; T10 = trabalhado a quente + encruamento + envelhecimento artificial.

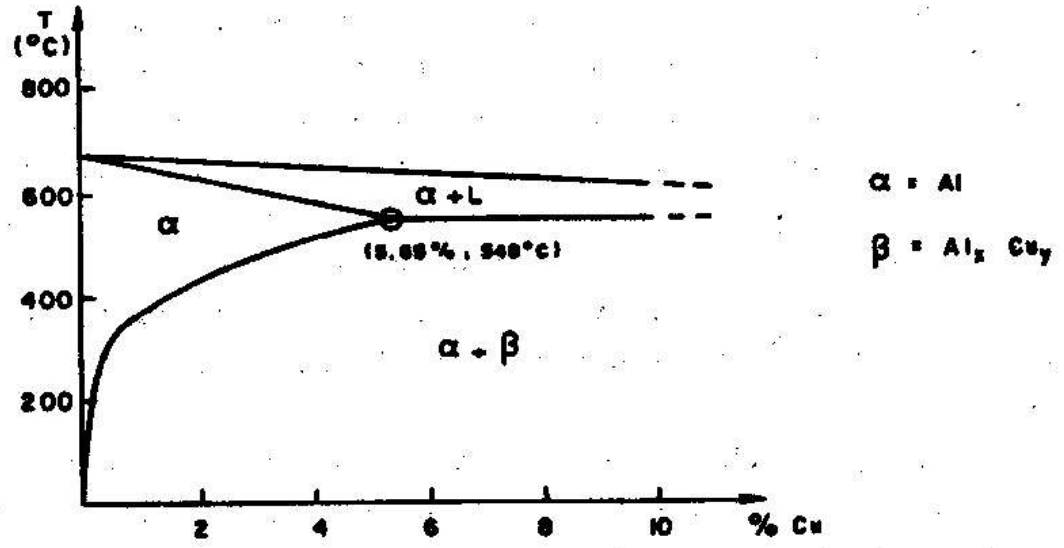


Figura 1 - Parte do diagrama de equilíbrio Al-Cu.

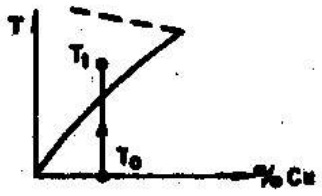
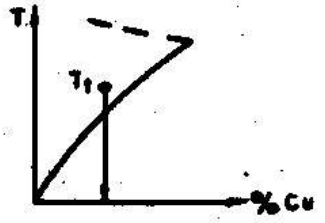
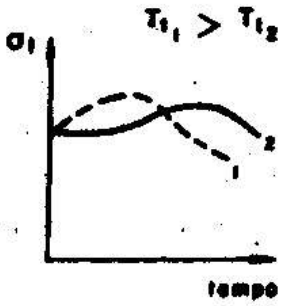
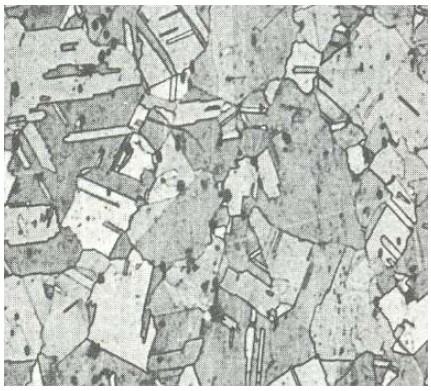
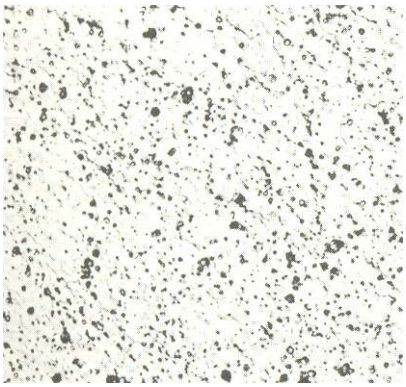
Tratamento	Microestrutura	Propriedade	Diagrama
Solubilização			
$T_a \rightarrow T_t \rightarrow T_s$	$\alpha+\beta \rightarrow \alpha$	$\alpha_t \downarrow$ $\delta \uparrow$	
Resfriamento brusco			
$T_t \rightarrow T_a$	$\alpha \rightarrow \alpha_{super-saturado}$	σ_t, δ depende da velocidade de resfriamento	
Precipitação (envelhecimento natural)			
$T_t = T_a$	$\alpha \rightarrow \alpha+\beta_{precipitado}$	$\sigma \uparrow$ $\delta \downarrow$	
(envelhecimento artificial)			
$T_S > T_t > T_a$			

Figura 12. Ciclo completo dos tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento.

A **figura 13** ilustra microestruturas de materiais não ferrosos.



(a)



(b)

Figura 13. (a) Cobre, laminado e recozido contendo impurezas. (b) Alumínio laminado e recozido com resíduos de Fe. Mg, Si e Cu (precipitados $FeAl_3$, AlFeSi, Mg_2Al_3 entre outros).

3.TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os tratamentos térmicos superficiais envolvem alterações microestruturais, e por conseqüência nas propriedades mecânicas, em apenas de parte superficial da peça ou componente. Exemplos de aplicação: dentes de engrenagens, eixos, mancais, fixadores, ferramentas e matrizes. Estes processos aumentam a dureza superficial, resistência à fadiga e desgaste sem perda de tenacidade da peça ou componente. Muitos dos tratamentos térmicos superficiais consistem em aquecer o componente ou peça em atmosfera rica em elementos tais como carbono, nitrogênio ou boro.

3.1. Cementação.

É utilizada em aços carbono ou ligados com teores de carbono de até 0,2%. O aço é aquecido entre 870-950ºC em atmosfera rica em carbono. O processo de cementação segue a seguinte reação:

$$Fe + 2CO \rightarrow Fe_{(C)} + CO_2$$

A atmosfera rica em carbono pode ser fornecida basicamente por gás, ou por um banho (líquido) de sais. A superfície rica em carbono produzida tem dureza entre 55 e 60 HRC. A profundidade da camada cementada varia normalmente de 0,5 a 1,5 mm. Pode ocorrer distorções na peça durante a c

3.2. Nitretação.

É utilizada em aços carbono ou ligados (Cr,Mo), aços ferramenta e aços inoxidáveis. O aço é aquecido entre 500-600ºC em atmosfera rica em nitrogênio. Quando a atmosfera é gasosa, o gás utilizado contém amônia, que dissociada gera o nitrogênio. Outra forma de se obter o nitrogênio dissociado, a partir do N_2, pela formação de um plasma. Esse processo consiste em colocar uma mistura de gases em um recipiente onde foi existe vácuo. Nesse recipiente é estabelecida uma diferença de potencial, produzindo ionização do gás nitrogênio. Esse processo tem como vantagens menores problemas ambientais, melhor estabilidade dimensional e melhor controle da camada nitretada, além da utilização de menores temperaturas.

As durezas alcançadas na superfície atingem um valor maior do que 1100 HV. A profundidade da camada nitretada varia de 0,1 a 0,6 mm. No caso dos aços rápidos essa camada varia de 0,02 a 0,07 mm.

3.3. Carbonitretação.

É um processo realizado em aços baixo carbono, onde ocorre um enriquecimento na superfície tanto em carbono como em nitrogênio. Nesse caso a reação é dada por:

$$2NaCN + O_2 \rightarrow 2NaNCO$$

$$4NaNCO \rightarrow Na_2CO_3 + CO + 2N$$

Neste processo o aço é aquecido entre 700 e 800ºC em uma atmosfera rica em carbono e em amônia. A peça é resfriada em óleo.

3.4. Banhos de sal (Cianetos).

É um processo realizado em aços baixo carbono (0,2%C), e aços ligados (0,08 a 0,2%C). Neste processo ocorre enriquecimento na superfície da peça tanto em carbono como em nitrogênio. O aço é colocado em um banho de sal (cianetos) em temperaturas entre 760 e 845ºC. A dureza alcançada na superfície chega a 65 HRC. A profundidade da camada modificada fica entre 0,025 e 0,25 mm.

3.5. Têmpera superficial.

3.5.1 Chama. É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando uma tocha oxiacetilênica e resfriamento com água ou outro meio (salmoura ou óleo).

3.5.2 Indução. É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando espiras de cobre onde passa uma corrente com alta freqüência. O resfriamento é feito com água ou outro meio (salmoura ou óleo).

3.6. Jateamento com Granalhas.

O jateamento com granalhas é um processo de trabalho a frio, que consiste em projetar granalhas com alta velocidade (entre 20 e 100 m/s) contra uma superfície de um material metálico. A granalha atua como se fosse um pequeno martelo sobre a superfície metálica causando deformação plástica. Esse processo de deformação superficial é largamente utilizado para introduzir tensões residuais de compressão na superfície, as quais melhoram as propriedades mecânicas dos componentes em serviço, em especial, aumentam a vida em fadiga.

4. EXERCÍCIOS.

1. O que ocorre e quais os efeitos dos tratamentos térmicos?
2. O que é o tratamento térmico de recozimento e quais objetivos da realização desse tratamento térmico?
3. O que é o tratamento térmico de têmpera e o que visa esse tratamento?
4. Qual a importância do ensaio Jominy e como é feito esse ensaio?
5. Qual a finalidade do ensaio de dureza Rockwell na análise da temperabilidade de um aço?
6. Qual a finalidade do revenimento?
7. Qual as diferenças entre um tratamento térmico de solubilização e de envelhecimento?
8. Descreva o tratamento de cementação e qual sua finalidade?
10. Determine o tempo necessário para que um aço contento 0,2% em peso de carbono tenha, numa posição 2 mm abaixo da superfície, um teor de carbono de 0,45%. Durante o tratamento de cementação realizado a 1000 ^{0}C, o teor de carbono na superfície foi mantido em 1,3%. O coeficiente de difusão do carbono neste aço é dado pela expressão: $D = 10^{-5}\exp(\frac{-32400}{1{,}987T})$; (m^2/s).

Na temperatura de 1000 ^{0}C, D=2,74x10^{-11} m^2/s.

Temos enriquecimento da superfície em carbono, logo $\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - erf(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})$, substituindo os valores tem-se $\frac{0{,}45 - 0{,}2}{1{,}3 - 0{,}2} = 1 - erf(\frac{2x10^{-3}}{2\sqrt{2{,}74x10^{-11}t}})$,

$erf(\frac{2x10^{-3}}{2\sqrt{2{,}74x10^{-11}t}})$=0,7222 Para esse valor $z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ = 0,7678

$\frac{2x10^{-3}}{2\sqrt{2{,}74x10^{-11}t}} = 0{,}7678$ t= 13,2 horas

5. BIBLIOGRAFIA

1.Vicente Chiaverini. **Tecnologia Mecânica.** Vol. 1, 2 e3. 2ª edição. Makron Books. 1986. São Paulo.
2. Sérgio Augusto de Souza. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos.** 5ª edição. Editora Edgar Blücher Ltda. 1982. São Paulo.
3. Amauri Garcia; J. A. Spim, C. A. dos Santos. **Ensaios dos Materiais.** LTC. 2000. Rio de Janeiro.
4. Angelo Fernando Padilha. **Materiais de Engenharia-Microestrutura e Propriedades**. Hemus. 1997.São Paulo.
5. **Metals Handbook**. Vol 7. 8ª edição. 1973. American Society for Metals.
6. George Krauss. Steels: **Heat Treatment and Processing Principles**. ASM. 1989.USA.
7.William D. Callister Jr. **Materials Science and Engineering – An Introduction**. 4ª edição. John Willey. 1997. USA.
8. James F. Shakelford. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 4ª edição. Prentice Hall. 1996. USA.
9. Angelo Fernando Padilha e Fulvio Siciliano Jr. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. ABM. 1996. São Paulo.
10. A. G. Guy. **Ciência dos Materiais.** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Editora da Universidade de São Paulo. 1980. Rio de Janeiro.
11. George E. Dieter. **Mechanical Metallurgy**. 2ª edição. 1976. McGraw Hill. Japan.
13. Marc A. Meyers; Krisen K. Chawla. **Príncipios de Metalurgia Mecânica**. Editora Edgar Blücher Ltda. 1982. São Paulo.
14. Sidney H. Avner. **Introduction to Physical Metallurgy**. 2ª edição. McGraw Hill. 1974. Singapura.
15. Humbertus Colpaert. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos mais Comuns.** Editora Edgar Blücher Ltda.1974. São Paulo.
17. Lawrence H. Van Vlack. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4ª edição. Editora Campus. 1994. Rio de Janeiro.

ANEXO.

Difusão.

Nos materiais metálicos os átomos estão arranjados em uma determinada estrutura cristalina, que é função da composição química e da temperatura. Esses também átomos se movimentam, o nome desse fenômeno é difusão, que é um fenômeno termicamente ativado. No estado líquido os átomos movimentam-se ao acaso. No estado sólido os átomos dos materiais metálicos podem movimentar-se principalmente de duas formas. Essas formas são por interstícios e por troca com lacunas. Átomos intersticiais (átomos pequenos: H, C, N, O, B) difundem pelos. Átomos do metal e átomos substitucionais (elementos de liga) difundem por troca com lacunas. Essa movimentação pode propiciar a ocorrência de precipitados ou a dissolução dos mesmos, isto dependerá da temperatura. Quanto maior a temperatura maior é a movimentação dos átomos.

A difusão é um fenômeno que ocorre durante os tratamentos térmicos. A relação matemática que descreve essa movimentação é dada pelo coeficiente de difusão de um átomo em uma liga ou nele mesmo (D). Essa relação é dada a seguir.

$$D = D_0 \exp(\frac{-Q}{RT}) \qquad (m^2/s)$$

Onde D é o coeficiente de difusão de um elemento na liga ou no próprio metal. D_0 é uma constante independente da temperatura, Q é uma energia de ativação para a difusão (J/mol, cal/mol ou eV/átomo), R é constante dos gases (8,31 J/mol K, 1,987 cal/mol K ou $8{,}62 \times 10^{-5}$ eV/ átomo K) e T é a temperatura em Kelvin (K).

A maioria das mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais submetidos a tratamentos térmicos decorre de transformações de fase onde ocorre difusão. A grande exceção é o tratamento térmico de têmpera nos aços, onde ocorre uma transformação que não envolve difusão, chamada transformação martensítica.

Segunda Lei de Fick. O segundo tratamento para a difusão fica estabelecido para condições não-estacionárias (perfil de concentração varia com o tempo) é dado por: $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D\frac{\partial C}{\partial x})$, mas se considerarmos que o coeficiente de difusão é independente da composição química tem-se que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2})$$

Essa equação diferencial é conhecida como segunda lei de Fick. A **figuras 1** mostra perfis de concentração para o estado não-estacionário em diferentes períodos de tempo.

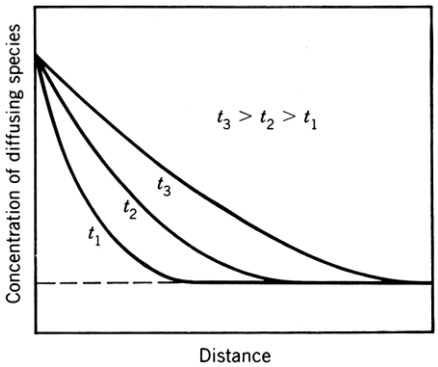


Figura 1. Perfis de concentração para condições não-estacionárias em diferentes períodos de tempo (Enriquecimento da superfície em soluto - Cementação, Nitretação).

Soluções para a segunda lei de Fick são possíveis desde que estabelecidas algumas condições. Uma dessas soluções tem muita aplicação em tratamentos termo-químicos. Considera-se uma placa

semi-infinita, cuja concentração de soluto na superfície é mantida constante. Para as seguintes condições de contorno t=0, $C=C_0$ em $0 \leq x \leq \infty$ e para $t > 0$, $C=C_0$ em x=0 e $C=C_0$ em $x=\infty$ tem-se:

$$\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

C_0 é concentração inicial de soluto na liga, Cs é a concentração de soluto na superfície, Cx é a concentração de soluto na posição x, D é o coeficiente de difusão e t é tempo. $erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ é a integral normalizada de probabilidade ou função erro de Gauss, o valor de z, comumente usado é dado por $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$. A função erro de Gauss é definida como: $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^Z e^{-y^2}dy$ onde $erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ é a variável z.

Uma situação freqüente que pode ser equacionada utilizando a segunda lei de Fick é para o caso onde há um empobrecimento em soluto na superfície. Isso pode ocorrer durante tratamentos térmicos em temperaturas elevadas. Existem dois exemplos bastante comuns que são a descarbonetação e de dezincificação em latões. Nestes casos, a segunda lei de Fick tem a seguinte solução:

$$(Cx - Cs) = (Co - Cs)erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Os valores da função erro de Gauss são tabelados e são apresentados na **tabela 1**.

Tabela 1. Tabulação da função erro de Gauss.

z	erf(z)	z	erf(z)
0	0	0,85	0,7707
0,025	0,0282	0,90	0,7969
0,05	0,0564	0,95	0,8209
0,10	0,1125	1,0	0,8427
0,15	0,1680	1,1	0,8802
0,20	0,2227	1,2	0,9103
0,25	0,2763	1,3	0,9340
0,30	0,3286	1,4	0,9523
0,35	0,3794	1,5	0,9661
0,40	0,4284	1,6	0,9763
0,45	0,4755	1,7	0,9838
0,50	0,5205	1,8	0,9891
0,55	0,5633	1,9	0,9928
0,60	0,6039	2,0	0,9953
0,65	0,6420	2,2	0,9981
0,70	0,6778	2,4	0,9993
0,75	0,7112	2,6	0,9998
0,80	0,7421	2,8	0,9999