
Mestrado Integrado Engenharia Mecânica
Materiais Construção Mecânica I

Aula 1

Lucas F M da Silva

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Conteúdo

- Introdução
- Ferro puro, **ferrite**, **austenite**
- Diagramas de equilíbrio
- Diagrama de equilíbrio **Fe-C**

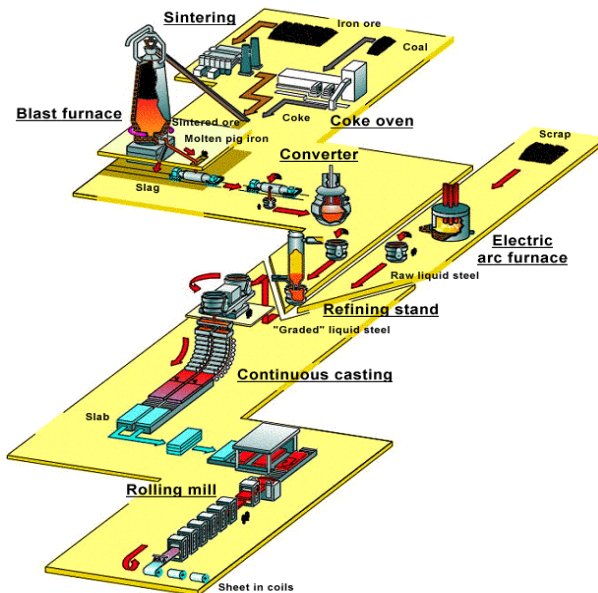
O aço é o metal mais utilizado por 2 razões:

- baixo custo
- excelentes propriedades mecânicas

Os utilizadores de aço enfrentam em geral 2 questões fundamentais:

- escolha do aço
- tratamento do aço

Para tirar o máximo partido dum aço, é necessário conhecer as propriedades do aço em função da sua composição e as modificações provocadas pelos diversos tratamentos.



Produção do aço:

A matéria prima (minério de ferro ou sucata, dependendo do processo) é convertida em aço líquido.

Processo com minério de ferro ⇒ alto forno

Processo com sucata ⇒ forno de arco eléctrico

Depois, o aço fundido é vazado em contínuo (ou em lingotes). Isto produz produtos semi-acabados:

brames - secção rectangular

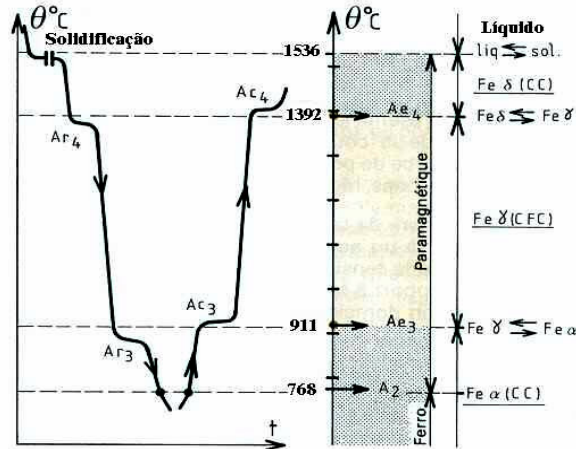
para produtos em chapa

blooms - secção quadrada para perfis

Ferro puro, ferrite, austenite

O ferro puro apresenta 3 variedades alotrópicas estáveis em gamas de temperaturas determinadas:

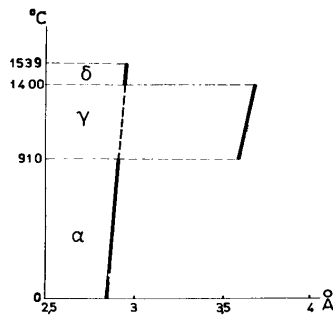
ferro α , ferro γ , ferro δ



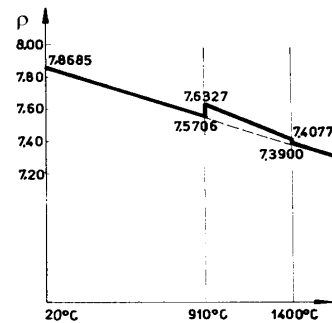
Pontos de transformação do ferro; curva $\theta(t)$

Ferro puro, ferrite, austenite

Para além dos fenómenos térmicos na mudança de estrutura cristalina, há também **variações de volume**.



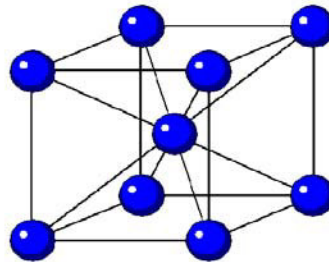
Varição do parâmetro a da rede cristalina do ferro em função da temperatura



Densidade do ferro em função da temperatura

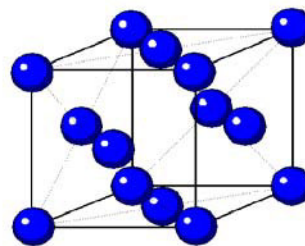
Ferro α , Ferrite

- estrutura **CCC**
- $a = 0,2866 \text{ nm}$
- estável para temp. $< 911 \text{ }^\circ\text{C}$
- solubilidade de C no $\text{Fe}_\alpha < 0,006\%$, à temp. ambiente
- % de interstícios = 32%
- nº total de átomos por malha = 2
- os átomos de Fe tocam-se segundo as diagonais de direcção $\langle 111 \rangle$
- cada átomo tem 8 vizinhos mais próximos



Ferro γ , Austenite

- estrutura **CFC**
- $a = 0,3647 \text{ nm}$
- estável entre 911°C e 1403°C
- solubilidade de C no $\text{Fe}_\gamma < 2,1\%$
- % de interstícios = 26%
- nº total de átomos por malha = 4
- estrutura muito deformável
- os átomos de Fe tocam-se segundo as direcções $\langle 110 \rangle$
- planos de máxima densidade atómica $\{111\}$

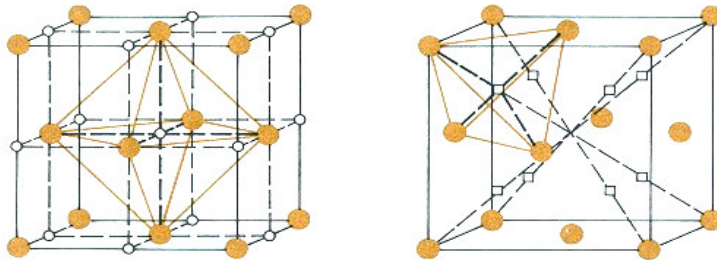


- cada átomo tem 12 vizinhos mais próximos
- a passagem de Fe_α para Fe_γ dá-se com uma contracção volumétrica (1%)

Vazios intersticiais na estrutura CFC

Na austenite um espaço octaedral pode acomodar um átomo com um raio de 0,052 nm. Um vazio tetraedral acomoda um átomo de raio 0,028 nm (raio atômico do C = 0,07 nm)

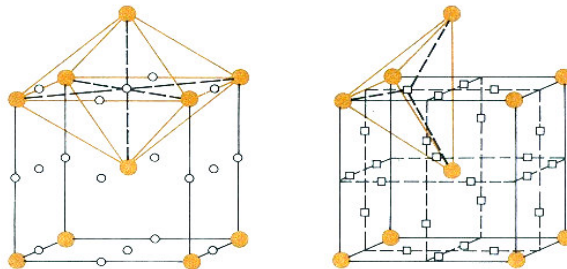
Assim, na austenite os átomos de C localizam-se em vazios octaédricos, os de maiores dimensões



Vazios intersticiais na estrutura CCC

Na ferrite os espaços intersticiais são menores. Um vazio tetraédrico aloja um átomo de raio 0,035 nm e um octaédrico um átomo de raio 0,019 nm.

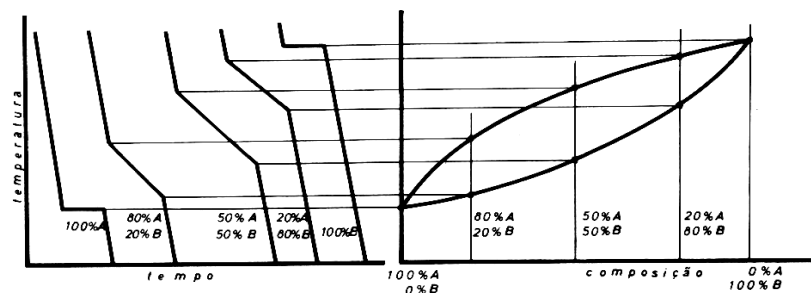
Os espaços octaédricos não são simétricos, pelo que a inclusão de um átomo nesses locais origina deformações de malha importantes. Mas os átomos de C inserem-se nos espaços octaédricos pois assim a energia do cristal não aumentará de forma acentuada: dá-se uma deformação provocada pelo afastamento de apenas 2 átomos.



O estado de equilíbrio termodinâmico das ligas metálicas é estudado por intermédio do **diagrama de equilíbrio ou de fases**. Excluindo o estado líquido, distingue-se 2 tipos de fases:

- as **soluções sólidas** (inserção e substituição)
- e os **compostos definidos** (A_xB_y)
cujos domínios de estabilidade são fornecidos pelo diagrama de equilíbrio.

A determinação dos diagramas de equilíbrio pode ser feita por exemplo por **análise térmica**:



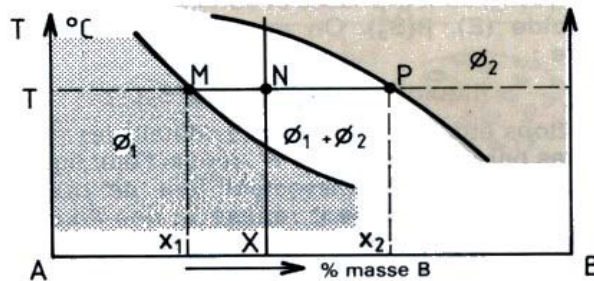
O ajustamento da composição dos cristais à composição dada pelo diagrama é um problema de difusão para o qual é preciso um longo tempo.
Os diagramas serão válidos, então, apenas se o arrefecimento for feito muito lentamente.

Regras de interpretação e de leitura

Domínios bifásicos

Regra da horizontal

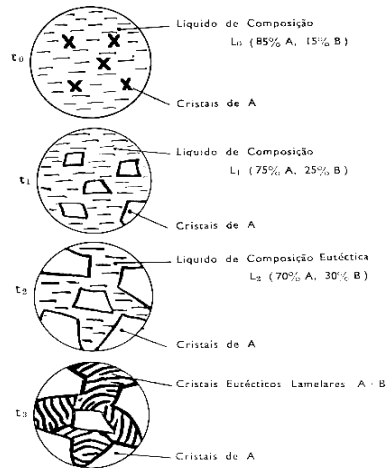
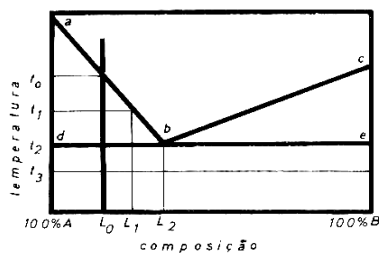
Regra dos segmentos inversos



$$\% \Phi_1 = \frac{NP}{MP} \times 100$$

$$\% \Phi_2 = \frac{MN}{MP} \times 100$$

Estudo duma reacção eutética



Diagramas de equilíbrio

Estudo duma
reacção
eutectoide

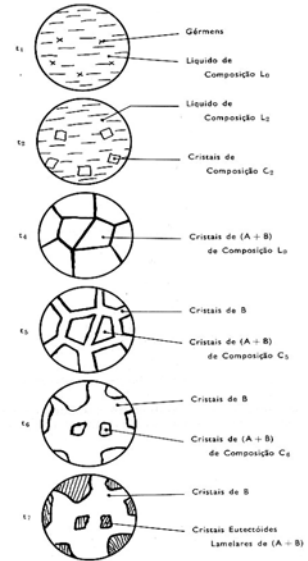
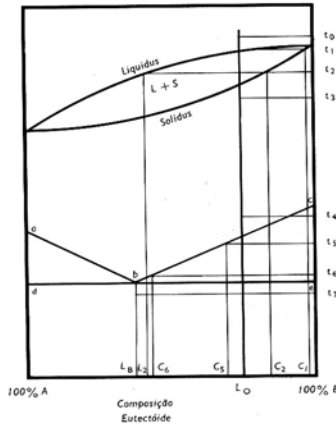
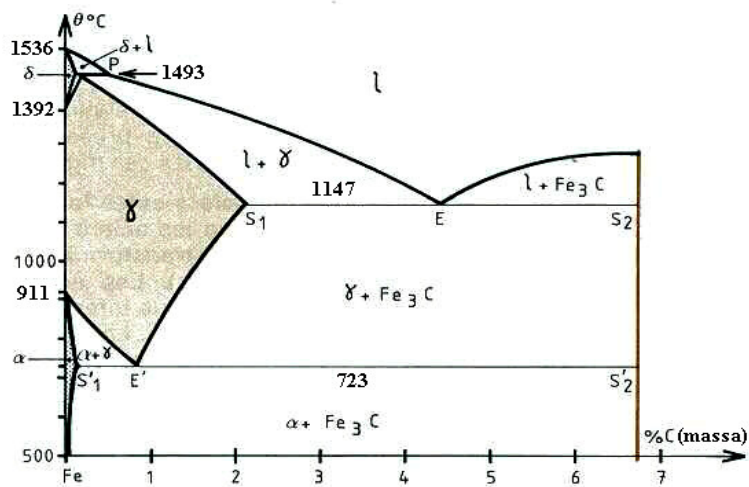


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Diagrama das ligas Fe-C (metaestável)



Estão presentes as seguintes **fases**:

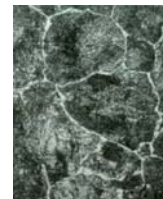
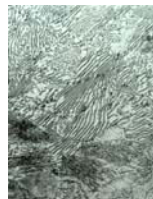
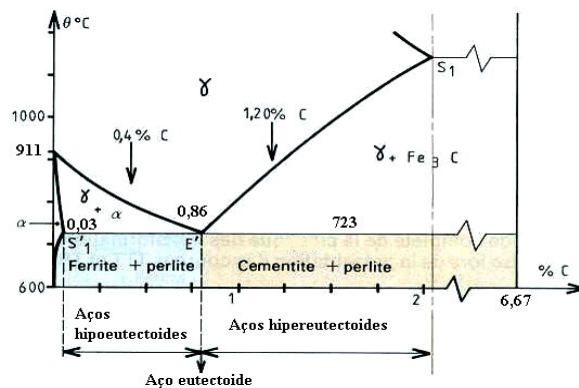
ferrite α : solução sólida de inserção de carbono no ferro α (solubilidade máxima 0,03% em massa a 723°C). O ferro α é CCC,

ferrite δ : solução sólida de inserção de carbono no ferro δ (solubilidade máxima 0,1% em massa a 1493°C). O ferro δ é CCC,

austenite γ : solução sólida de inserção de carbono no ferro γ (solubilidade máxima 2,1% em massa a 1147°C). O ferro γ é CFC,

cementite ou **carboneto de ferro Fe_3C** : a sua composição corresponde a um teor de 6,67% em massa de carbono. Este carboneto é um composto intersticial de malha ortorrômbica.

Constituição
dos aços no
estado
recozido



Mestrado Integrado Engenharia Mecânica
Materiais Construção Mecânica I

Aula 2

Lucas F M da Silva

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

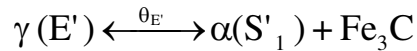
Conteúdo

- Diagrama de equilíbrio **Fe-C** (cont.)
- Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da velocidade (**Bainite**, **Martensite**)

Transformação **eutectoide perlítica**

Exceptuando os aços com menos de 0,03%C, todas as ligas ferrosas contêm em proporções variáveis o constituinte eutectoide perlite.

A **perlite** é um agregado eutectoide obtido pela transformação isotérmica da austenite $\gamma(E')$ segundo:



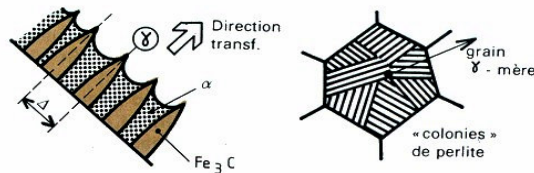
Note bem que para a temperatura θ_E , para todas as ligas tais que %C>0,03%, a austenite tem o mesmo teor em carbono (0,86%: E').

A perlite é um **constituente bifásico**, cujas fracções mássicas são:

$$\frac{\text{massa } Fe_3C \text{ eut.}}{\text{massa perlite}} = \frac{0,86 - 0,03}{6,67 - 0,03} = 0,13; \quad \frac{\text{massa } \alpha \text{ eut.}}{\text{massa perlite}} = 0,87$$

Transformação **eutectoide perlítica** (cont.)

O agregado é em geral **lamelar**. É formado por lamelas alternadas de Fe_3C e de α . A **fase nucleante** é a cementite. A **germinação** é recíproca e faz-se a partir das juntas de grão da fase γ -mãe: o **crescimento é cooperativo** e faz-se sem relação cristalográfica com a fase γ -mãe. Faz intervir a **difusão do carbono** (ver Fig.).



Um parâmetro importante é o **espaço interlamelar Δ** .

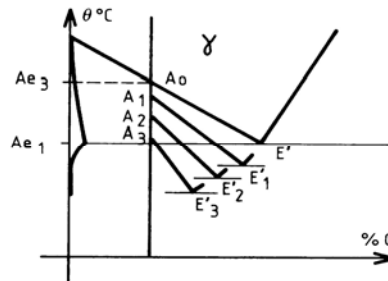
Por um tratamento térmico apropriado é possível obter uma **perlite globular** directamente ou a partir duma perlite lamelar: é então formada por glóbulos de Fe_3C numa matriz ferrítica. Corresponde a um estado menos duro e mais deformável.

Influência da velocidade de arrefecimento sobre os pontos de transformação

As transformações no aquecimento e no arrefecimento são diferentes.

Em geral a histerese no aquecimento é pequena e **Ac** é uma boa aproximação de **Ae**, enquanto **Ar** depende muito da velocidade de arrefecimento e pode afastar-se muito de **Ae**.

Uma consequência é a impossibilidade de usar os valores numéricos do diagrama para determinar as fracções mássicas das fases formadas.

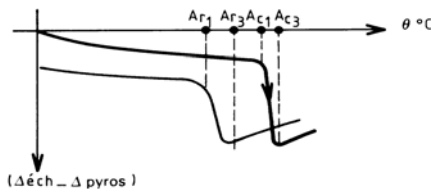


Influência da velocidade de arrefecimento sobre os pontos de transformação (cont.)

A dilatometria absoluta ou diferencial permite a determinação da posição dos pontos críticos. Na segunda técnica compara-se em cada instante a dilatação dum provete do aço com um provete de referência (pyros). A curva registada é:

$$(\Delta_{\text{prov.}} - \Delta_{\text{pyros}}) = f(\theta) \quad (\Delta : \text{dilatação})$$

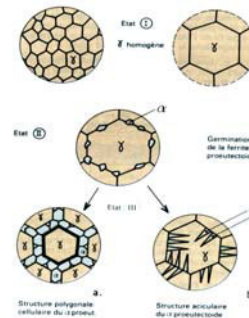
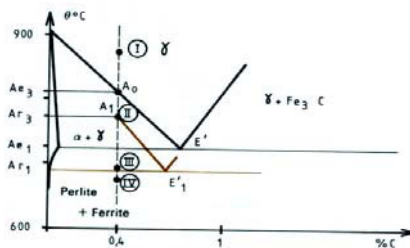
A interpretação destes registos baseia-se no facto da transformação $\alpha \rightarrow \gamma$ se dar com uma contracção e inversamente com uma dilatação, e que $\alpha_{\alpha} < \alpha_{\text{pyros}} < \alpha_{\gamma}$.



Influência da velocidade de arrefecimento sobre a microestrutura

O diagrama de equilíbrio permite determinar a natureza dos constituintes mas não permite prever a morfologia que define a microestrutura do metal. Esta microestrutura que depende das condições de germinação e crescimento é fixada pelas condições de arrefecimento.

Caso dum aço com 0,4%C:



Influência da velocidade de arrefecimento sobre a microestrutura (cont.)

O espaço inter-lamelar, Δ , na perlite depende também da velocidade de arrefecimento, V : Δ diminui com V (para aumentar a velocidade de difusão, o espaço entre as lamelas reduz-se; a distância que o C percorre para se distribuir entre a ferrite e a cementite diminui)

Em resumo:

- O aumento da velocidade de arrefecimento conduz a estruturas com mais perlite (aços hipo) e cada vez mais **finas**, tanto dos grãos ferríticos (poligonais equiaxiais → poligonais irregulares → aciculares) como da perlite o que se traduz num aumento da tensão limite de elasticidade.
- O controlo da velocidade de arrefecimento é então um meio de controlar a microestrutura dos aços.

Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas**

Os aços hipoeutectoides não ligados são as ligas ferrosas mais utilizadas. No estado ferrito-perlítico, fornecem as soluções mais correntes em construção metálica (pontes, vigas, chapas para carroçaria,...)

As **propriedades mecânicas** deste tipo de aço dependem:

- das **fracções mássicas**, determinadas pelo diagrama de equilíbrio,
- dos **parâmetros microestruturais**: tamanho de grão **d** da ferrite e espaço inter-lamelar **Δ** da perlite, que dependem da velocidade de arrefecimento a partir do estado austenítico.

Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas** (cont.)

Características mecânicas dos constituintes dos aços no estado recozido

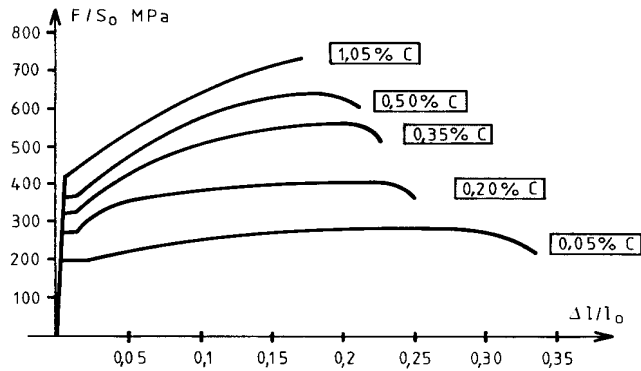
	Ferrite	Perlite	Cementite
σ_r (MPa)	300	850	
Dureza	80 HB	180 HB	700 a 800 HV
A%	40	15	

Influência dos parâmetros micro-estruturais

	σ_c	Tenacidade ao choque
Se d ↓	↑	↑
Se Δ ↓	↑	↓

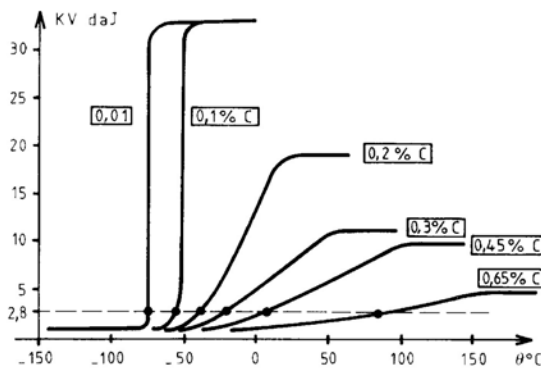
Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas** (cont.)

Influência da % de C sobre as características de tracção



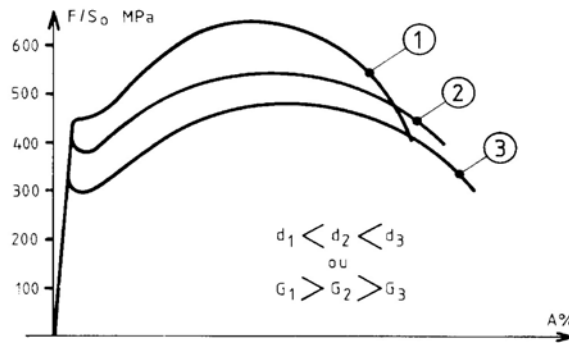
Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas** (cont.)

Influência da % de C sobre as características de tenacidade ao choque



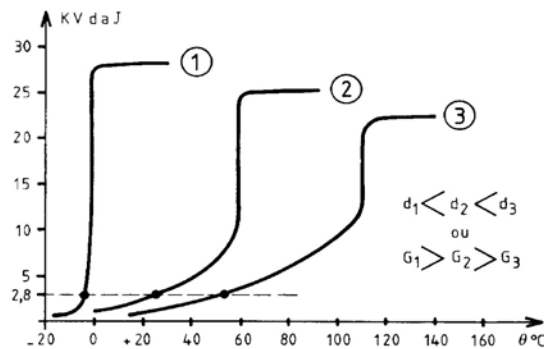
Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas** (cont.)

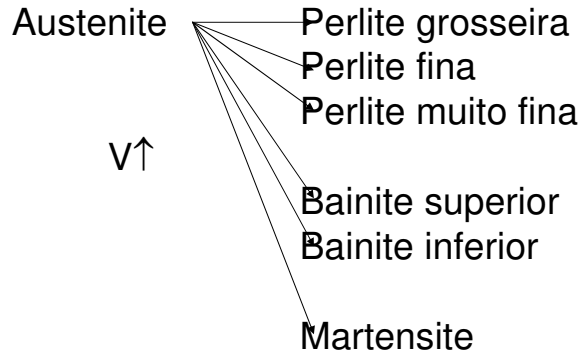
Influência da microestrutura sobre as características de tração



Relação entre a **microestrutura** e as **propriedades mecânicas** (cont.)

Influência da microestrutura sobre as características de tenacidade ao choque





•Com difusão
•Transf. isotérmicas

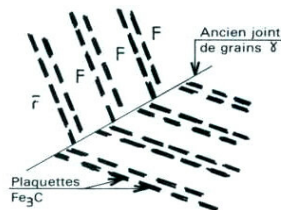
•Sem difusão
•Transf. atérmica

Com o aumento de V, vão-se formando estruturas menos de acordo com o diagrama de equilíbrio Fe-C

Transformação bainítica

Bainite superior

A ferrite forma-se em ripas, e carbonetos de ferro precipitam entre essas ripas paralelamente a estas. A presença inter-ripas dos carbonetos frágeis dá más propriedades de tenacidade à bainite superior.



Microscopia electrónica



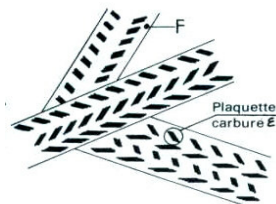
Aço 4360,
transformado a
495°C, 750x

Microscopia óptica

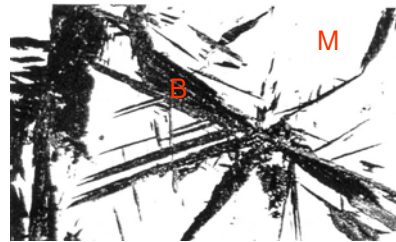
Transformação bainítica

Bainite inferior

A ferrite é cada vez mais acicular. A difusão do C também se torna difícil. As agulhas de ferrite estão sobre-saturadas em C. Os carbonetos de ferro ϵ precipitam no interior das agulhas sob a forma de pequenas placas muito finas, semi-coerentes com a matriz ferrítica. Há um endurecimento por precipitação dando um bom compromisso entre o limite elástico e a tenacidade.



Microscopia electrónica



Microscopia óptica

Aço 4360,
transformado a
300°C, 750x

Transformação martensítica

Ao contrário das transformações vistas anteriormente, as transformações martensíticas caracterizam-se por pura e simples ausência de difusão. Por outras palavras, com um arrefecimento muito intenso - em água fria p. ex^o - suprime-se a movimentação atómica.

No caso dos aços, a possibilidade de endurecer o aço por transformação martensítica é sujeita a 2 condições indispensáveis:

•**uma condição metalúrgica:**

- existência dum domínio austenítico (γ)
- existência da transformação ($\gamma \rightarrow \alpha$)

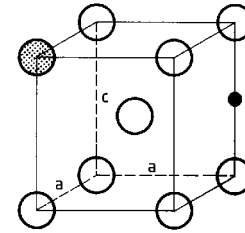
•**uma condição térmica:**

possibilidade de arrefecer o aço a uma velocidade suficiente a partir do estado austenítico de maneira a provocar a formação de constituintes fora de equilíbrio, nomeadamente a martensite.

Transformação **martensítica** (cont.)

A difusão não intervindo na transformação martensítica, a martensite tem por conseguinte a mesma composição que a austenite inicial (que pode ser diferente da do aço se a austenitização for parcial). Em particular a martensite está sobressaturada em carbono em relação a uma ferrite de equilíbrio.

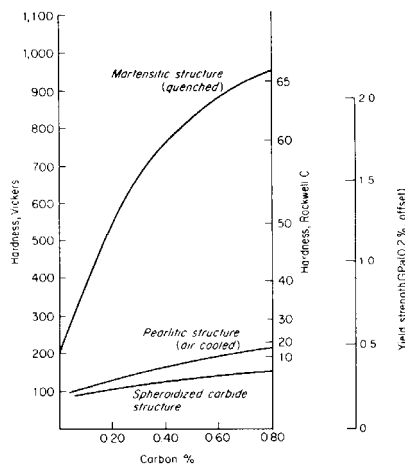
A martensite tem uma estrutura cristalina quadrática ou tetragonal centrada na qual os átomos de carbono em inserção ocupam preferencialmente os interstícios 'z'. A relação c/a da malha depende essencialmente do teor em carbono.



Malha de martensite
• átomo de C (interstício 'z')

A martensite é um constituinte de dureza elevada. Esta dureza é devida a uma forte densidade de deslocações associada a um caso extremo de endurecimento por solução sólida de inserção do carbono.

Transformação **martensítica** (cont.)

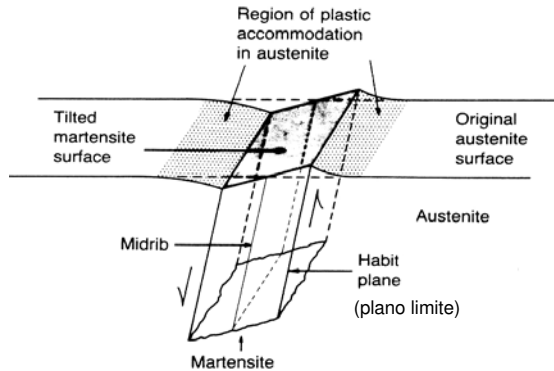


A dureza da martensite depende principalmente do teor em carbono da austenite que a origina.

Transformação **martensítica** (cont.)

A martensite é obtida por corte complexo da rede de austenite, i.e., por movimento cooperativo dos átomos todos numa certa direcção de pequena distância. Aparece à escala micrográfica sob a forma de pequenas placas ou de agulhas.

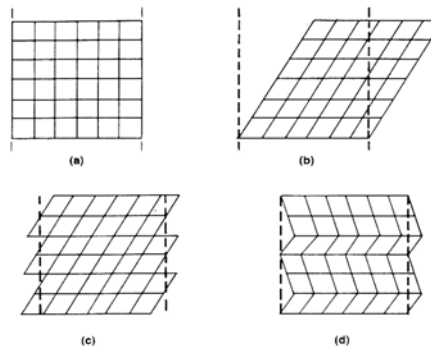
Os germes de corte são induzidos pelas concentrações locais de tensões. A formação duma agulha de martensite está associada a uma micro-relevo



Transformação **martensítica** (cont.)

Porquê que a martensite está cheia de deslocações e maclas?

A deformação da rede causa a rotação do cristal inicial. No entanto a fase mãe que está à volta obriga a unidade de martensite a acomodar-se ou deformar-se de maneira a ficar dentro das fronteiras iniciais. Na fig. (c) a martensite deforma-se por deslizamento e na (d) por maclagem. Quanto maior for a % de C maior é a deformação.



Transformação **martensítica** (cont.)

Morfologia da martensite

%C > 1: placa

agulhas grandes e pequenas orientadas aleatoriamente

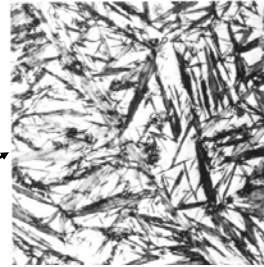
visíveis no microscópio óptico

%C < 0,6: rede ou massiva

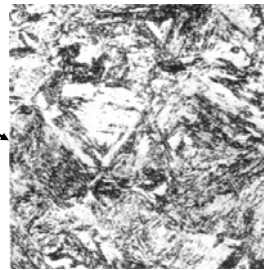
pequenas agulhas que aparecem muito mais ordenadas

visíveis apenas na microscopia electrónica

0,6 < %C < 1: mista



%C = 1,5
×150

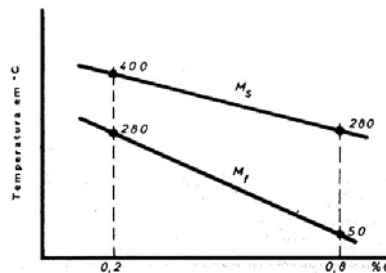


%C = 0,15
×250

Transformação **martensítica** (cont.)

Temperaturas M_s e M_f

A austenite começa a transformar-se em martensite a uma temperatura M_s (*martensite start*). A temperatura M_f (*martensite finish*) corresponde ao fim da transformação $A \rightarrow M$. Se a temperatura do banho θ_i de têmpera é tal que $M_s > \theta_i > M_f$, a transformação martensítica é incompleta. A austenite não transformada em martensite é a austenite residual γ_{res} .



Transformação **martensítica** (cont.)

Para aços cujos teores em carbono e elementos de liga são suficientemente elevados, o ponto M_f encontra-se nitidamente abaixo da temperatura ambiente. Depois da têmpera pode então haver uma quantidade de austenite residual mais ou menos importante.

- A presença de γ_{res} pode ter uma influência sobre:
 - as **características mecânicas**: diminuição de σ_R , σ_E , H...
 - a **estabilidade dimensional**: a transformação $\gamma_{res} \rightarrow M$ pode ter lugar por encruamento (ex: pista de rolamentos de um rolamento)
- Pode-se diminuir a percentagem de γ_{res} :
 - por um tratamento criogénico (frio) à volta de -80 até -120°C (mais próximo de M_f),
 - por revenido após têmpera



Mestrado Integrado Engenharia Mecânica
Materiais Construção Mecânica I

Aula 3

Lucas F M da Silva

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Conteúdo



- Diagramas de transformação
isotérmica e **contínua**
- Aços ligados

Diagrama de transformação isotérmica

Estudo, durante o estágio a uma temperatura θ_i , da evolução qualitativa e quantitativa da fase austenítica em função do tempo.

Por análise micrográfica, dilatométrica, térmica,...

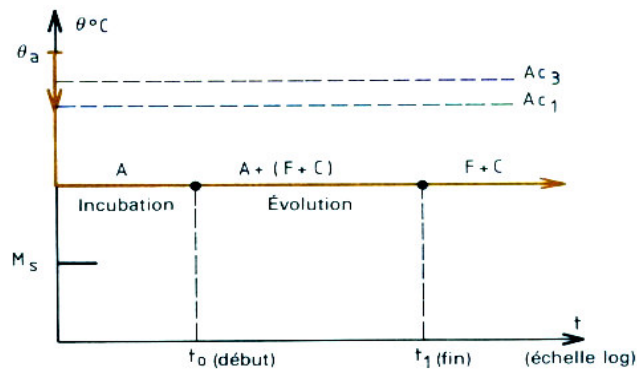
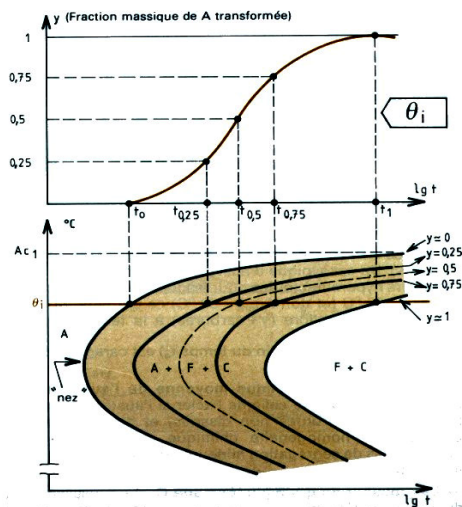


Diagrama de transformação isotérmica

Transformações com difusão

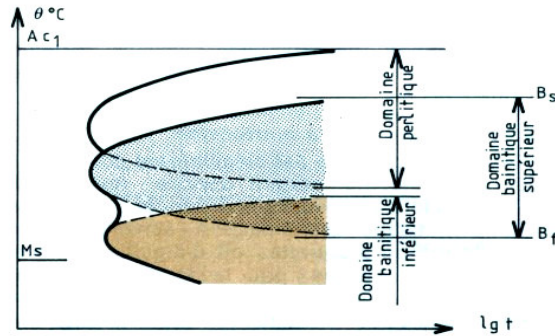
Quando a temperatura do banho está entre A_1 e M_s : $A \rightarrow F + C$

Fazendo variar θ_i , determina-se $t_0(\theta_i)$: início de transformação de A
 $t_1(\theta_i)$: fim de transformação de A
 $t_y(\theta_i)$: fracção mássica y de A transformada
 e tem-se assim as curvas iso-austeníticas



Transformações com difusão

Existem 3 categorias de transformação dando 3 tipos de agregados F+C; perlítica, bainítica superior e bainítica inferior. Cada uma destas transformações corresponde a 1 "C" de isoaustrénicas.



Transformações sem difusão

Quando a temperatura $\theta_i < M_s$, a A dá M. A cada temperatura θ_i , uma fracção mássica de A transforma-se em M. Um estágio isotérmico entre M_s e M_f não modifica a taxa de avanço da reacção: é uma transformação atérmica. As isoaustrénicas são paralelas ao eixo do tempo.

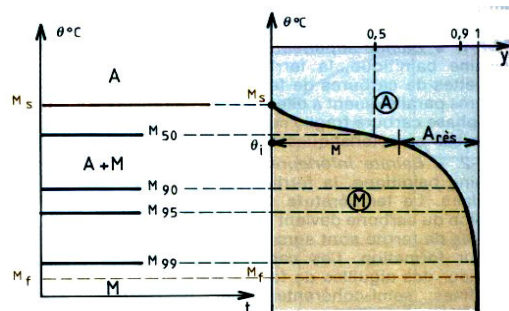


Diagrama de transformação isotérmica

O porquê da forma em “C” da curva

Um produto de transformação (perlite ou bainite) forma-se a partir da austenite por germinação e crescimento.

O **crescimento** do produto de transformação é tanto mais rápido quanto maior for a temperatura.

A **germinação** é tanto mais rápida quanto menor for a temperatura.

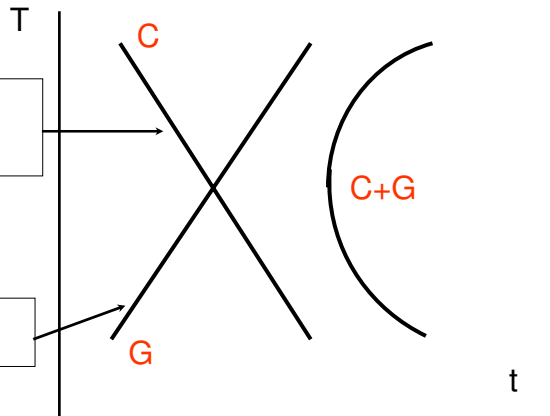
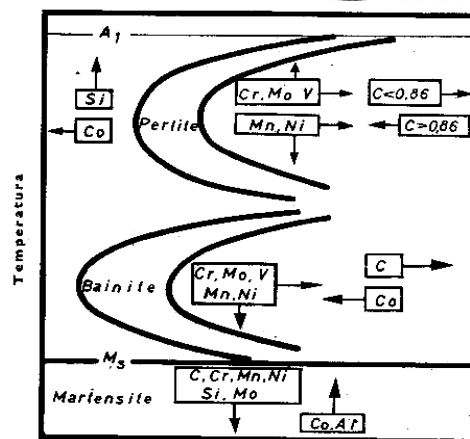


Diagrama de transformação isotérmica

Parâmetros que influenciam as transformações da A

Composição da A



Todos os elementos de liga (excepto Co) aumentam os tempos de incubação puxando as curvas para a direita; propriedade essencial (ver temperabilidade) e que justifica o uso dos aços ligados para tratamentos térmicos.

Parâmetros que influenciam as transformações da A

Condições de austenitização, θ_a e t_a

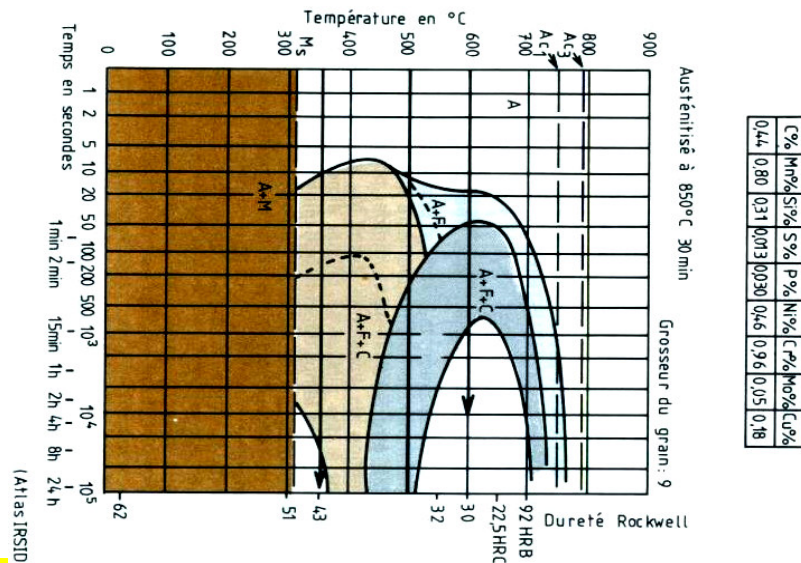
Composição química da A

Pode ser diferente da do aço se a austenitização for parcial

Tamanho de grão da austenite

O aumento do tamanho de grão aumenta os tempos de incubação

Interpretação



4.2 C 4

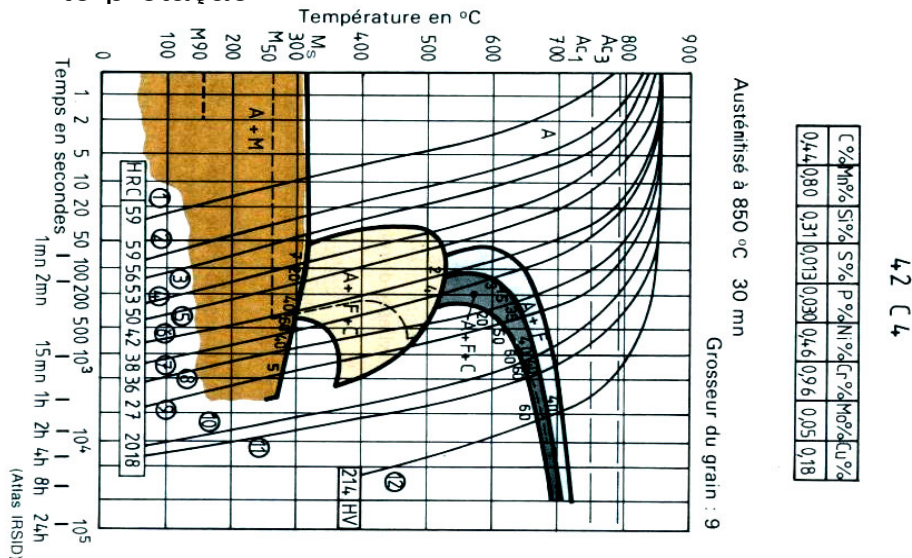
Introdução

Amostras de pequenas dimensões, depois de austenitizadas, são submetidas a leis de arrefecimento diferentes, indo de alguns graus por hora a centenas de graus por segundo.

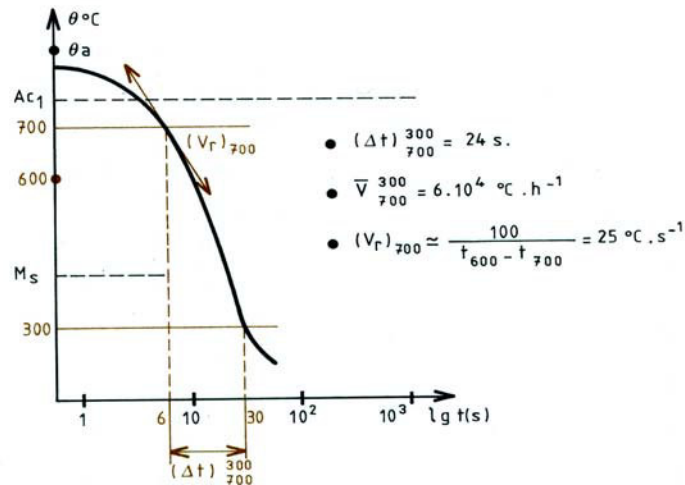
Pode-se assim simular aproximadamente as leis de arrefecimento caracterizando os diferentes locais duma peça desde o núcleo até a superfície.

Para um mesmo aço e condições de austenitização idênticas, as curvas em arrefecimento contínuo estão deslocadas para a direita e para baixo relativamente às transformações isotérmicas.

Interpretação



Parâmetro de arrefecimento



Definição e designação

As propriedades dos aços ao carbono não são suficientes para certas aplicações. Os aços ligados são usados para:

- Melhorar a **temperabilidade**
→ aços ligados para tratamento térmico
- Melhorar comportamento a **temperaturas extremas**
→ aços resistentes à fluência
→ aços refractários
→ aços para temperaturas negativas
- Melhorar comportamento em **meios agressivos**
→ aços inoxidáveis
- etc...

Os aços ligados são pelo menos ligas ternárias. Como os aços ao carbono, estão sempre presentes o Si, Mn, S e P (elementos de elaboração, desoxidação Si)

Definição e designação

Um aço diz-se ligado com um certo elemento se o seu teor ultrapassar os seguintes valores:

Cr	Ni	Mo	V	W
0,25%	0,50%	0,10%	0,05%	0,30%
Co	Ti	Cu	Al	P+S
0,30%	0,05%	0,35%	0,10%	0,12%

Aços de pouca liga: o teor total dos elementos de liga é inferior a 5%

Aços de muita liga: o teor total dos elementos de liga é superior a 5%

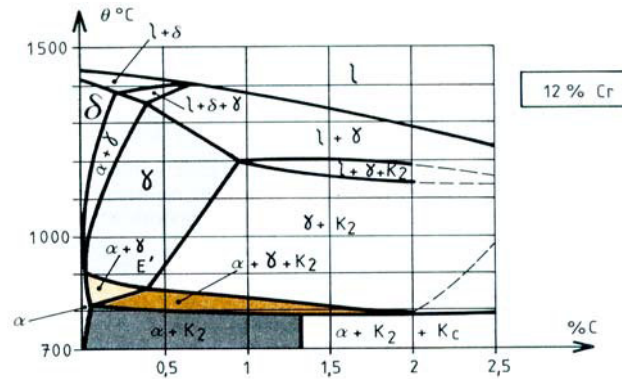
A norma AFNOR A 35-610 reúne e comenta as equivalências entre os aços franceses e os aços DIN (Alemanha), ASTM, SAE, AISI (US), BS (UK), JIS (Japão), etc...

Tomando como referência o diagrama binário Fe-C, pode-se classificar a influência dos elementos de liga em 3 pontos principais:

- modificação das temperaturas de transformação e dos teores correspondentes à transformação eutética e eutectoide
- modificação da extensão dos domínios da ferrite (α) e da austenite (γ): efeito gamageno ou alfageno
- modificação da natureza dos carbonetos em equilíbrio dependendo do carácter carburígeno ou não carburígeno

Transformação eutectoide

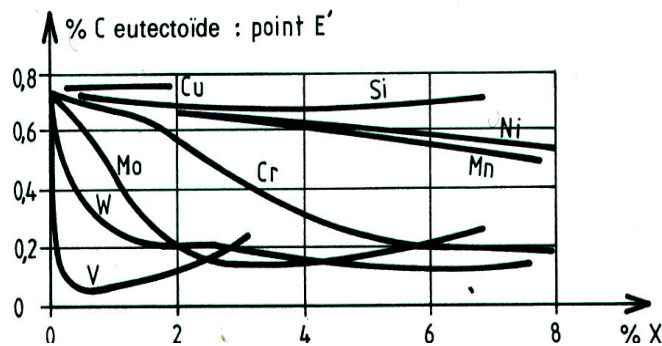
Corte pseudo-binário



Neste exemplo a % em C do ponto eutectoide é de 0,4%: a perlite dum aço ligado tem sempre um teor em carbono inferior à dum aço não ligado.

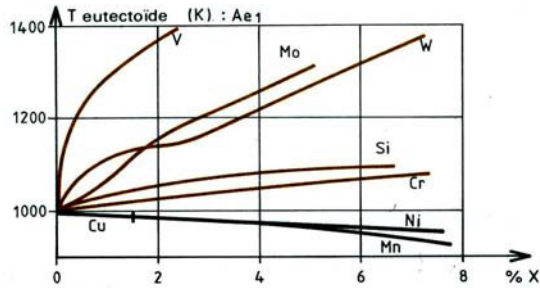
Transformação eutectoide

Influência dos elementos de liga nas características do eutectoide



Fórmula de **M. Aall** para o cálculo do deslocamento do ponto eutectoide
 $\%C = 0,86 - 0,09Mn - 0,065Cr - 0,03Ni - 0,13Mo - 0,3V - 0,06Co - 0,08Ti$

Temperaturas de transformação

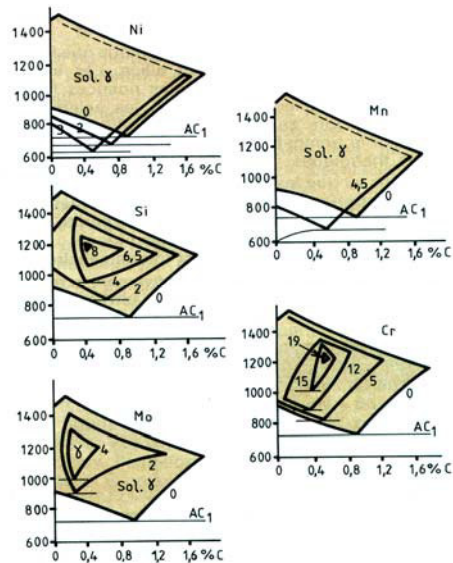


Fórmula de **Andrews** para A_{c1} , válida para aços de pouca liga com $\%C < 0,6$
 $A_{c1}(^{\circ}C) = 727 - 10,7(\%Mn) - 16,9(\%Ni) + 29,1(\%Si) + 16,9(\%Cr) + 6,38(\%W) + 290(\%As)$

Fórmula de **Andrews** para A_{c3} , válida para aços de pouca liga com $\%C < 0,6$
 $A_{c3}(^{\circ}C) = 912 - 203(\%C)^{0,5} - 15,2(\%Ni) - 30(\%Mn) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) + 13,1(\%W)$

Efeito **gamageno** ou **alfageno**

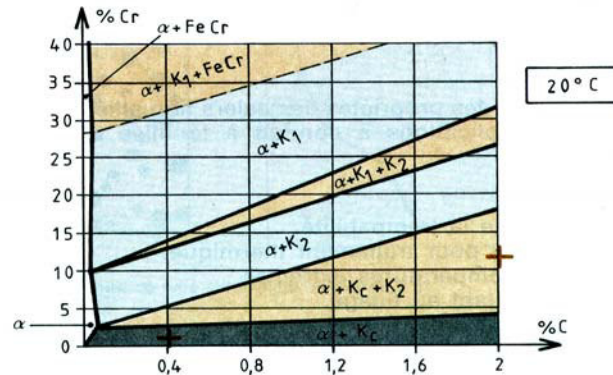
Modificação do domínio γ com os elementos de liga Ni, Mn, Si, Mo, e Cr (cortes pseudo-binários)



Natureza dos carbonetos

Se a aproximação for válida, pode-se utilizar gráficos bidimensionais sob a forma de

Corte ternário isotérmico



No estado de equilíbrio, 42C4: $\alpha + (\text{Fe, Cr})_3\text{C}$
Z200C12: $\alpha + (\text{Fe, Cr})_3\text{C} + (\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$

Elementos carburígenos e não carburígenos

A presença do C nos aços pode conduzir à formação de carbonetos com elementos de liga. A afinidade termodinâmica dos diversos elementos com o C conduz à seguinte classificação:

Si-Al-Cu-Ni-Co-Fe-Mn-Cr-Mo-W-V-Ti-Nb

Os carbonetos podem ser de 2 tipos:

- **cementites ligadas**: $(\text{Fe, X})_3\text{C}$
- **carbonetos especiais**: $(\text{Fe, X})_m\text{C}_n$

- Si, Al, Cu, Ni, e Co estão repartidos todos na α
- Mn, Cr, W, Mo estão repartidos entre a α e os carbonetos
- V, Ti, Zr, Nb estão repartidos sobretudo nos carbonetos

Mestrado Integrado Engenharia Mecânica
Materiais Construção Mecânica I

Aula 4

Lucas F M da Silva

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Conteúdo

Tratamentos térmicos:

- **Recozido** (difusão, normalização, amaciamento e distensão)
- **Têmpera**
 - Temperabilidade
- **Revenido**

Introdução

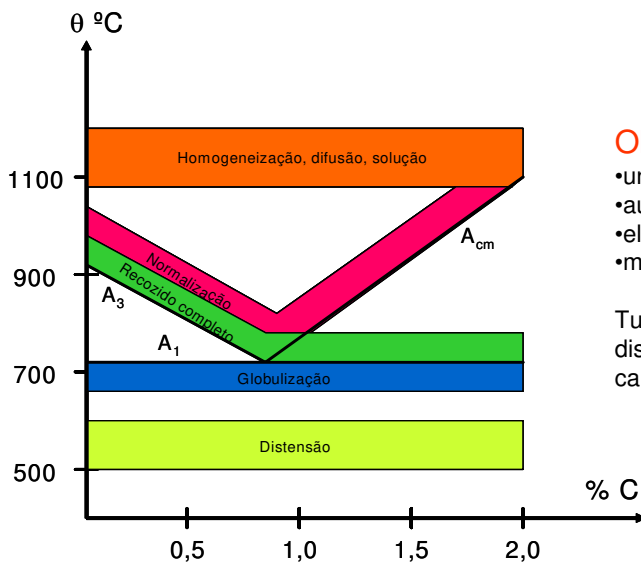
Um aço pode encontrar-se num estado fora do equilíbrio e (ou) com heterogeneidades estruturais devido a tratamentos térmicos ou mecânicos anteriores.

Exemplos:

- segregações durante o processo de solidificação
- encruamento por deformação a frio
- tensões residuais de soldadura, etc...

Os **recozidos** são tratamentos que permitem a obtenção de um estado próximo do **equilíbrio** termodinâmico provocando a formação de estruturas de ferrite + carbonetos depois da passagem por um estado total ou parcialmente austenítico.

Assim, elimina-se ou reduz-se os efeitos nefastos de tais estados, para operações posteriores sobre o metal ou para a utilização correcta do aço.



Objectivos:

- uniformização de estruturas
- aumentar a ductilidade
- eliminar as tensões residuais
- melhorar a maquinabilidade

Tudo à custa de modificações na distribuição e forma da ferrite e carbonetos

Recozido ou recozido completo

Estágio ligeiramente acima de A_{c_3} para os aços hipoeutectoides ou $A_{c_1}+50^{\circ}\text{C}$ para os aços hipereutectoides, seguido dum arrefecimento lento no forno, sobretudo no intervalo crítico de transformação.

No caso dos aços hipoeutectoides, a ferrite e a perlite são grosseiras: resistência e dureza baixas e ductilidade elevada.

No caso dos aços hipereutectoides, a globulização parcial da cementite proeutectoide permite evitar a fragilização devido à formação duma rede de cementite.

Recozido de homogeneização (ou difusão)

O objectivo é eliminar as heterogeneidades estruturais (segregações, gradientes de concentração química) através de uma **repartição mais homogénea dos componentes** solúveis, por **difusão**. Realizado normalmente nos aços em lingote pois podem possuir estrutura pouco homogénea, após vazamento.



Aço vazado com 0,28%C

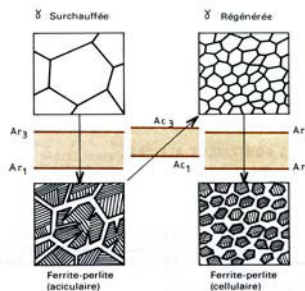
Observa-se o crescimento do grão austenítico, austenite uniforme e homogénea, melhor capacidade de trabalho mecânico e comportamento uniforme do aço aos posteriores tratamentos térmicos.

Se o grão aumentar de tamanho, pode-se fazer um recozido de normalização ou têmpera e revenido de modo a afiná-lo.

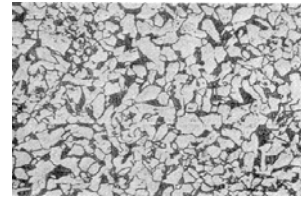
Recozido de normalização

O objectivo é obter uma **estrutura homogênea. Reduzir o tamanho de grão** da ferrite e da perlite. Criar uma estrutura favorável para a têmpera (eliminar alinhamento de carbonetos, estruturas aciculares, fibras de laminagem,...).

Aquecimento acima de A_{c3} e A_{cm} . Estágio curto para não aumentar o tamanho de grão. Arrefecimento ao ar.



Processo de afinamento do tamanho de grão.

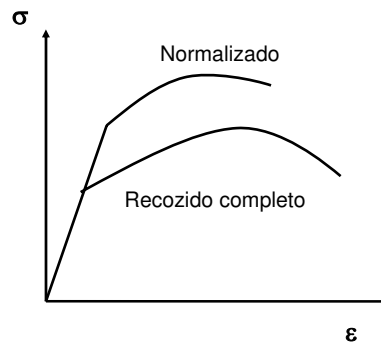
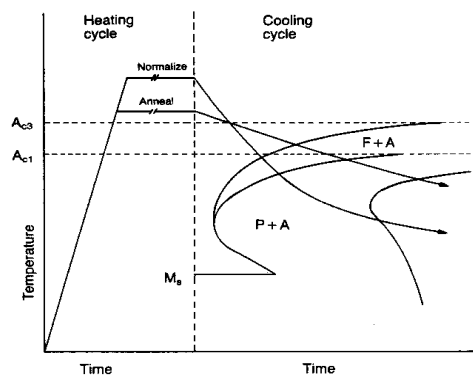


Aço normalizado com 0,28%C

As estruturas ferrito-perlíticas obtidas são finas.

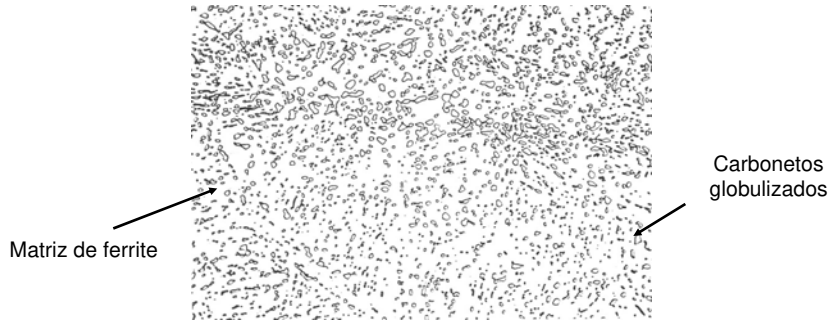
Nota: os aços temperáveis ao ar, de muita liga, não são normalizáveis a não ser por meio de recozidos isotérmicos.

Recozido completo vs recozido de normalização



Recozido de amaciamento ou globulização

A estrutura mais macia de um aço é aquela em que todos os carbonetos, incluindo a cementite, se apresentam sob a forma de pequenas **partículas esféricas, finamente dispersas pela matriz.**

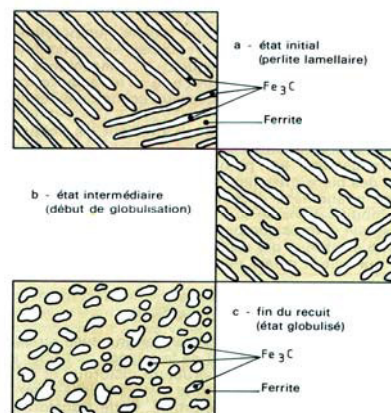


A boa ductilidade de estruturas globulizadas é importante para aços com pouco carbono para serem trabalhados a frio. Para aços com muito carbono, melhora a maquinabilidade.

Recozido de amaciamento ou globulização

Amaciamento a partir de uma **perlite lamelar** (o mais longo)

- Aços hipo: aquecimento abaixo de A_{c1}
- Aços hiper: aquecimento acima de A_{c1} ou aquecimentos e arrefecimentos alternados à volta de A_1 , o que diminui a estabilidade da cementite, arredondando-a.
- Estágio de 2 horas, dependendo da composição
- Arrefecimento lento até 500°C e depois livre.

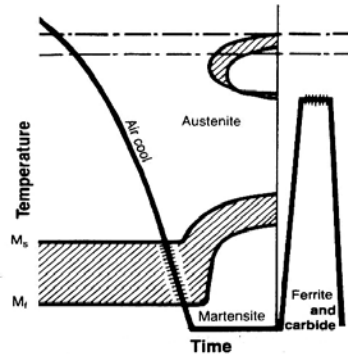


Recozido de amaciamento ou globulização

Amaciamento directo

Austenitização total ou parcial (uma austenite heterogénea favorece a formação de uma perlite globular) e estágio a uma temperatura ligeiramente inferior a A_1 .

Amaciamento de aços que temperam ao ar
Têmpera + revenido próximo de A_1



Recozido de distensão

Elimina as tensões residuais, sem modificação das estruturas, devidas a tratamentos térmicos ou mecânicos anteriores.

Exemplos:

- arrefecimento rápido
- soldadura
- maquinagem, trabalho a frio

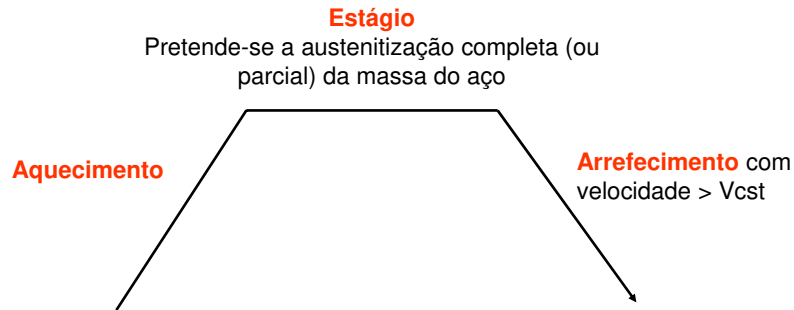
Estas tensões podem conduzir a deformações ou mesmo fissuras na têmpera.

Devido ao fenómeno da restauração, o recozido de distensão não modifica as propriedades mecânicas.

- Aquecimento até 500/620°C
- Estágio de 0,5 a 2 horas
- Arrefecimento lento, para evitar o aparecimento de novas tensões

Introdução

A têmpera, como todos os tratamentos térmicos, é constituída por 3 fases:



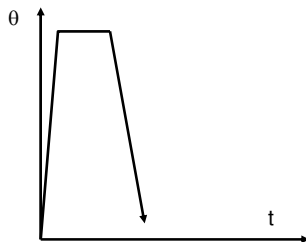
Aumenta: dureza, R_m , R_e , resistência ao desgaste
Diminui: tenacidade ao choque, extensão após rotura, ductilidade

Aquecimento

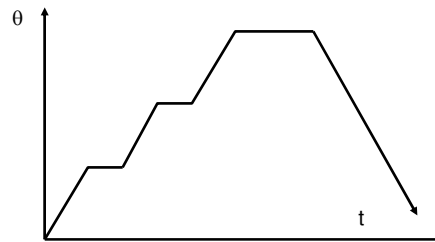
Evitar tensões residuais

É necessário garantir um aquecimento uniforme ao longo de toda a peça com vista a reduzir as tensões internas (devidas a gradientes térmicos) e consequentes deformações.

Aços pouco ligados ou peças de baixa massividade



Aços muito ligados ou peças muito massivas



Aquecimento

Evitar oxidação superficial

Devido à atmosfera oxidante do forno, pode haver oxidação do Fe e do C:

- Se o Fe queimar, a peça fica com uma película de óxidos fácil de detectar e de remover.
- Se o C queimar, não se consegue detectar o problema. Mas o aço fica descarbonizado e a sua dureza superficial é inferior ao esperado.

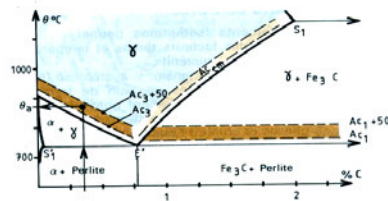
Solução:

Potencial em carbono da atmosfera = teor em carbono do aço:

- caixas de protecção com coque queimado, limalha de ferro fundido ou papel de jornal
- fornos de atmosfera controlada

Estágio

Temperatura



Aços hipo: $Ac_3 + 50^\circ C$
Aços hiper: $Ac_1 + 50^\circ C$

Ac_3 ou Ac_1 podem ser determinadas através de:

- diagrama de equilíbrio
- curvas dilatométricas
- fórmulas empíricas
- diagramas TI ou TC

Nota: Para aços com elementos de liga que formam carbonetos estáveis (ex: aços rápidos) deve-se elevar a temperatura acima de A_{cm} ($300^\circ C$ por vezes) de maneira a dissolvê-los e enriquecer a A em carbono.

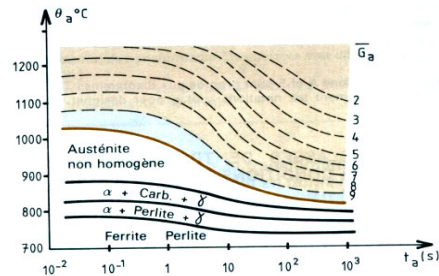
Têmpera

Estágio

Tempo

Depende da dimensão e da composição química:
aços s/ liga ou de pouca liga: 5 min / 10 mm de espessura
aços c/ média liga: 7 min / 10 mm de espessura
aços de muita liga: 10 min / 10 mm de espessura

O tamanho de grão da austenite G_a , que dita os resultados da têmpera, depende fundamentalmente da temperatura mas também do tempo.



Têmpera

Estágio

Temperatura e tempo limitados

Aço sobreaquecido: crescimento exagerado do grão austenítico, o que causa fragilidade

Aço queimado: estrutura grosseira e frágil devido à fusão de impurezas que cercam os grãos

Arrefecimento

Deve-se utilizar a velocidade de arrefecimento mais lenta possível mas superior à V_{cst} .

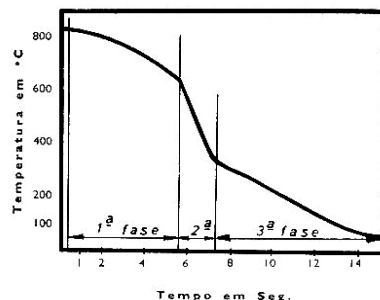
A lei de arrefecimento $\theta(t)$ depende da condutibilidade térmica do metal, da forma e dimensões da peça e do poder de arrefecimento do fluido de têmpera e da agitação do banho.

Grossman classificou os fluidos de têmpera em função da sua **severidade**, expressa em mm^{-1} ou em in^{-1} .

Nature de l'agitation	Eau salée	Eau	Huile	Air
Agitation nulle	2	0,9-1,0	0,25-0,3	0,02
Agitation faible	2-2,2	1,0-1,1	0,30-0,35	—
Agitation modérée	—	1,2-1,3	0,35-0,40	—
Agitation forte	—	1,4-1,5	0,5-0,80	0,05
Agitation violente	5	4	0,8-1,1	—

Arrefecimento

Porquê água com sal?



1ª fase - Capa de vapor

Formação de uma capa de vapor. O vapor isola a superfície e produz um arrefecimento lento.

2ª fase - Transporte de vapor

Eliminação da capa de vapor. A água, em contacto com a superfície, vaporiza. Há continuamente água em contacto com a superfície. Arrefecimento rápido.

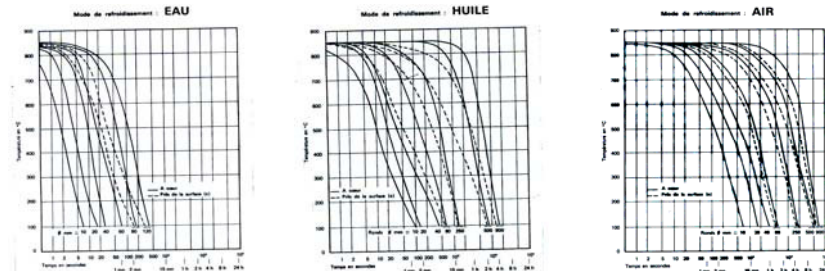
3ª fase - Arrefecimento por líquido

Quando a temperatura do aço está abaixo da temperatura de ebulição, a vaporização pára e o arrefecimento é por líquido. Arrefecimento lento.

Arrefecimento

Utilização das curvas de arrefecimento sobre transparentes

A AFNOR fornece curvas de arrefecimento para formas simples e diversos meios, traçadas nas mesmas coordenadas que as curvas TRC.



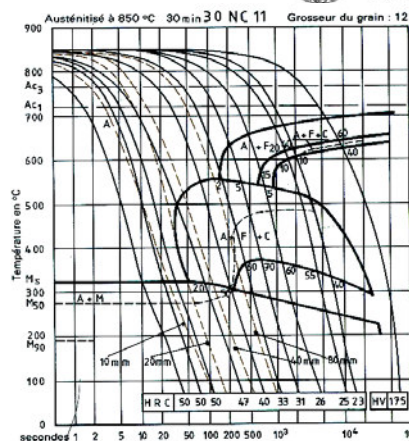
A sobreposição nos diagramas TRC permite determinar se a velocidade de arrefecimento é superior à V_{cst} , as durezas após têmpera e ligá-las à constituição.

Arrefecimento

Utilização das curvas de arrefecimento sobre transparentes

Exemplo: aço 30NC11
Óleo

- φ 10 mm 50 HRC; 100% M
- φ 20 mm 50 HRC; 100% M
- φ 40 mm 45 HRC; 20% B, 80% M
- φ 80 mm 37 HRC; 60% B, 40% M

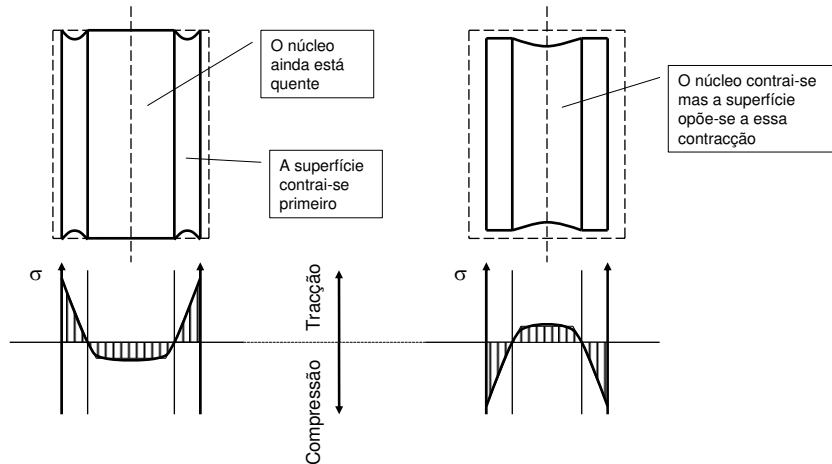


Pode-se assim:

- Escolher uma qualidade de aço que permita obter, para uma peça de determinadas dimensões, arrefecida de forma definida, as características mecânicas exigidas.
- A partir de uma peça, fabricada num dado aço, determinar o tratamento térmico necessário para obter as características requeridas.

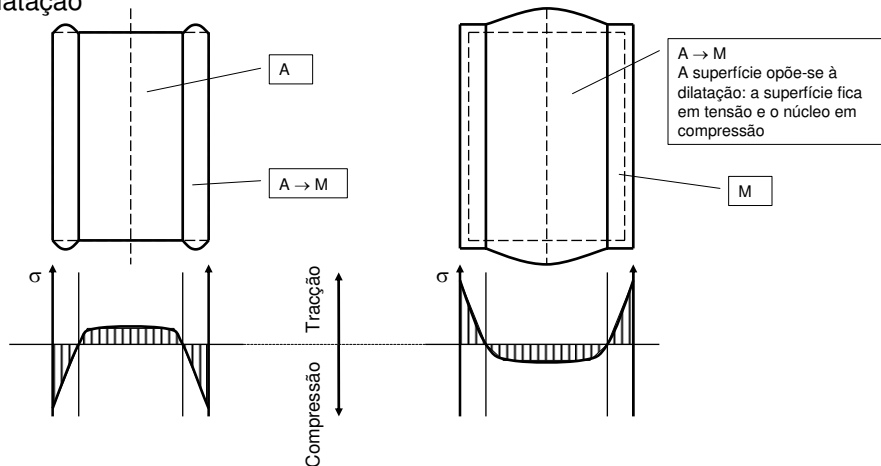
Arrefecimento

Tensões residuais devidas aos gradientes térmicos
Tensões criadas pela contracção



Arrefecimento

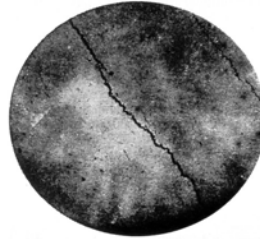
Tensões residuais devidas aos gradientes térmicos
Tensões criadas pela transformação A \rightarrow M, que se dá com uma dilatação



Arrefecimento

Tensões residuais devidas aos gradientes térmicos

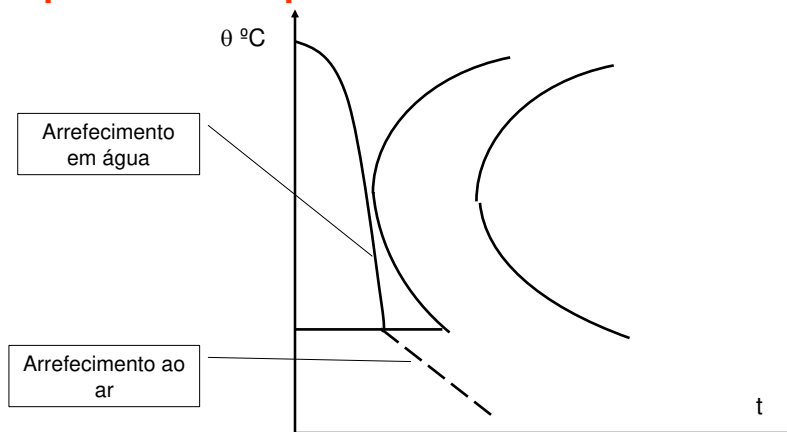
A existência de gradientes térmicos conduz a heterogeneidades de deformação que introduzem um campo de tensões residuais (TR).
se $TR > Re \rightarrow$ deformações
se $TR > Rm \rightarrow$ fissuras



Os riscos aumentam com a severidade do meio de arrefecimento (aumentam os gradientes térmicos), com a massividade da peça e com o teor em carbono.

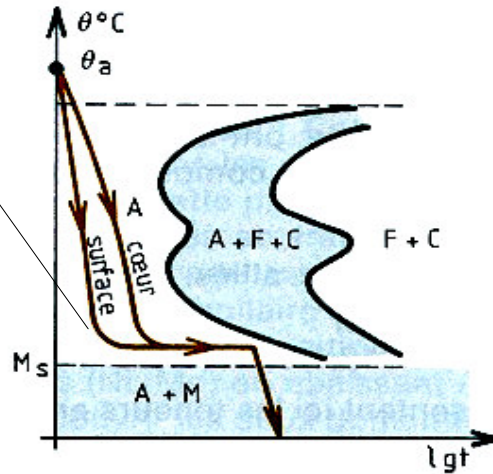
Para diminuir os riscos de deformações e fissuras pode-se fazer:

Têmpera interrompida



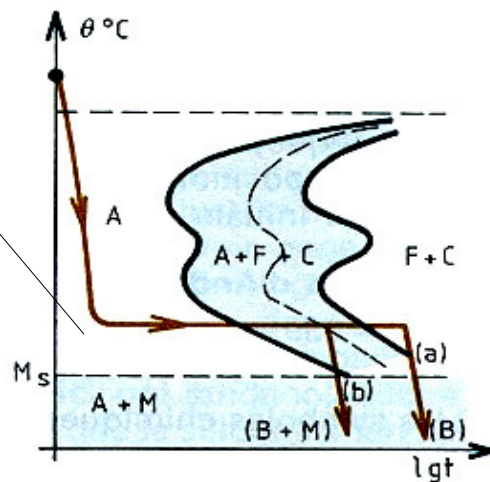
Martêmpera

Arrefecimento num banho quente (sais) a uma temperatura ligeiramente superior a M_s , de maneira a garantir a uniformização da temperatura em toda a peça.



Austêmpera

Arrefecimento num banho quente (sais) a uma temperatura superior a M_s , e estágio até atingir a transformação bainítica



Definição

Os diagramas TRC mostram que é mais ou menos difícil obter uma estrutura martensítica. A temperabilidade traduz essa maior ou menor facilidade.

A **temperabilidade** de um aço caracteriza a sua capacidade em evitar a formação de agregados F+C para arrefecimentos cada vez mais lentos de θ_a a M_s .

Ou seja, quanto mais lento for o arrefecimento que conduz à transformação A→M, maior é a temperabilidade do aço.

Factores que influenciam a temperabilidade

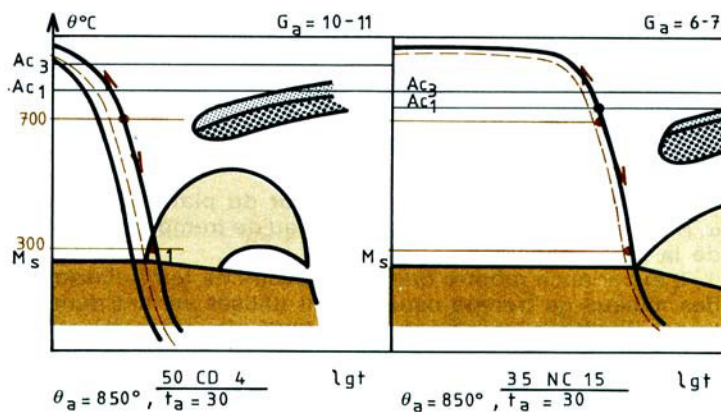
De maneira geral, todo o factor que tem influência nos tempos de incubação A→F+C, ou seja na velocidade de germinação da F ou C, tem uma acção directa sobre a temperabilidade:

- Os **elementos de liga** em solução na A (excepto Co) retardam a germinação dos carbonetos e aumentam a temperabilidade. Mas a presença de precipitados ou de inclusões pode favorecer a germinação e diminuir a temperabilidade
- As condições de austenitização que fixam o tamanho de grão da A, G_a . Um aumento de G_a melhora a temperabilidade mas piora as propriedades mecânicas.

O **conhecimento** da temperabilidade é feito através de:

- **Diagramas TRC**
- **Curvas em U** (curvas de penetração de têmpera)
- **Diâmetro crítico**
- **Ensaio Jominy**

A **velocidade crítica superior de têmpera** (V_{cst}) é a menor velocidade de arrefecimento que permite obter 100% de martensite. É a tangente ao “nariz” da curva.

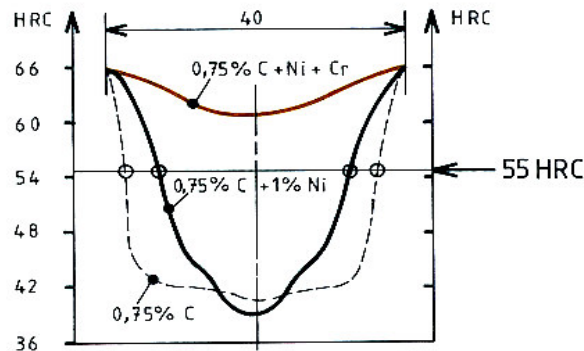


No arrefecimento, as velocidades de arrefecimento variam de um ponto para outro da peça. Para um meio de têmpera determinado e uma dada dimensão, cada ponto da peça tem uma lei de arrefecimento (a mais lenta no núcleo e a mais rápida na periferia).

Assim a diferença de temperabilidade entre 2 aços traduz-se por uma diferença de **penetração de têmpera**.

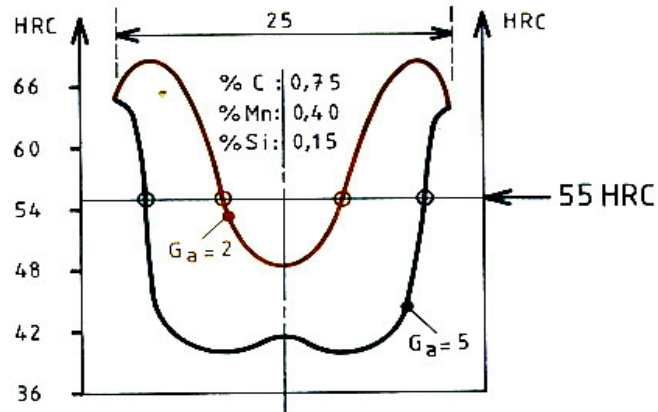
Esta penetração de têmpera pode ser quantificada por medição da dureza depois do tratamento, em função da posição na peça → **curvas em U**.

Influência do Ni e Cr num aço com 0,7% de C: a adição de **elementos de liga** aumenta a penetração de têmpera. A dureza 55 HRC corresponde à dureza crítica (50% de martensite)



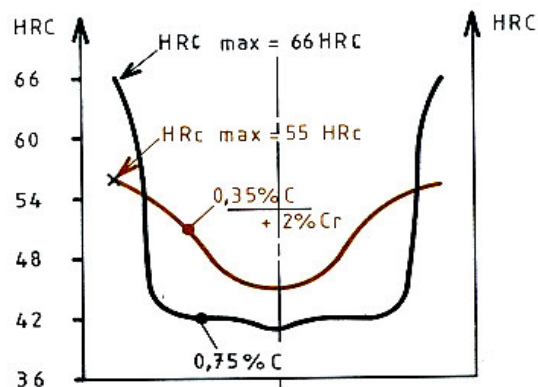
Temperabilidade - Curvas em U

Influência do **tamanho de grão**: um grão mais grosseiro melhora a penetração de têmpera.



Temperabilidade - Curvas em U

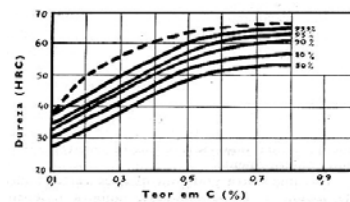
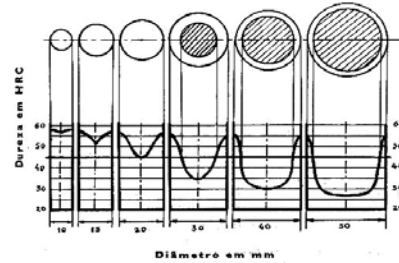
Temperabilidade (depende dos elementos de liga) vs **capacidade de endurecimento** (depende da % de carbono)



Temperabilidade - Diâmetro crítico

O **diâmetro crítico** (para um dado meio de arrefecimento) é aquele a partir do qual deixa de aparecer no núcleo da peça uma zona com dureza inferior a 50% de martensite (considerando que 50% de martensite representa uma estrutura não temperada). Se ϕ crítico aumenta então a temperabilidade aumenta.

A **dureza crítica** é a dureza para 50 % de martensite.

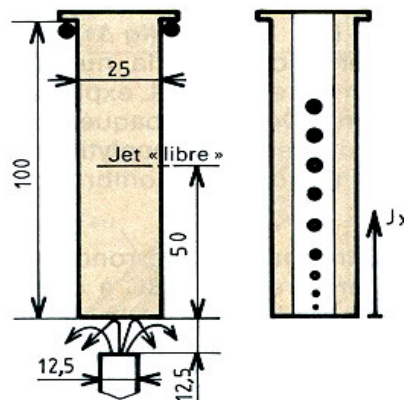


Temperabilidade - Ensaio Jominy

No ensaio Jominy obtém-se numa só operação e num provete normalizado indicações globais sobre a temperabilidade dos aços: **curva Jominy**. Este ensaio está descrito na norma NP-1680.

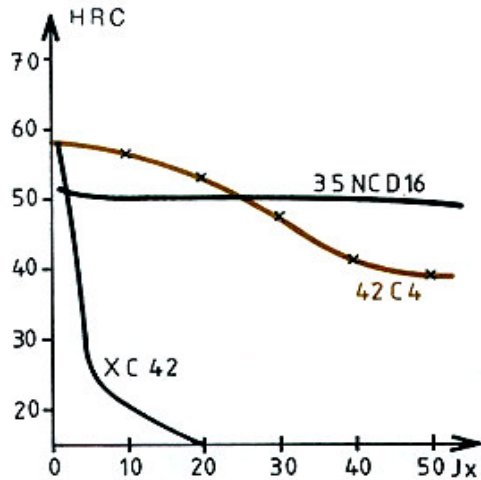
É feito em **3 etapas**:

- **austenitização** dum provete maquinado no aço a testar e de dimensões normalizadas. A temperatura depende do aço e o tempo é de 30 min.
- **arrefecimento** na extremidade do provete por um jacto de água de acordo com a norma
- medição da **dureza** ao longo duma geratriz realizada por rectificação ao longo de todo o comprimento. Os pontos de medida da dureza estão situados a 1,5-3-5-7-9-11-13-15-20-30-40-50-60-70-80 mm da extremidade arrefecida e são designados por $J_{1,5}$ - J_3 - J_5 -...- J_x .



Temperabilidade - Ensaio Jominy

Os resultados do ensaio são apresentados numa curva $HRC=f(J_x)$ chamada **curva Jominy** do aço.

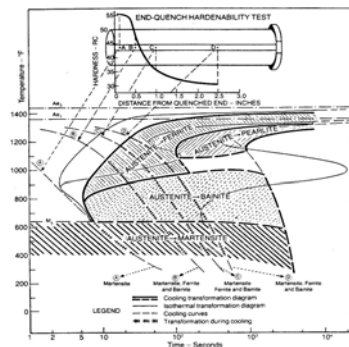
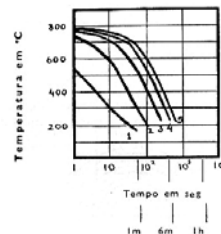


O aço 35NCD16 é o que tem maior temperabilidade

Temperabilidade - Ensaio Jominy

O estudo experimental do arrefecimento do provete Jominy permitiu definir uma velocidade de arrefecimento para cada ponto J_x .

Assim é possível prever, a partir da curva TRC o andamento da curva Jominy.



Introdução

Depois da têmpera o aço tem:
Rm, Re e H elevados mas A(%) e tenacidade ao choque (K) baixas e muitas tensões internas.

O revenido destina-se a corrigir esses inconvenientes. Fica-se com um compromisso satisfatório entre Rm, Re, H e A(%) e K.

O revenido provoca uma evolução do material para um estado mais próximo do estado de equilíbrio sem atingí-lo completamente.

É um tratamento térmico após têmpera que consiste num aquecimento a temperaturas inferiores a A_1 , estágio a essa temperatura e arrefecimento posterior, geralmente ao ar.

Transformações das **estruturas**

As propriedades mecânicas obtidas no revenido dependem das transformações dos constituintes obtidos depois da têmpera.

A ferrite, a perlite e a bainite que estão relativamente próximas do estado de equilíbrio praticamente não se alteram.

A **martensite** e a **austenite residual** nitidamente fora de equilíbrio é que vão transformar-se sendo responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas.

Transformação da **martensite**

Caso dos aços não ligados e ligados não contendo elementos de liga que formam carbonetos.

1ª zona - até 100-150°C

O carbono deixa os interstícios ϵ e segrega nos defeitos cristalinos (deslocações). É uma zona de pré-precipitação. A segregação pára para um teor de 0,25% C. Diminuição das tensões internas por diminuição da deformação da martensite.

2ª zona - entre 130 e 250-300°C

Precipitação do carboneto ϵ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$). Isto conduz a uma contracção volúmica cuja amplitude aumenta com a % de C.

Nota: durante a transformação martensítica entre M_s e M_f e para arrefecimentos lentos pode haver um autorevenido da martensite com pré-precipitação ou mesmo precipitação de ϵ .

Transformação da **martensite**

Caso dos aços não ligados e ligados não contendo elementos de liga que formam carbonetos.

3ª zona - entre 300 e 450°C

A martensite tetragonal passa a martensite cúbica com formação de Fe_3C e desaparecimento de ϵ . A cementite começa por ter a forma de pequenas placas que a partir de 450°C e até A_{c1} , globulizam e aumentam de volume por coalescência, fenómenos acompanhados duma diminuição de R_m , R_e , H e aumento de $A(\%)$ e K .

Ni , Mn e sobretudo o Si retardam a coalescência da cementite.

Transformação da **martensite**

Caso dos aços ligados contendo elementos de liga que formam carbonetos.

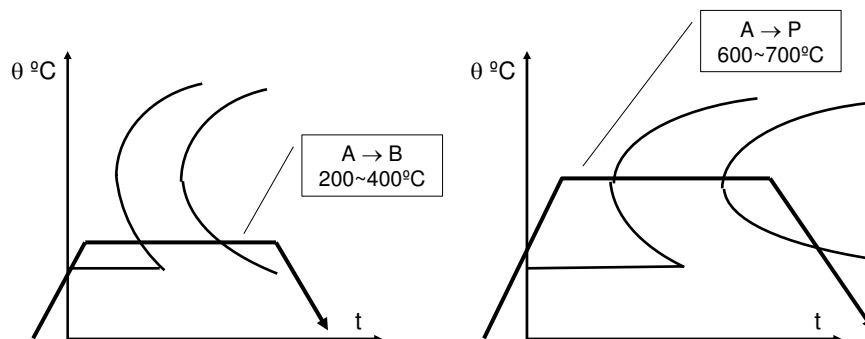
A presença dos elementos V, Mo, W, Ti, Nb em quantidade suficiente provoca o aparecimento duma 4ª zona.

4ª zona - > 450°C

Formação de carbonetos ligados, mais estáveis do que a cementite. Estão dispersos na matriz sendo mais finos e mais resistentes à coalescência do que a cementite. Há endurecimento por precipitação (ou secundário) da ferrite.

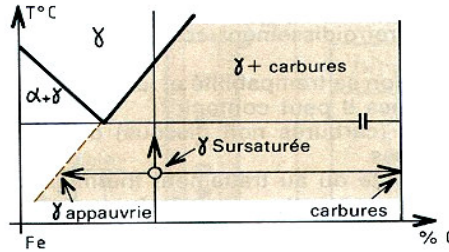
Transformação da **austenite residual**

O revenido é um estágio isotérmico e a evolução da austenite é descrita pelas curvas TI.



Transformação da **austenite residual**

Para os aços muito ligados e com muito carbono, outro fenómeno pode ocorrer:
à volta de 500~600°C a austenite residual que está sobre-saturada em C fica mais pobre em C.

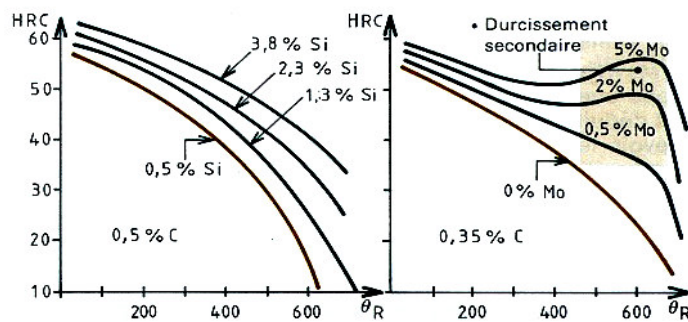


O ponto M_s sobe e no arrefecimento a $\gamma_r \rightarrow M$, chamada martensite secundária.

Evolução das **propriedades mecânicas**

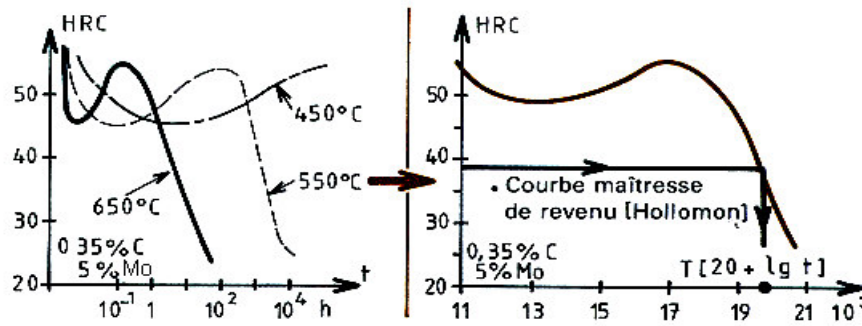
Os principais parâmetros que vão ter influência no revenido são:
→ a composição química
→ θ_r e t_r

Influência da composição química



Evolução das propriedades mecânicas

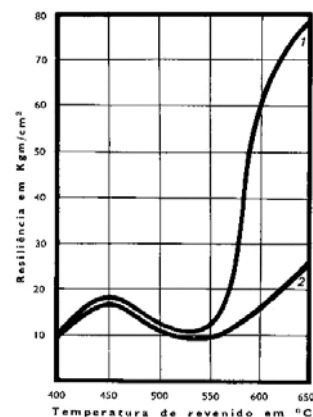
Influência de θ_r e t_r



Evolução das propriedades mecânicas

A evolução da tenacidade ao choque é relativamente complexa. Regista-se no entanto:

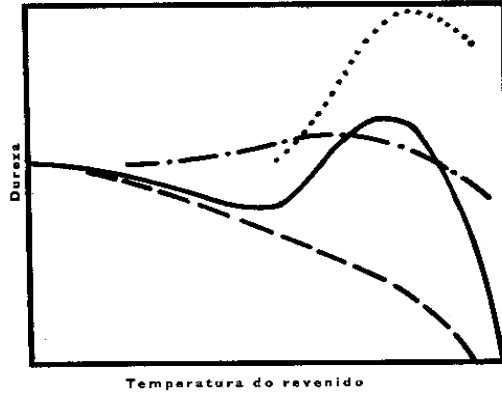
- **fragilização por envelhecimento** ou por revenido baixo de 200 a 320°C. O Si desloca essa zona para os 500°C
- **fragilização Krupp** na zona 450-525°C. O Mo elimina esta fragilidade. Outra solução será revenir os aços a temperaturas acima de 550°C e arrefecer rapidamente ao passar nesta zona.



1- água
2- forno

Evolução das **propriedades mecânicas**

Para o caso dum aço rápido há então que distinguir vários fenómenos:



- comportamento do aço rápido no revenido
- - - influência da martensite revenida
- . - . influência da precipitação de carbonetos provocada pelo revenido
- influência da austenite revenida (formação de martensite).