

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA I (EM0022)

**2º Semestre
2010/11**

F. Jorge Lino Alves

**(Prof. Associado da FEUP/DEMec)
Investigador do INEGI**

**L106, Ext.: 1704 (1742)
(falves@fe.up.pt, www.fe.up.pt/~falves)**

DOCENTES

Teóricas: Viriato Antunes

**Práticas: Jorge Lino (3 turmas)
Lucas Silva (4 turmas)
Tomé Ribeiro (2 turmas)**

**Local:
Laboratório de Materialografia (L101)
Laboratório de Tratamentos Térmicos (edifício M)**

OBJECTIVOS DE MCM I

MCM I destina-se a dar aos estudantes do MIEM um conhecimento teórico-prático dos mecanismos que alteram o comportamento mecânico dos materiais metálicos e que permitem uma selecção de materiais mais racional.

MCM I deverá dar uma visão dos **materiais metálicos** disponíveis para a selecção de materiais em construção mecânica. Não se pretende formar especialistas em tratamentos térmicos, contudo numa época em que toda a gente “sabe” como se faz mas nunca fez, a realização de um tratamento térmico no âmbito do estudo mais amplo de um dado material é fundamental.

Objectivos principais:

1. Raciocínio sobre os princípios dos tratamentos térmicos dos aços e ferros fundidos e algumas ligas não ferrosas;
2. Métodos de aumentar a resistência mecânica (estática, à fadiga, à fluência, etc.);
3. Relação entre a microestrutura e as características mecânicas. O uso da metalografia para este tipo de análise.
4. Capacidade de selecção para os diferentes tipos de aços e ferros fundidos e ligas não ferrosas.

Aulas práticas

1. O diagrama de equilíbrio ferro - carbono

- 1.1 Formas alotrópicas do ferro
- 1.2 Solubilidade do carbono no ferro. Fases ricas em carbono: carbonetos de ferro e grafite. Diagrama estável e metaestável
- 1.3 Linhas de temperatura críticas
- 1.4 Definição de estruturas em arrefecimento lento das ligas Fe-C
- 1.5 Mecanismos de endurecimento e efeitos nas propriedades mecânicas do aço
 - 1.5.1. Controle da quantidade de carbonetos
 - 1.5.2. Controle dos elementos de liga
 - 1.5.3. Controle da velocidade de arrefecimento

2. Diagramas de transformação isotérmica e contínua

- 2.1 Transformação da austenite em transformação isotérmica ou arrefecimento contínuo.
- 2.2 Diagramas isotérmicos (TI) e contínuos (TC). Efeito dos elementos de liga nos diagramas TI e TC.

3. Tratamentos térmicos dos aços

- 3.1. Recozido: recozido completo, recozido de alívio de tensões e de recristalização
- 3.2. Esferoidização
- 3.3. Normalização
- 3.4. Distensão
- 3.5. Temperabilidade: diagramas TRC, curvas em U, Diâmetro crítico e curvas Jominy
- 3.6. Têmpera
- 3.7. Revenido
- 3.8. Tratamentos térmicos superficiais
 - 3.8.1 Cementação
 - 3.8.2 Nitruração
 - 3.8.3 Carbonitruração
- 3.9. Endurecimento por chama e indução
- 3.9. Tensões residuais

Classificação das aulas práticas: 30% da nota da disciplina

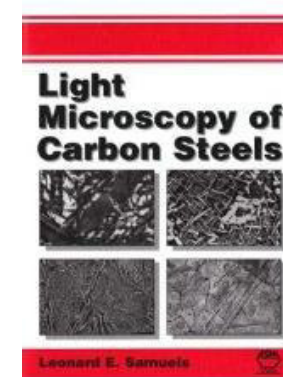
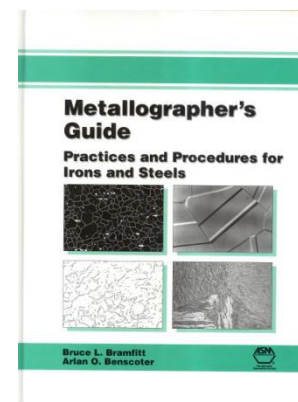
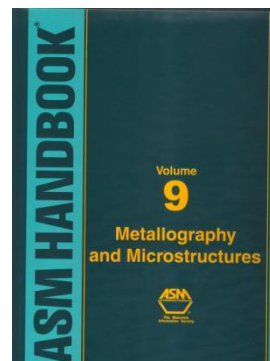
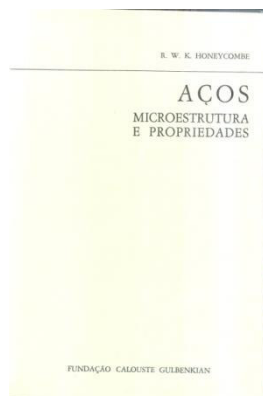
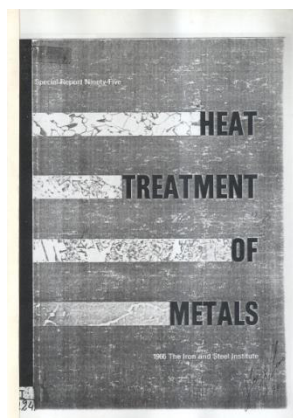
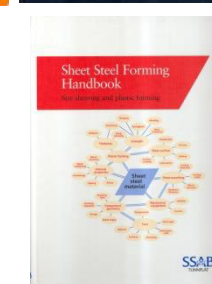
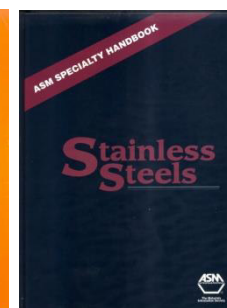
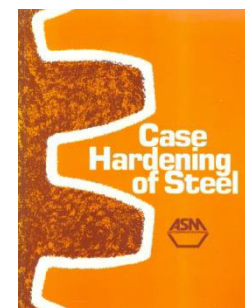
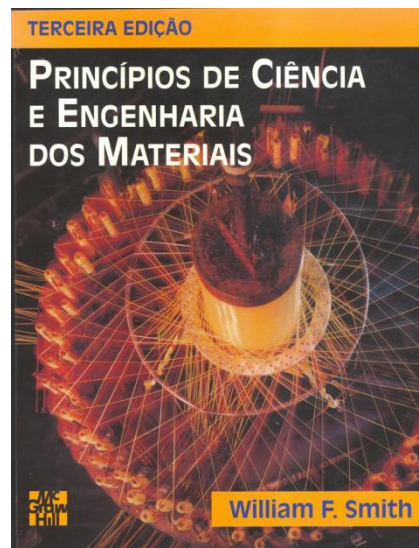
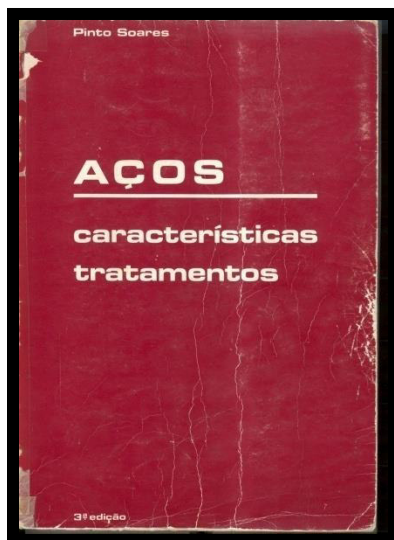
1. Desempenho e participação nas aulas
2. Classificação dos trabalhos de casa (TPC1 e TPC2)
3. Avaliação prática das 4 primeiras aulas
4. Trabalho prático (relatório, poster, apresentação e discussão do trabalho, cd, outros)

Trabalho experimental (grupos 2 pessoas)

1. Definição e execução de um ou vários tratamentos térmicos
2. Corte e montagem de amostras para preparação metalográfica (estado fornecido e tratado)
3. Desbaste e polimento, ataque, análise microscópica e microfotografias
4. Determinação da dureza e ensaios mecânicos (charpy, tracção, etc.)
5. Estudo do efeito do tratamento térmico na alteração das propriedades mecânicas
6. Elaboração de um relatório e sua discussão

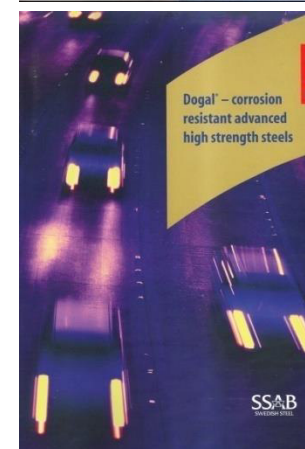
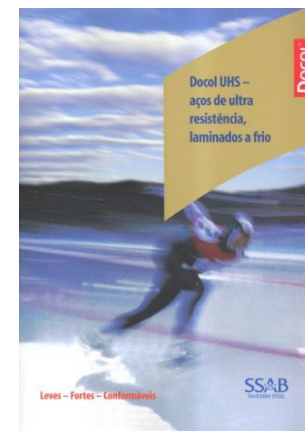
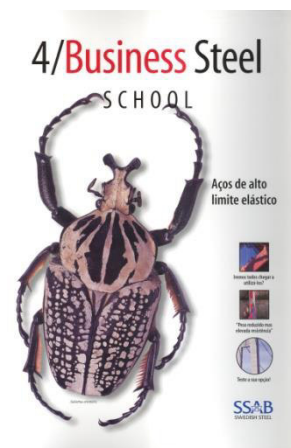
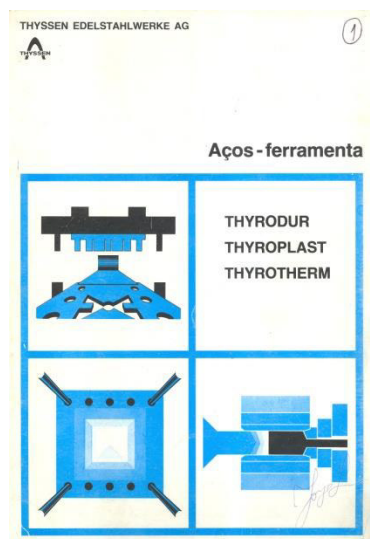
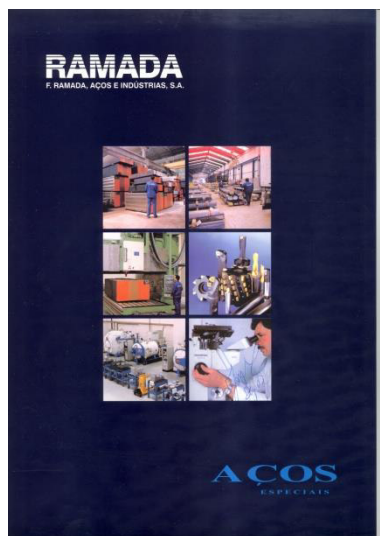
BIBLIOGRAFIA

ALGUNS LIVROS



BIBLIOGRAFIA

Alguns catálogos



MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA I (EM0022)

2º Semestre

AÇOS

1. Diagrama de Equilíbrio das ligas Fe-C

Jorge Lino

SUMÁRIO

- 1. O diagrama de equilíbrio ferro - carbono**
 - 1.1 Formas alotrópicas do ferro**
 - 1.2 Solubilidade do carbono no ferro. Fases ricas em carbono: carbonetos de ferro e grafite. Diagrama estável e metaestável**
 - 1.3 Linhas de temperatura críticas**
 - 1.4 Definição de estruturas em arrefecimento lento das ligas Fe-C**
 - 1.5 Mecanismos de endurecimento e efeitos nas propriedades mecânicas do aço**
 - 1.5.1. Controle da quantidade de carbonetos**
 - 1.5.2. Controle dos elementos de liga**
 - 1.5.3. Controle da velocidade de arrefecimento**

A importância do aço!



ATOMIUM (Bruxelas)

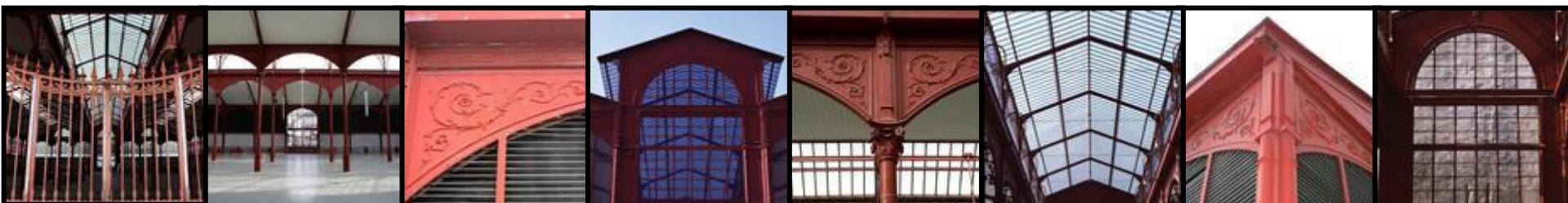
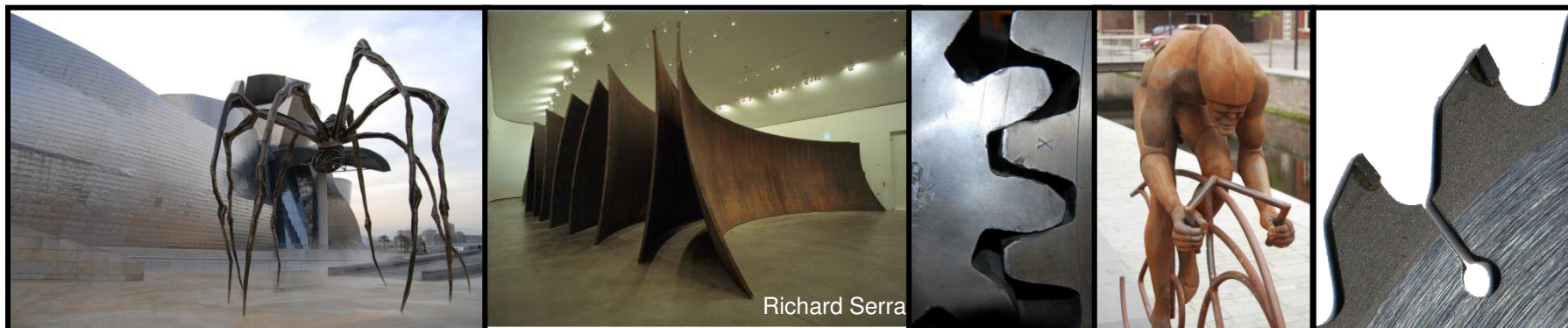
Monumento construído para a Exposição Universal de 1958. Representa a rede **cristalina do ferro (cúbica de corpo centrado)**. Estrutura em aço revestida por alumínio, de 102 metros de altura, é composta por nove esferas de 18 metros de diâmetro, e representa as nove províncias Belgas (após 1 de Janeiro de 1995 passaram a ser 10).

As esferas são ligadas entre si por tubos de 29 m de comprimento e 3 metros de diâmetro.

O peso total é de 2400 toneladas.

A estrutura foi concebida pelo Engenheiro André Waterkeyn e demorou 18 meses a ser construída.

A importância dos materiais na nossa sociedade



Aço?

Ferro?

Inox? Titânio?

Bronze?

Alumínio?

Que diferença faz?

O aço é o metal mais utilizado por 2 razões:

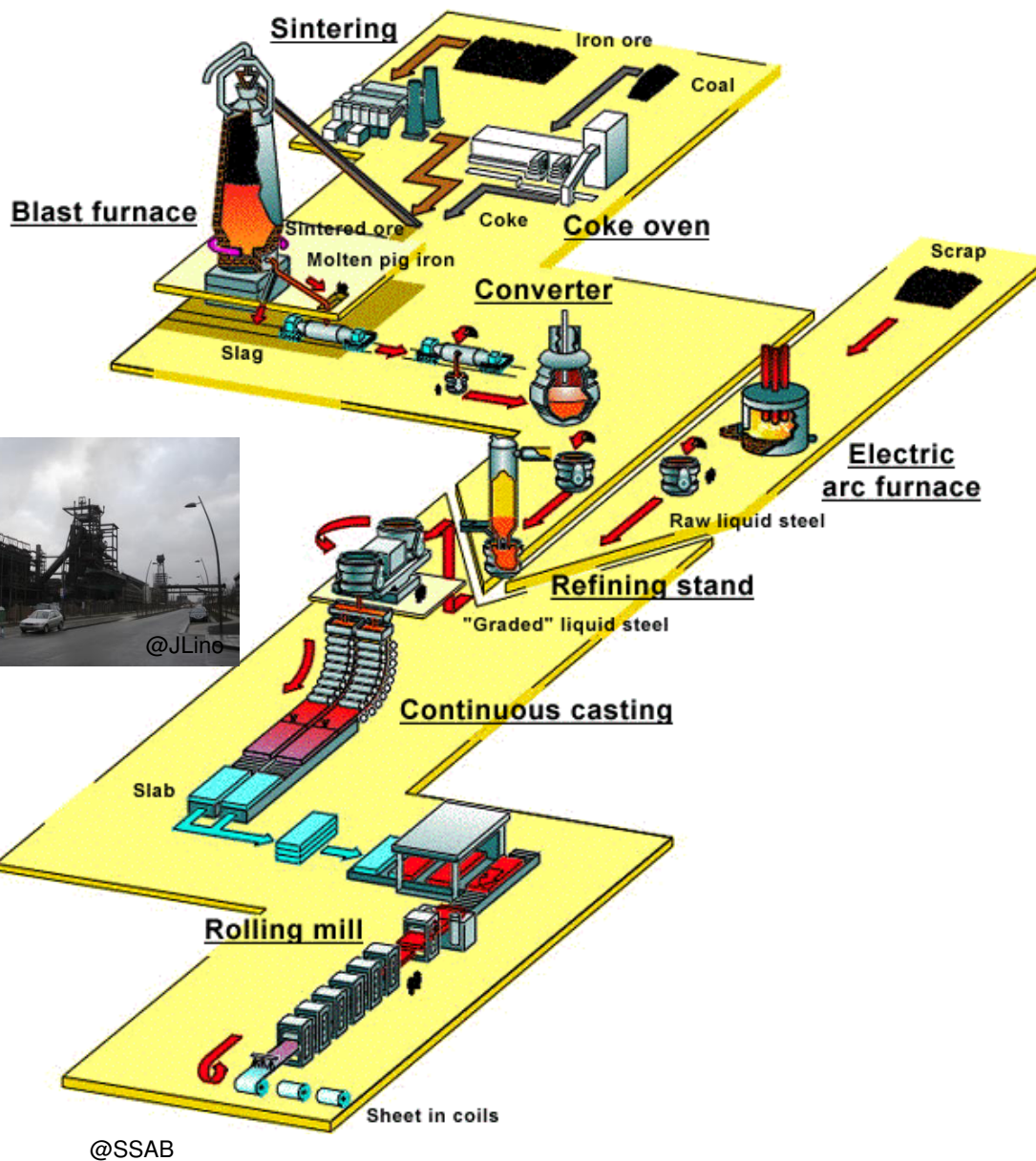
- baixo custo
- excelentes propriedades mecânicas



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 suas propriedades 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.

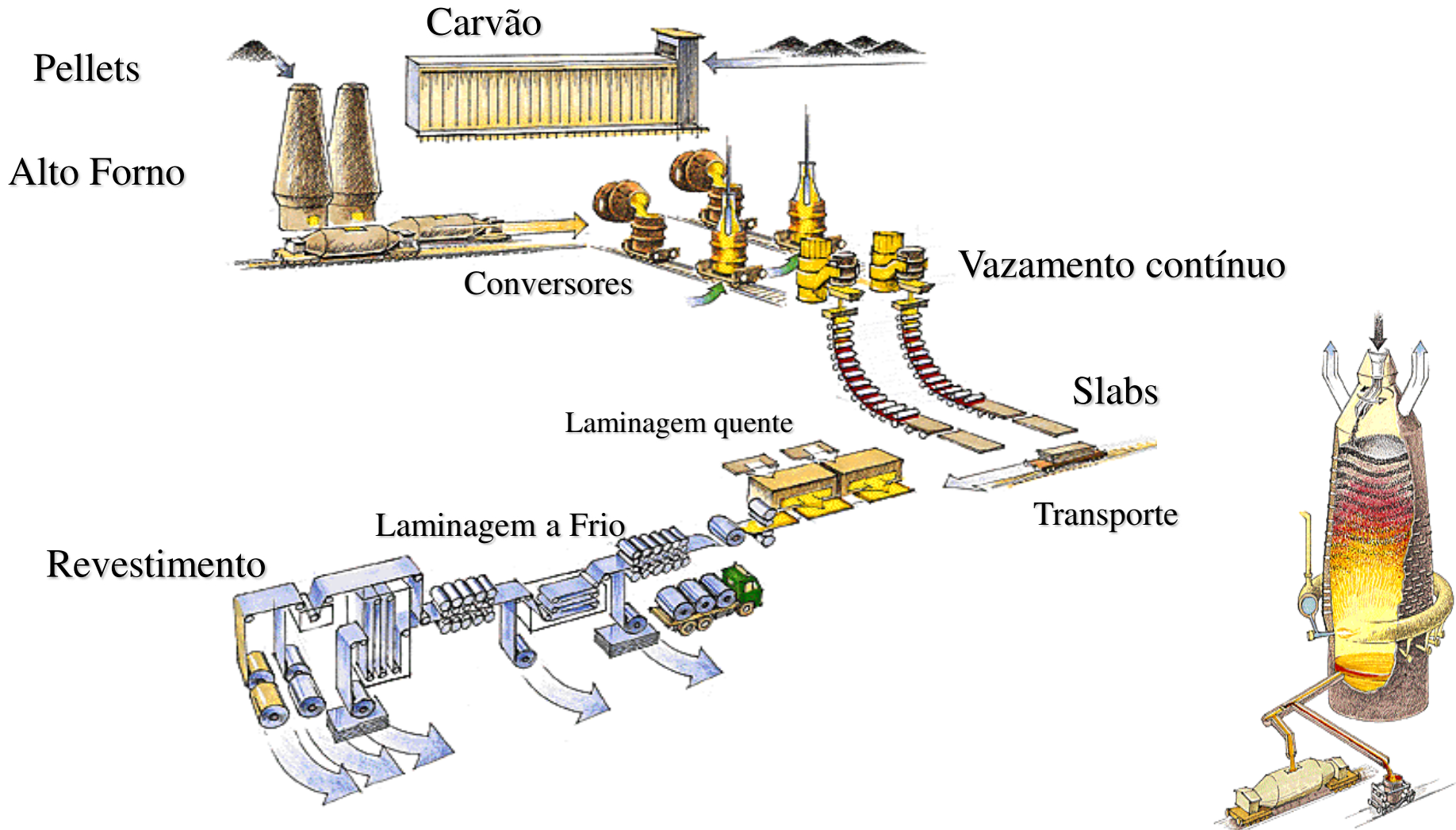
- Processo com minério de ferro ⇒ alto forno
- Processo com sucata ⇒ forno de arco eléctrico.

O aço fundido é vazado em contínuo (ou em lingotes) ⇒ produtos semi-acabados:

- brames - secção rectangular para produtos em chapa.
- blooms - secção quadrada para perfis.

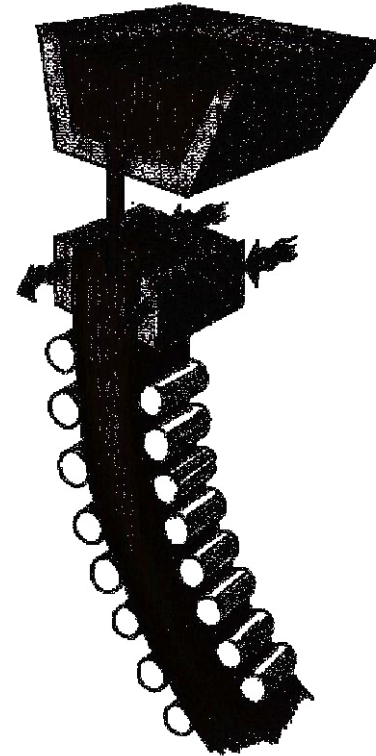


@SSAB



@SSAB

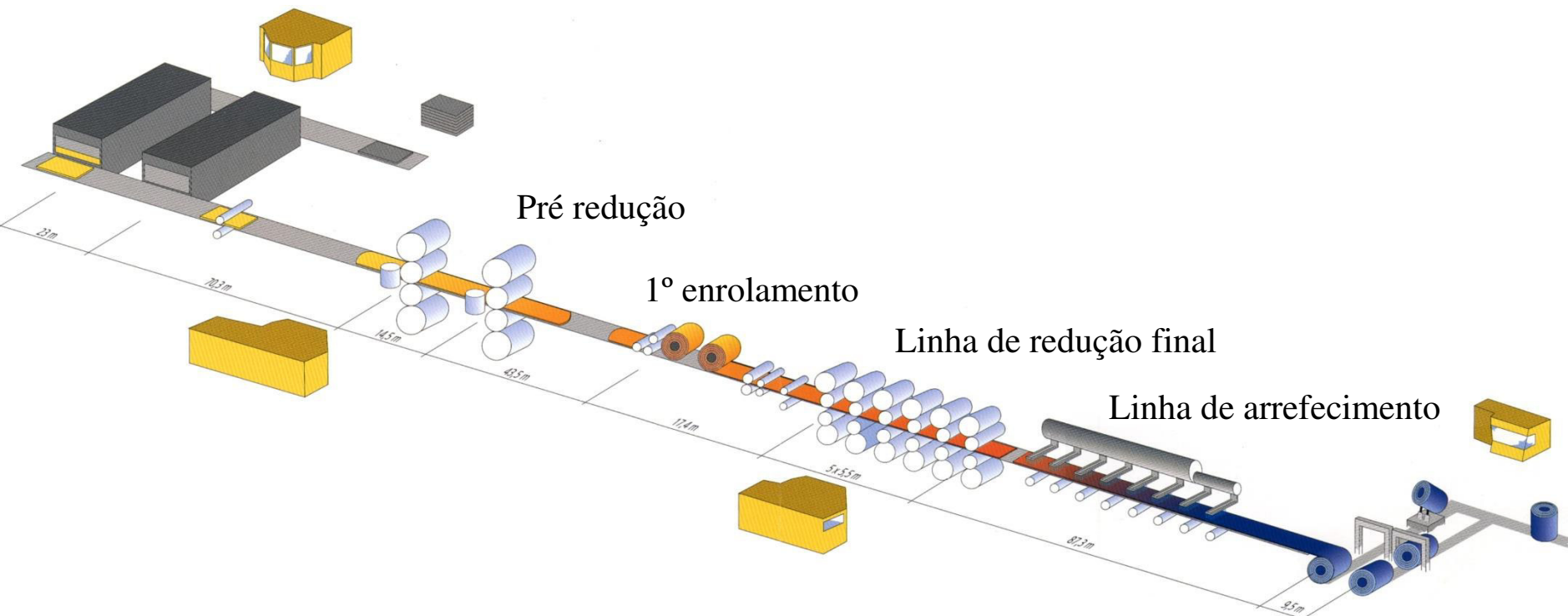
Vazamento Contínuo



@SSAB

Linha de Laminagem a Quente

Fornos de reaquecimento

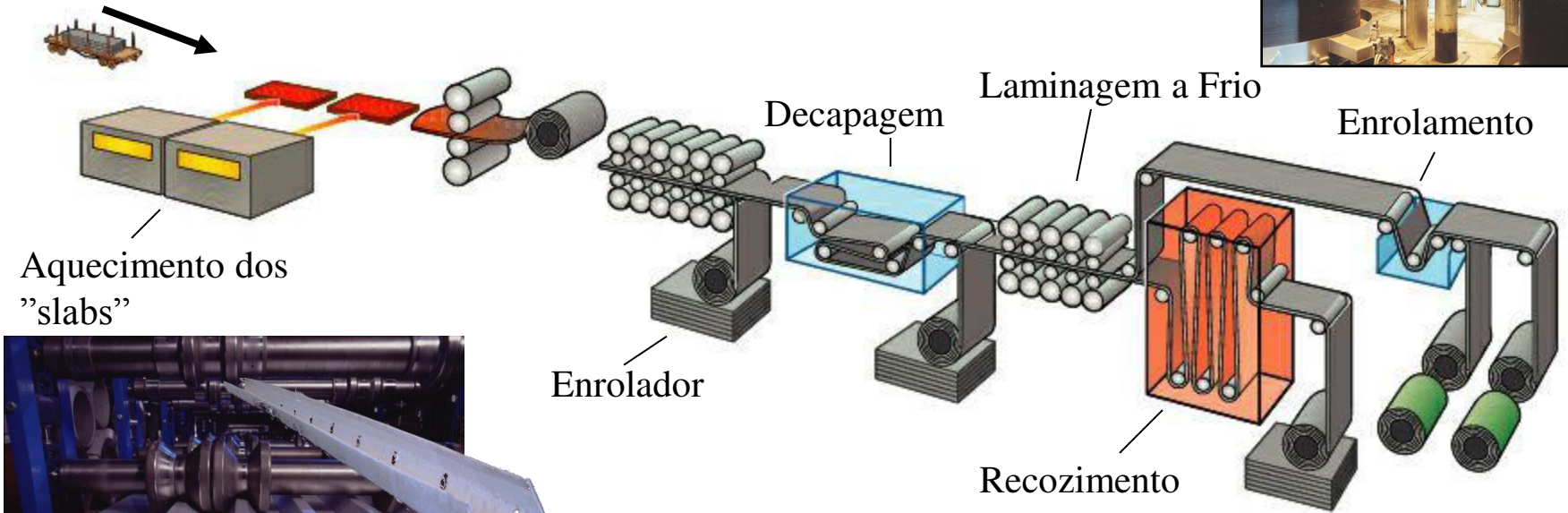


@SSAB

Enroladores

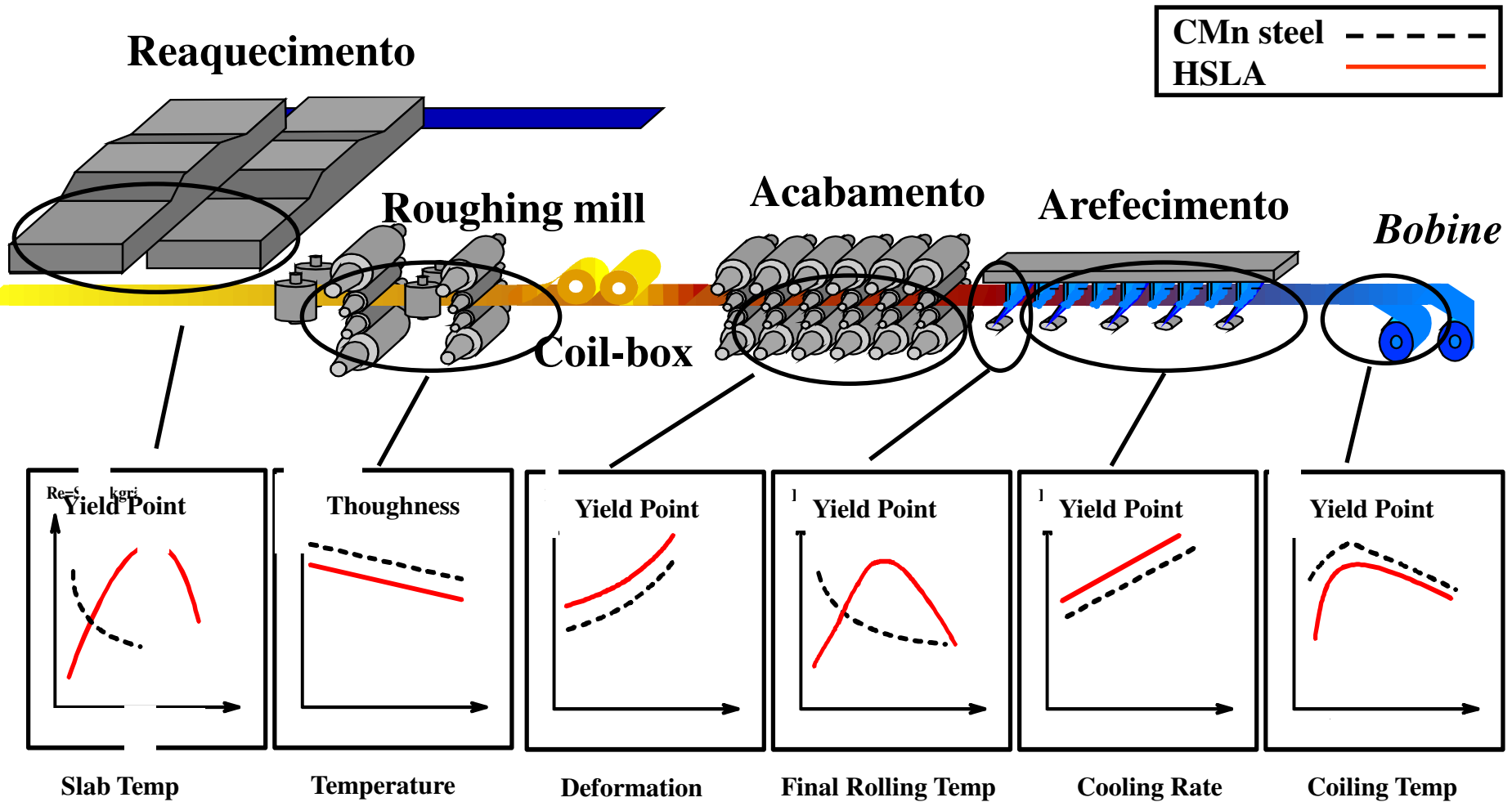
Fluxo de Produção

Transporte

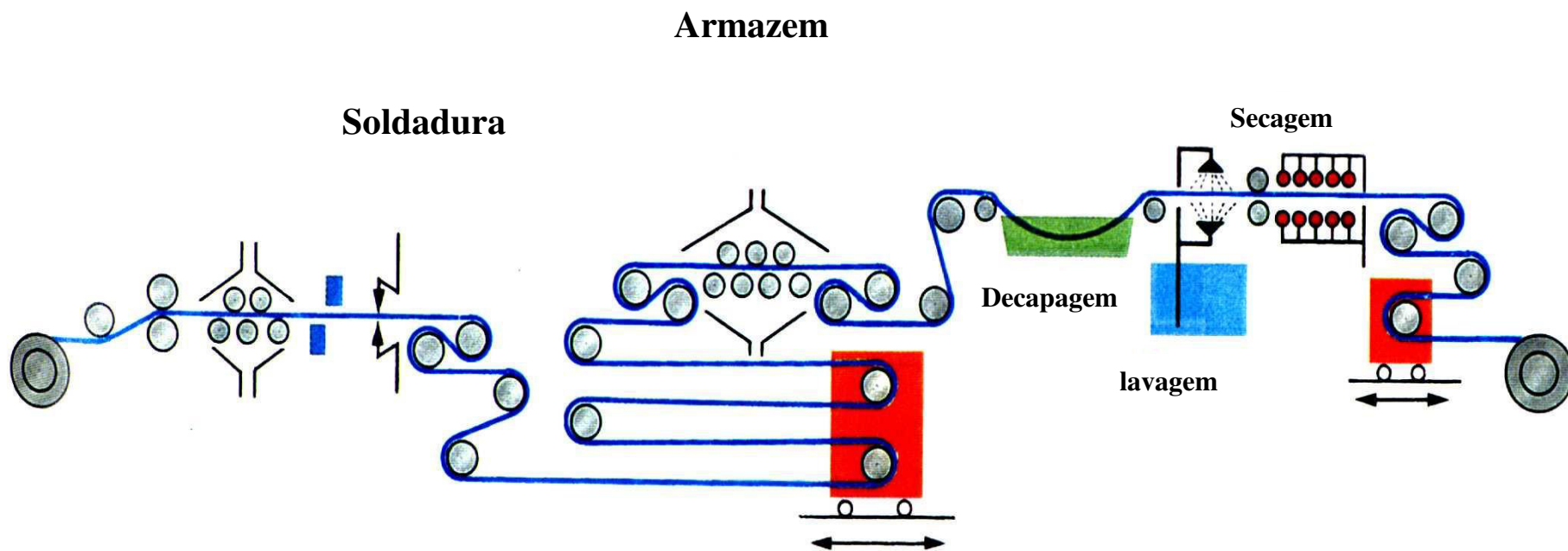


@SSAB

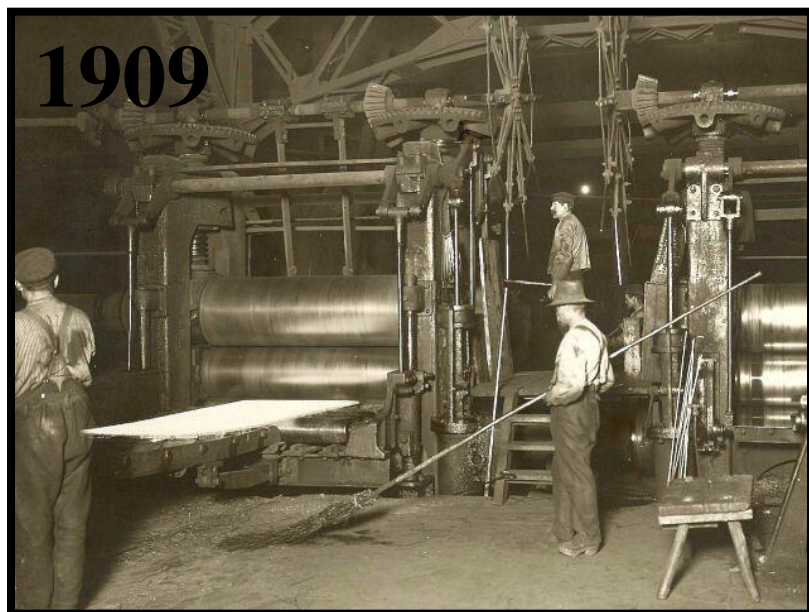
Propriedades e Processos, aço HSLA/C-Mn



Linha de Decapagem



@SSAB

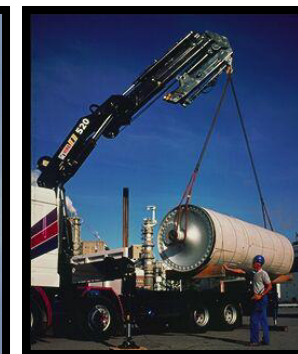


Linha de laminagem a quente



@SSAB





O aço obtêm-se por afinação da “gusa branca” em cuja operação se **reduz a percentagem de C de 3.5 a menos de 1%**. Esta operação consiste essencialmente num conjunto de oxidações parciais produzidas por:

- Acção de uma corrente de ar que atravessa a massa de gusa líquida (afinação por ar);
- Acção de um óxido de Fe (minério ou sucata) num forno de soleira (afinação por soleira) ou no forno eléctrico (afinação eléctrica).

A eliminação do C é realizada por uma “**oxidação**” em que o C se transforma em óxido de C e em gás carbónico.

A acção do O_2 sente-se também sobre outros constituintes da gusa, tais como o Mn, Si e o P, que também se oxidam e eliminam quer parcialmente quer completamente.




Por outro lado, também o Fe é oxidado parcialmente, o que é indesejável por dois motivos:

1. **Reduz o rendimento da operação;**
2. **A presença do FeO diminui as propriedades mecânicas do aço.**

Torna-se então necessário que após as oxidações parciais se realize uma “**redução**” do FeO formado. É neste período de redução do FeO que se poderá eliminar o S, cujo conteúdo se mantém praticamente inalterável durante a oxidação.

OXIDAÇÃO + REDUÇÃO  **“AFINAÇÃO” DA GUSA**

Oxidação  Eliminação do C e O₂ (Si, P, Mn)

Redução  Qualidade do aço (adição de ferro-manganês, utiliza-se também o Si)

P – Torna o aço quebradiço no estado frio



< 0.12%

S – Torna o aço quebradiço no estado quente

Controle do teor em Gases do aço O, N, H

- **O – Desoxidação**
- **N e H - Tratamento em vazio**

Aços sem liga

- **Si < 0.5%**
- **Mn < 1.5%**

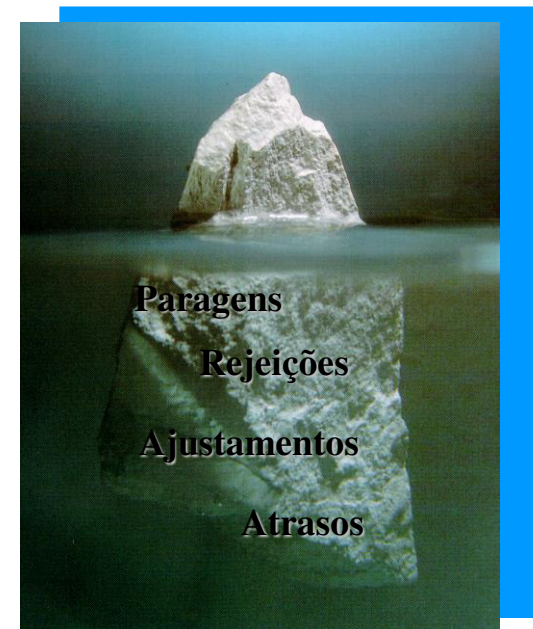
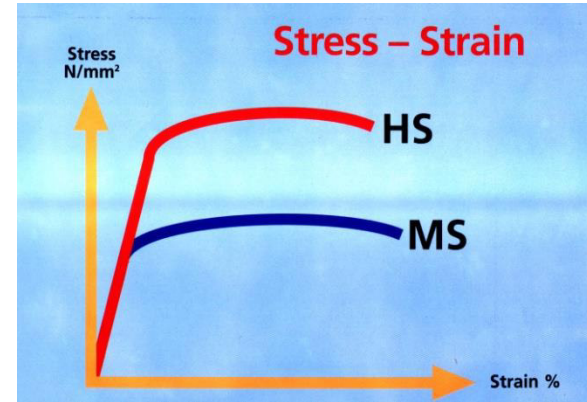
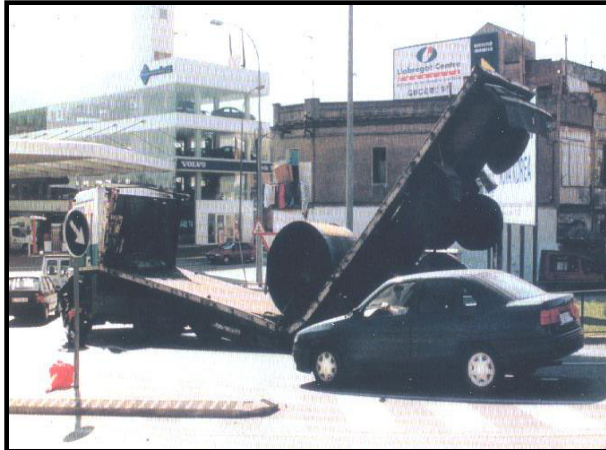
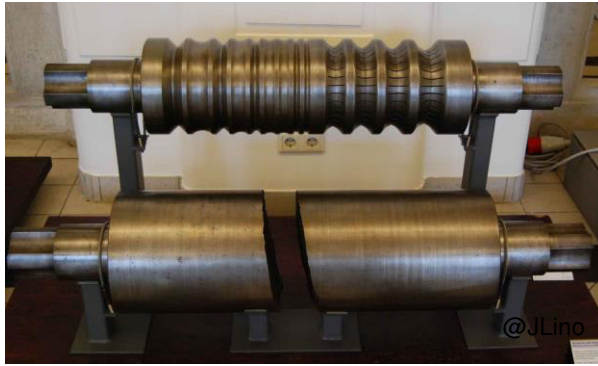
O que é um Aço ?

É uma liga Ferro-Carbónica cujo teor em Carbono varia entre 0.03% e 2.06%, contendo Si, Mn, P e S.



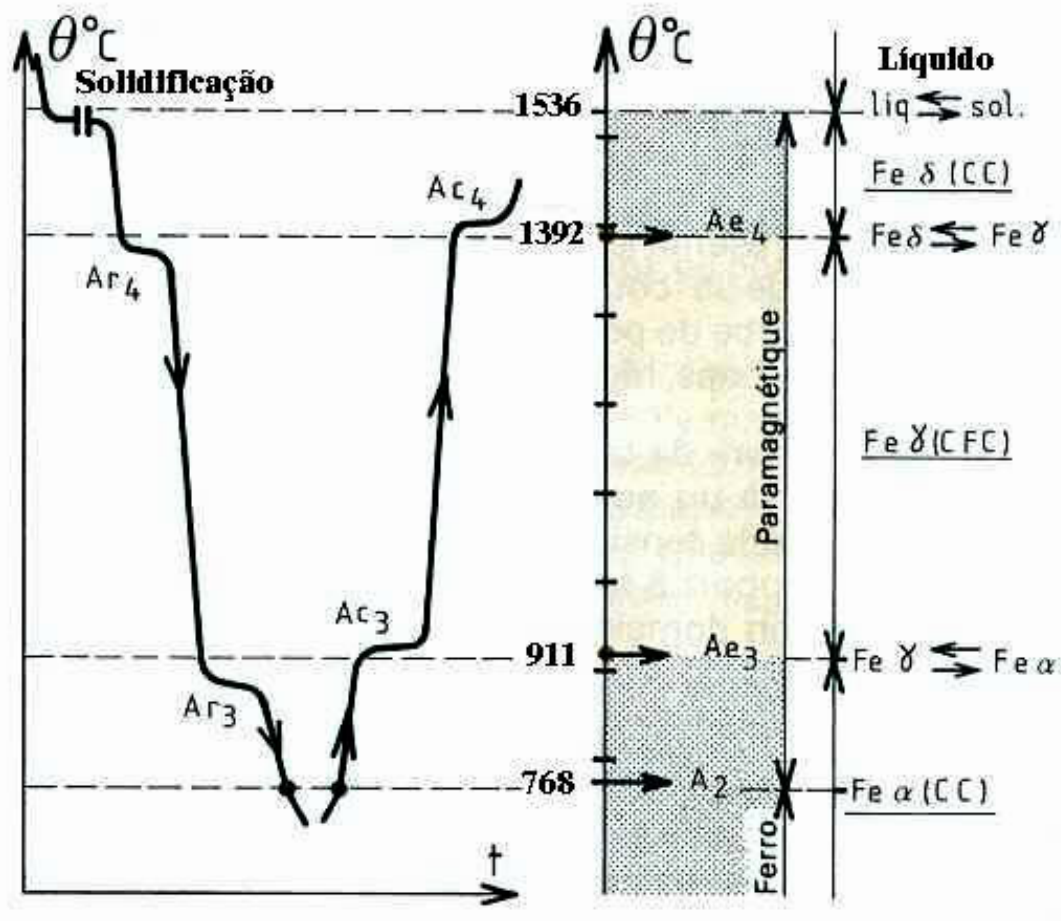
Para muitas aplicações necessita de possuir elementos de liga (aços ligados) variando o C entre aqueles limites.

Como Evitar ?



FERRO - AÇO

Ferro puro, ferrite, austenite



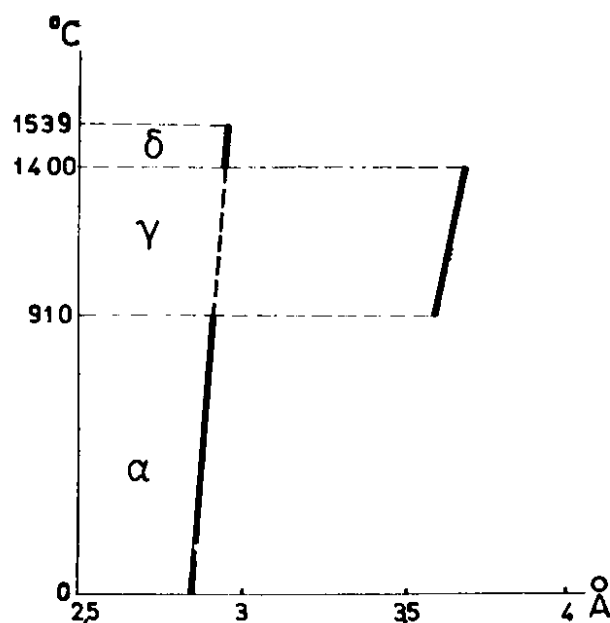
O ferro puro apresenta 3 variedades alotrópicas estáveis em gamas de temperaturas determinadas:

- **Ferro α**
- **Ferro γ**
- **Ferro δ**

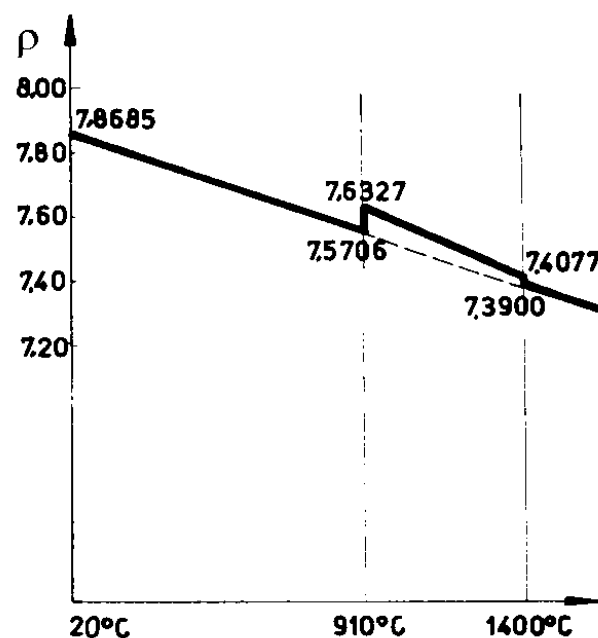
Pontos de transformação do ferro; curva $\theta(t)$

Ferro puro, ferrite, austenite

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

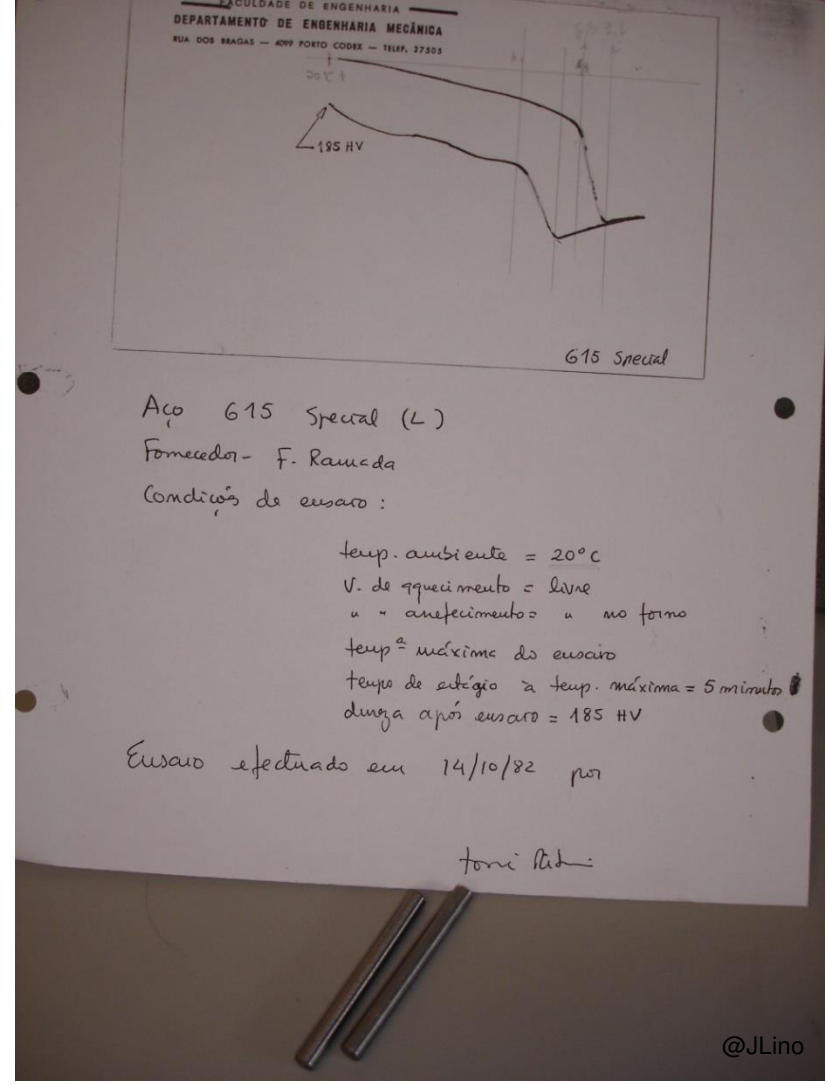


Variação do parâmetro da rede cristalina do ferro em função da temperatura



Densidade do ferro em função da temperatura

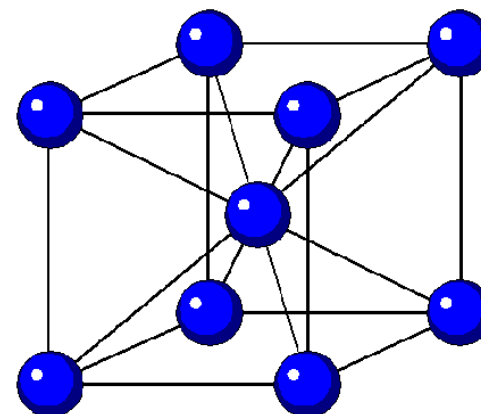
Ferro puro, ferrite, austenite



Ferro puro, ferrite, austenite

Ferro α , Ferrite

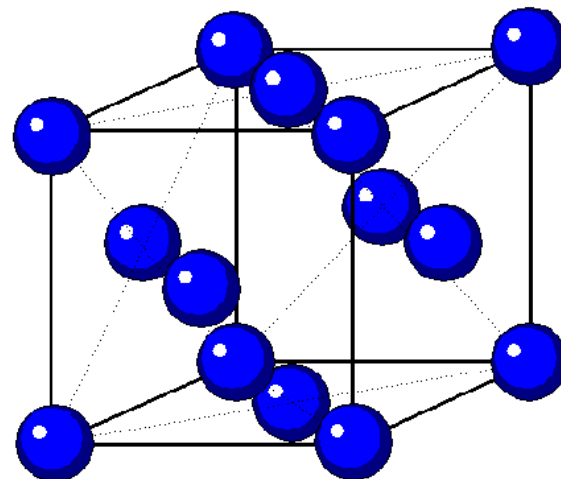
- Estrutura **CCC**
- $a = 0,2866 \text{ nm}$
- Estável para temp. $< 911 \text{ }^\circ\text{C}$
- Solubilidade de C no Fe $\alpha < 0,006\%$, à temp. ambiente
- % de interstícios = 32%
- N^o total de átomos por malha = 2
- Os átomos de Fe tocam-se segundo as diagonais de direcção $\langle 111 \rangle$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



Ferro puro, ferrite, austenite

Ferro γ , Austenite

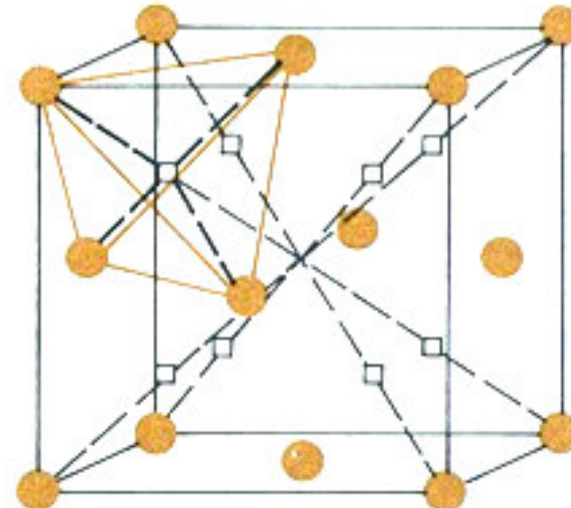
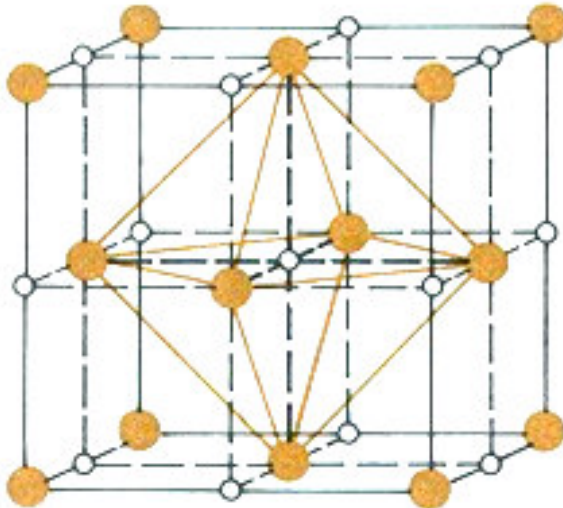
- Estrutura **CFC**
- $a = 0,3647 \text{ nm}$
- Estável entre 911°C e 1403°C
- Solubilidade de C no $\text{Fe}_\gamma < 2,1\%$
- % de interstícios = 26%
- Nº total de átomos por malha = 4
- Estrutura muito deformável
- Os átomos de Fe tocam-se segundo as direcções $\langle 110 \rangle$
- Planos de máxima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



Ferro puro, ferrite, austenite

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.

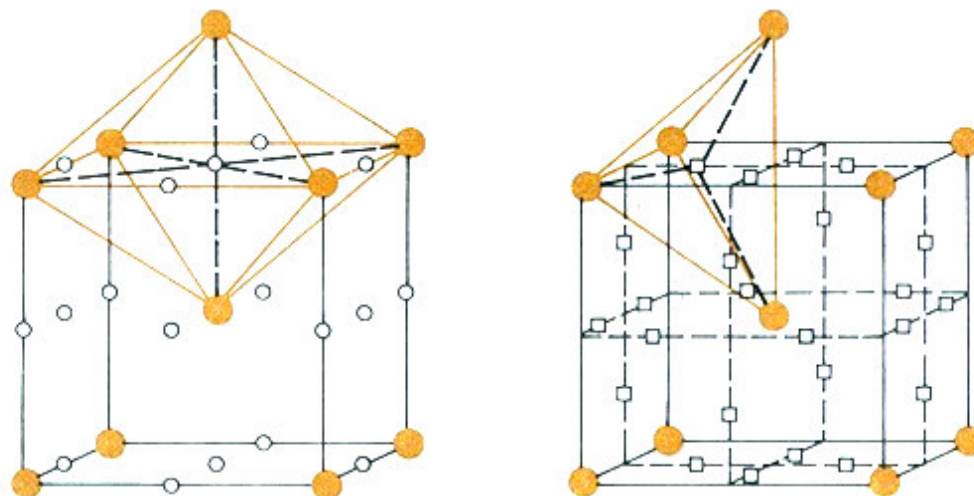


Ferro puro, ferrite, austenite

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.



Diagramas de equilíbrio

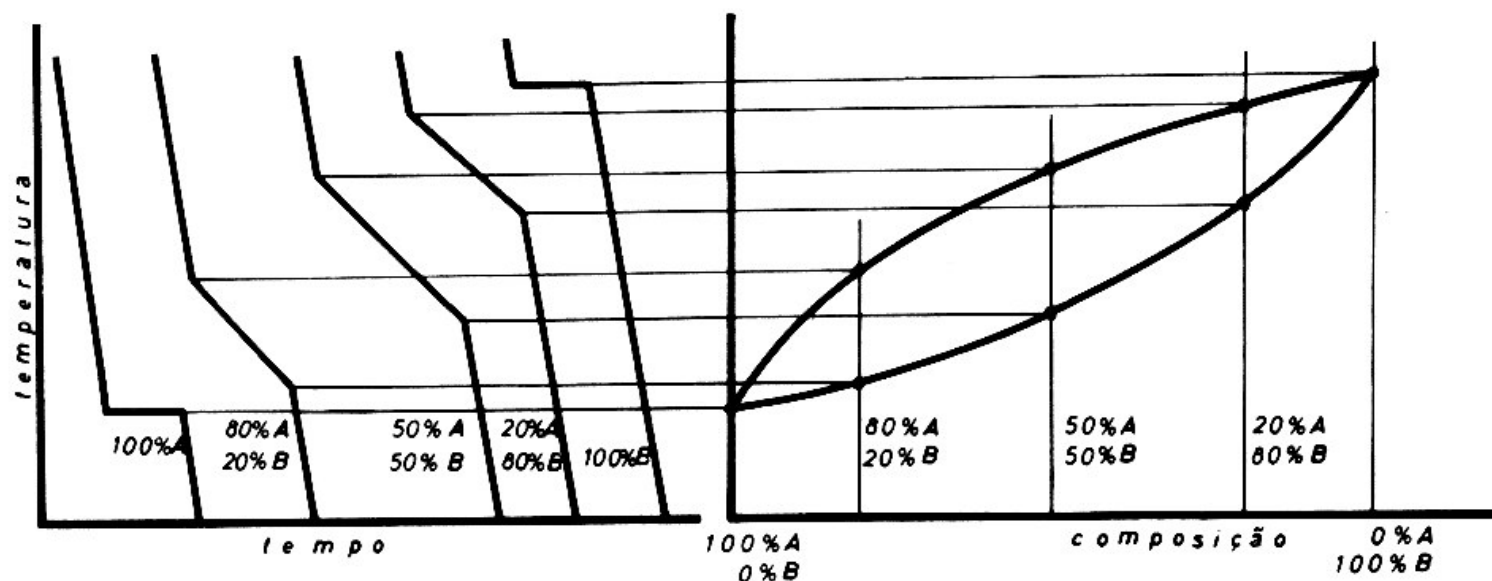
O estado de equilíbrio termodinâmico das ligas metálicas é estudado por intermédio do **diagrama de equilíbrio ou de fases**. Excluindo o estado líquido, distingue-se 2 tipos de fases:

- **Soluções sólidas** (inserção e substituição)
- **Compostos definidos** (A_xB_y)

cujos domínios de estabilidade são fornecidos pelo diagrama de equilíbrio.

Diagramas de equilíbrio

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



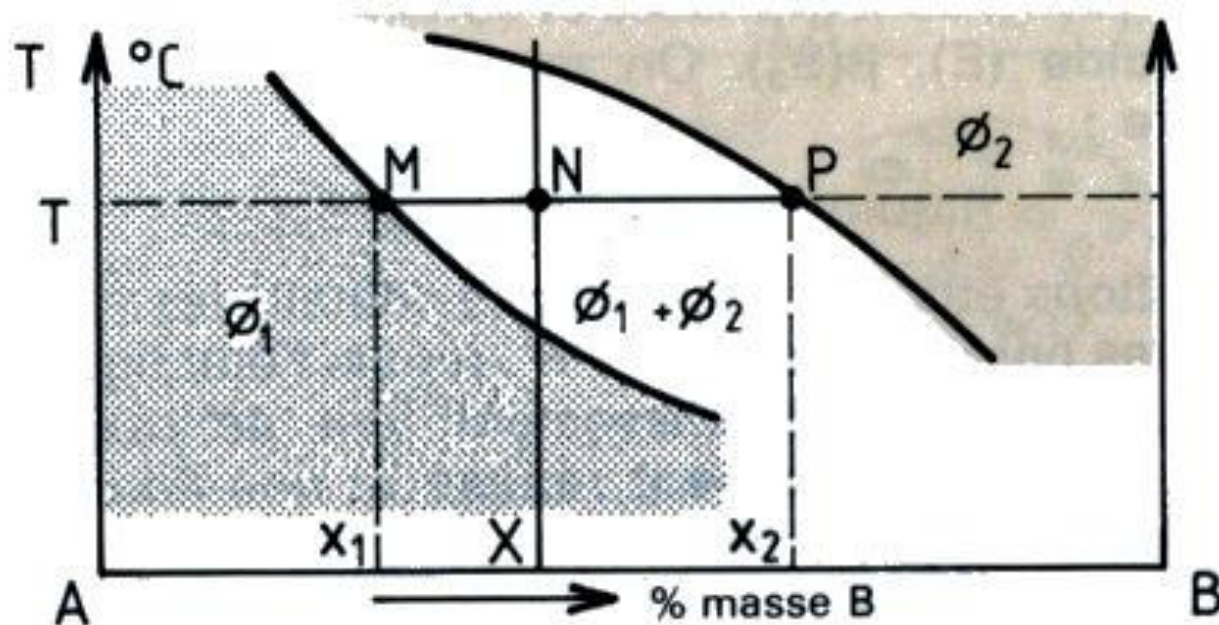
- O ajustamento da composição dos cristais à composição dada pelo diagrama é um problema de **difusão para o qual é preciso um longo tempo.**
- Os diagramas serão válidos, então, apenas se o **arrefecimento for feito muito lentamente.**

Diagramas de equilíbrio

Regras de interpretação e de leitura

Domínios bifásicos:

- **Regra dos segmentos inversos**

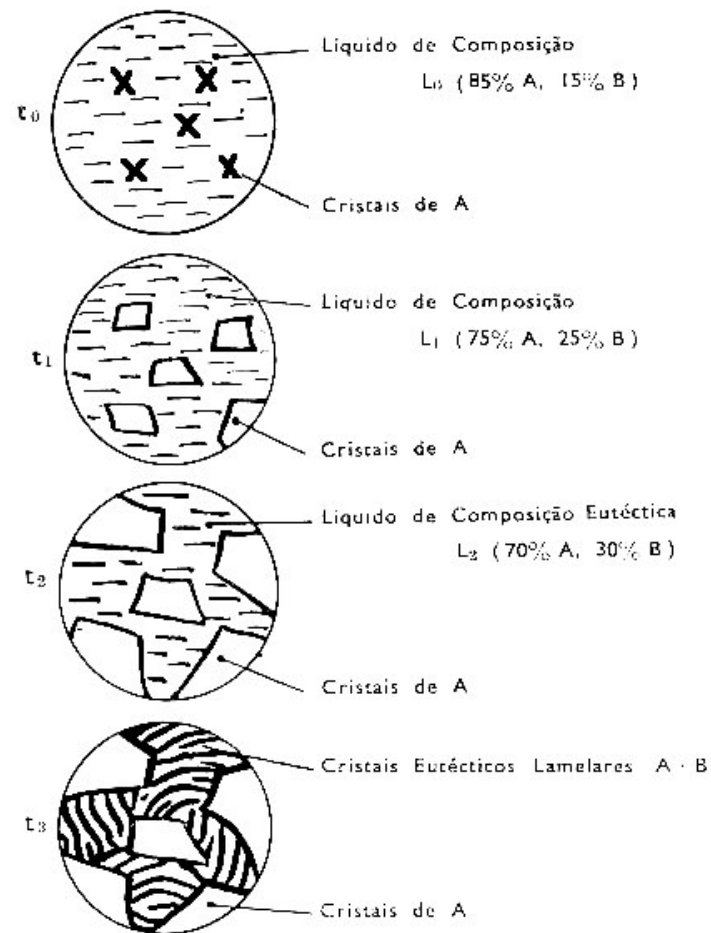
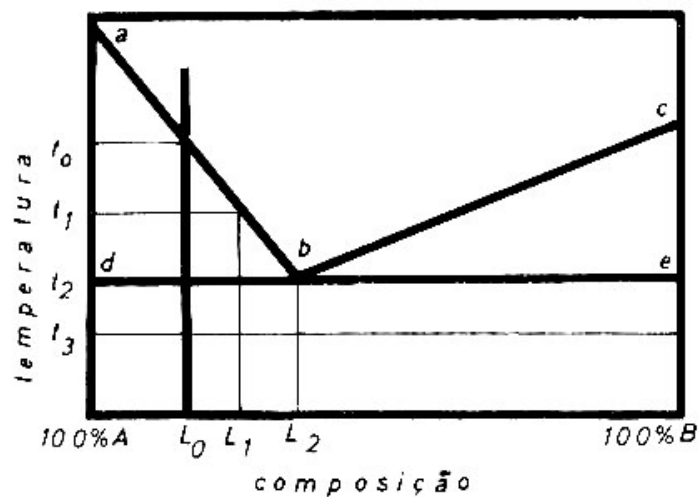


$$\% \Phi_1 = \frac{NP}{MP} \times 100$$

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

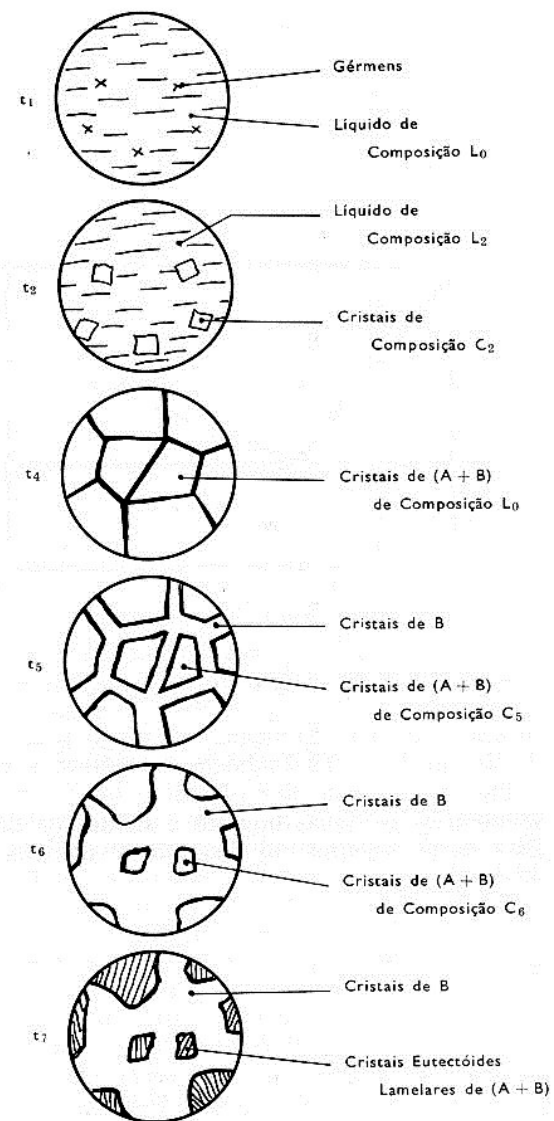
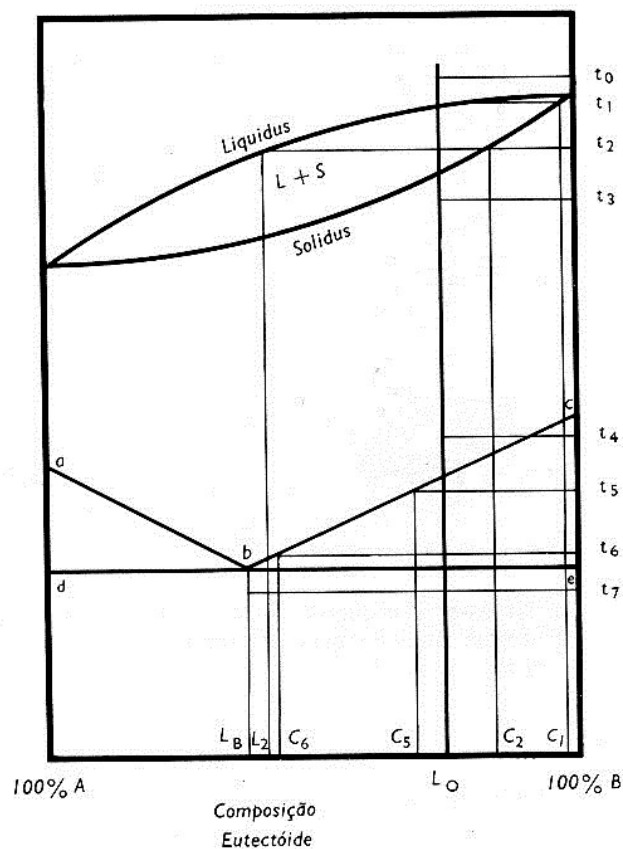
Diagramas de equilíbrio

Estudo duma reacção eutética



Diagramas de equilíbrio

Estudo duma reacção eutectóide



Diagramas de equilíbrio Fe-C

Diagrama das ligas Fe-C (metaestável)

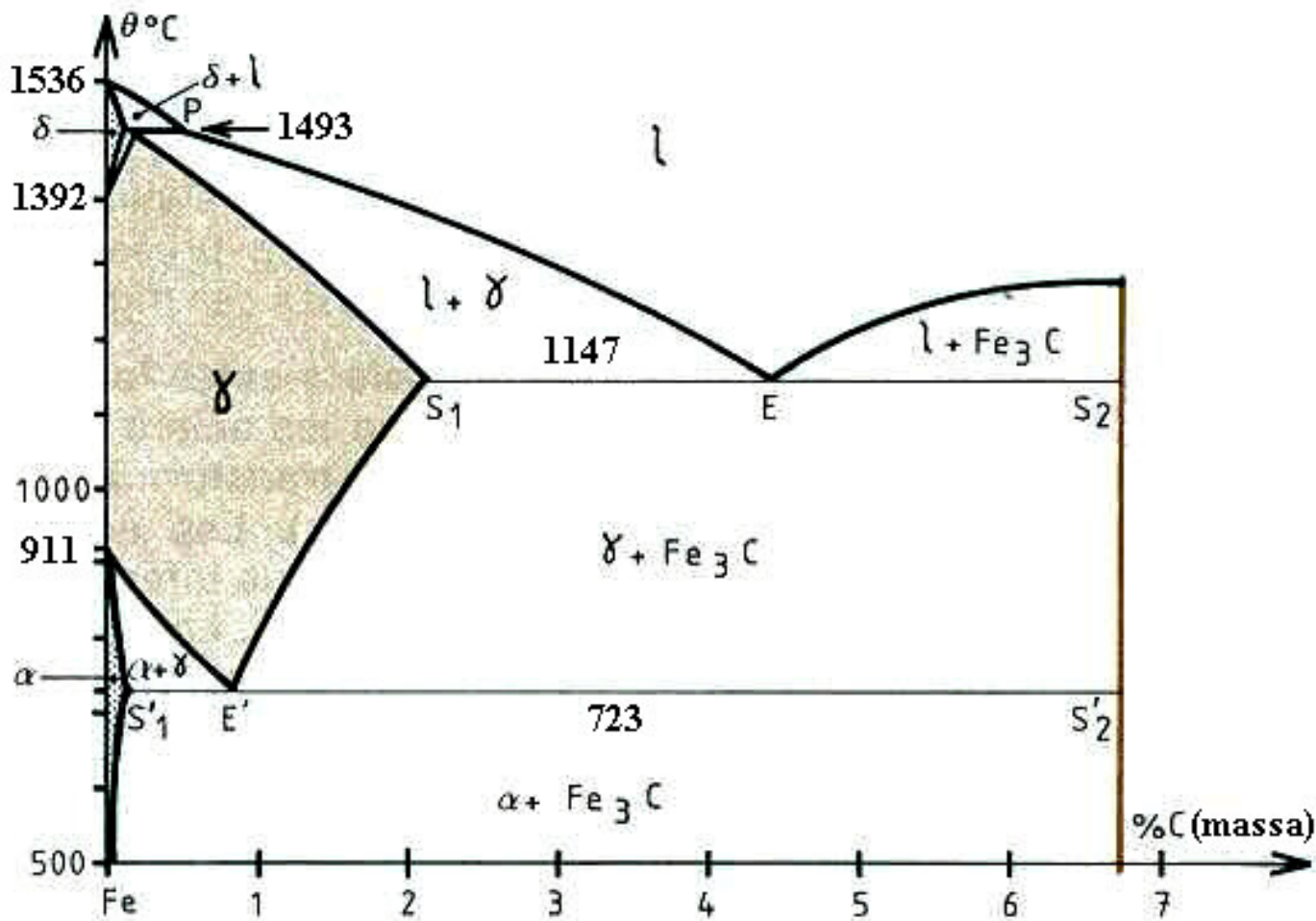


Diagrama de equilíbrio Fe-C

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..

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Constituição dos aços

Estado Recozido

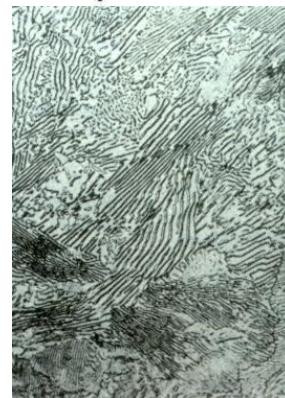
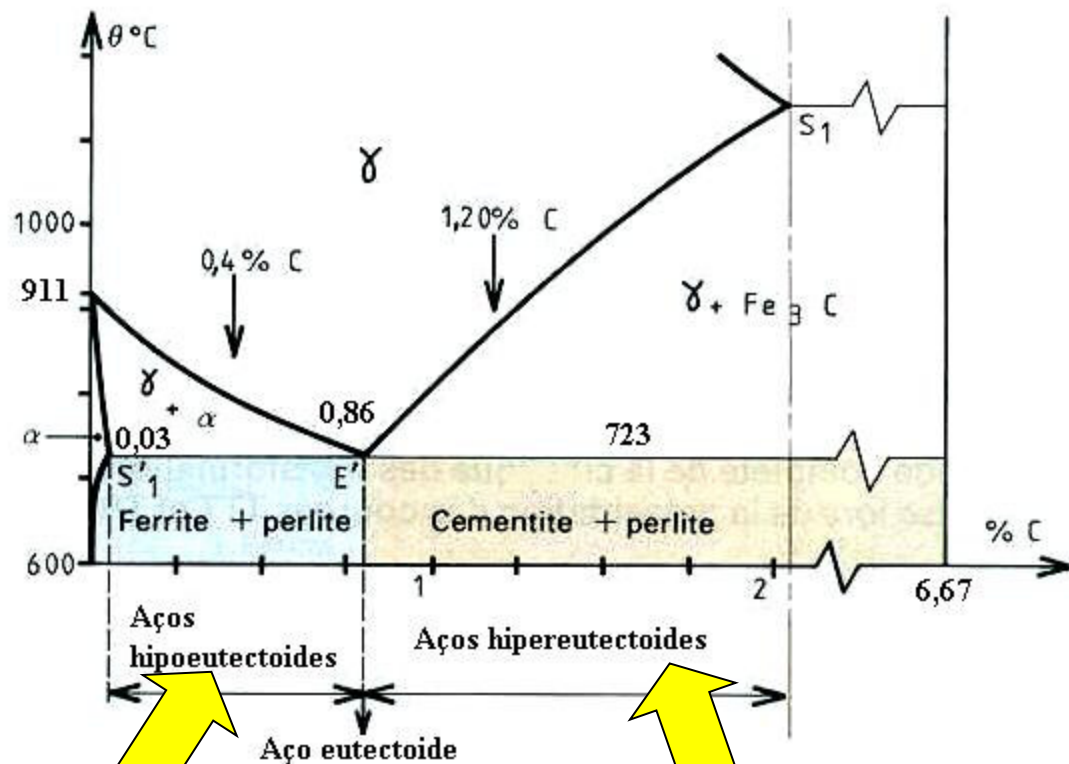
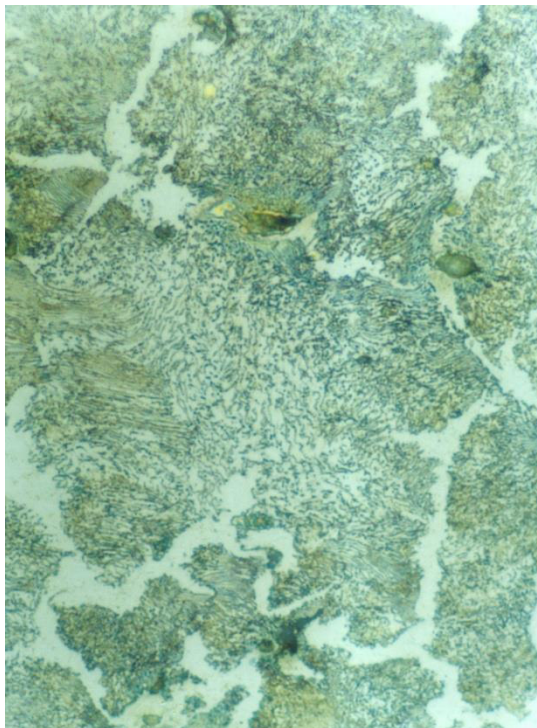


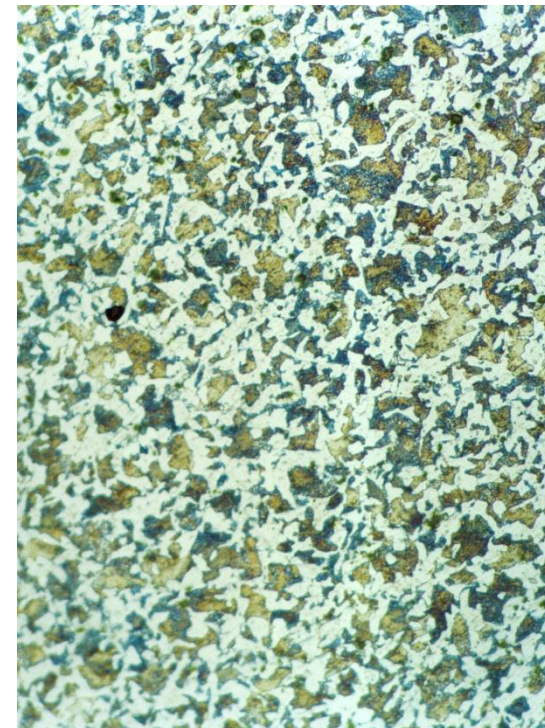
Diagrama de equilíbrio Fe-C



Aço Construção
F10 (0.45% C)
Estado Natural

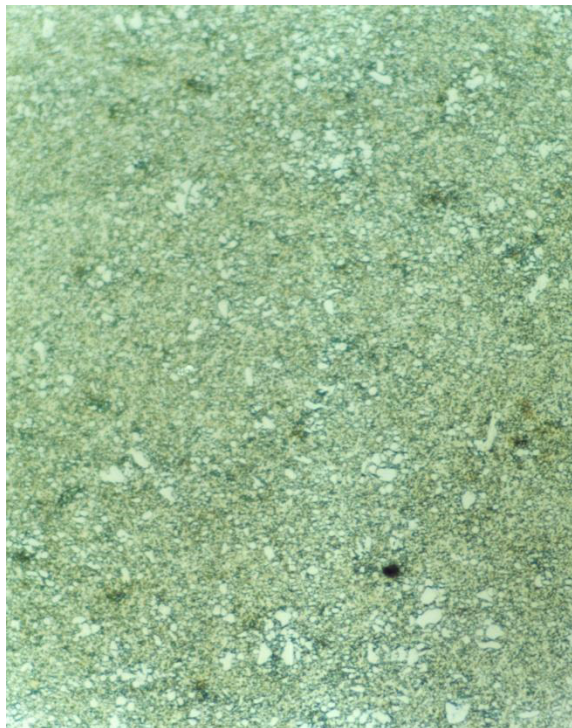


Aço Construção
F10 (0.45% C)
Estado Natural

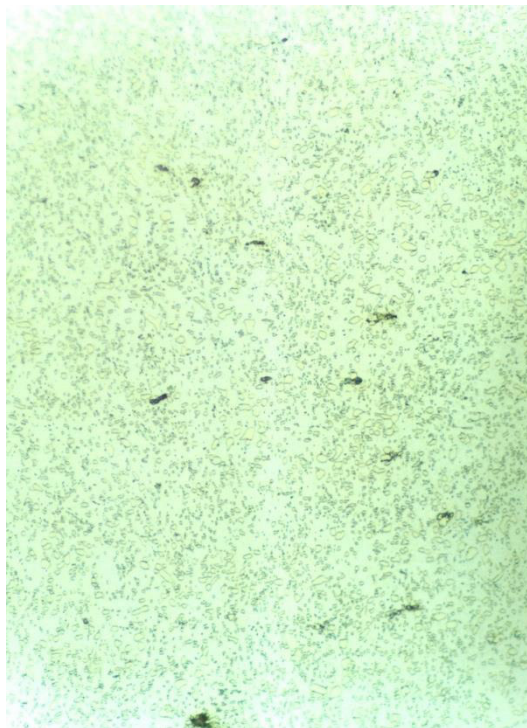


Aço Carbono Ferramentas
Combatente (0.55% C)
Estado Natural

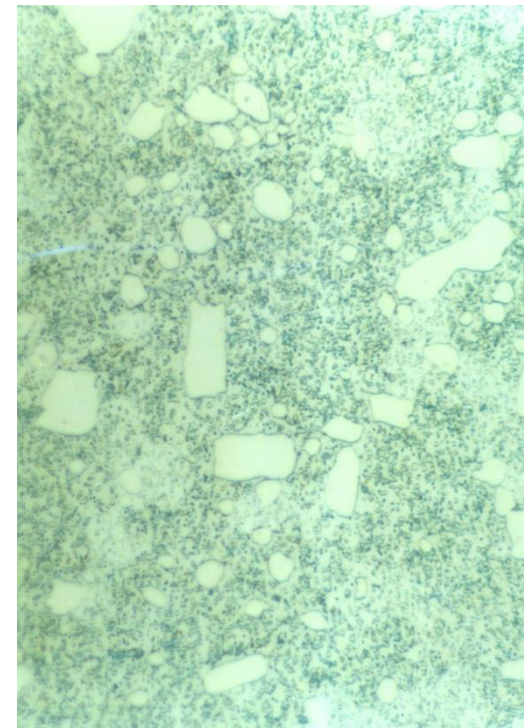
Diagrama de equilíbrio Fe-C



Aço Rápido
Ark Superior (0.75% C)
Estado Recozido



Aço ao C Ferr.
Fagersta 20 (1.05% C)
Estado Recozido

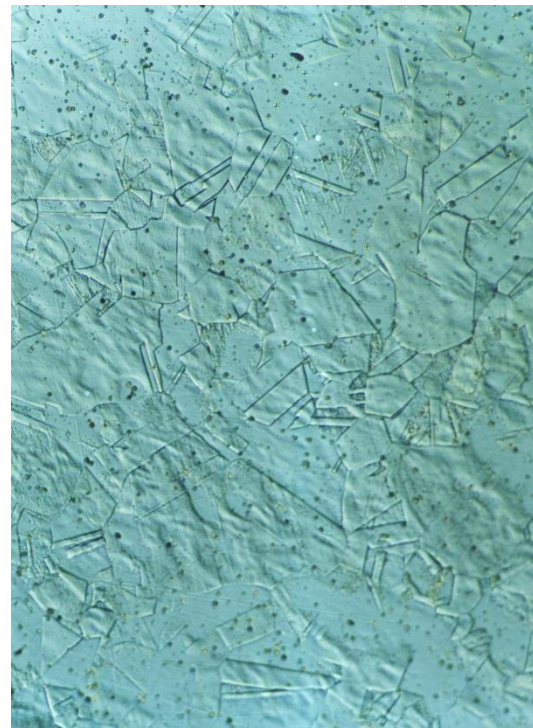


Aço Ferr. Trabalho a Frio
RL 200 (2.10% C)
Estado Recozido

Diagrama de equilíbrio Fe-C

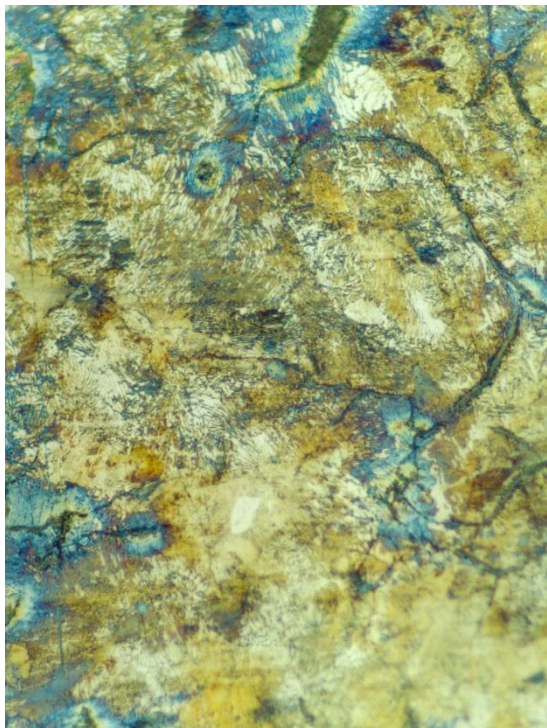


Aço ao C
Linhas de fluxo

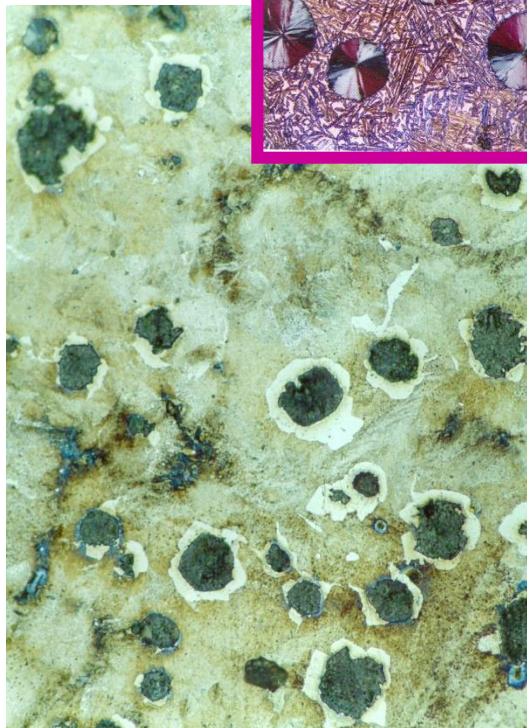


Aço Inoxidável Austenítico

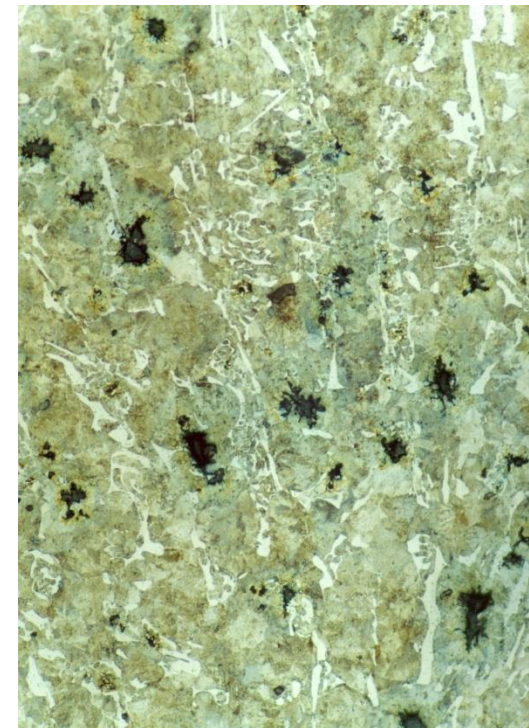
Diagrama de equilíbrio Fe-C



Ferro Fundido Cinzento
Lamelar



Ferro Fundido Nodular



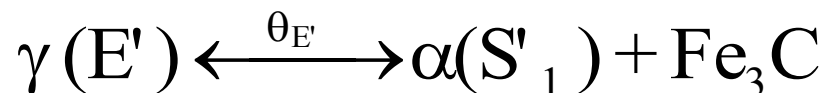
Ferro Branco

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Transformação eutectóide perlítica

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

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



Para a temperatura $\theta_{E'}$, para todas as ligas tais que %C>0,03%, a austenite tem o mesmo teor em carbono (0,86%: E').

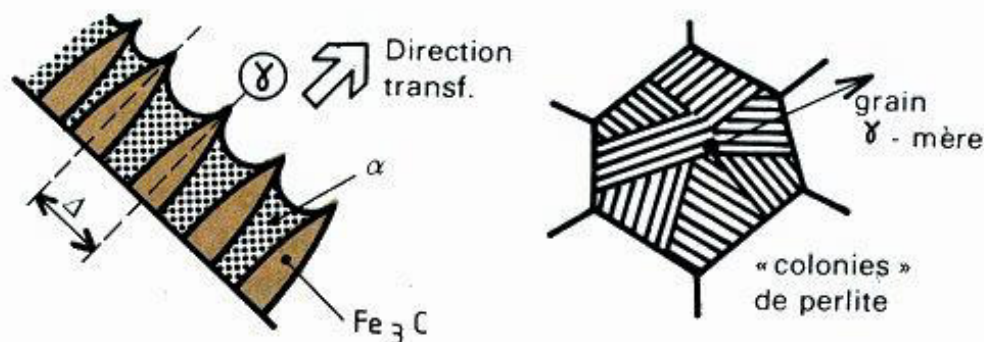
A perlite é um **constituente bifásico**, cujas fracções mássicas são:

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

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Transformação eutectóide perlítica

O agregado é em geral **lamelar**, 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**.



Parâmetro importante

Espaçamento Interlamelar Δ .

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



Diagrama de equilíbrio Fe-C

Transformação eutectóide perlítica

Se a %C < 0.25 → Tamanho de grão ferrítico condiciona σ_E

0.25 < %C < 0.8 → Espaço interlamelar condiciona σ_E

$$\sigma_E = 2.18 (S^{-1/2}) - 0.40 (P^{-1/2}) - 2.88 (d^{-1/2}) + 52.3 \text{ (MPa)} \text{ (Krauss pag. 123)}$$

S – Espaço interlamelar médio

P – Tamanho das colónias de perlite

d – Tamanho de grão austenítico

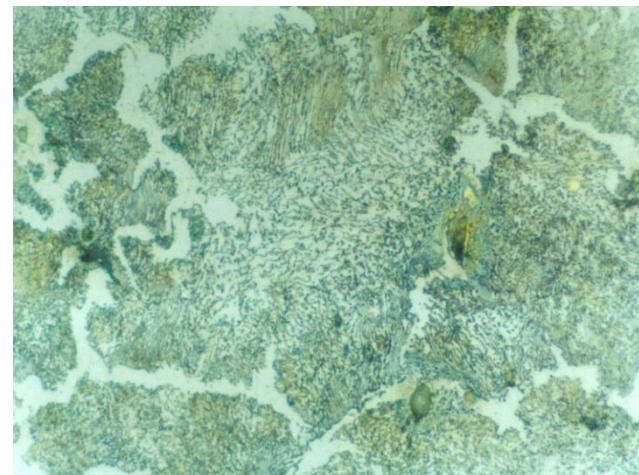


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Influência da veloc. arrefecimento nos 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.

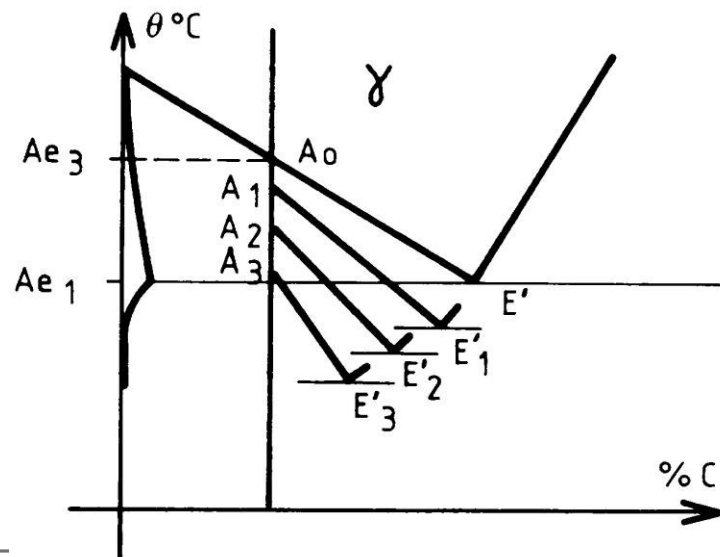


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Influência da veloc. arrefecimento nos pontos de transformação

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 $\alpha_{\alpha} < \alpha_{\text{pyros}} < \alpha_{\gamma}$.

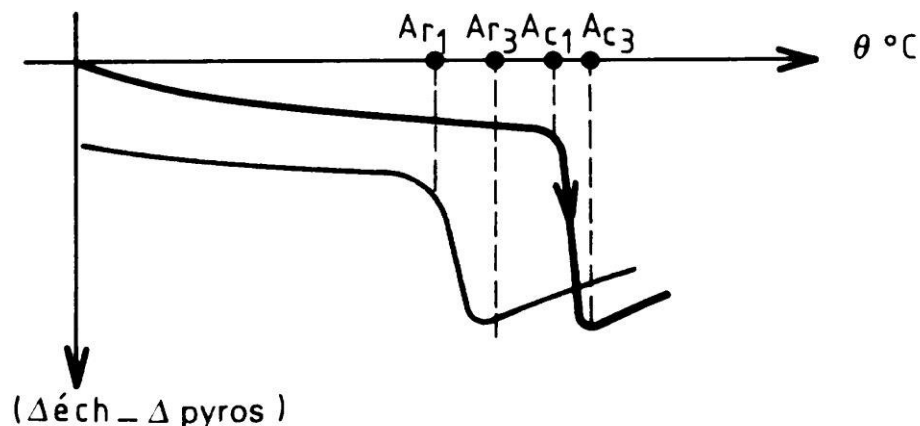


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Influência da veloc. 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:

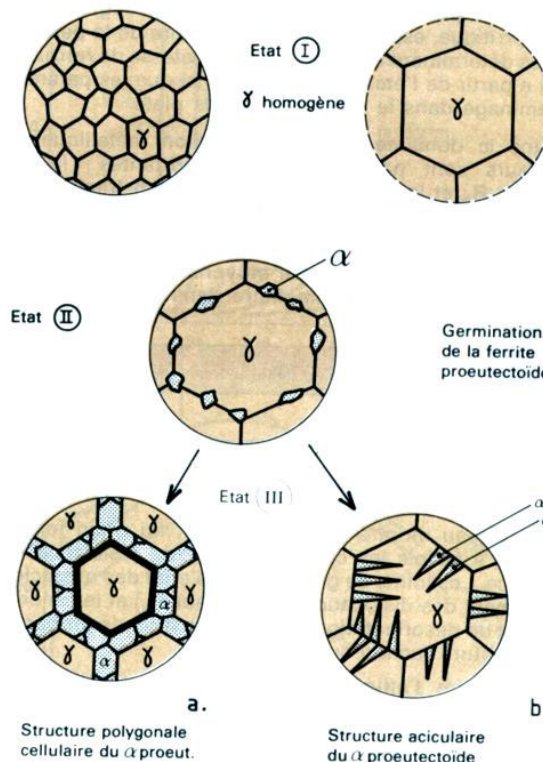
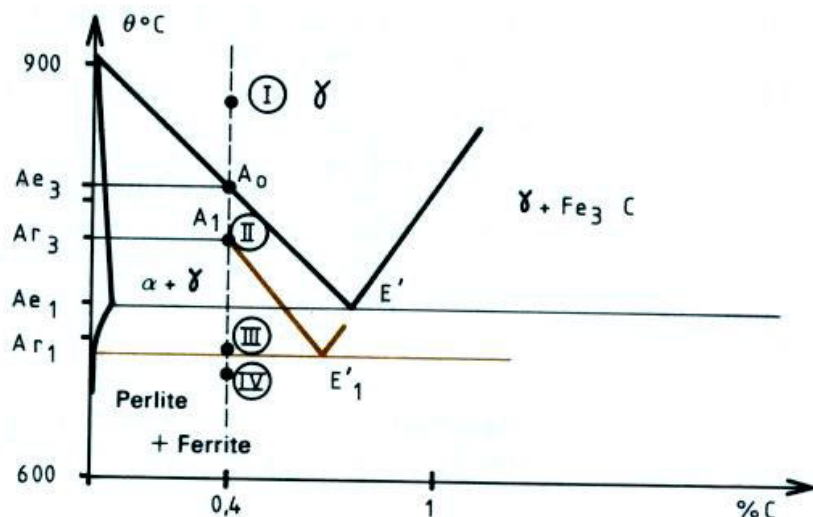


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Influência da veloc. de arrefecimento sobre a microestrutura

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 \rightarrow poligonais irregulares \rightarrow 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.

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

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

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

- **Fracções mássicas**, determinadas pelo diagrama de equilíbrio,
- **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.

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

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 microestruturais

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

■ TABELAS DE CONVERSÃO DE DUREZAS ■

CORRESPONDÊNCIA APROXIMADA ENTRE OS VALORES DE DUREZA ROCKWELL, VICKERS, BRINELL E A TENSÃO DE ROTURA



ROCKWELL						VICKERS CARGA ≥ 10 Kgf	BRINELL CARGA 3000 Kgf ESFERA STANDARD	ESCLEROS- CÓPIO	TENSÃO DE ROTURA		ROCKWELL RC CARGA 150 Kgf DIAMANTE
RC CARGA 150 Kgf DIAMANTE	RA CARGA 60 Kgf DIAMANTE	RB CARGA 100 Kgf ESFERA	15 - N CARGA 15 Kgf DIAMANTE	30 - N CARGA 30 Kgf DIAMANTE	45 - N CARGA 45 Kgf DIAMANTE				MPA	Kg/mm ²	
		37,5				82	77		279	28,5	
		56,2				100	95		339	34,6	
		66,7				120	114	16	393	40,1	
		75,0				140	133	21	455	46,4	
		81,7				160	152	24	517	52,7	
		87,1				180	171	26	580	59,1	
		91,5				200	190	29	634	64,7	
		95				220	209	32	696	71,0	
20	60,5	97,8	69,4	41,4	19,6	238	226	34	758	77,3	20
21	61,0	98,5	70,0	42,3	20,7	243	231	35	780	79,5	21
22	61,5	99	70,5	43,2	21,9	248	237	35	793	80,9	22
23	62,0	100	71,0	44,1	23,1	254	243	35	814	83,0	23
24	62,4	101	71,6	45,0	24,3	260	247	37	835	85,1	24
25	62,8	101,5	72,2	45,9	25,5	266	253	38	855	87,2	25
26	63,3	102,5	72,8	46,8	26,6	272	258	38	876	89,3	26
27	63,8	103	73,4	47,7	27,8	279	264	40	903	92,1	27
28	64,3	104	73,9	48,6	28,9	286	271	41	924	94,2	28
29	64,7	104,5	74,5	49,5	30,1	294	279	41	951	97,0	29
30	65,3	105,5	75,0	50,4	31,3	302	286	42	979	99,8	30
31	65,8	106	75,6	51,3	32,5	310	294	43	1007	102,7	31
32	66,3	107	76,1	52,3	33,7	318	301	44	1035	105,5	32
33	66,8	107,5	76,6	53,2	34,8	327	311	46	1062	108,3	33
34	67,4	108	77,2	54,1	36,0	336	319	47	1096	111,8	34
35	67,9	108,5	77,7	55,0	37,2	345	327	48	1124	114,6	35
36	68,4	109	78,3	55,9	38,4	354	336	49	1158	118,1	36
37	68,9		78,8	56,8	39,6	363	344	50	1186	120,9	37
38	69,4		79,4	57,8	40,8	372	353	51	1213	123,7	38
39	69,9		79,9	58,3	41,9	382	362	52	1248	127,3	39
40	70,4		80,4	59,3	43,1	392	371	54	1283	130,8	40
41	70,9		80,9	60,3	44,3	402	381	55	1317	134,3	41
42	71,5		81,5	61,3	45,5	412	390	56	1351	137,8	42
43	72,0		82,0	62,2	46,7	423	400	57	1386	141,3	43
44	72,5		82,5	63,1	47,9	434	409	58	1420	144,8	44
45	73,1		83,0	64,0	49,1	448	421	60	1462	149,1	45
46	73,6		83,5	64,9	50,2	458	432	62	1510	154,0	46
47	74,1		84,0	65,8	51,4	471	442	63	1551	158,2	47
48	74,7		84,5	66,7	52,6	484	451	64	1599	163,1	48
49	75,2		85,0	67,6	53,0	498	464	66	1648	168,0	49
50	75,9		85,5	68,5	55,0	513	475	67	1690	172,3	50
51	76,3		86,0	69,4	56,1	528	487	68	1745	177,9	51
52	76,8		86,4	70,3	57,4	544	500	69	1806	184,2	52
53	77,4		86,9	71,2	58,6	560		71	1854	189,1	53
54	78,0		87,4	72,0	59,8	577		72	1917	195,5	54
55	78,5		87,9	73,0	60,9	595		74	1979	201,8	55
56	79,0		88,4	73,9	62,1	613		75	2034	207,4	56
57	79,6		88,9	74,8	63,2	633		76	2103	214,4	57
58	80,1		89,3	75,7	64,3	653		78	2171	221,4	58
59	80,7		89,8	76,6	65,5	674		80	2248	229,2	59
60	81,2		90,2	77,5	66,6	697		81			60
61	81,8		90,7	78,4	67,7	720		83			61
62	82,3		91,0	79,3	68,8	746		85			62
63	82,8		91,4	80,2	69,9	772		87			63
64	83,4		91,8	81,1	71,0	800		88			64
65	93,9		92,2	81,9	72,1	832		91			65
66	84,5		92,5	82,8	73,1	865		92			66
67	85,0		92,9	83,6	74,2	900		95			67
68	85,6		93,2	84,4	75,4	940		97			68

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

Influência da % de C sobre as características de tracção

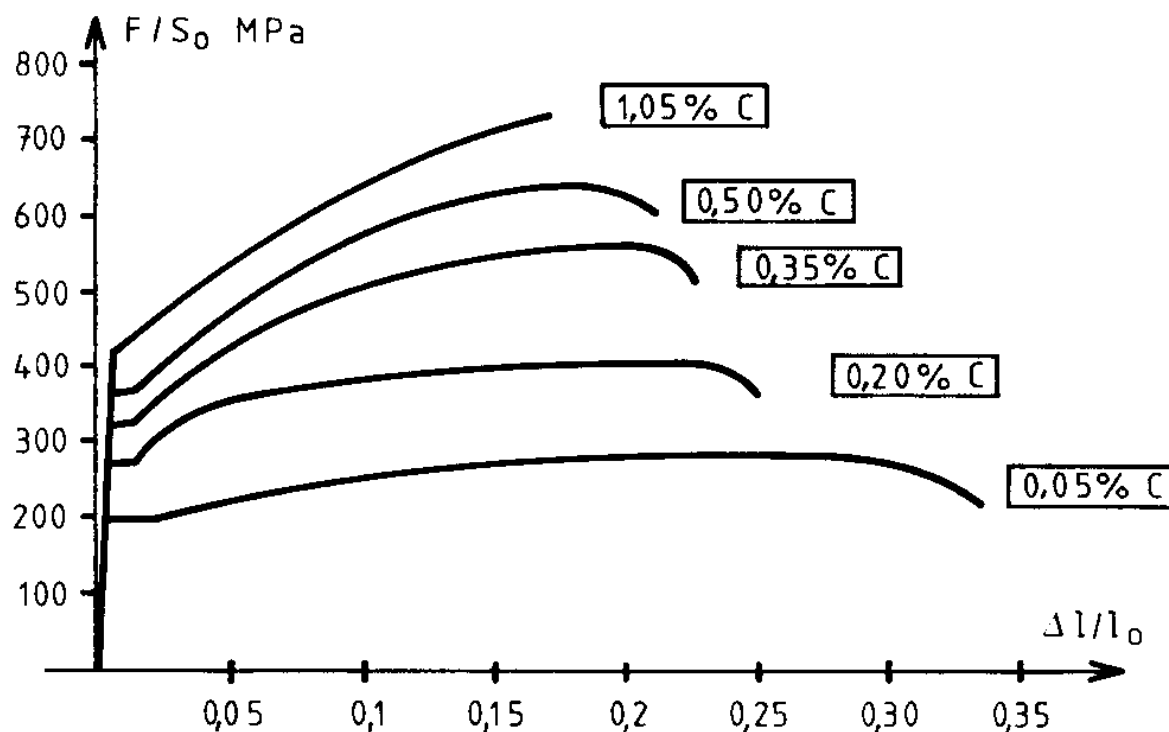


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

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

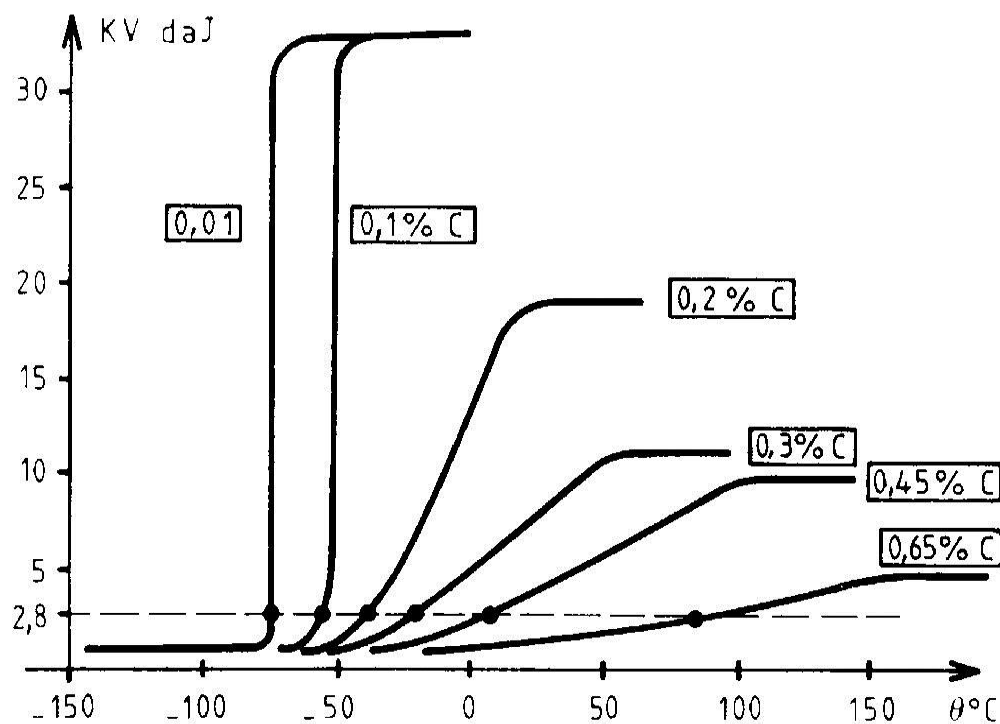


Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

Influência da microestrutura sobre as características de tracção

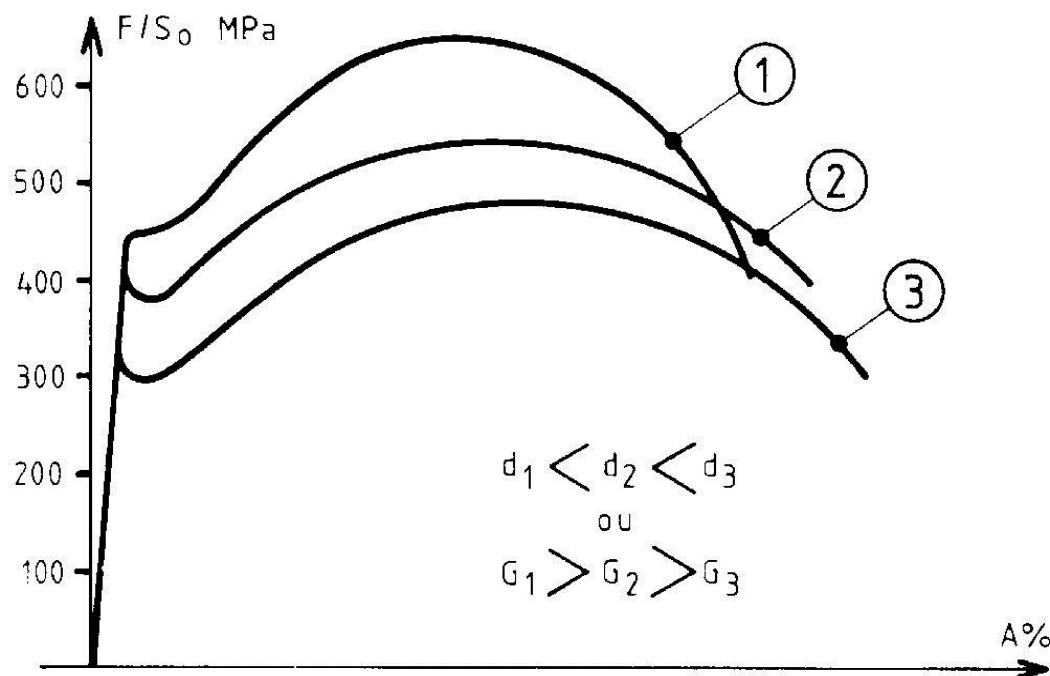
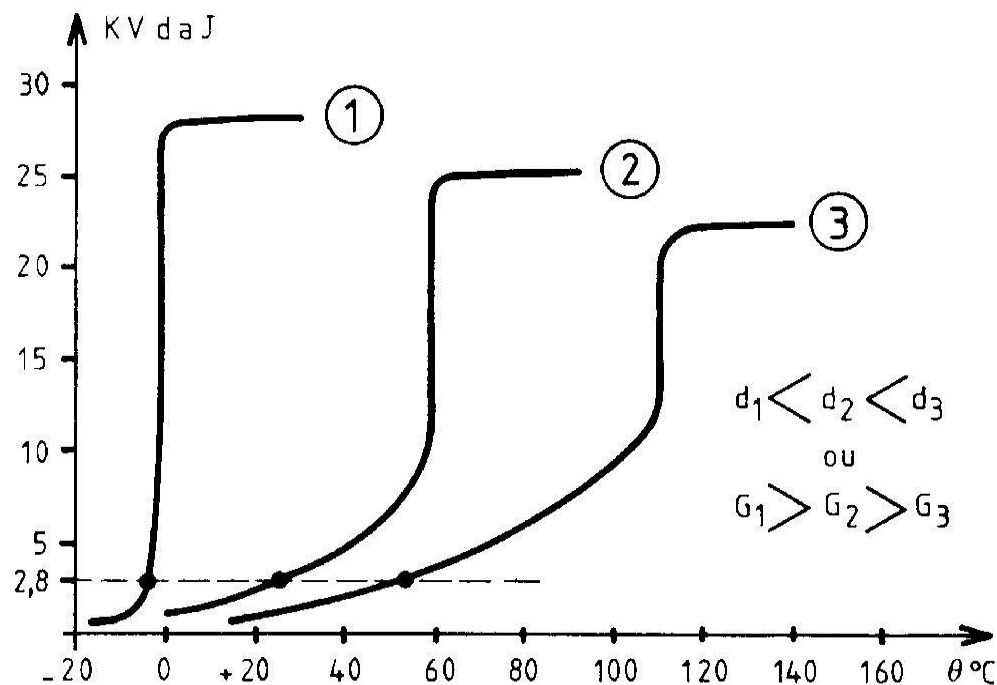


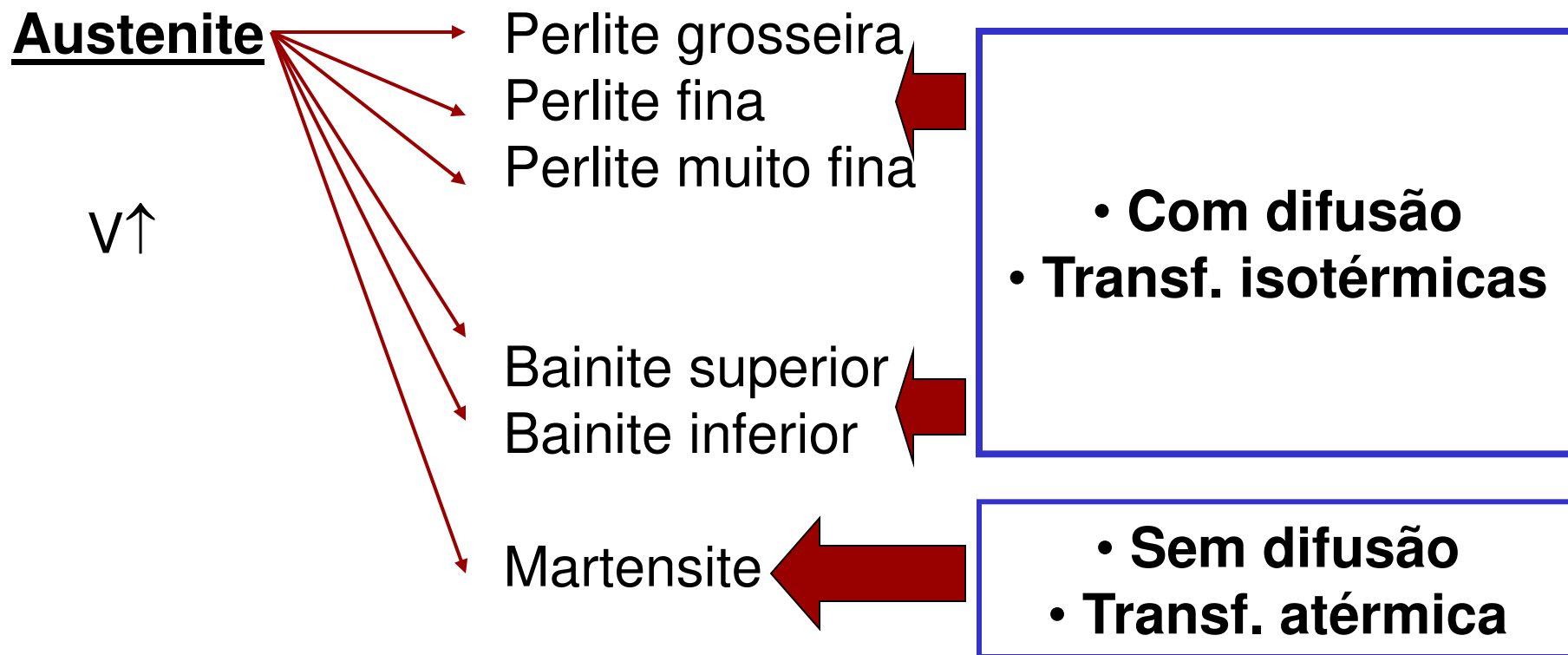
Diagrama de equilíbrio Fe-C

Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

Influência da microestrutura sobre as características de tenacidade ao choque



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

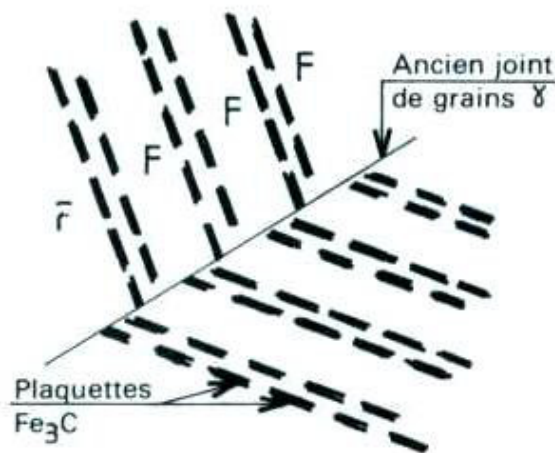


Com o aumento de V, vão-se formando estruturas menos de acordo com o diagrama de equilíbrio Fe-C

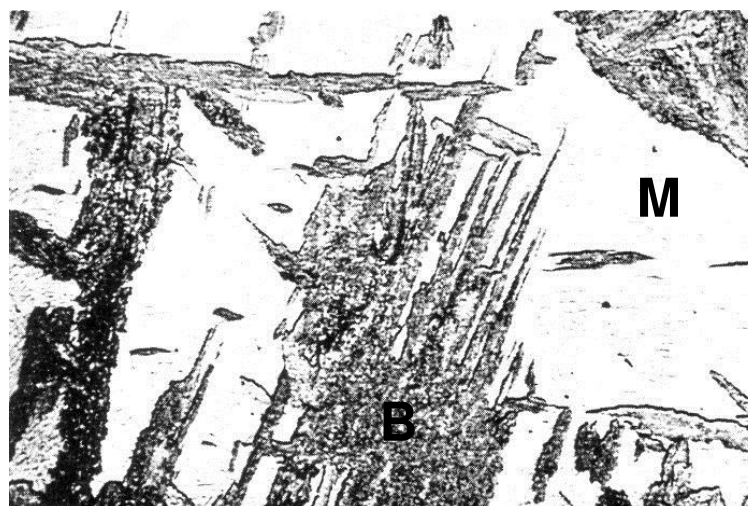
Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

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



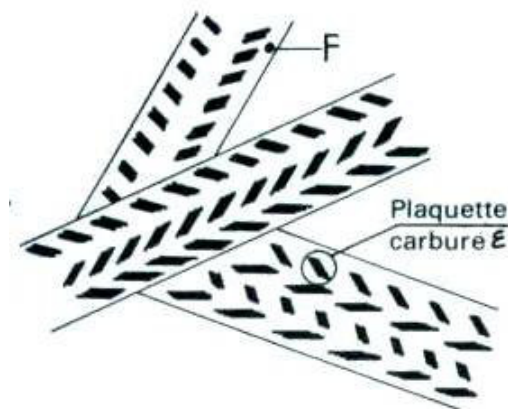
Microscopia óptica

Aço 4360,
transformado a
495°C (750×)

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

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
(750×)

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação bainítica

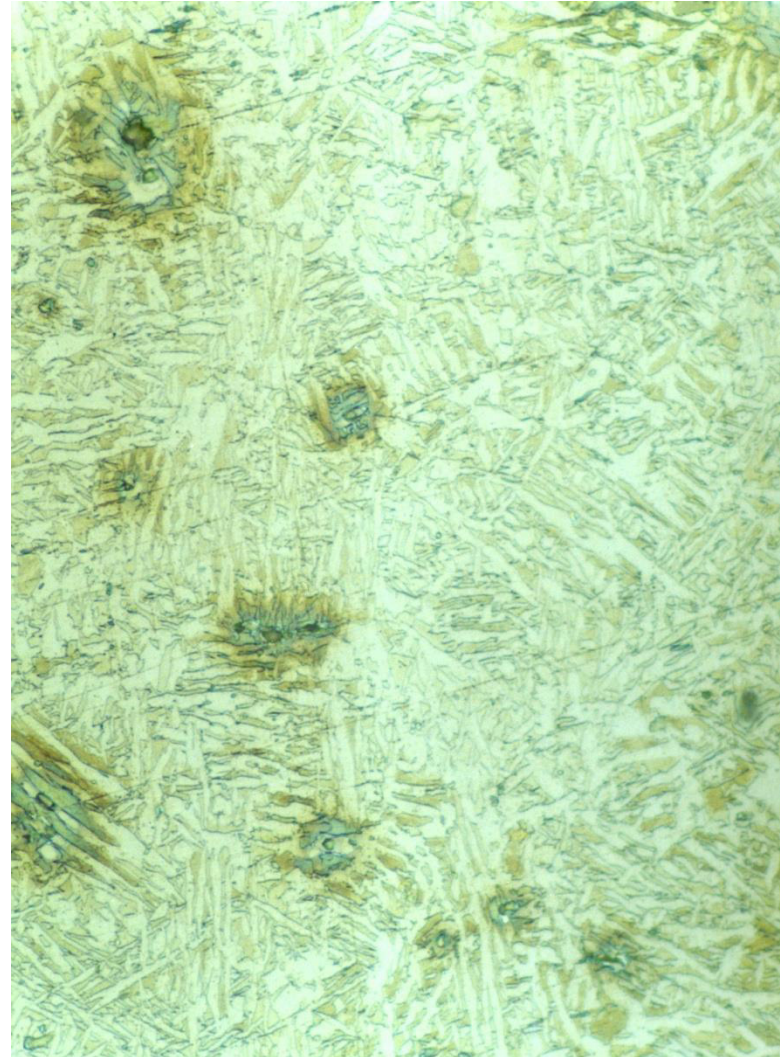
A dureza das estruturas bainíticas dos aços resulta da combinação dos efeitos de:

1. Finura do grão da ferrite bainítica
2. Elevado nº e grande dispersão de finos carbonetos
3. Tensões internas resultantes da dilatação que acompanha quer a precipitação de ferrite quer a precipitação de carbonetos
4. Elevada densidade de deslocações relacionada com as tensões resultantes da transformação por corte e provavelmente com a própria existência dos carbonetos precipitados
5. Carbono dissolvido na ferrite bainítica (normalmente sobressaturada, em maior ou menor grau)

A contribuição de cada um destes factores para a dureza final da bainite depende, em larga medida da composição do aço, nomeadamente do seu teor em C e da temperatura de transformação.

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

**Aço de Molas
RAM 208 (0.55%C)**



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

Ao contrário das transformações vistas anteriormente, as transformações martensíticas caracterizam-se por pura e simples **ausência de difusão** (com um arrefecimento muito intenso, por ex. água fria, suprime-se a movimentação atômica).

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

Condição metalúrgica:

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

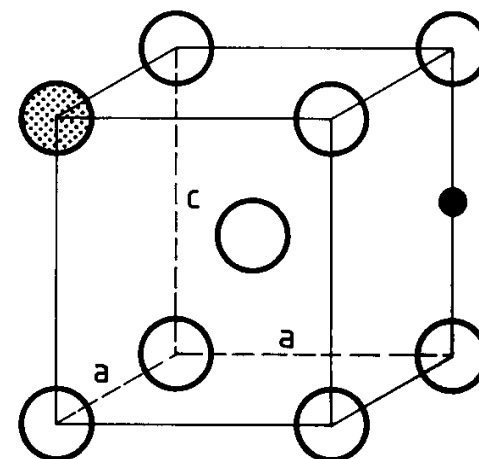
Condição térmica:

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

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

- 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.

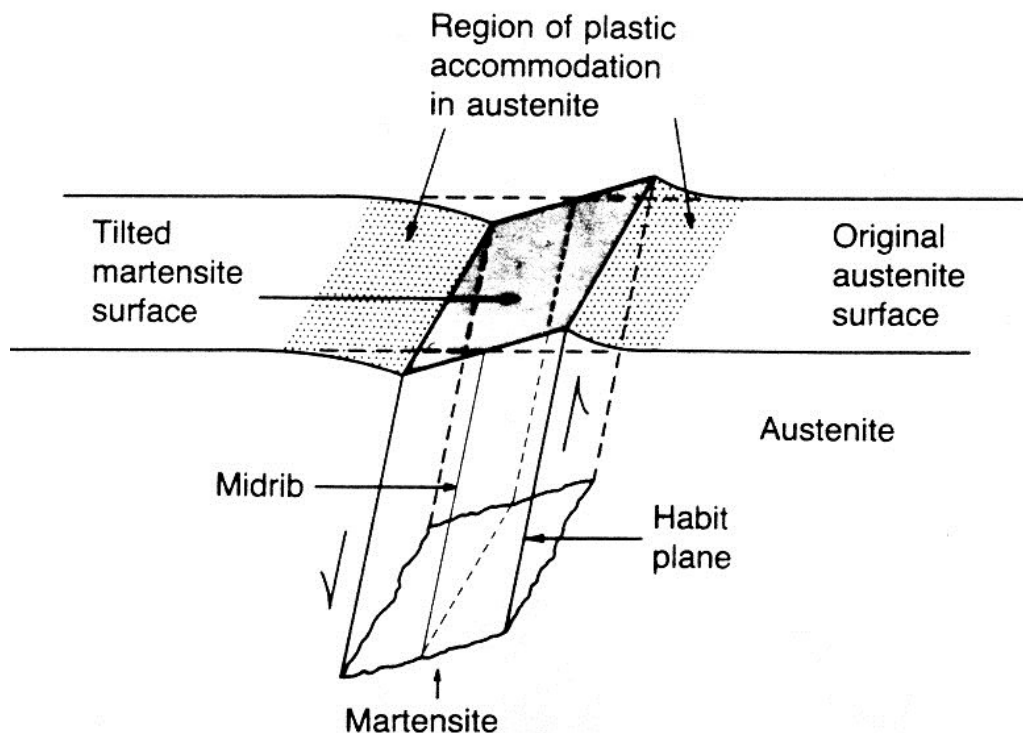
Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

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

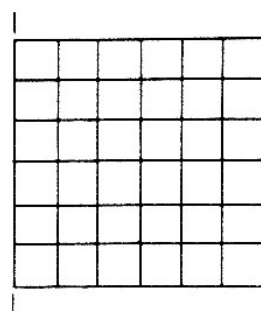


Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

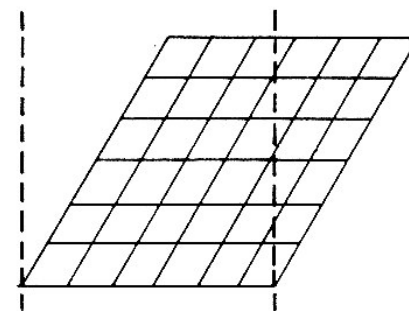
Transformação Martensítica

Porquê que a martensite está cheia de deslocações e maclas?

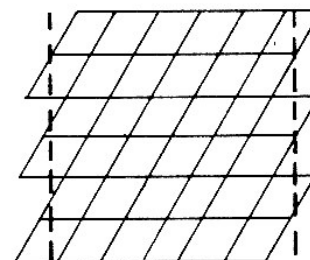
- A deformação da rede causa a rotação do cristal inicial.
- No entanto a fase mãe que está à volta obriga a unidade de martensite a acomodar-se ou deformar-se de maneira a ficar dentro das fronteiras iniciais.
- Na fig. (c) a martensite deforma-se por deslizamento e na (d) por maclagem. Quanto maior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



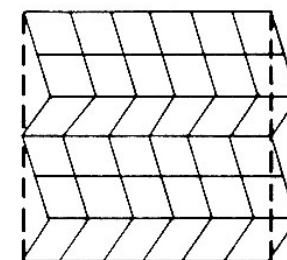
(a)



(b)



(c)



(d)

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

Morfologia da martensite:

%C > 1: placa

- agulhas grandes e pequenas orientadas aleatoriamente
- visíveis no microscópio óptico



%C = 1,5
×150

%C < 0,6: rede ou massiva

- pequenas agulhas que aparecem muito mais ordenadas
- visíveis apenas na microscopia electrónica



%C = 0,15
×250

0,6 < %C < 1: mista

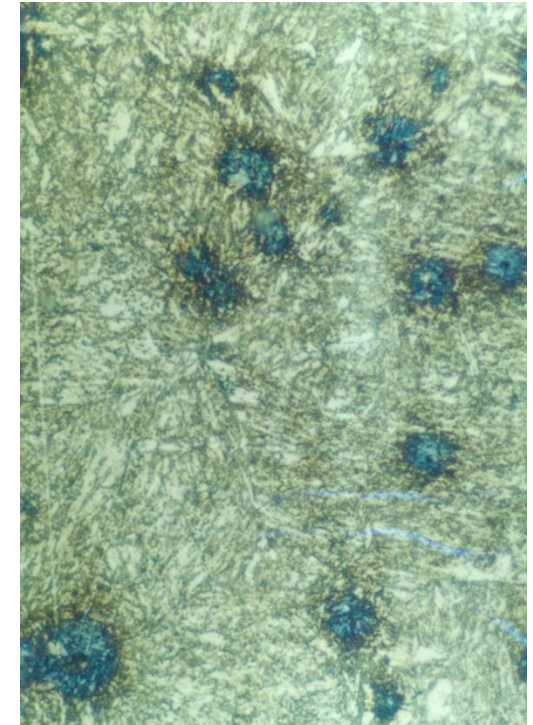
Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)



Aço Moldes Plástico
PM300 (0.33% C)
Estado Tratado

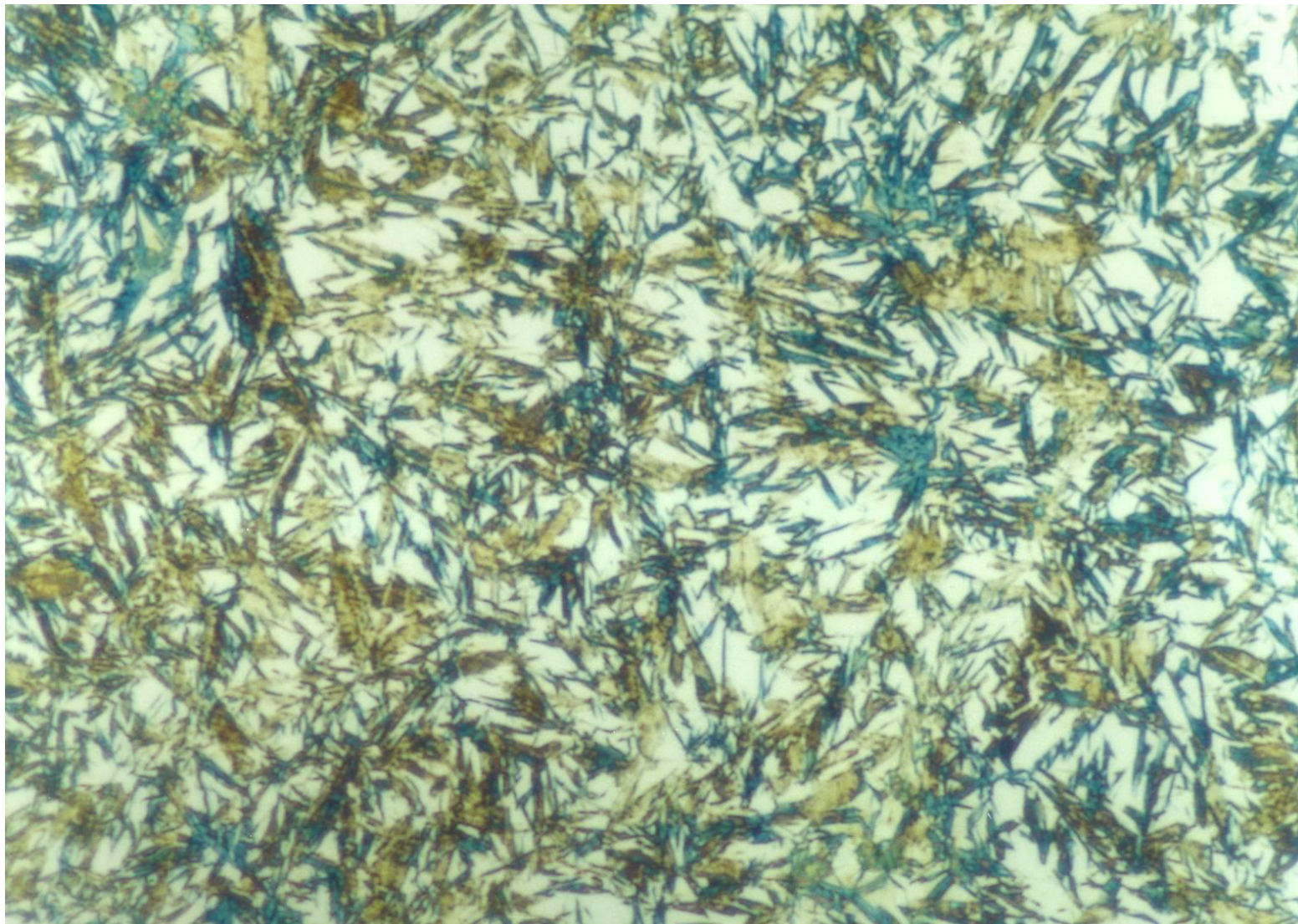


Aço Construção Ligado
FR3 (0.34% C)
Estado Tratado



Aço Molas
RAM 208 (0.55% C)
Estado Tratado

Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

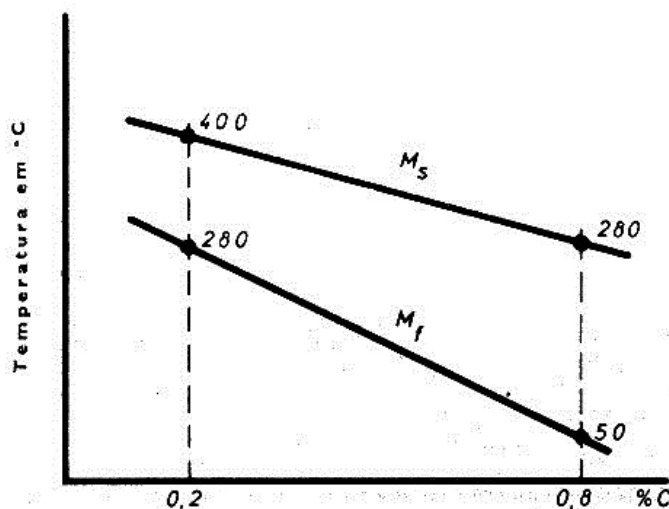


Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

Temperaturas M_s e M_f

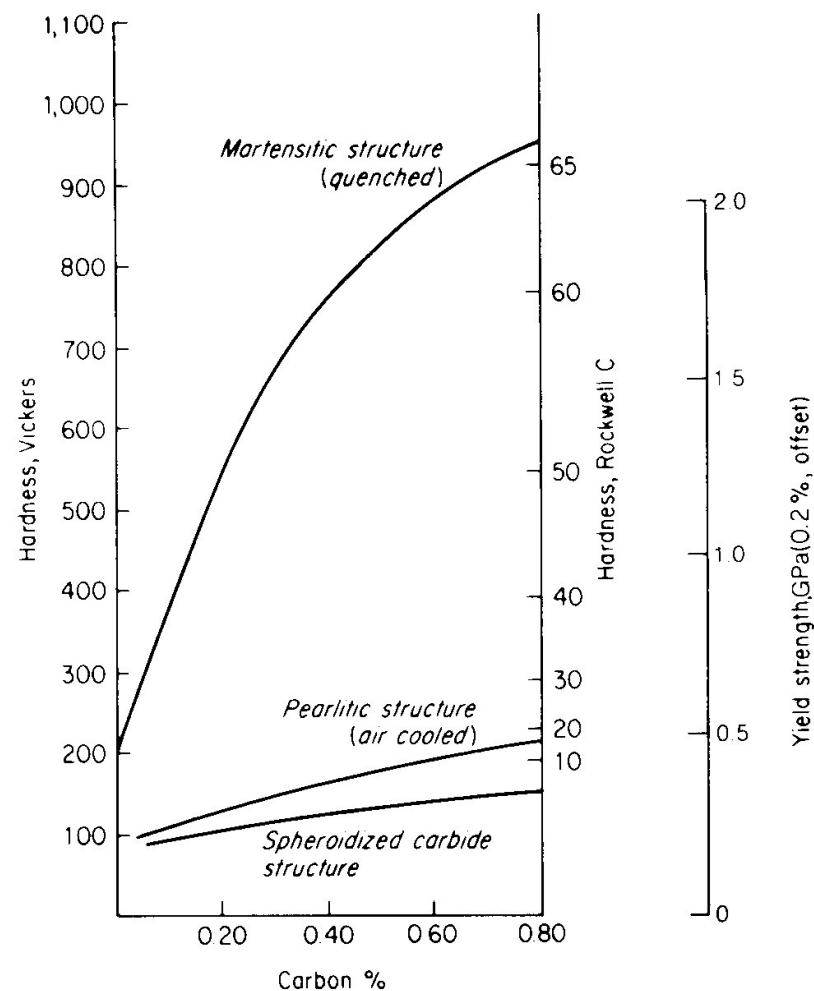
A austenite começa a transformar-se em martensite a uma temperatura M_s (*martensite start*). A temperatura M_f (*martensite finish*) corresponde ao fim da transformação $A \rightarrow M$. Se a temperatura do banho θ_i de têmpera é tal que $M_s > \theta_i > M_f$, a transformação martensítica é incompleta.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



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

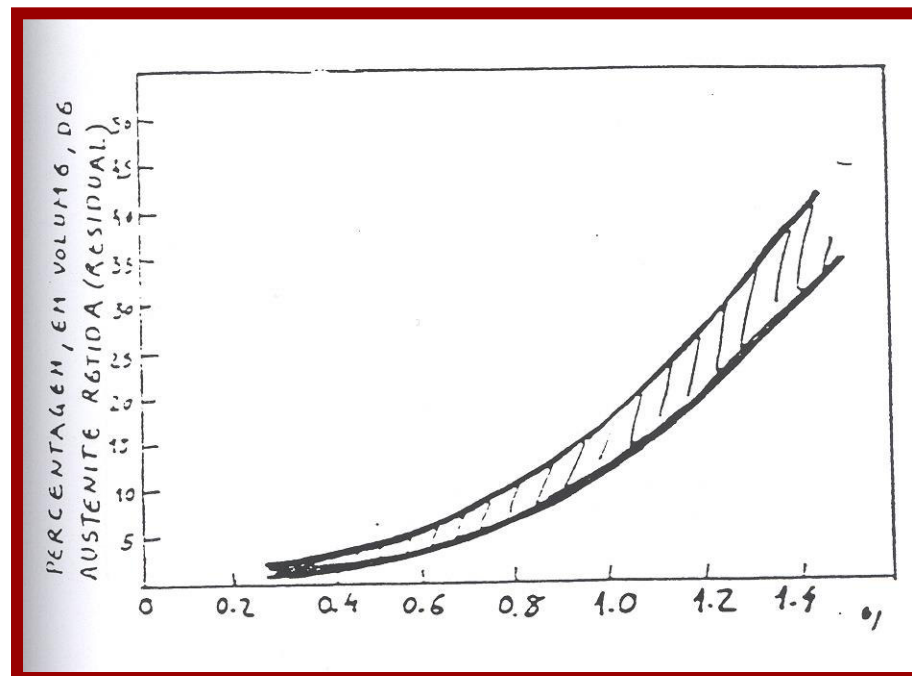
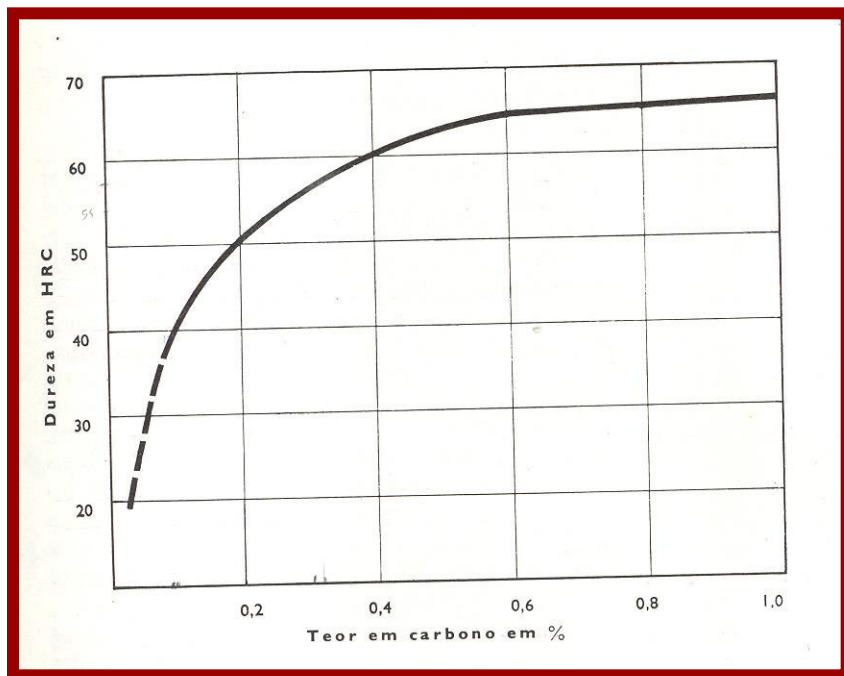
Transformação Martensítica

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



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

Transformação Martensítica

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 influência sobre:

- **Características mecânicas:** diminuição de σ_R , σ_E , H...
- **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:

- Tratamento criogénico (frio) à volta de -80 até -120°C (mais próximo de M_f),
- Revenido após têmpera

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA I (EM0022)

ENSAIO DE DUREZA

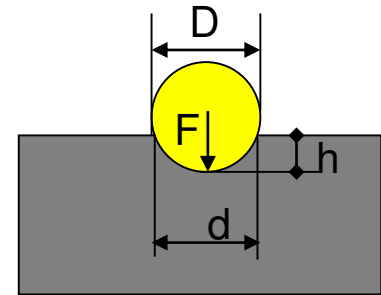
Jorge Lino

INTRODUÇÃO

A dureza define-se como sendo a resistência que um material oferece a sofrer uma deformação plástica na sua superfície.

Interesse do conhecimento da dureza (exemplos):

- 1. Conhecimento da resistência ao desgaste;**
- 2. Conhecimento aproximado da resistência mecânica através do uso de tabelas de correlação;**
- 3. Controlo de qualidade de tratamentos térmicos;**
- 4. Controlo de qualidade em processos de conformação plástica e em processos de ligação.**



INTRODUÇÃO

1 – Vantagens:

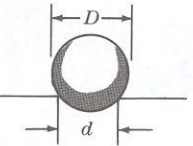
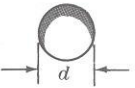
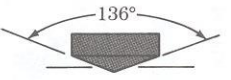
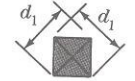
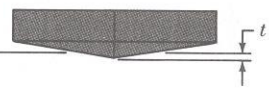
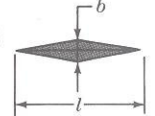
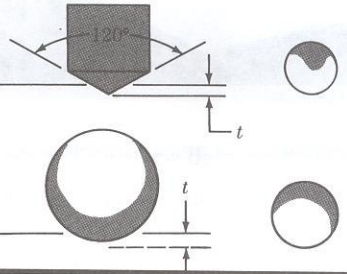


- **Rapidez de execução;**
- **Baixo custo dos equipamentos envolvidos.**

2 – Métodos de medição:

- **Risco (escala de dureza de MOHS);**
- **Ressalto (método SHORE);**
- **Penetração (BRINNEL, VICKERS, ROCKWELL).**

INTRODUÇÃO

TABELA 6.2 Ensaios de dureza

Ensaio	Indentador	Forma da indentação		Carga	Fórmula do número de dureza
		Vista lateral	Vista de topo		
Brinell	Esfera de aço ou carboneto de tungsténio, com 10 mm de diâmetro			P	$NDB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirâmide de diamante			P	$NDV = \frac{1,72 P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$NDK = \frac{14,2 P}{l^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cone de diamante			60 kg R_A	100-500t
				150 kg R_C	
				100 kg R_D	
B } F } G }	Esfera de aço com 1,6 mm de diâmetro			100 kg R_B	130-500t
				60 kg R_F	
				150 kg R_G	
E	Esfera de aço, com 3,2 mm de diâmetro			100 kg R_E	

Fonte: H. W. Hayden, W. G. Moffatt e J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol.III, Wiley, 1965, p.12.



MÉTODOS DE MEDIÇÃO

1. ESCALA DE DUREZA DE MOHS (ANO DE 1822)

Nº de Dureza	Termo de Escala
1	Talco
2	Gesso
3	Calcite
4	Fluorite
5	Apatite
6	Ortóclase
7	Quartzo
8	Topázio
9	Corindo
10	Diamante

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

2. DUREZA POR RESSALTO (MÉTODO SHORE)

Definição: É uma medida da capacidade que o material apresenta em absorver a energia cinética de um corpo que embate na sua superfície.

Domínio de aplicação:

- Cobre toda a gama de dureza dos metais;
- Útil para medições em estaleiro.

Limitações:

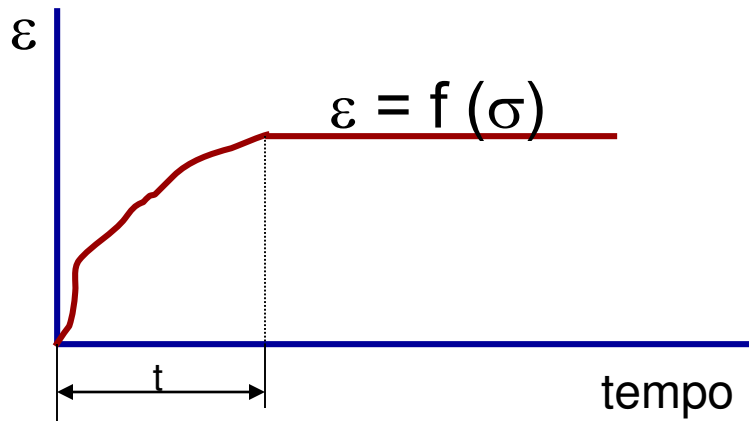
- Deve ser executado com o tubo perfeitamente vertical;
- Muito sensível ao acabamento superficial;
- Medições em peças pouco espessas são sensíveis ao tipo de apoio;
- Peças pouco espessas ou de baixa rigidez podem entrar em vibração com o impacto.

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

3. DUREZA POR PENETRAÇÃO (PRINCÍPIOS GERAIS)

Cuidados a ter:

- Perpendicularidade entre a força e a superfície da peça;
- Aplicação lenta da carga;
- Preparação correcta da superfície;
- Tempo de espera após aplicação da carga antes da descarga (fenómeno de fluência transitória).



Valores de t:

Mg – 60s

Aços – 10s

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

3.1 MÉTODO BRINNEL (ANO 1900)

- Penetrador esférico – esfera de aço, CW

A geometria do penetrador só garante proporcionalidade entre os incrementos de carga e os incrementos de área da calote.

Verifica-se que é válida a relação:

$$\frac{P}{D^2} = c^{te}$$

Aços e ferros fundidos:	30
Ligas de Cu e Al:	10
Ligas de Pb e Sn:	2.5

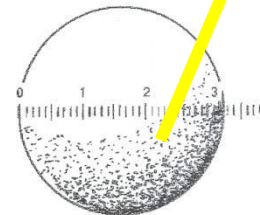
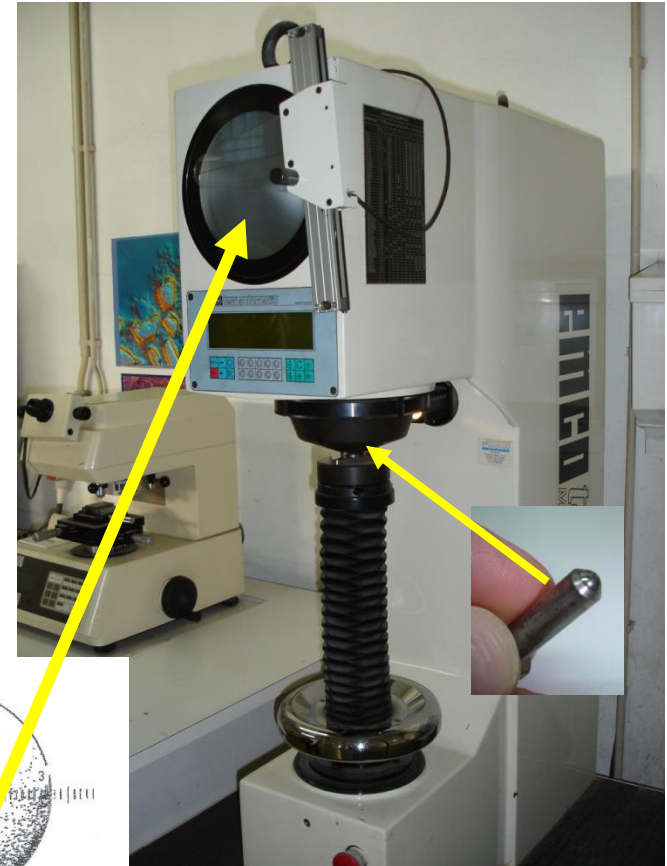
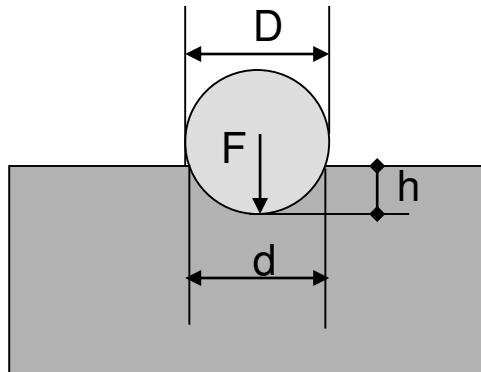


Imagem da medição da impressão através de um Micrômetro Óptico.

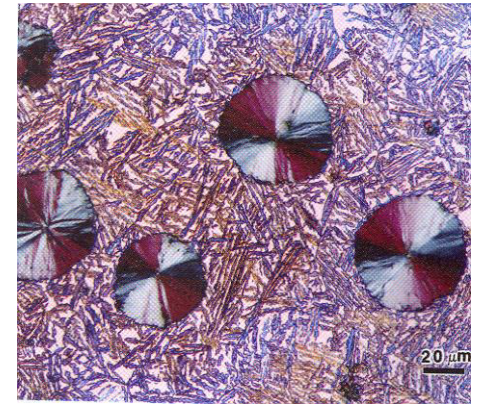
MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Vantagens:

- Económico;
- Baixo tempo de preparação das superfícies;
- Único possível para materiais pouco homogéneos.

Desvantagens:

- Não linearidade carga - impressão
- Dureza máxima admissível baixa.



Apresentação do resultado da medição:

Exemplo:

360 HBS 5/750/10

Esfera de aço – HBS

Esfera de W - HBW

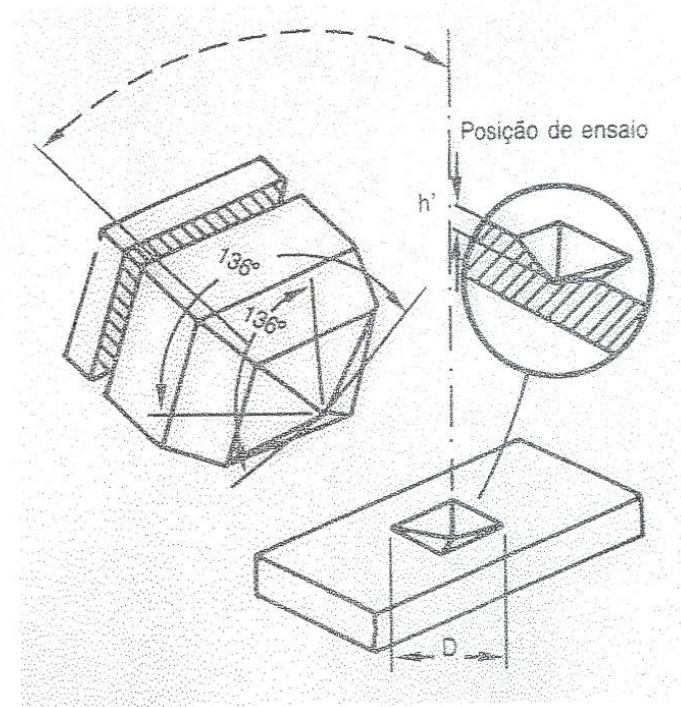
- diâmetro da esfera utilizada
- valor da força de ensaio
- duração da aplicação da força

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

3.2 MÉTODO VICKERS (ANO 1929)

Características:

- Utiliza um penetrador de diamante, o que torna o ensaio aplicável a todos os tipos de materiais;
- A área da impressão é proporcional à força aplicada, o que torna o ensaio insensível à força aplicada.



MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Forças aplicáveis:

- De 1 até 120kgf em macradurezas
- De 10 a 1000g em microdurezas

Baixas forças aplicadas



Diminuem o risco de danificação do penetrador



Exigem instrumentação de leitura mais correcta e melhor preparação da amostra

Para durezas até cerca de 300HB, as escalas Brinell e Vickers são coincidentes

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Vantagens:

- Escala contínua;
- Grande precisão de medida (deformação nula do penetrador);
- Possibilidade de fazer impressões muito pequenas;
- Possibilidade de medir durezas em todos os materiais.

Desvantagens:

- Regulação de velocidade mais crítica (mais moroso);
- Superfície muito mais cuidada (maiores ampliações);
- Ensaio globalmente menos económico.

Apresentação do resultado da medição:

Exemplo:

540 HV 20/20

- valor da força do ensaio
- duração da aplicação da força

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

3.3 MÉTODO ROCKWELL (ANO 1924)

ENSAIO ROCKWELL NORMAL

- Baseia-se no princípio da impressão;
- A variável de medida é a penetração;
- Não existe sistema óptico, mas sim um comparador.



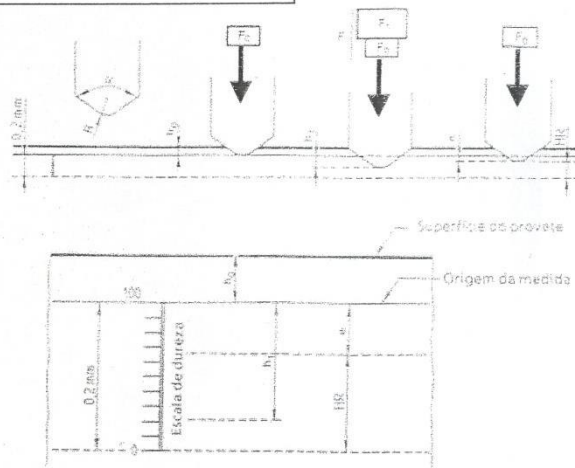
MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Procedimento (NP141-1990):

Escalas de dureza Rockwell (NP141-1990):

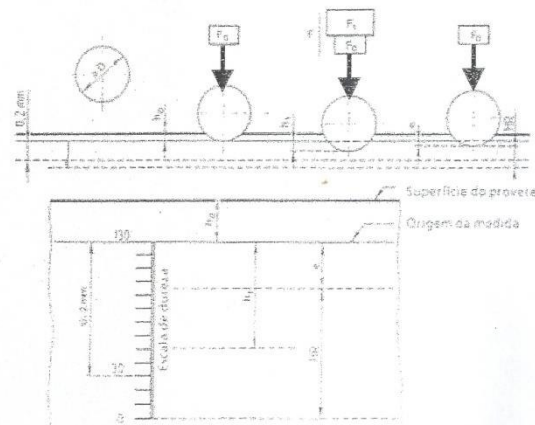
a) Escalas

A
C
D



b) Escalas

B
E
F
G
M
H
K



Escala de Dureza	Símbolo de Dureza	Tipo de Penetrador	Força Inicial FO(N)	Força Adicional FI(N)	Força Total F(N)	Campo de Aplicação	Materiais
A	HRA	Cone de diamante	98,07	490,3	588	20 a 88 HRA	aços niturados carbonetos metálicos
B	HRB	Esfera de aço 1,5875mm	98,07	882,6	981	20 a 100 HRB	aços ao carbono recozidos c/ baixo teor de carbono
C	HRC	Cone de diamante	98,07	1373	1471	20 a 70 HRC	aços duros
D	HRD	Cone de Diamante	98,07	882,6	981	40 a 77 HRD	aços cementados
E	HRE	Esfera de aço 3,175mm	98,07	882,6	981	70 a 100 HRE	metais macios, como antifricção e peças fundidas
F	HRF	Esfera de aço 1,587mm	98,07	490,3	588	60 a 100 3 HRF	bronze recozido
G	HRG	Esfera de aço 1,5875mm	98,07	1373	1471	30 a 94 HRG	bronze fosforoso e outros metais
H	HRH	Esfera de aço 3,175mm	98,07	490,03	588	80 a 100 HRH	metais macios com homogeneidade ferro fundido
K	HRK	Esfera de aço 3,175mm	98,07	1373	1471	40 a 100 HRK	Metais duros com homogeneidade ferro fundido

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Ensaio Rockwell para produtos metálicos de pequena espessura (NP4072: 1990-

Nota:

Utiliza-se como penetrador apenas uma esfera de aço com 1/16'' de diâmetro.

Espessuras $\geq 6\text{mm}$

$$F_0 = 10\text{kgf}$$

$$F_1 = 90\text{kgf}$$

Espessuras $< 6\text{mm}$

$$F_0 = 3\text{kgf}$$

$$F_1 = 27\text{kgf}$$

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Ensaio Rockwell superficial (NP4073: 1990 -

- Para determinar a dureza da camada superficial;
- Em peças que só possam admitir impressões muito pequenas.

Escalas de dureza Rockwell superficial (NP4073:1990)

Escala de dureza	Símbolo de dureza	Pene-trador	Força inicial (Fo)	Força adicional (F1)	Força total (F (N))	Campo de aplicação	Materi-ais
15N	HR15N	cone	3kgf	12	15	70-94 HR15N	aços tratados e metal duro
30N	HR30N	cone	3kgf	27	30	42-86 HR30N	idem
45N	HR45N	cone	3kgf	42	45	20-77 HR45N	idem
15T	HR15T	esfera 1/16''	3kgf	12	15	6-9 HR15T	bronze, latão, aço macio
30T	HR30T	esfera 1/16''	3kgf	27	30	29-82 HR30T	idem
45T	HR45T	esfera 1/16''	3kgf	42	45	1-72 HR45T	idem

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Vantagens do Método Rockwell:

- As superfícies não necessitam de polimento;
- Pequenas irregularidades são eliminadas pela pré-carga;
- Não necessita de sistema óptico;
- Equipamento mais simples.

Desvantagens:

- Escala C só para aços temperados;
- Necessidade de usar muitas escalas e esferas diferentes para abranger toda a gama de materiais possíveis.

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Equivalência entre escalas de dureza

DUREZA DE MATERIAIS DE USO CORRENTE	Vickers	Brinell	Rockwell	Mohs	Shore
			BC		
	2500			10	
	2000				
Carbonetos sinterizados	1500			9	
	1000				100
Aços ferramentas temperados	900	700		8	90
	800				
	700	600		60	80
	600	600			
	500	500		55	
	400	400		50	
				45	
				40	50
				35	
Aços de construção tratados	300	300		30	40
			100	25	5
				20	
Aços recozidos	200	200	90	7	Espatoflúor
Duraluminios		80		3	Calcite
Bronzes		70			
Aços macios	100	100	60		
	90	90		2	Gesso
	80	80			
	70	70			
Latões	60	60			
Cobres	50	50			
Ligas de alumínio	40	40			
	30	30			
				1	Talco
	20	20			

MÉTODOS DE MEDIÇÃO

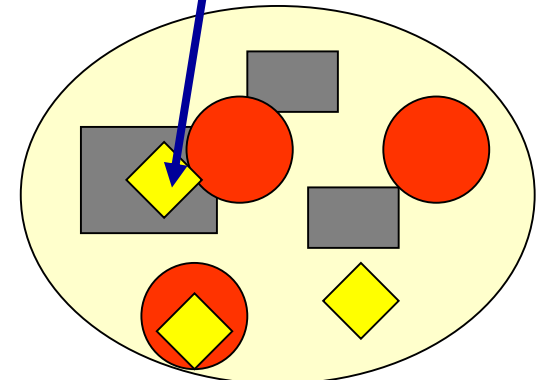
3. DUREZA POR PENETRAÇÃO (PRINCÍPIOS GERAIS)

Microdurezas

A microdureza utiliza forças de ensaio bastante baixas, geralmente, inferiores a 1kgf.

Interesse:

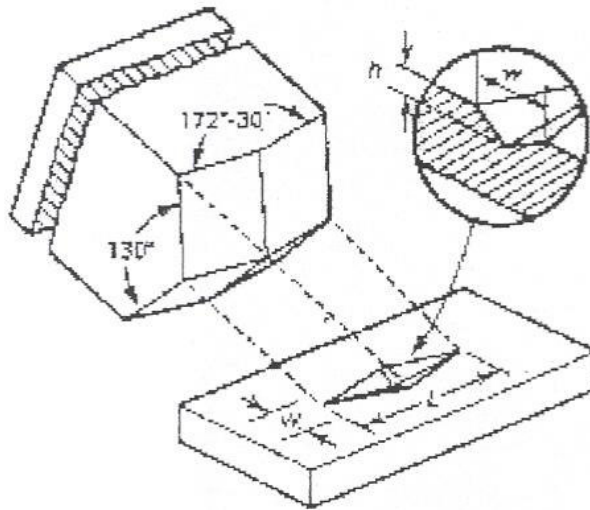
- Medição da dureza de microconstituintes;
- Dureza em peças de dimensões muito pequenas.



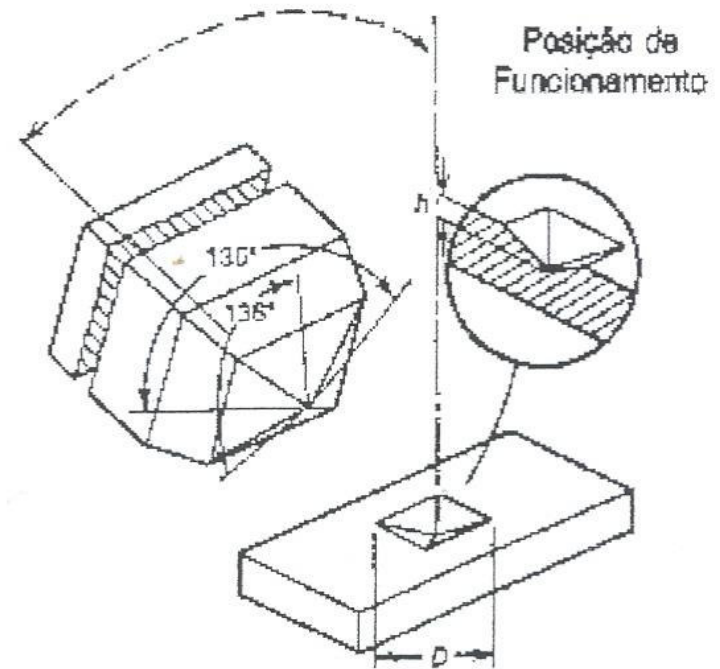
MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Tipo de penetradores:

KNOOP



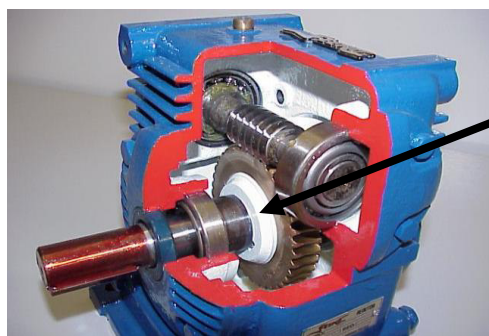
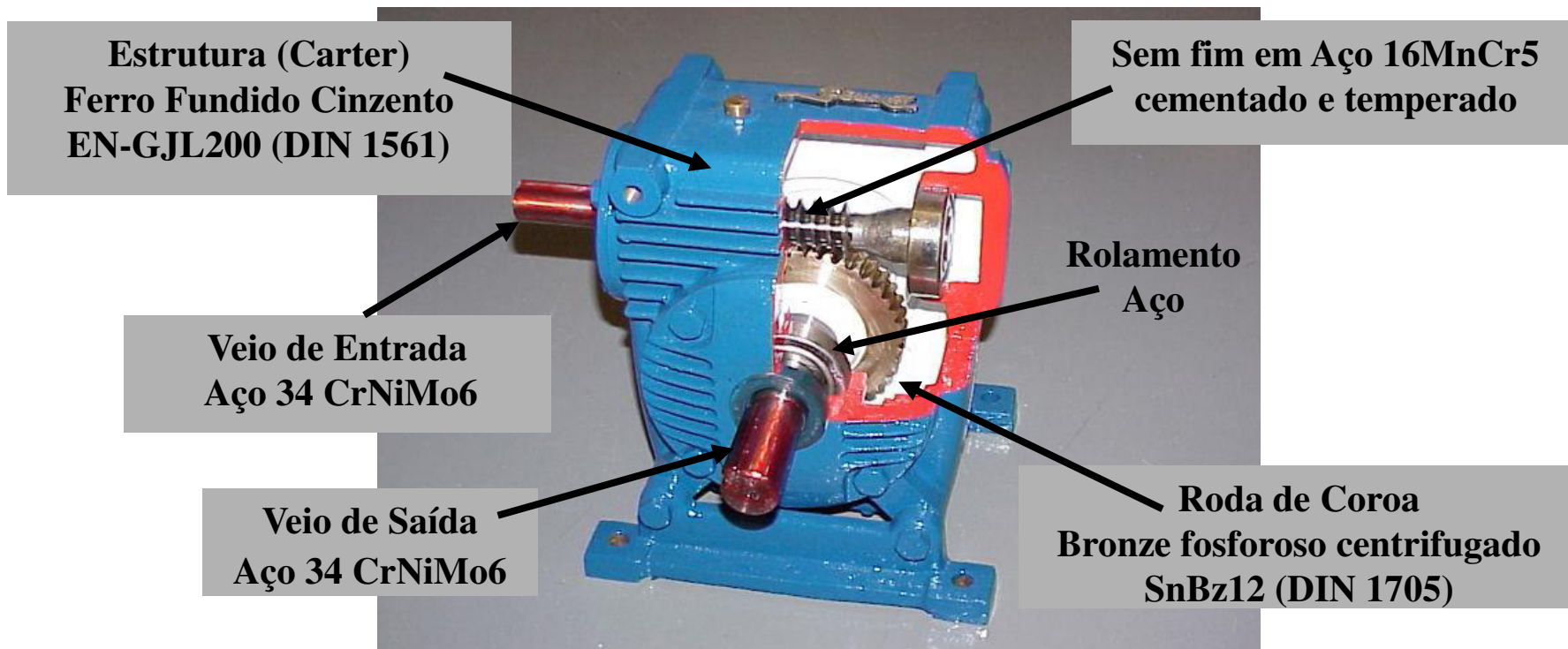
VICKERS



MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA I (EM0022)

FERROS FUNDIDOS

Jorge Lino



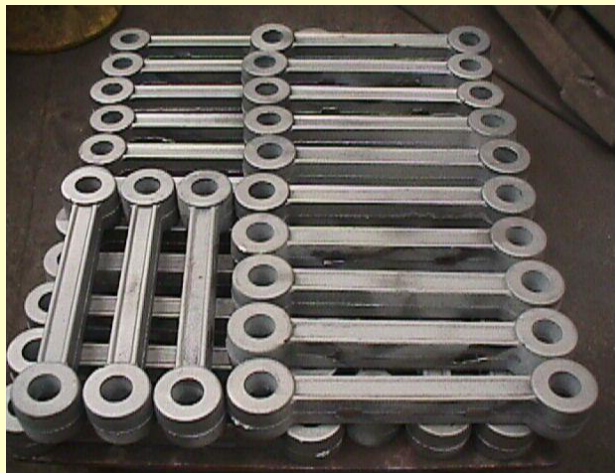
Características:

1. Entre-eixo 63 mm
2. Redução 39/1

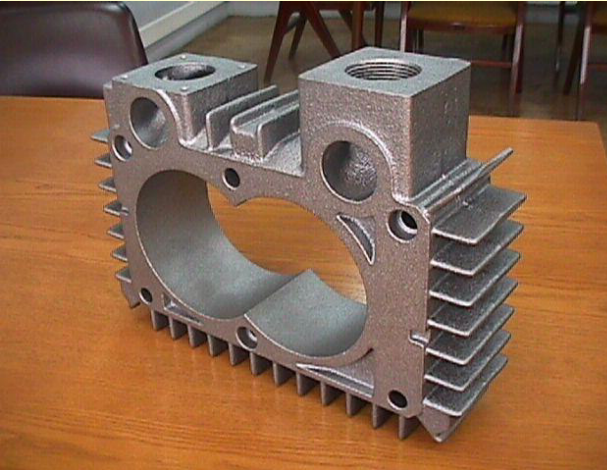
Oferta da Felino ao DEMEGI



Fotos JL na Felino



Fotos JL na Felino

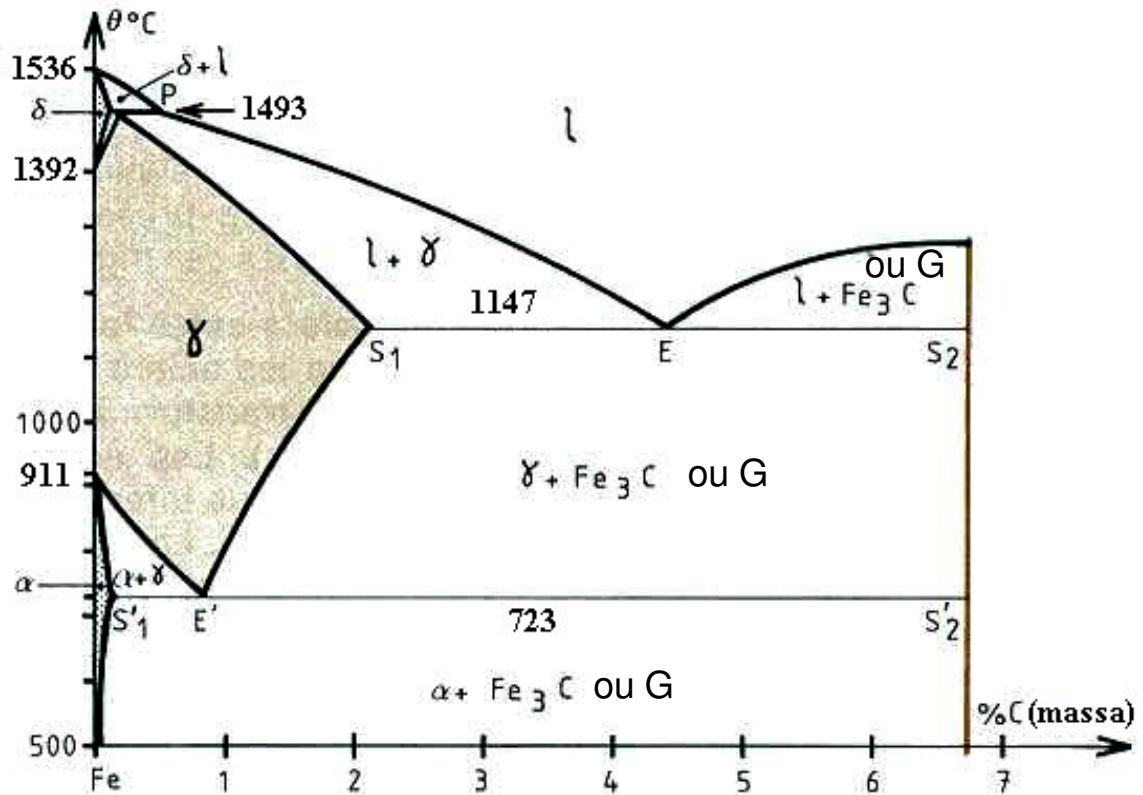


Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos

Chama-se **FERROS FUNDIDOS** às ligas metálicas constituídas fundamentalmente por Fe e C, e nas quais se forma, durante a solidificação, grafite ou Fe_3C ou ambos.

Ligas Fe-C (2-4%)
+
Si, Mn, S, P, ...



Ferros Fundidos

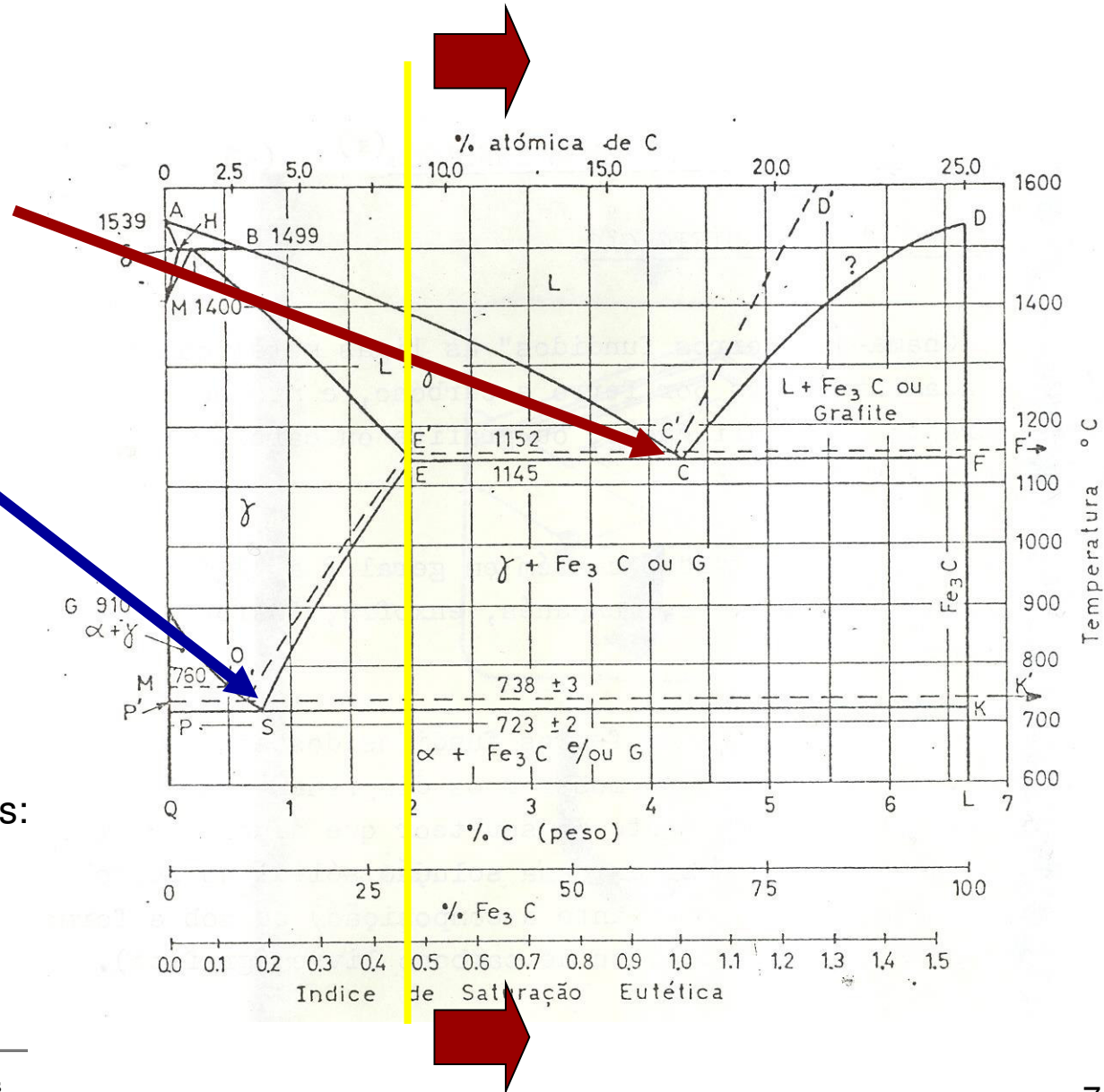
Ferros Fundidos Aços

Diagrama Fe - C:

- Diagrama estável
- Diagrama metaestável

O grau de estabilidade é influenciado por vários factores:

- Temperatura
- Composição



Ferros Fundidos

As características dos FF dependem da forma como o C não dissolvido na matriz se apresenta após a solidificação (segundo o diagrama estável – grafite, ou metaestável - cementite).

A velocidade de decomposição da cementite é extremamente baixa:



Produz-se a uma veloc. quase nula, provavelmente devido ao aumento de volume que acompanha a precipitação da grafite (a densidade da grafite é mt baixa, pois o seu vol. específico é cerca de 3x superior ao da cementite).

Ferros Fundidos

Deve-se ter em atenção ao facto de que os elementos presentes no FF deslocam a maior parte dos pontos e linhas do diagrama Fe – C.

Elemento	Deslocamento correspondente a 1% de adição: %C (eutético)	Domínio de validade %
Si	- 0.31	< 5.5
P	- 0.33	< 3
S	- 0.36	< 0.4
Al	- 0.25	< 2
Cu	- 0.074	< 3.8
Ni	- 0.053	< 8
Mn	+ 0.027	< 25
Cr	+ 0.065	< 9
Mo	+ 0.025	< 2
V	+ 0.135	< 3.4

Ferros Fundidos

O Si é um elemento que tem grande influência no diagrama de equilíbrio devido às % em que é utilizado nestas ligas.

O C pode precipitar em formas muito diversas, originando diferentes tipos de FF.

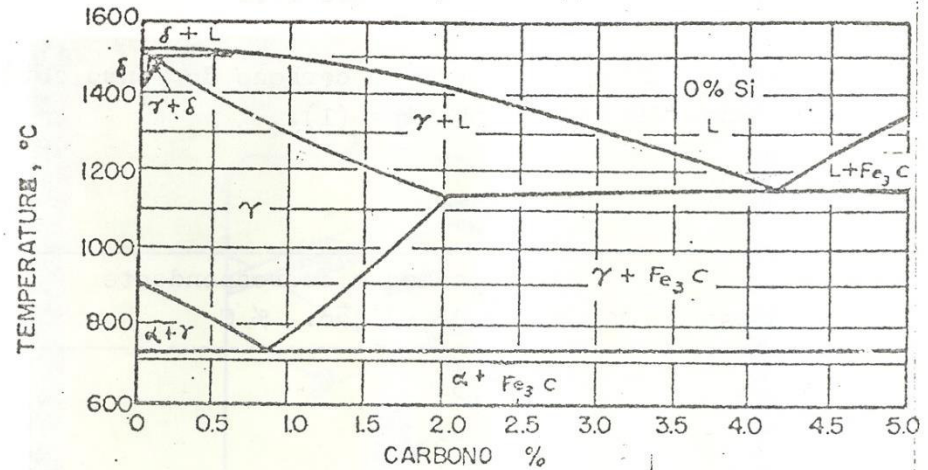


Fig. 4.2a- Diagrama Fe-C, simplificado

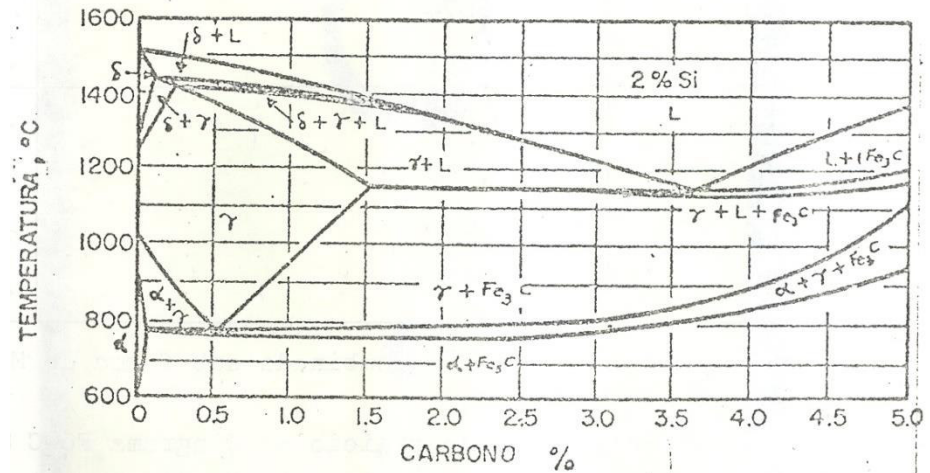


Fig. 4.2b- Corte a 2% Si no diagrama Fe-C-Si simplificado.

Ferros Fundidos

Tipos de FF ou classes:

1. FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

Carbono precipita sob a forma de grafite lamelar

Denominação resulta da cor da fractura

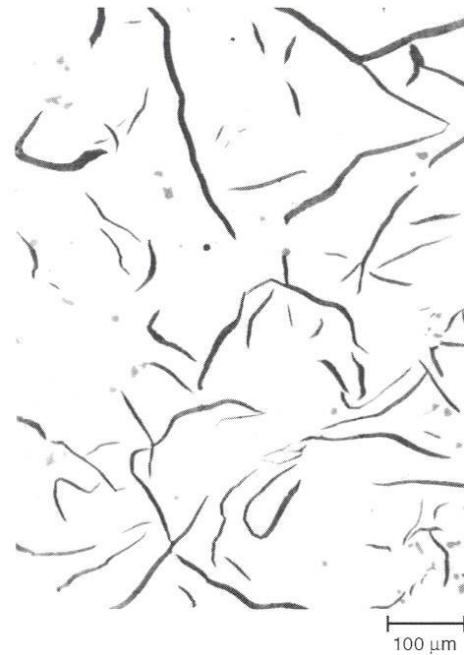


Fig. 58 Hypoeutectic as-cast gray iron (Fe-2.8%C-1.85%Si-0.5%Mn-0.04%P-0.025%S). Flake graphite type A. As-polished. 100×



Fig. 60 Hypereutectic as-cast gray iron (Fe-3.5%C-2.95%Si-0.4%Mn-0.08%P-0.02%S-0.13%Ni-0.15%Cu). Flake graphite type A. As-polished. 100×

Ferros Fundidos

2. FERROS FUNDIDOS DÚCTEIS

Carbono precipita sob a forma de nódulos.

A fractura é menos cinzenta.

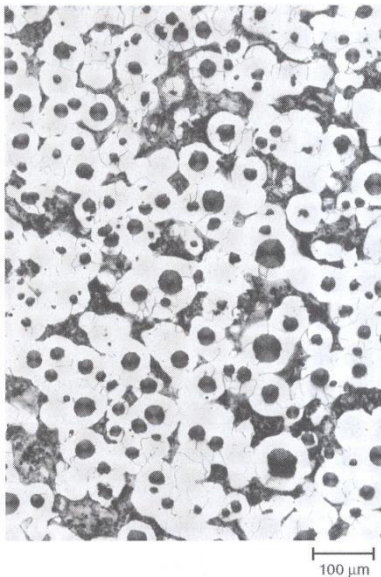


Fig. 83 As-cast ductile iron. Ferritic-pearlitic matrix. Etched with 4% nital. 100×

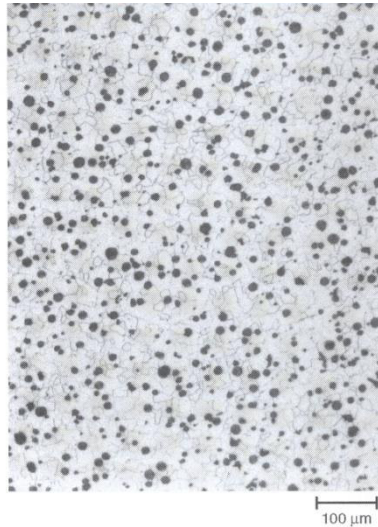


Fig. 84 Ductile iron. Ferritic matrix. The casting was annealed at 900 °C (1650 °F), held 2 h, quick furnace cooled to 730 °C (1345 °F), slow furnace cooled to 600 °C (1110 °F), and air cooled. Etched with 4% nital. 100×

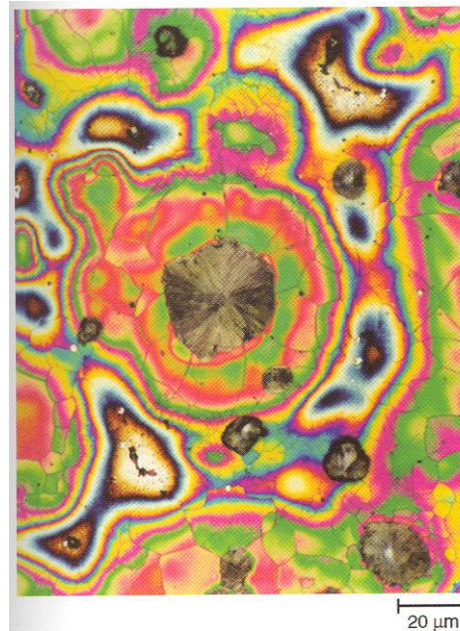


Fig. 22 Nodular iron (Fe-3.9%C-2.9%Si-0.32%Mn-0.06%P-0.037%Mg-1.5%Ni-0.57%Cu). Silicon microsegregation was revealed. The casting was annealed. Etched with hot aqueous solution of sodium hydroxide, picric acid, and potassium pyrosulfite (Table 2, etchant No. 7). 500×

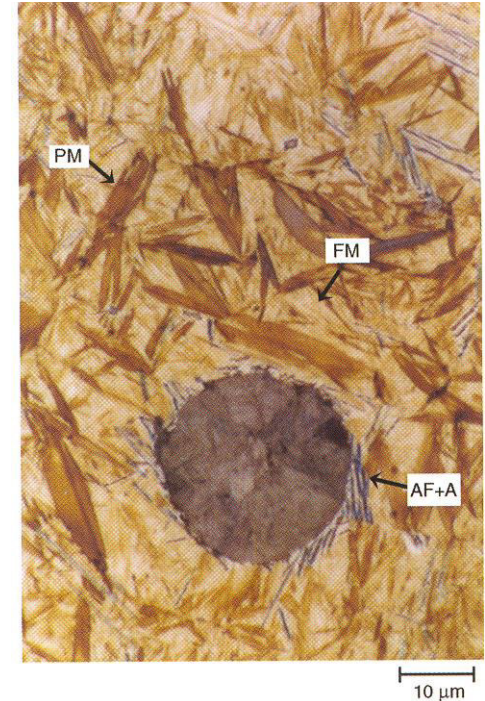


Fig. 35 Same as in Fig. 32 but after etching with 10% sodium metabisulfite. PM, plate martensite; FM, fine martensite; and AF + A, acicular ferrite and austenite. 1000×

Ferros Fundidos

3. FERROS FUNDIDOS BRANCOS

Carbono precipita sob a forma de cementite.

A fractura é branca.



Fig. 94 As-cast white iron (Fe-3.0%C-2.7%Si-0.45%Mn-0.07%P-0.025%S). C, cementite; P, pearlite. Etched with 4% nital. 400×

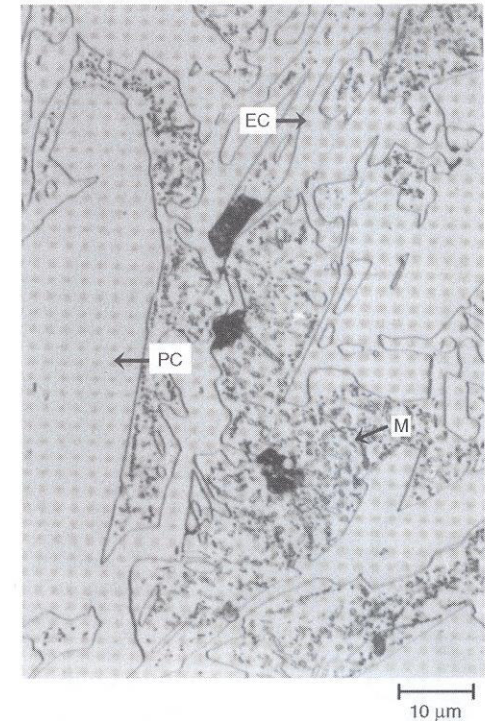


Fig. 96 White high-chromium cast iron (see Fig. 43). PC, primary carbides; EC, eutectic carbides in martensitic matrix with fine, globular secondary carbides. The casting was heat treated at 1000 °C (1830 °F), held 1 h, furnace cooled to 550 °C (1020 °F), held 4 h in a 400 °C (750 °F) salt bath, and air cooled. Etched with glyceric acid. 1000×

Ferros Fundidos

4. FERROS FUNDIDOS TEMPERADOS E MESCLADOS

Estrutura mesclada ou com
estrutura parcialmente branca
(ledeburítica) e parcialmente
cinzenta (grafítica)

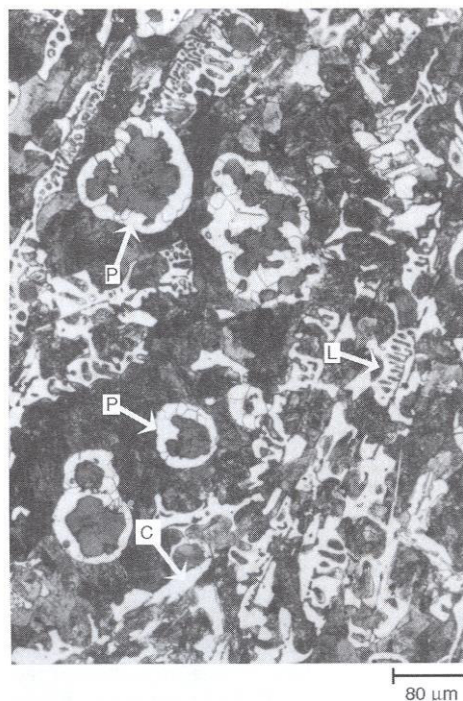


Fig. 85 As-cast ductile iron (Fe-3.35%C-2.05%Si-0.08%Mn-0.04%P-0.02%Cr-0.02%Ni-0.045%Mg). C, cementite; L, ledeburite; and P, pearlite and ferrite around graphite nodules. Etched with 4% nital. 125× (microscopic magnification is 100×)

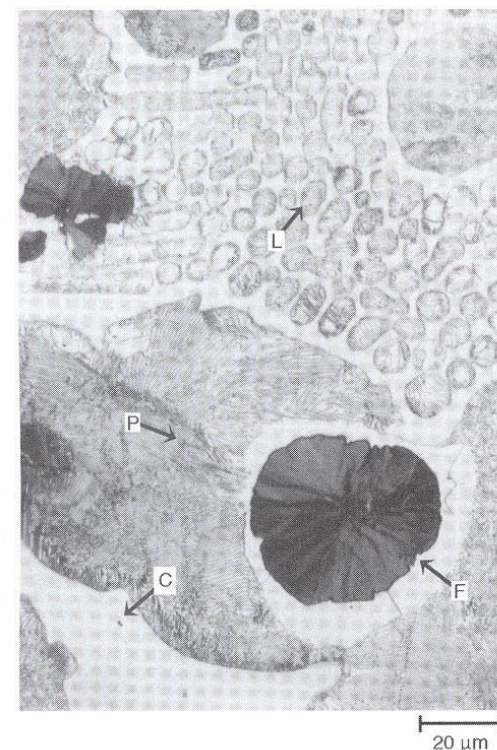


Fig. 86 Same as in Fig. 85. C, cementite; L, ledeburite; F, ferrite; and P, pearlite. 500×

Ferros Fundidos

5. FERROS FUNDIDOS MALEÁVEIS

No estado bruto de vazamento são ffb sofrendo posteriormente um TT de maleabilização (24h):

Coração negro ou americanos: precipitação de grafite sob a forma de rosetas ou nódulos mais ou menos recortados.

Coração branco ou europeus: o carbono é eliminado, total ou parcialmente, durante um TT descarburante.



Fig. 92 Malleable iron (Fe-2.95%C-1.2%Si-0.53%Mn-0.06%P-0.21%S-0.08%Cr-0.10%Cu-0.07%Ni-<0.01%Al). The casting was annealed: at 950 °C (1740 °F), held 10 h, furnace cooled to 720 °C (1330 °F), held 16 h, and air cooled. Pearlitic-ferritic matrix. Etched with 4% nital. 125× (microscopic magnification 100×)

Ferros Fundidos

As propriedades dos ff dependem da forma e distribuição da grafite e da estrutura da matriz.

Na maioria dos casos a matriz dos ff é constituída por perlite e/ou ferrite.

Tipo Ferro Fundido	Composição, %				
	C	Si	Mn	P	S
Cinzento	2.5 – 4.0	1.0 – 3.0	0.2 – 1.0	0.05 – 1.0	0.02 – 0.25
Dúctil	3.0 – 4.0	1.8 – 2.8	0.10 – 1.00	0.01 – 0.10	0.01 – 0.03
Branco	1.8 – 3.6	0.5 – 1.9	0.25 – 0.80	0.06 – 0.18	0.06 – 0.20
Maleável	2.2 – 2.9	0.9 – 1.9	0.15-1.2	0.02 – 0.2	0.02 – 0.2

O mesmo banho (3.5%C, 1.75%Si e 0.29%Mn) pode ser utilizado para produzir cinzento e nodular. Após vaziar o nodular deve-se adicionar Mn para vaziar o cinzento (perlitizar).

Ferros Fundidos

TABELA 9.14 Propriedades mecânicas típicas e aplicações dos ferros fundidos

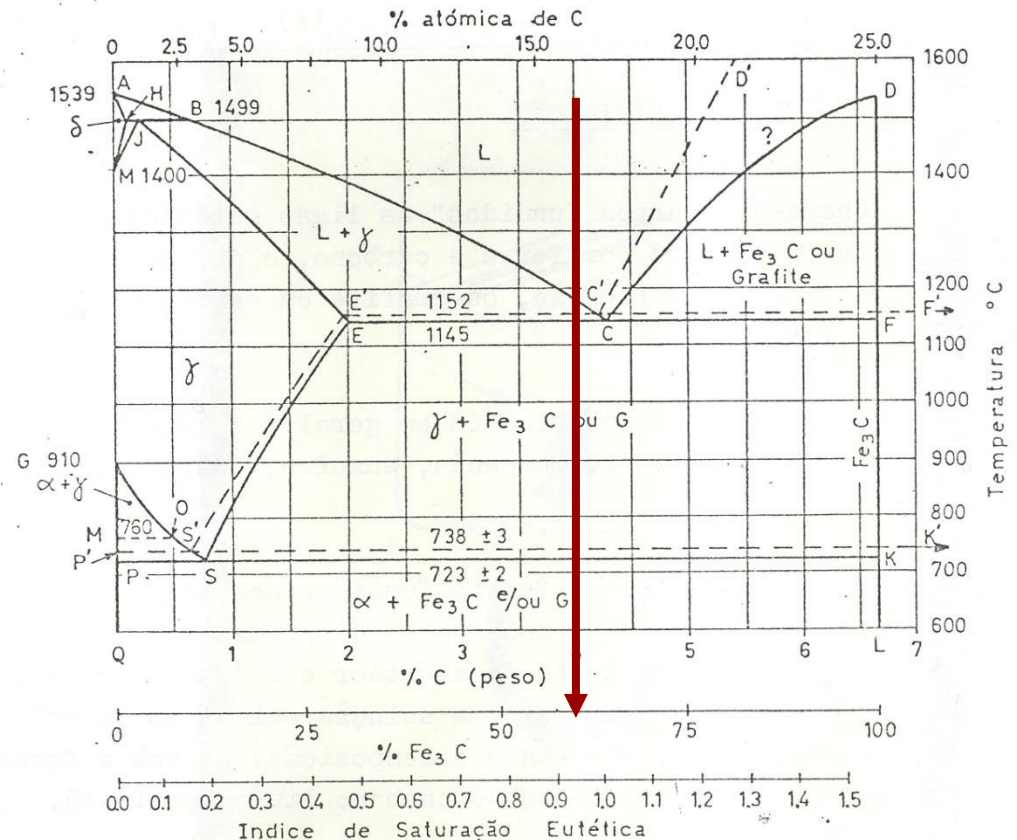
Designação e número da liga	Composição química % pond.	Estado	Microestrutura	Resistência à tracção MPa	Tensão de cedência MPa	Alongamento %	Aplicações típicas
Ferros fundidos cinzentos							
Ferrítico (G2500)	3,4 C; 2,2 Si; 0,7 Mn	Recozido	Matriz ferrítica	179	.....	...	Cilindros pequenos, cabeças de cilindros, discos de embraiagens.
Perlítico (G3500)	3,2 C; 2,0 Si; 0,7 Mn	Vazado	Matriz perlítica	252	...	...	Cilindros para camiões e tractores, caixas de engrenagens pesadas.
Perlítico (G4000)	3,3 C; 2,2 Si; 0,7 Mn	Vazado	Matriz perlítica	293	...	...	Vazados para motores diesel.
Ferros fundidos maleáveis							
Ferrítico (32510)	2,2 C; 1,2 Si; 0,04 Mn	Recozido	Carbono revenido e ferrite	345	224	10	Utilizações gerais de engenharia, com boa maquinabilidade.
Perlítico (45008)	2,4 C; 1,4 Si; 0,75 Mn	Recozido	Carbono revenido e ferrite	440	310	8	Utilizações gerais de engenharia, com tolerâncias dimensionais especificadas.
Martensítico (M7002)	2,4 C; 1,4 Si; 0,75 Mn	Temperado e revenido	Martensite revenida	621	438	2	Peças com elevada resistência mecânica; bielas e juntas de transmissão homocinéticas.
Ferros fundidos dúcteis							
Ferrítico (60-40-18)	3,5C; 2,2 Si	Recozido	Ferrítica	414	276	18	Peças vazadas sob pressão, como válvulas e corpos de bombas.
Perlítico	3,5 C; 2,2 Si	Vazado	Ferrítica-perlítica	552	379	6	Eixos de manivelas, engrenagens, e esferas de rolamentos.
Martensítico (120-90-02)	3,5 C; 2,2 Si	Temperado e revenido	Martensítica	828	621	2	Rodas dentadas, engrenagens, esferas de rolamentos e guias.

Ferros Fundidos

SOLIDIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS

Para que ocorra a precipitação do eutético γ -G (anormal – não há germinação recíproca nem crescimento coerente das duas fases) é necessário a existência de germens abundantes de G.

Ora a γ já solidificada não serve de germen de solidificação da G.



Ferros Fundidos

ESTADO DE NUCLEAÇÃO DO METAL LÍQUIDO

Germens possíveis:

- Partículas de grafite
- SMn
- SiO₂
- Carbonetos de Ca e de Ba
- Óxido de Al

INOCULAÇÃO: Introdução no FF líquido, pouco antes do vazamento, de certas adições tais como Fe - Si, Si - Ca, etc., que aumentam o poder germinador do banho para a grafite.

O efeito das inoculações diminui com o tempo e normalmente ao fim de 20-30min desaparece integralmente (coagulação dos germens e sua flutuação no banho).



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos



Fotos JL na Felino



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos Cinzentos



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos Cinzentos



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos Cinzentos



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos Cinzentos



Ferros Fundidos Dúcteis



Fotos JL na Felino

Ferros Fundidos Dúcteis



Fotos JL na Felino

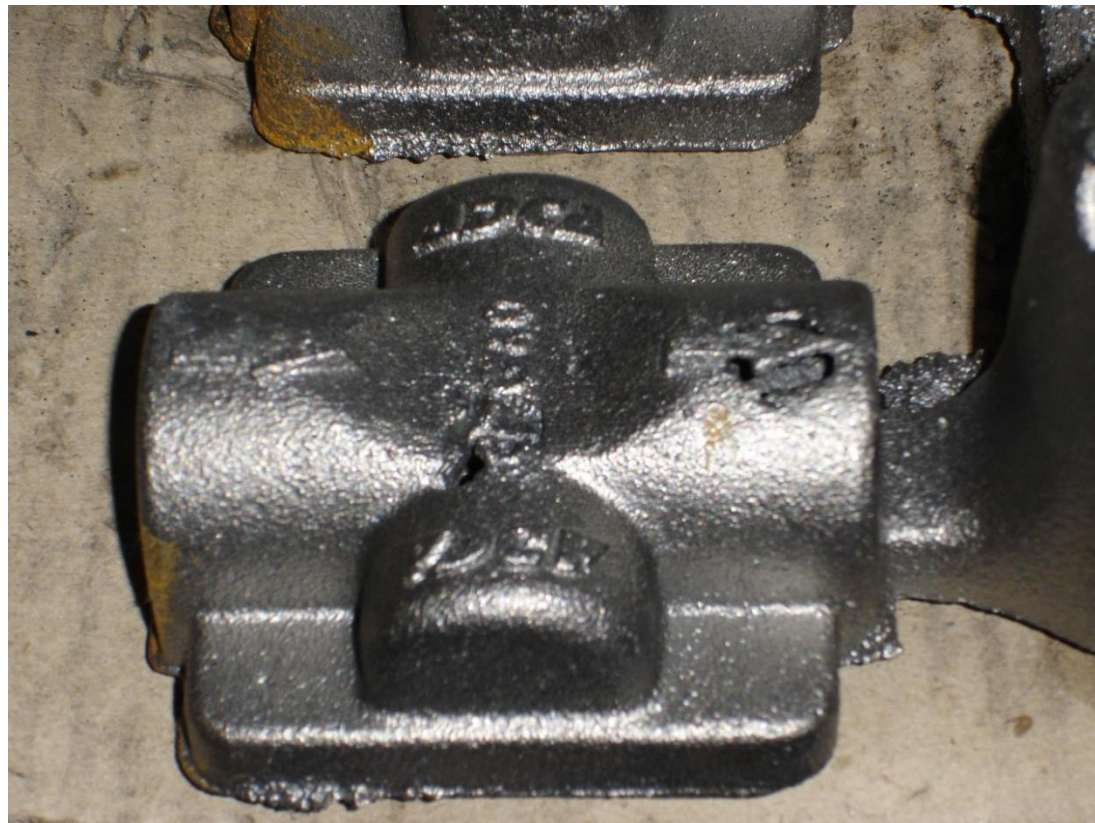
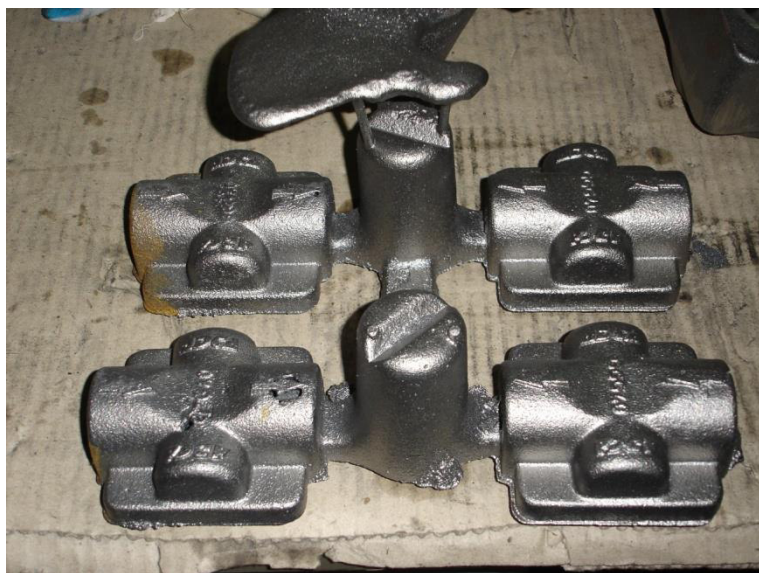
Ferros Fundidos Dúcteis



Fotos JL na Felino

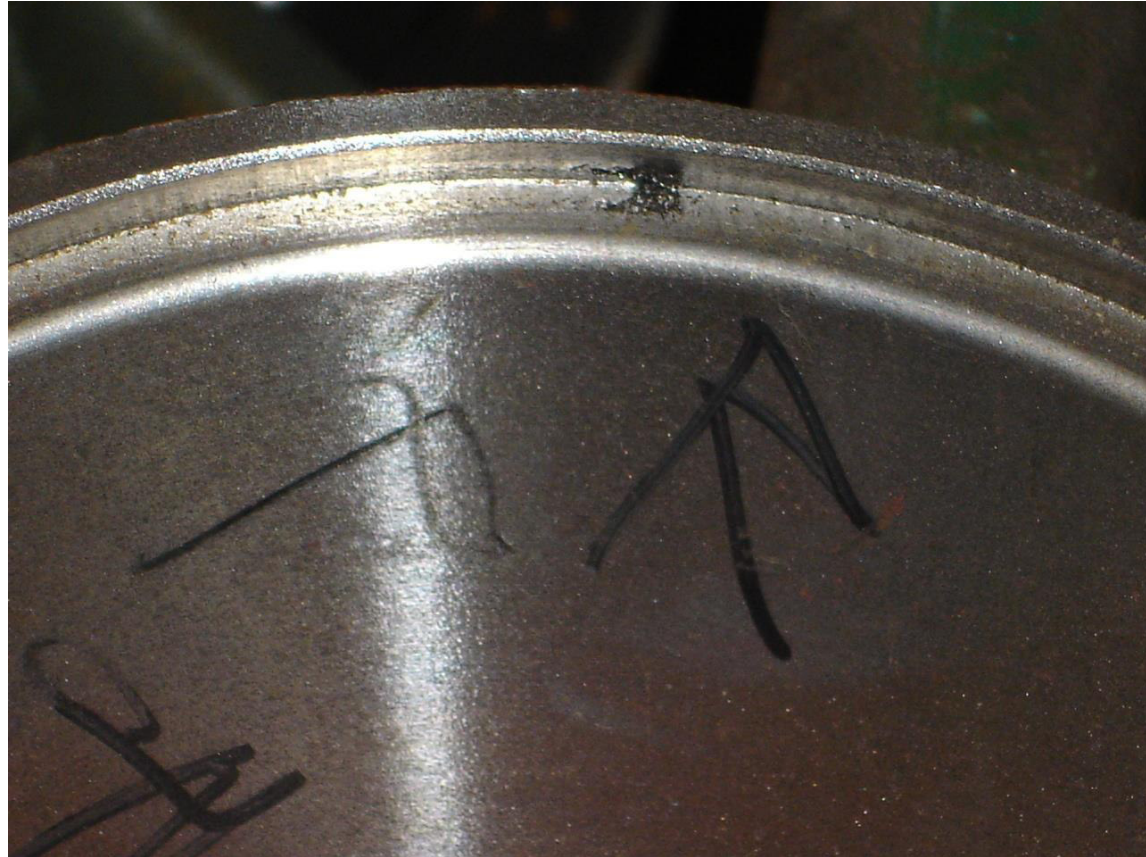
PEÇAS DEFEITUOSAS

Deslocação do macho



Fotos JL na Felino

Inclusão de escória



Microrechupe



2. Diagramas de transformação isotérmica e contínua

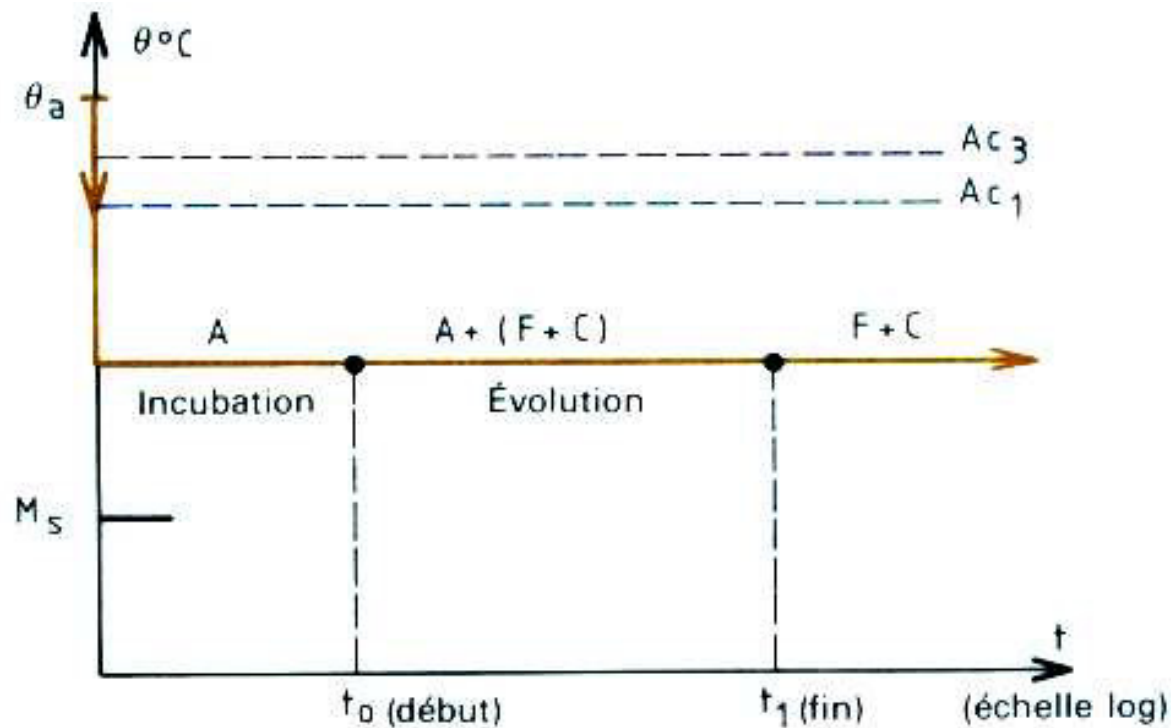
2.1 Transformação da austenite em transformação isotérmica ou arrefecimento contínuo.

2.2 Diagramas isotérmicos (TI) e contínuos (TC). Efeito dos elementos de liga nos diagramas TI e TC.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA

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,...



Estruturas micrográficas que surgem com o aumento da Veloc. (V)

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

obtendo-se assim as curvas isoasteníticas

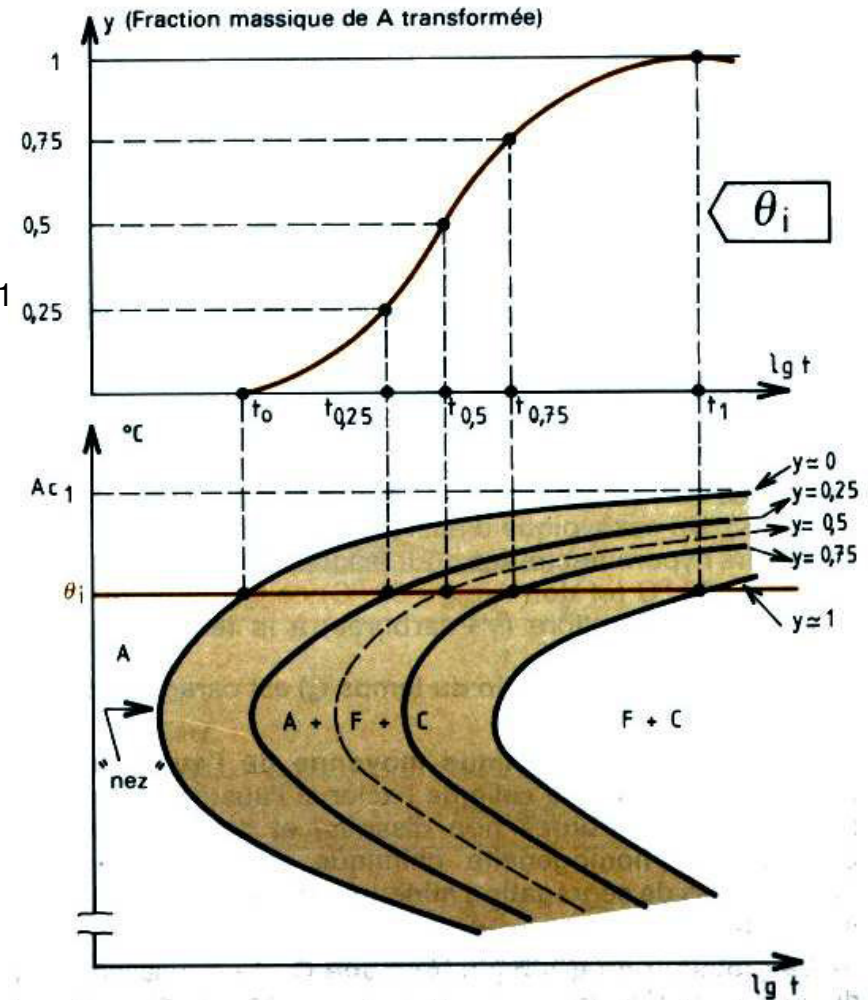


Diagrama de transformação isotérmica

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 iso-austeníticas.

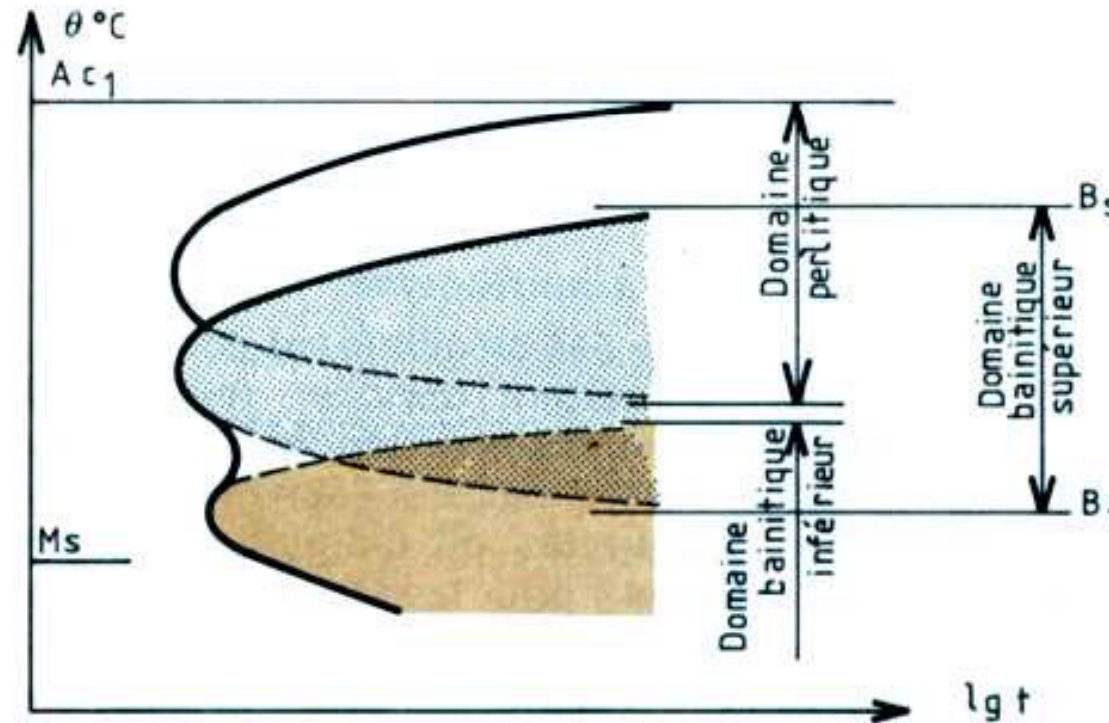


Diagrama de transformação isotérmica

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 iso-austeníticas são paralelas ao eixo do tempo.

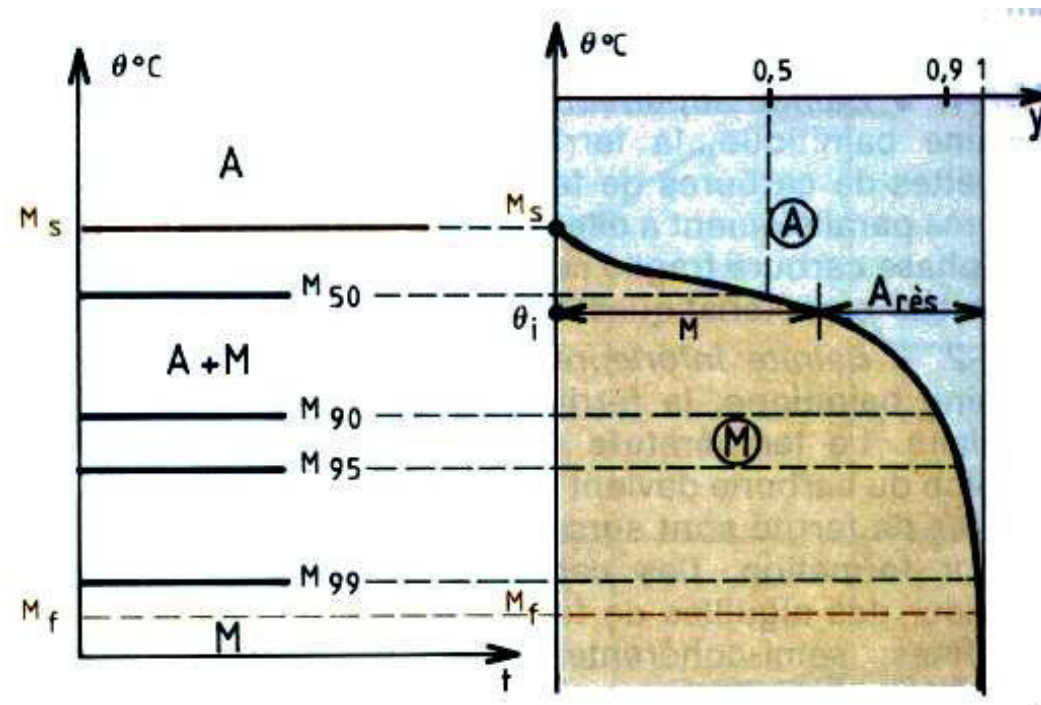


Diagrama de transformação isotérmica

Porquê a forma em “C” da curva ?

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

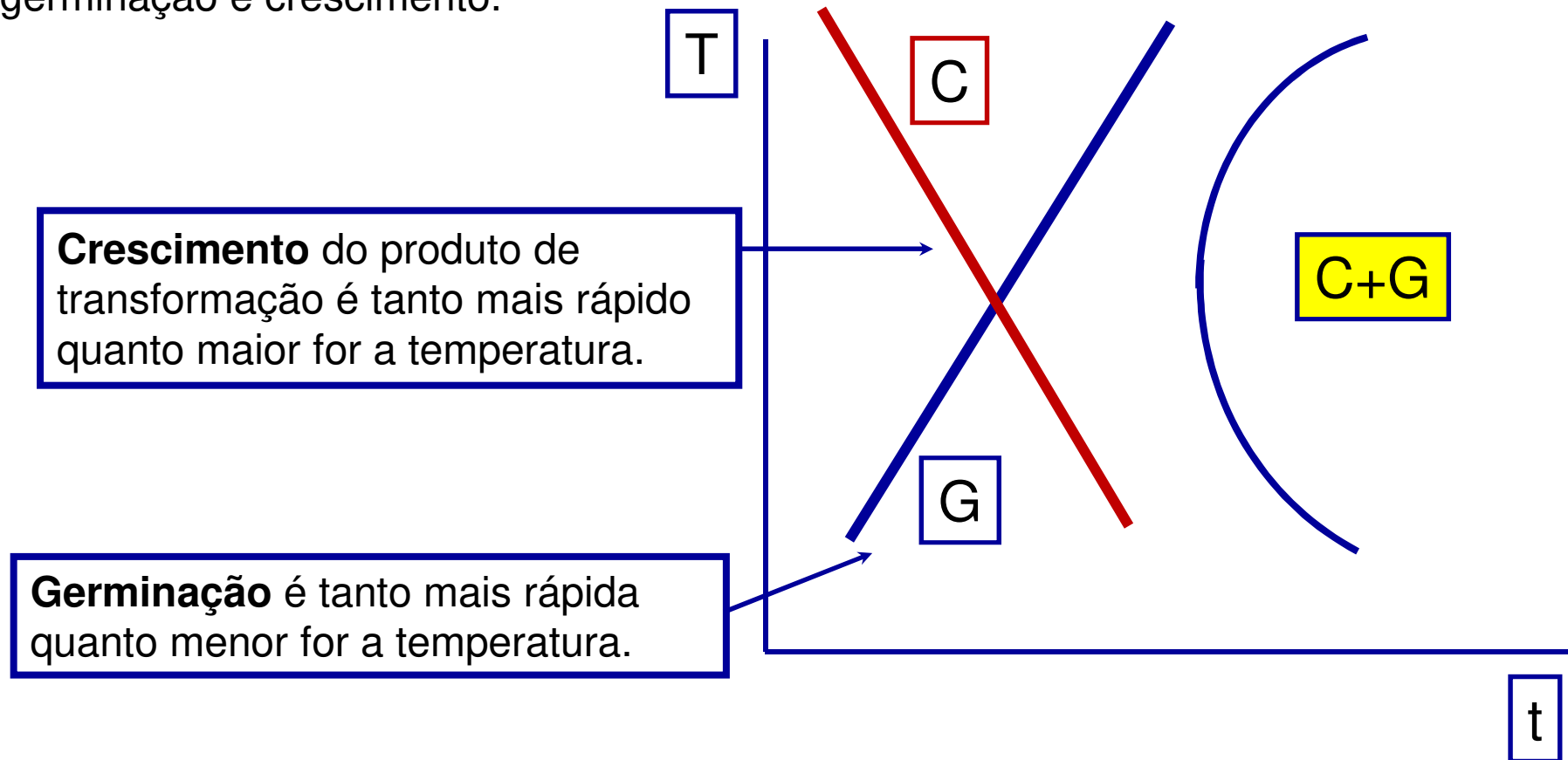


Diagrama de transformação isotérmica

Parâmetros que influenciam as transformações da Austenite

Composição química do aço

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.

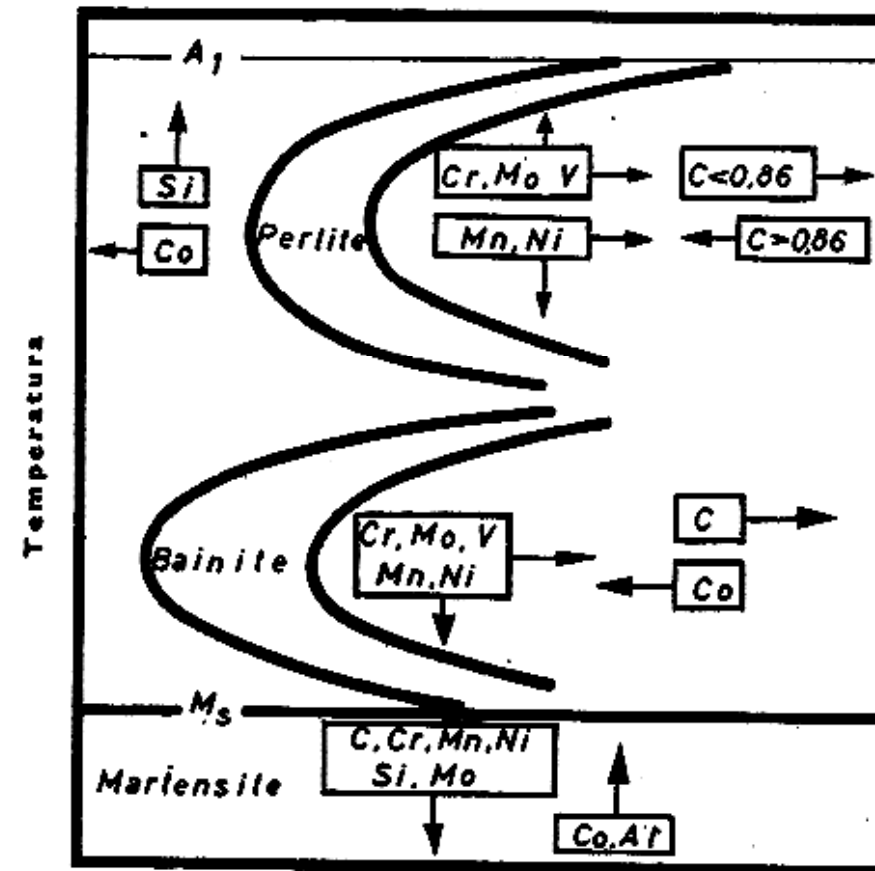


Diagrama de transformação isotérmica

Parâmetros que influenciam as transformações da Austenite

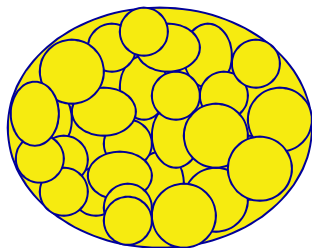
Condições de austenitização, θ_a e t_a

- Composição química da austenite

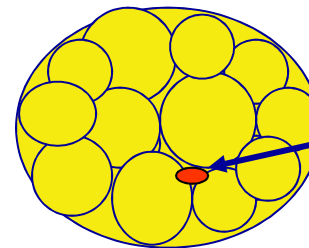
Pode ser diferente da do aço se a austenitização for parcial

- Tamanho de grão da austenite

O aumento do tamanho de grão aumenta os tempos de incubação



Área junta de grão



menor n° de locais
para precipitação
novas fases

Diagrama de transformação isotérmica

Interpretação

42 C 4

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,44	0,80	0,31	0,013	0,030	0,46	0,96	0,05	0,18

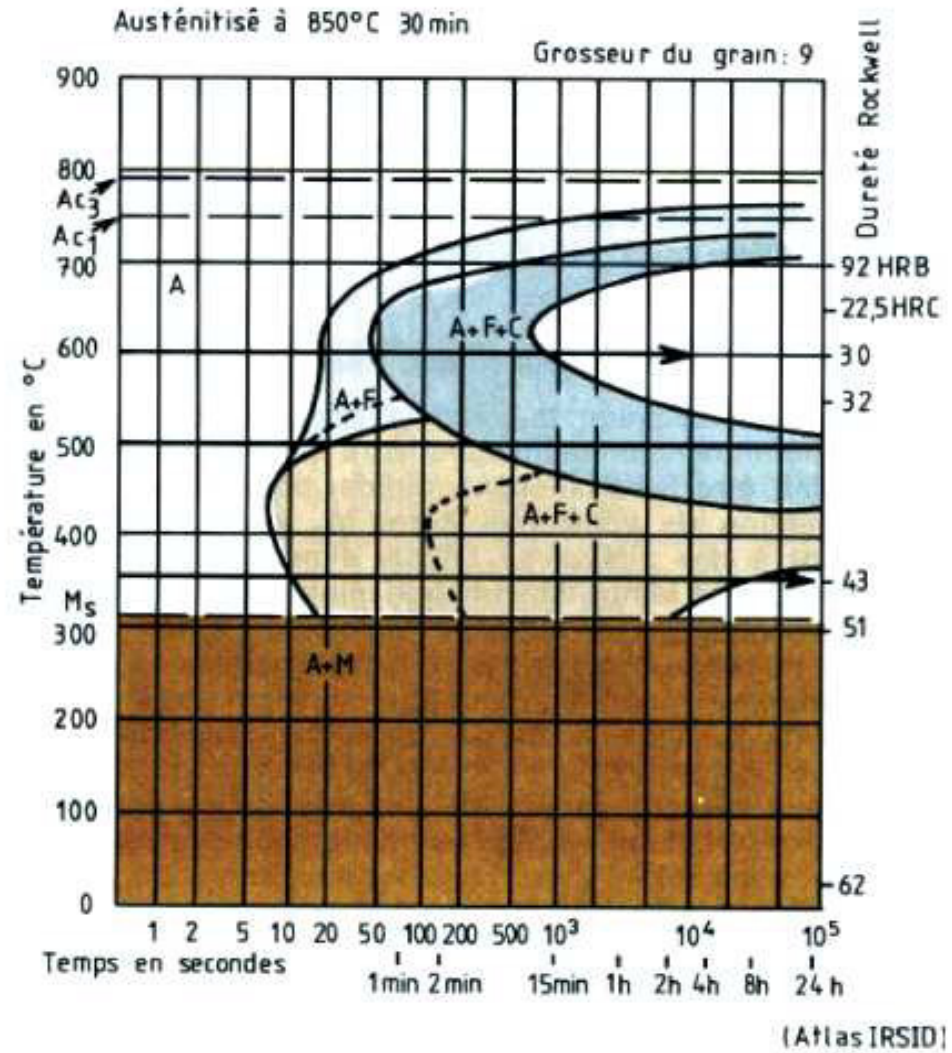
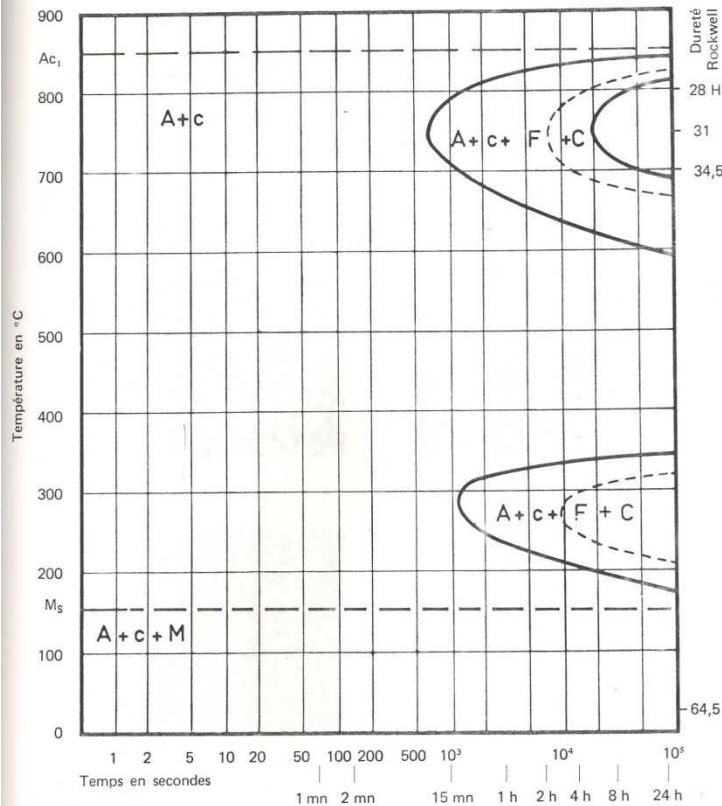


Diagrama de transformação isotérmica

nuance 4371 | Z 85 WDKCV 06-05-05-04-02 (6-5-2-5)

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Mo %	V %	W %	Co %
0,84	0,22	0,23	0,014	0,025	4,36	4,95	1,830	6,48	4,85

Austénitisé à 1230 °C 10 mn (mise en température comprise) Grosseur du grain 8-7



40 NCD 3

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,40	0,80	0,33	0,019	0,018	0,58	0,56	0,28	0,10

Austénitisé à 850 °C 30 mn

Grosseur du grain : 8

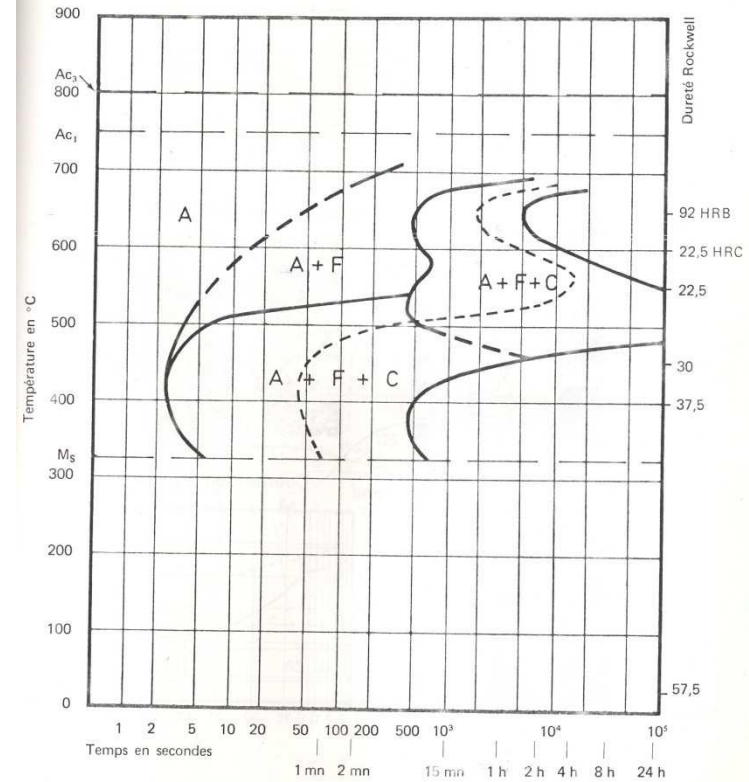


Diagrama de transformação isotérmica

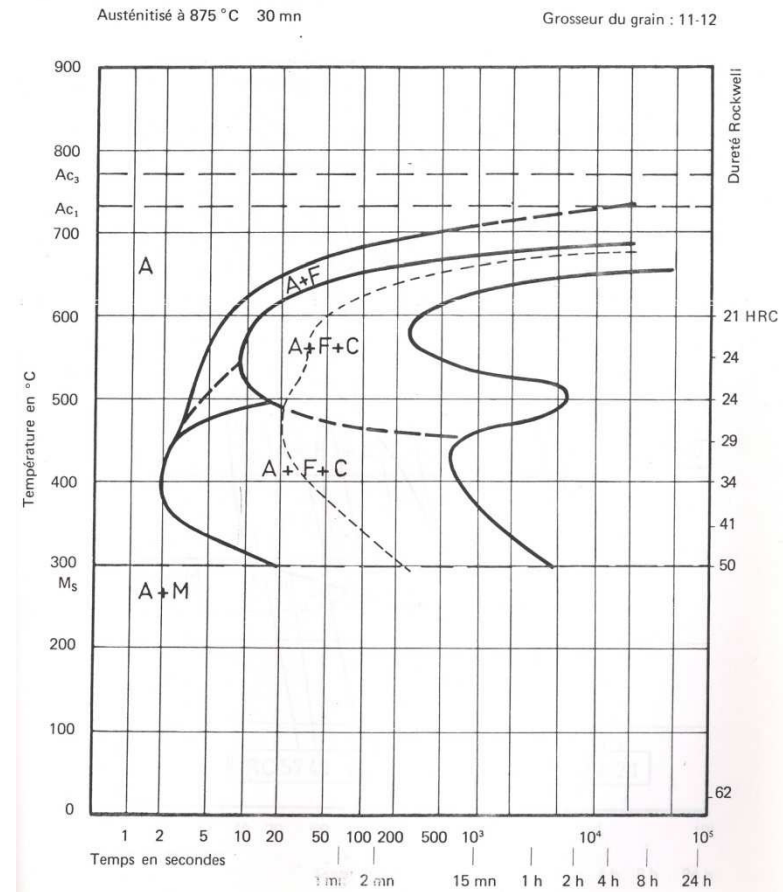
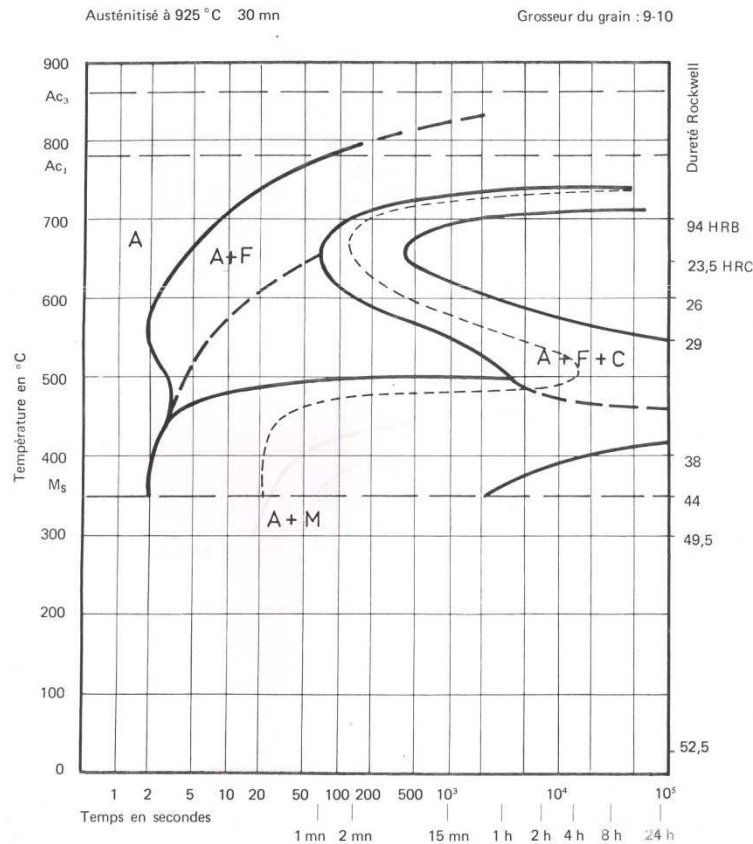
30 SCD 6 *

30 SCD 6 *

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,28	0,59	1,25	0,048	0,055	< 0,05	0,92	0,22	0,03

45 M 5

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Cu %
0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19



DIAGRAMAS DE TRANSFORMAÇÃO CONTÍNUA

Diagrama de transformação contínua

Introdução

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

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

Diagrama de transformação contínua

Interpretação

42 C 4

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,44	0,80	0,31	0,013	0,030	0,46	0,96	0,05	0,18

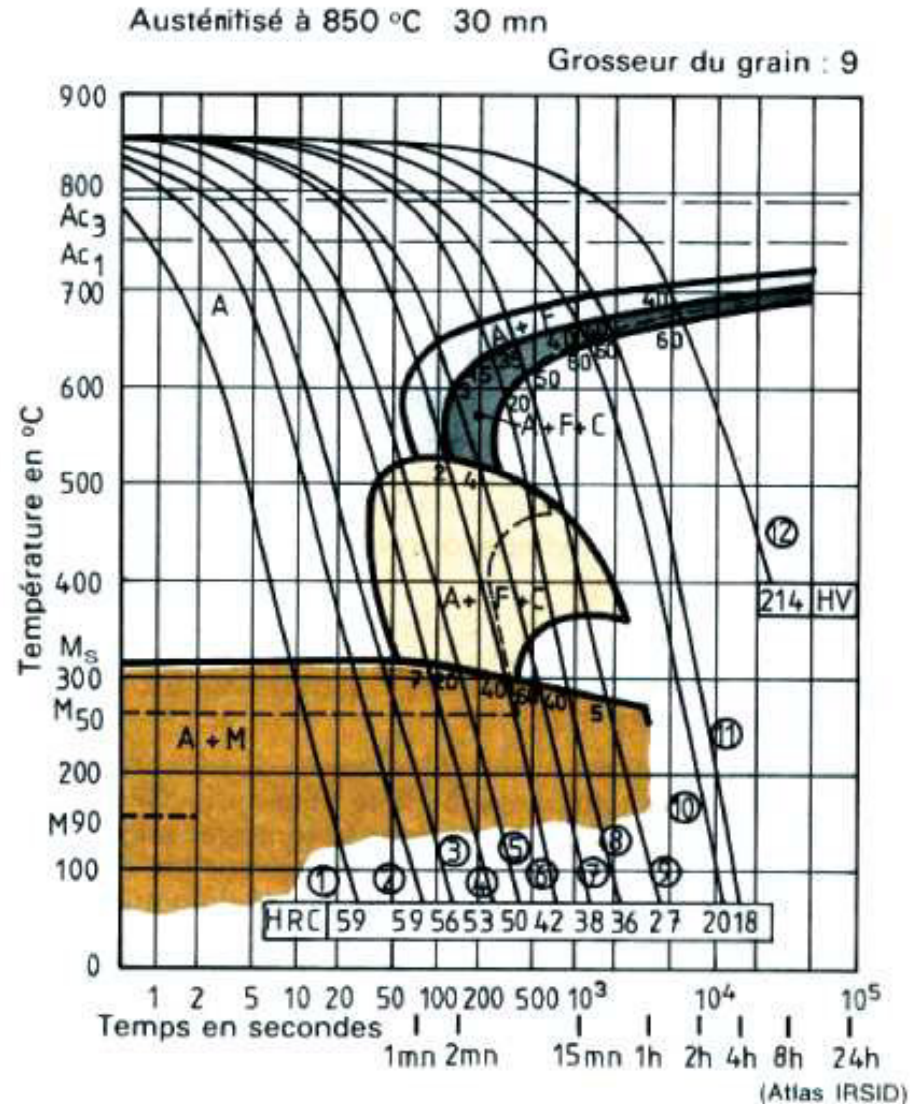


Diagrama de transformação contínua

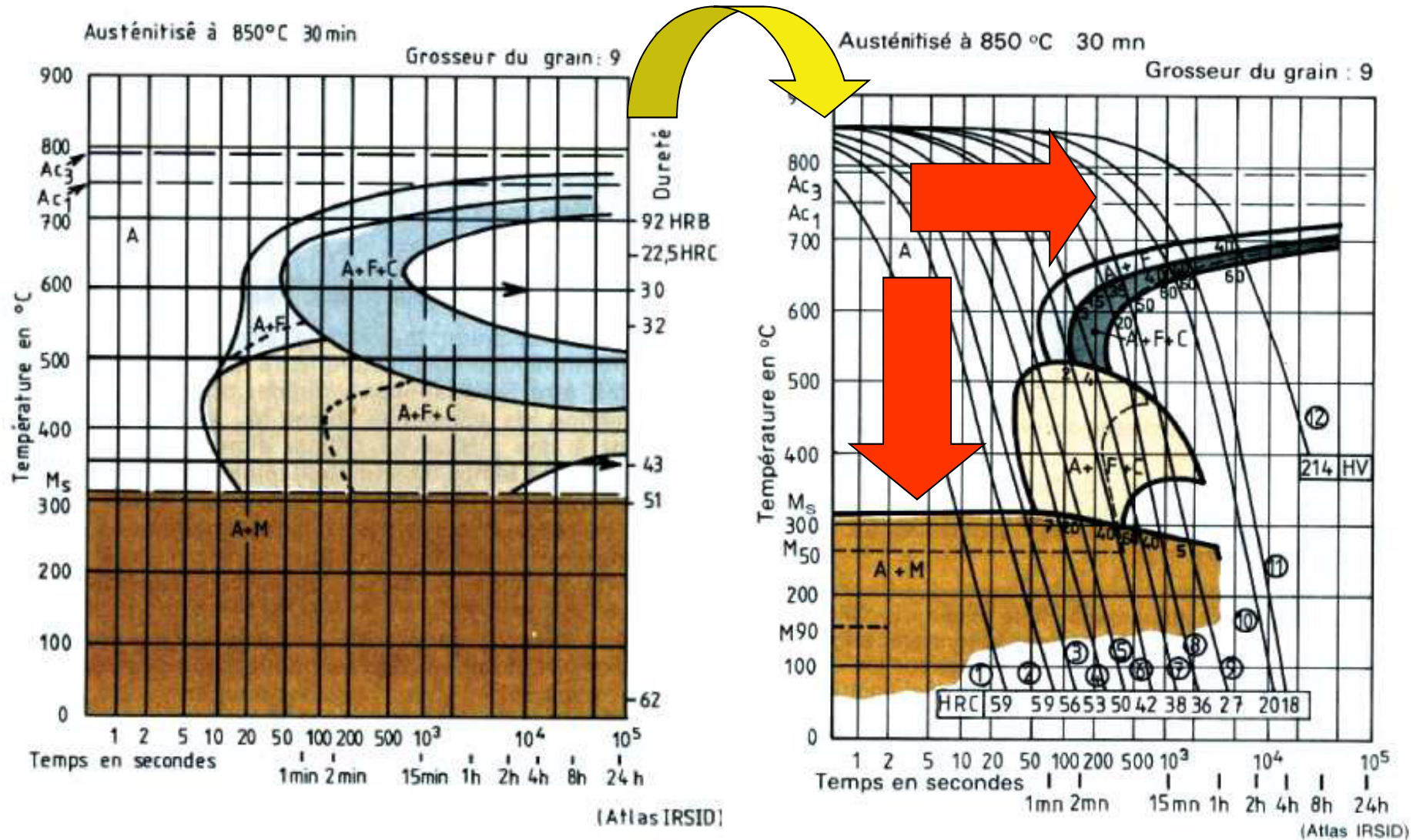


Diagrama de transformação contínua

Parâmetro de arrefecimento

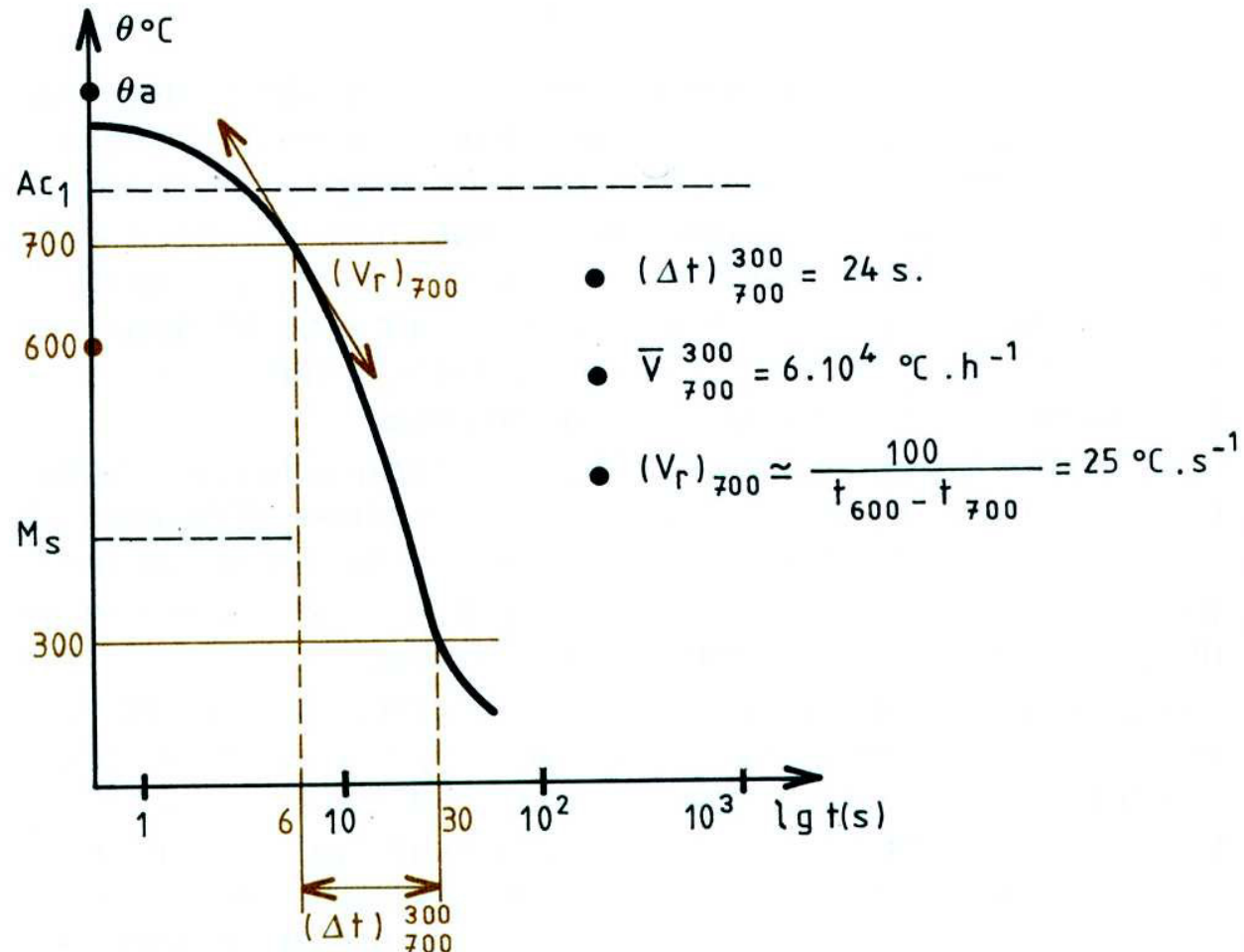


Diagrama de transformação contínua

THYRODUR 2210			
Material N.º	1.2210		
Código DIN	115 CrV 3		
Normas comparáveis:	AISI: L2		
Análise química (valores médios em %)	C	Cr	V
	1.20	0.7	0.1
Propriedades	Aço Cr-V para trabalho a frio com grande resistência ao desgaste.		

Diagrama de tempo-temperatura-transformação não interrompido

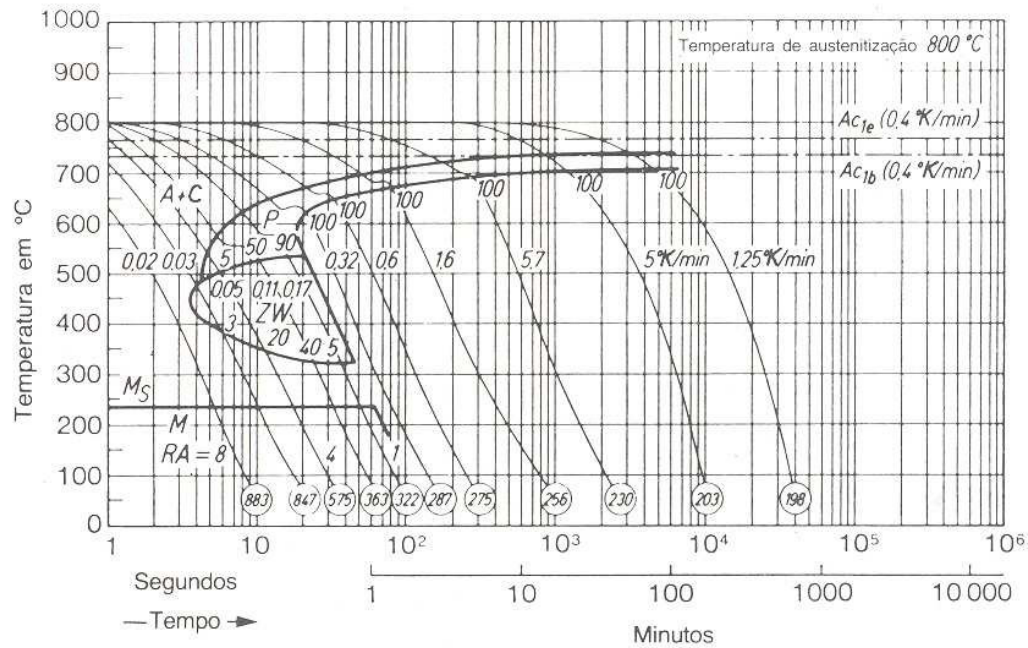


Diagrama de revenido

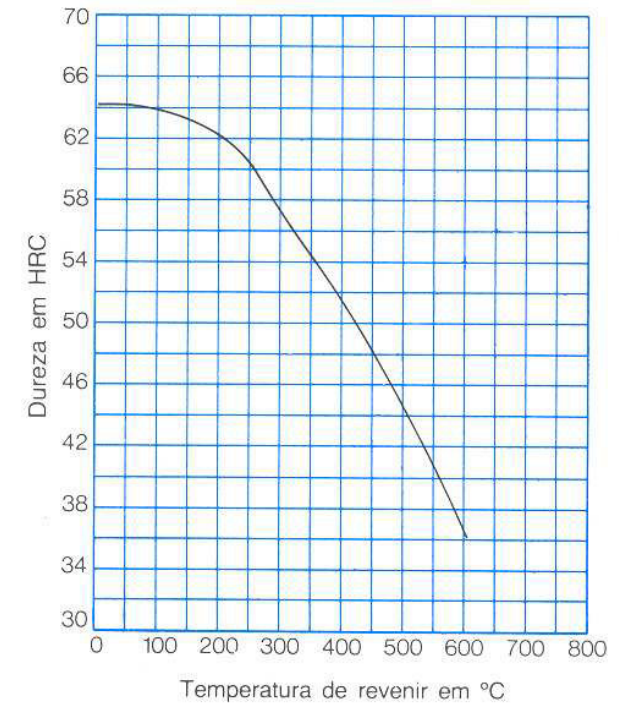


Diagrama de transformação contínua

THYRODUR 2080

Material N.º	1.2080	
Código DIN	X 210 Cr 12	
Normas	AISI: D 3 BS: BD 3 Afnor: Z 200 C 12 JIS: SKD 1	
Análise química (Valores médios em %)	C	Cr
	2.00	12.00
Propriedades	Aço ledeburítico 12% Cr com a mais alta resistência ao desgaste.	

Diagrama de tempo-temperatura-transformação não interrompido

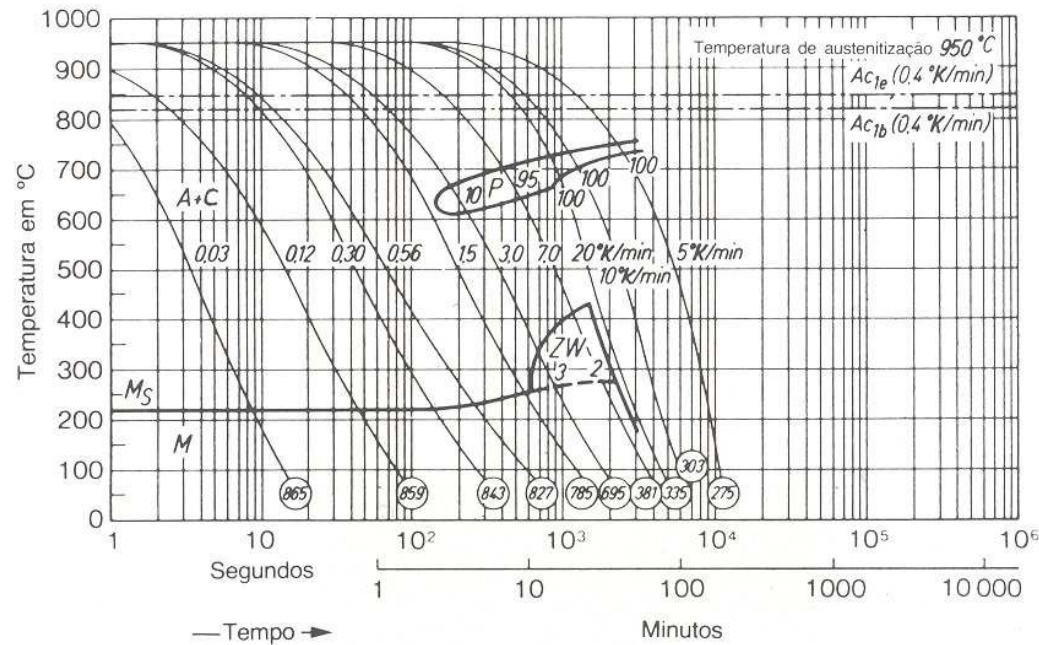


Diagrama de revenido

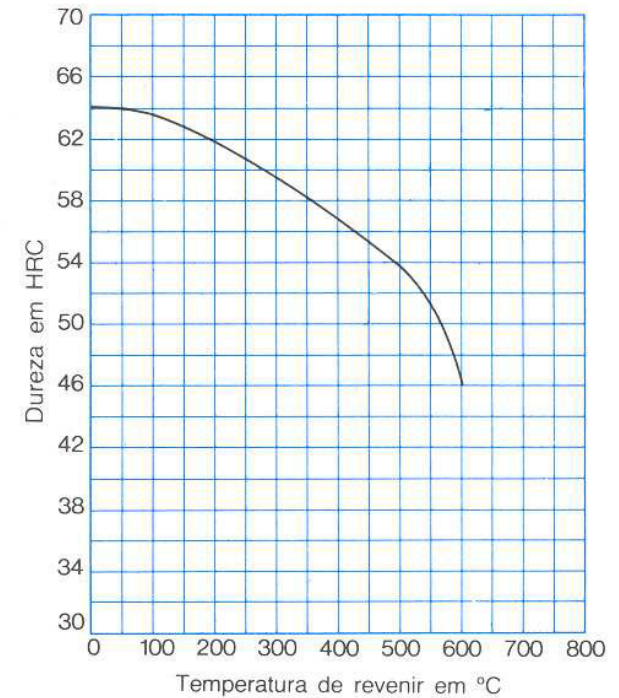


Diagrama de transformação contínua

THYRODUR 2162

Material N.º	1.2162		
Código DIN	21 Mn Cr 5		
Normas comparáveis	AISI: P 2		
Análise química (valores médios em %)	C	Mn	Cr
	0.21	1.3	1.2
Propriedades	Aço de cementação, boa polibilidade, recalque a frio.		

Diagrama de tempo-temperatura-transformação não interrompido

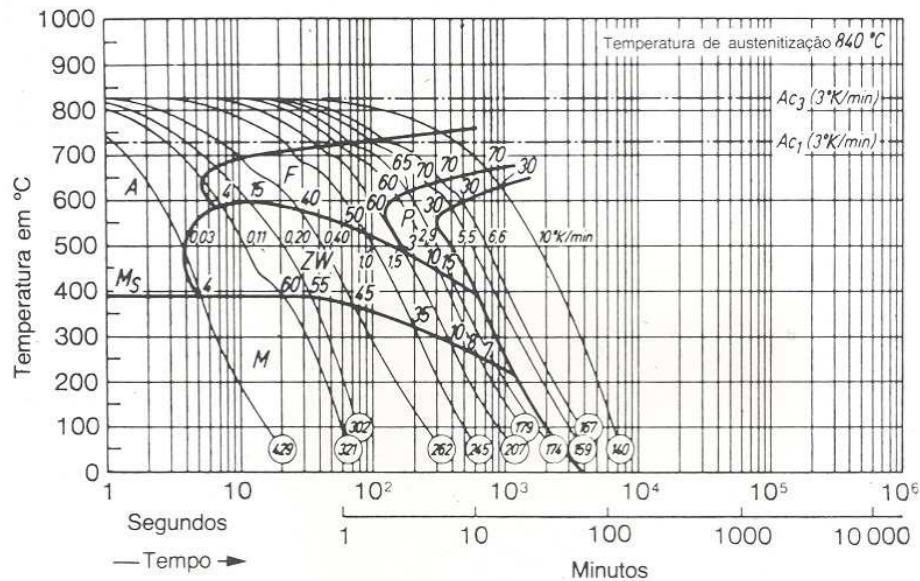


Diagrama de revenido

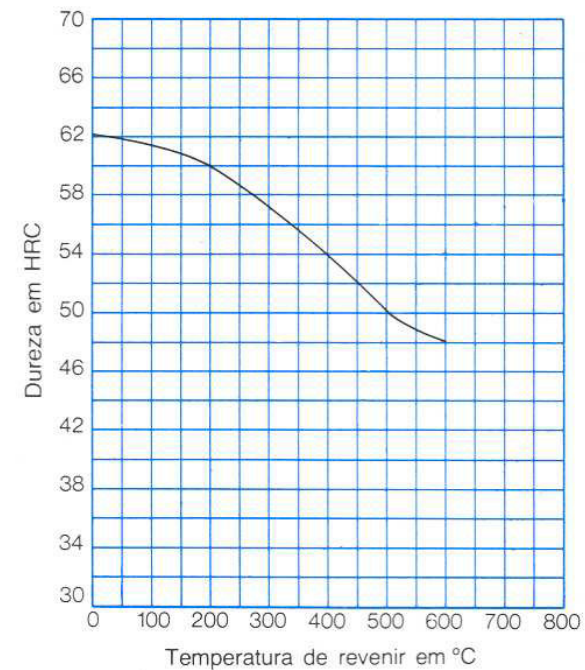


Diagrama de transformação contínua

THYROPLAST 2316

Material N.º	1.2316		
Código DIN	X 36 CrMo 17		
Análise química (valores médios em %)	C	Cr	Mo
	0.36	16.0	1.2
Propriedades	Melhor resistência à corrosão em comparação com o THYROPLAST 2083, boa polibilidade. Este aço é normalmente fornecido no estado de tratado com uma dureza aproximada de 300 HB.		

Diagrama de tempo-temperatura-transformação não interrompido

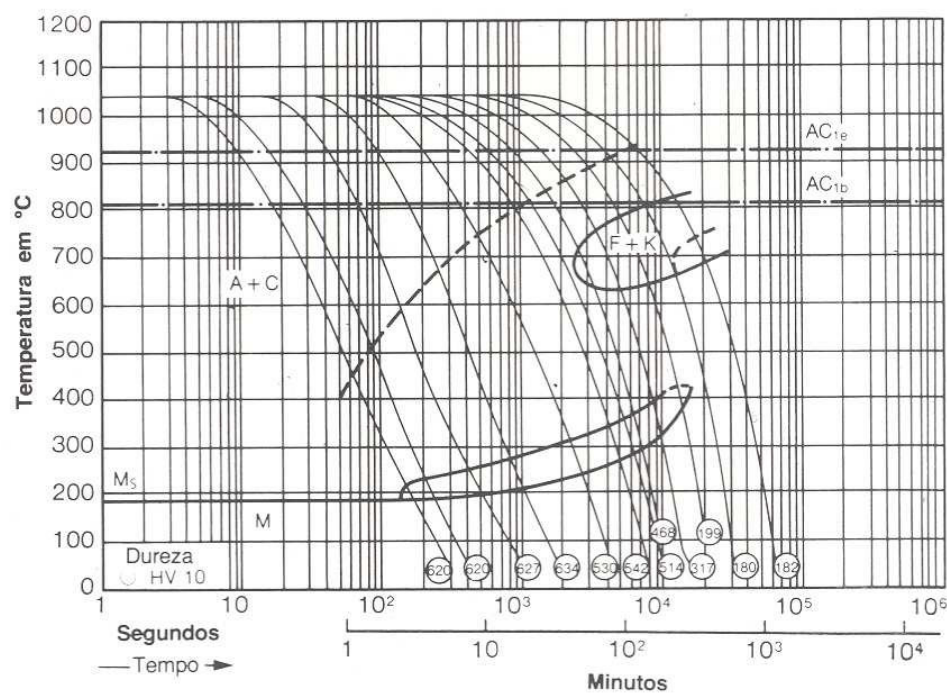


Diagrama de revenido

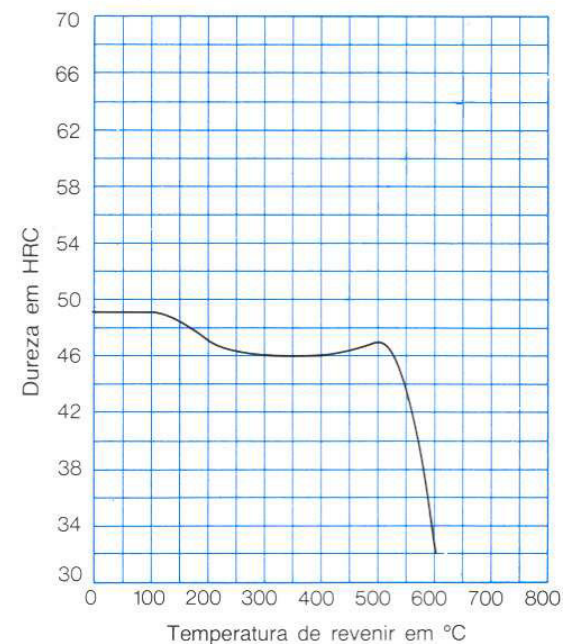
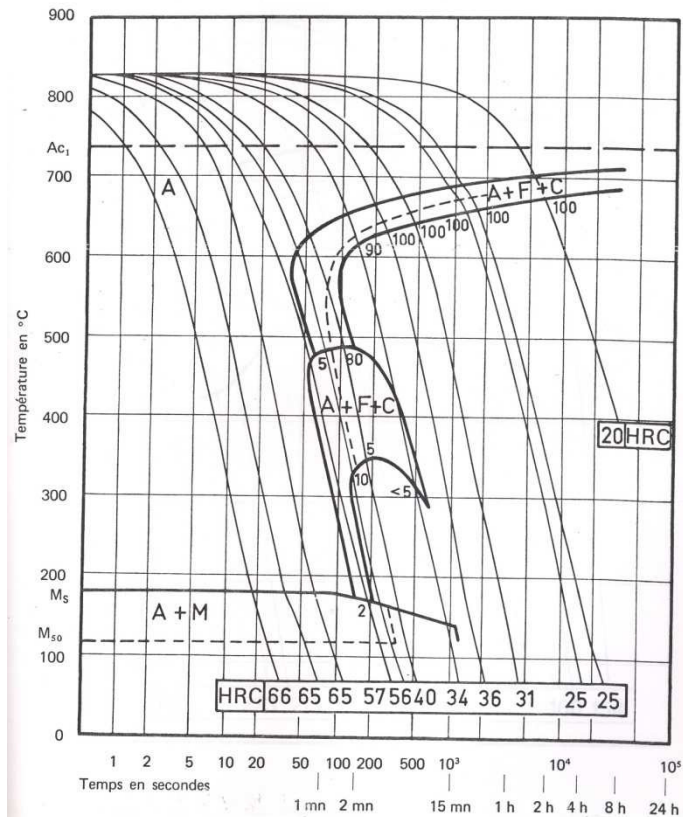


Diagrama de transformação contínua

90 M 5

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Cu %
0,93	1,25	0,20	0,007	0,020	0,24	0,60	0,15

Austénitizado à 825 °C 30 mn Grosseur du grain : 11-12



35 NC 6

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	V %
0,41	0,55	0,24	0,007	0,014	0,93	0,80	0,06	0,10	0,010

Austénitizado à 900 °C 30 mn Grosseur du grain : 11-12

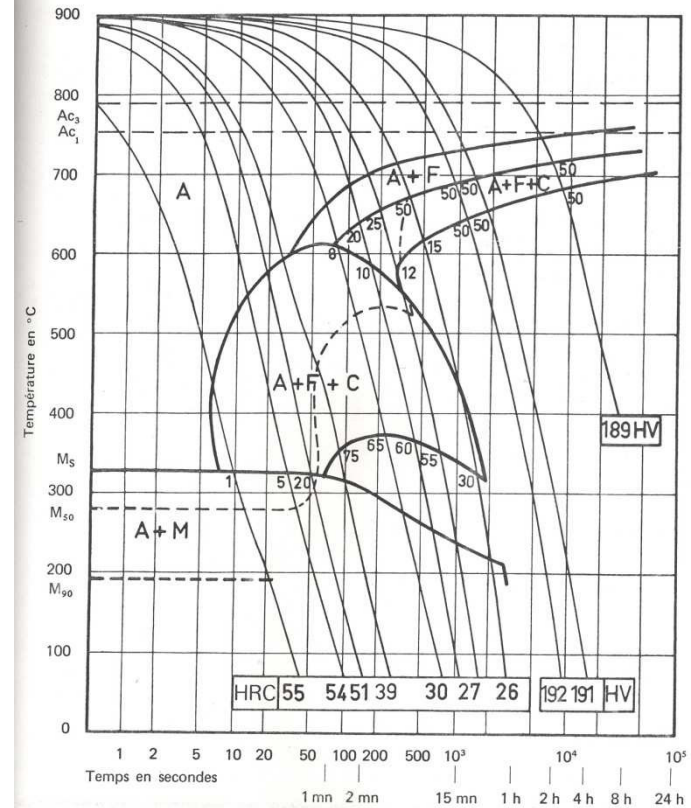
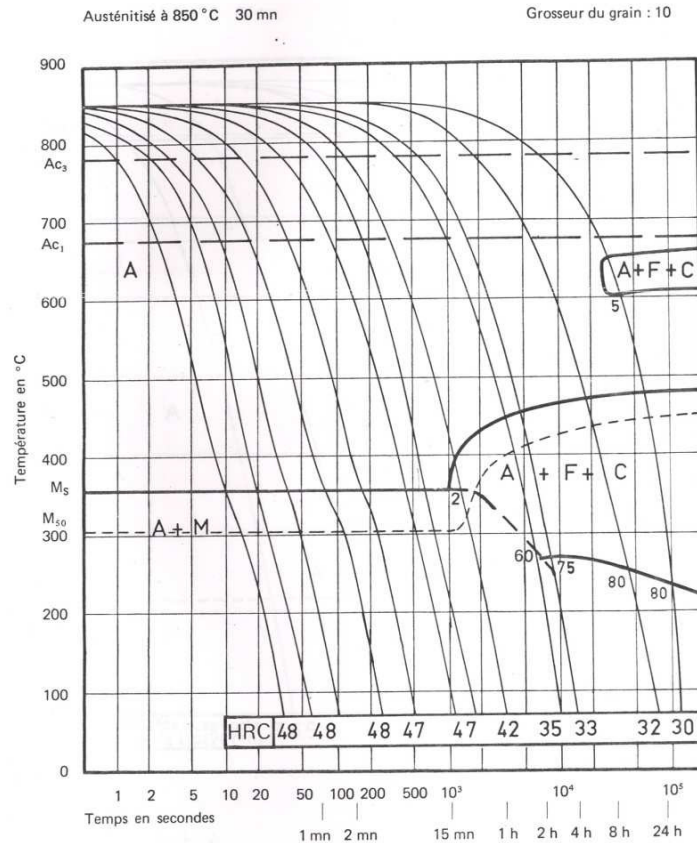


Diagrama de transformação contínua

20 ND 16

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,20	0,63	0,32	0,026	0,017	3,85	0,25	0,94	0,17



40 NDCV 18-11

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	V %
0,41	0,30	0,36	0,006	0,017	4,80	0,54	1,13	0,520

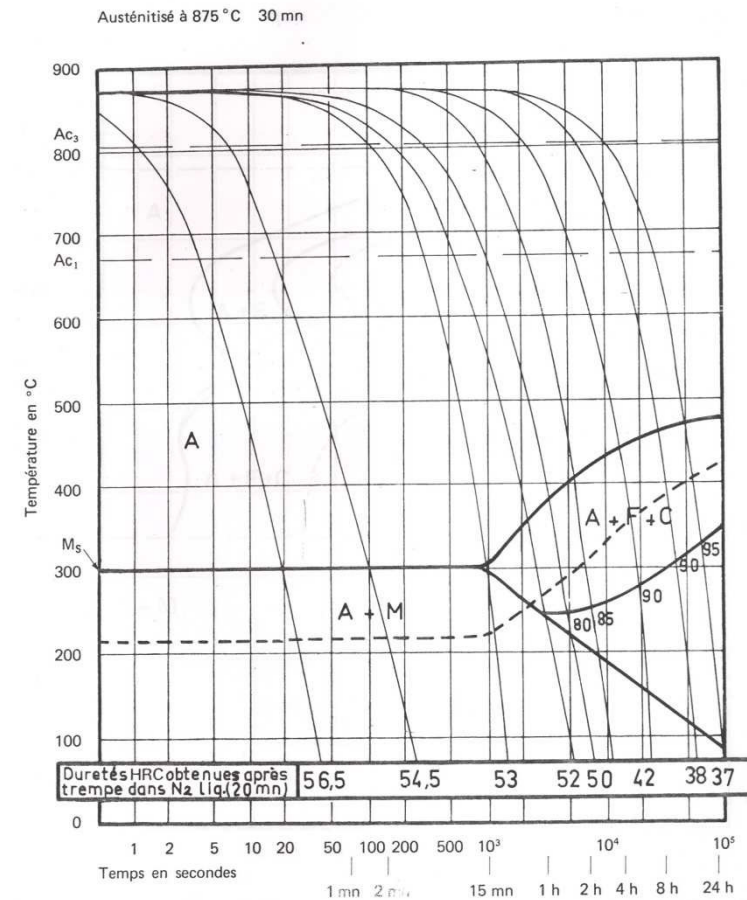
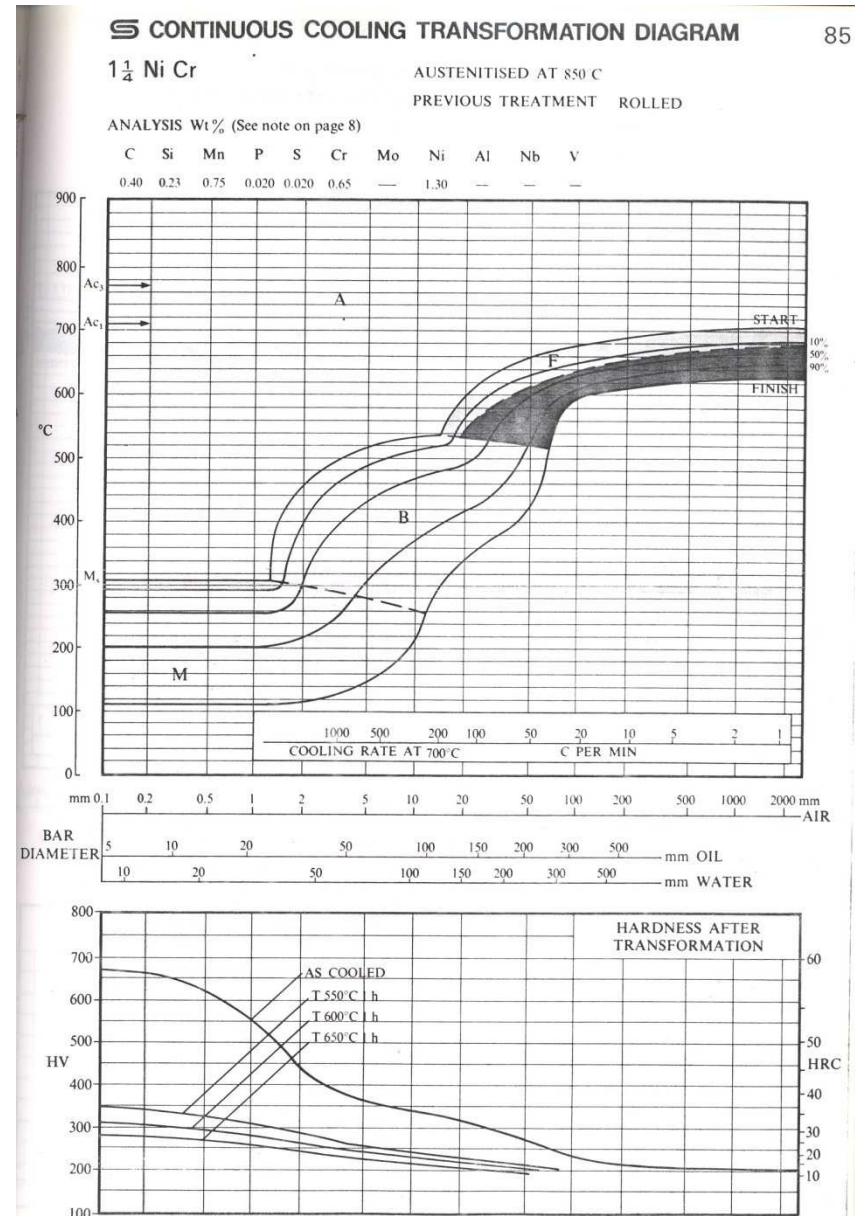
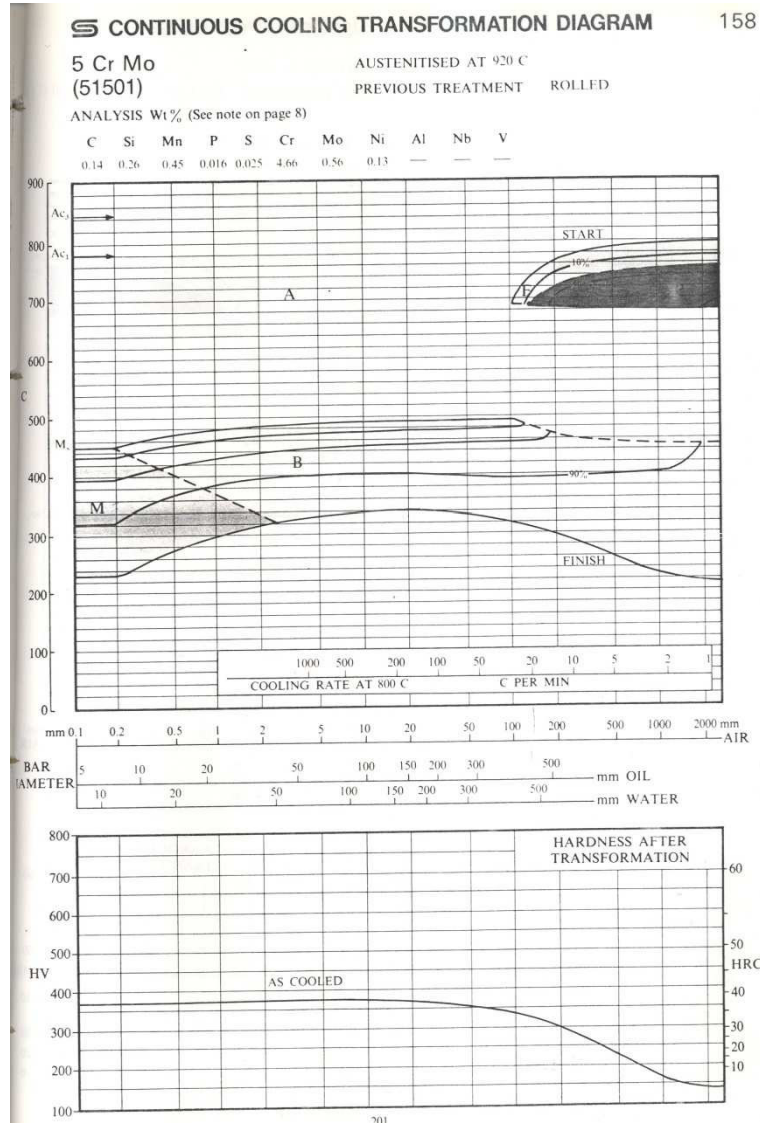


Diagrama de transformação contínua

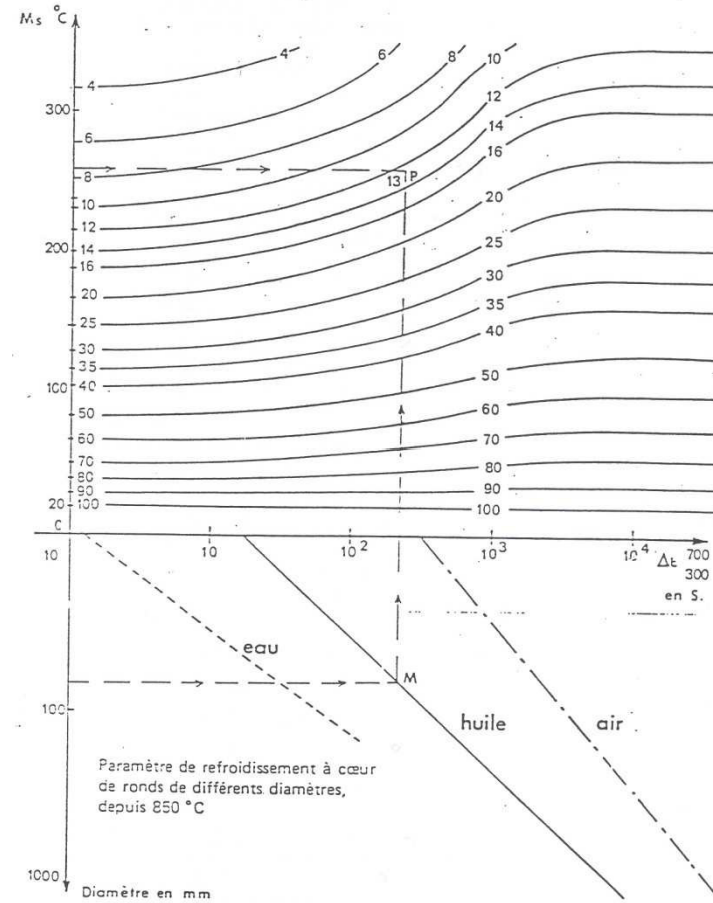
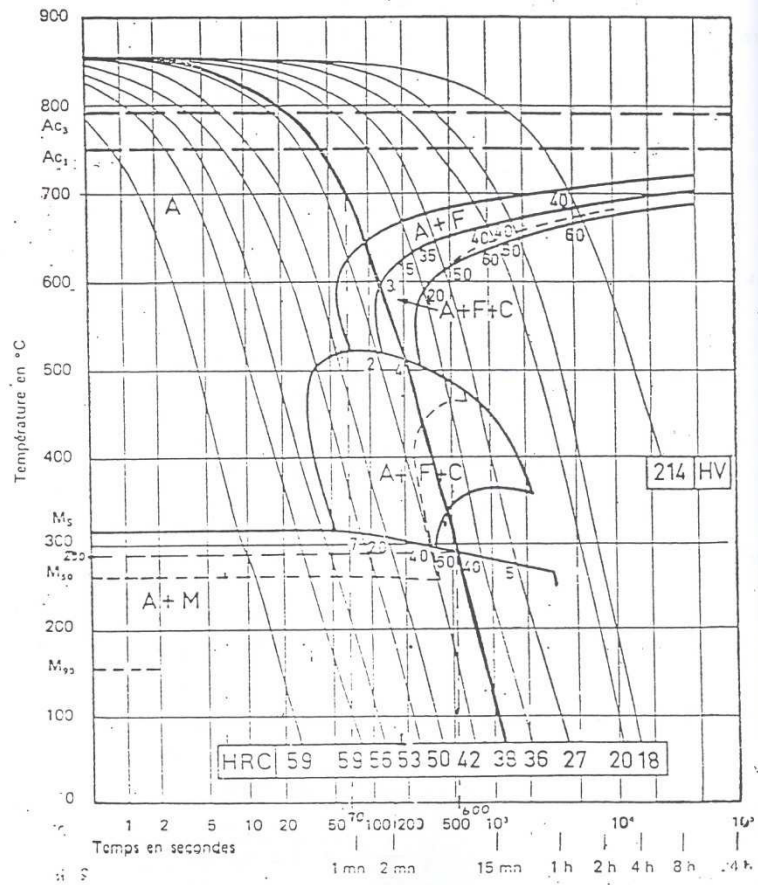


42 C 4

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,41	0,80	0,31	0,013	0,030	0,46	0,96	0,08	0,18

Austénitisé à 850 °C 30 mn

Grosseur du grain : 9



AÇOS LIGADOS

Aços ligados

Definição e designação

As propriedades dos aços ao carbono não são suficientes para certas aplicações.



Aços ligados

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 nos aços ao carbono, estão sempre presentes o Si, Mn, S e P (elementos de elaboração, desoxidação Si)

Aços ligados

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: teor total dos elementos de liga < 5%

Aços de muita liga: teor total dos elementos de liga > 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...

Aços ligados

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 eutectóide
- 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

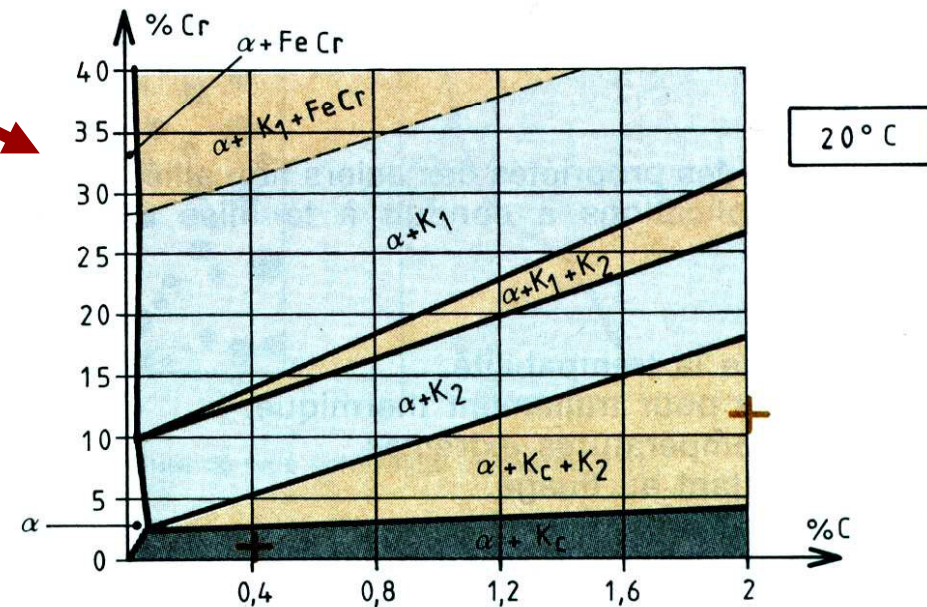
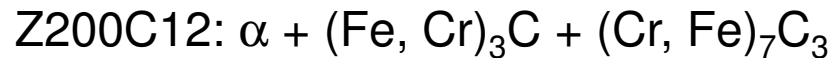
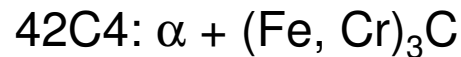
Aços ligados

Temperaturas de transformação e teores da **transformação eutectóide**

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

Corte ternário isotérmico

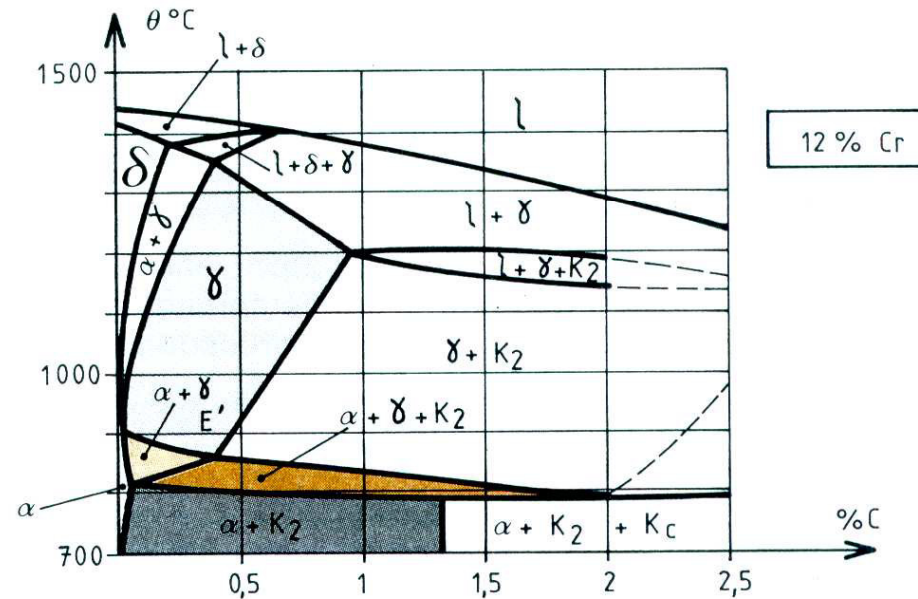
No estado de equilíbrio:



Aços ligados

Temperaturas de transformação e teores da **transformação eutectóide**

Corte pseudo-binário

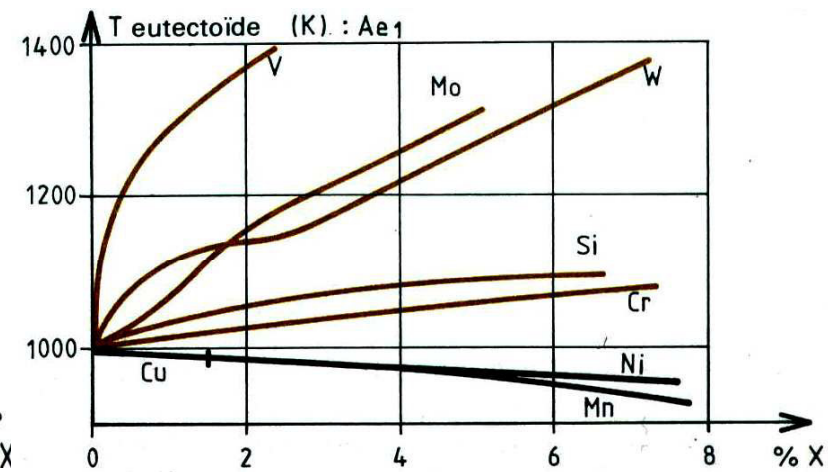
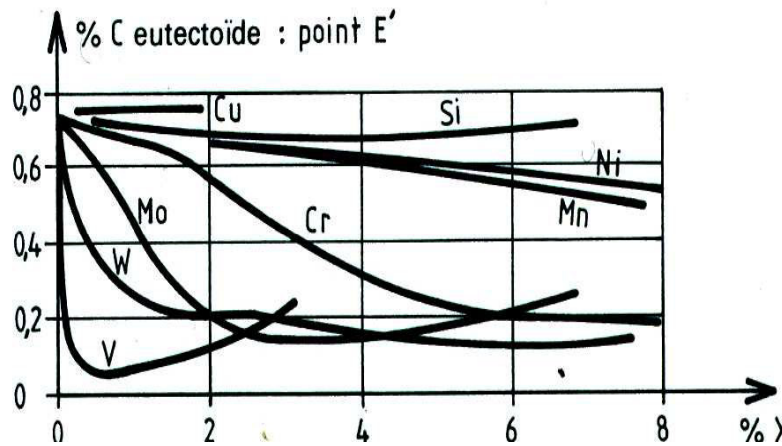


Neste exemplo a % em C do ponto eutectóide é de 0,4%: a perlite dum aço ligado tem sempre um teor em carbono inferior à dum aço não ligado.

Aços ligados

Temperaturas de transformação e teores da **transformação eutectóide**

Influência dos elementos de liga nas características do eutectóide



Fórmula de Andrews para A_{c1} , válida para aços de pouca liga com $\%C < 0,6$

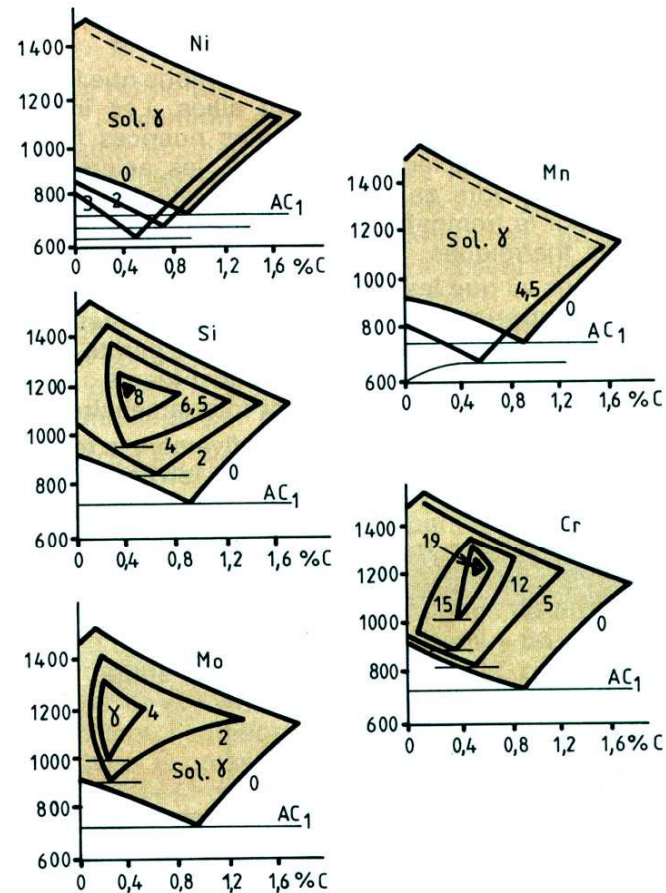
$$A_{c1} (^{\circ}C) = 727 - 10,7(\%Mn) - 16,9(\%Ni) + 29,1(\%Si) + 16,9(\%Cr) + 6,38(\%W) + 290(\%As)$$

$$Sh(\%C) = 0,86 - 0,09(\%Mn) - 0,065(\%Cr) - 0,03(\%Ni) - 0,13(\%Mo) - 0,3(\%V) - 0,06(\%Co) - 0,08(\%Ti)$$

Aços ligados

Efeito gamageno ou alfageno

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



Fórmula de Andrews para Ac_3 , válida para aços de pouca liga com %C < 0,6

$$Ac_3(^{\circ}C) = 912 - 203(\%C)^{0,5} - 15,2(\%Ni) - 30(\%Mn) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) + 13,1(\%W)$$

Aços ligados

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-Mn-**Fe**-Cr-Mo-W-V-Ti-Nb

Os carbonetos podem ser de 2 tipos:

- **Cementites ligadas:** $(\text{Fe}, \text{X})_3\text{C}$
 - **Carbonetos especiais:** $(\text{Fe}, \text{X})_m\text{C}_n$
-
- Si, Mn, Al, Cu, Ni, e Co estão todos repartidos na α
 - Cr, W, Mo estão repartidos entre a α e os carbonetos
 - V, Ti, Zr, Nb estão repartidos sobretudo nos carbonetos

3. Tratamentos térmicos dos aços

- 3.1. Recozido: recozido completo, recozido de alívio de tensões e de recristalização
- 3.2. Esferoidização
- 3.3. Normalização
- 3.4. Distensão
- 3.5. Temperabilidade: diagramas TRC, curvas em U, diâmetro crítico e curvas Jominy
- 3.6. Têmpera
- 3.7. Revenido
- 3.8. Tratamentos térmicos superficiais
 - 3.8.1. Carbonização
 - 3.8.2. Nitruração
 - 3.8.3. Carbonitruração
 - 3.8.4. Endurecimento por chama e indução
- 3.9. Tensões residuais

RECOZIDO

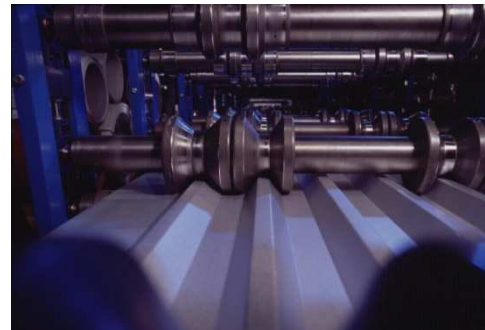
Recozido

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...



Recozido

Os recozidos são tratamentos térmicos 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.

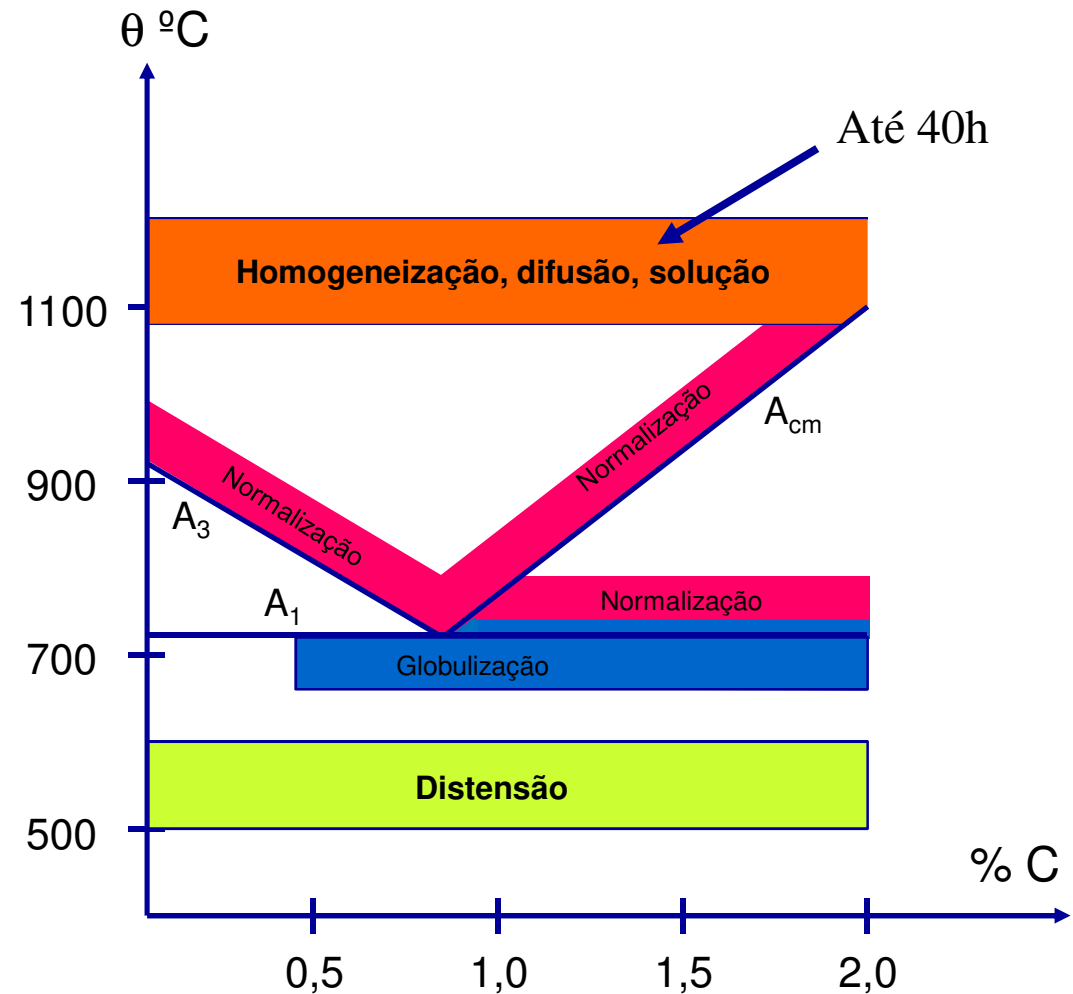
Assim, elimina-se ou reduz-se os efeitos nefastos de tais estados, para operações posteriores sobre o metal ou para a utilização correcta do aço.

Recozido

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**



3.1. Recozido de Difusão

Realizado a 1050-1200°C (2-45h) tem como objectivo 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.

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.



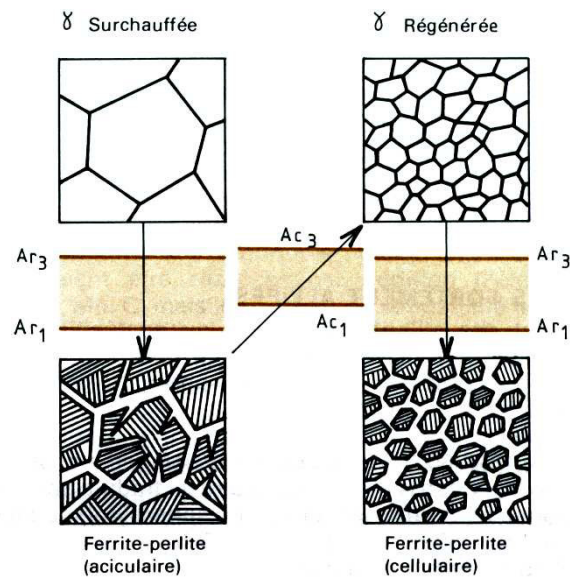
Aço vazado com 0,28%C

3.2. Recozido de Normalização

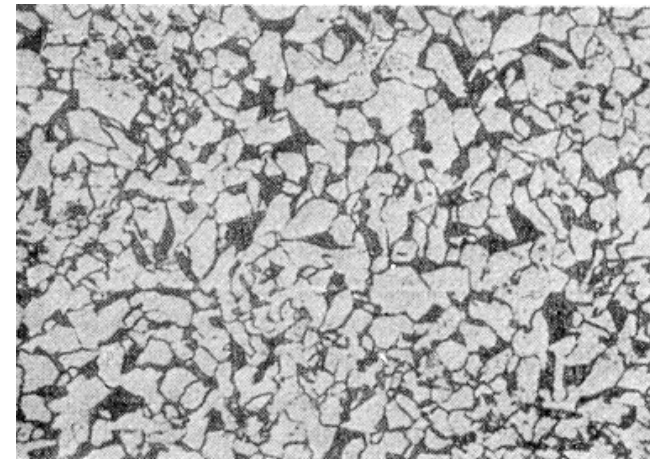
O objectivo é obter uma **estrutura homogénea**. Reduzir o tamanho de grão da ferrite e da perlite.

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.



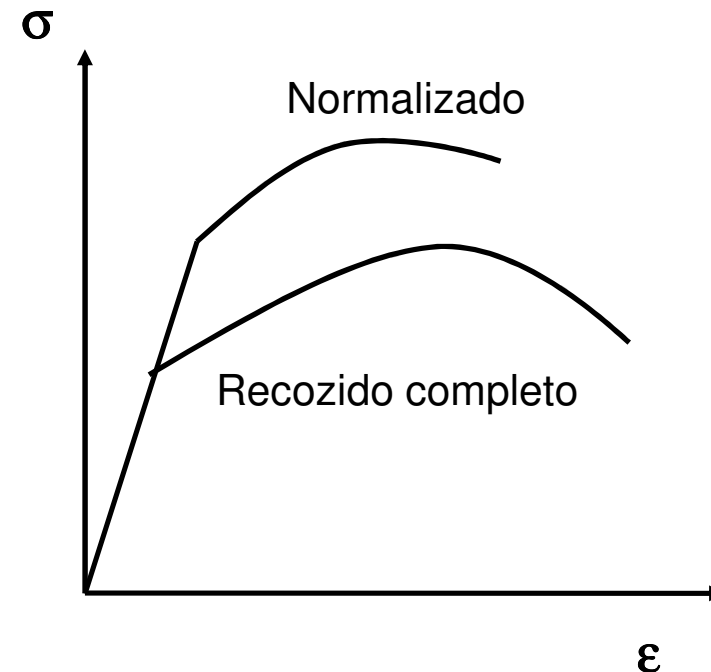
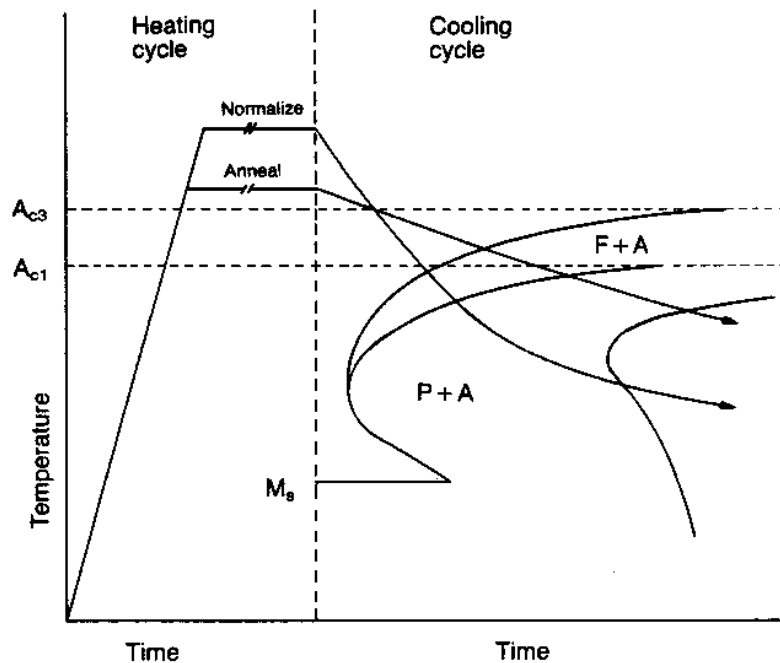
Aço normalizado com 0,28%C

3.2. Reozido de Normalização

As estruturas ferrítico-perlíticas obtidas são finas

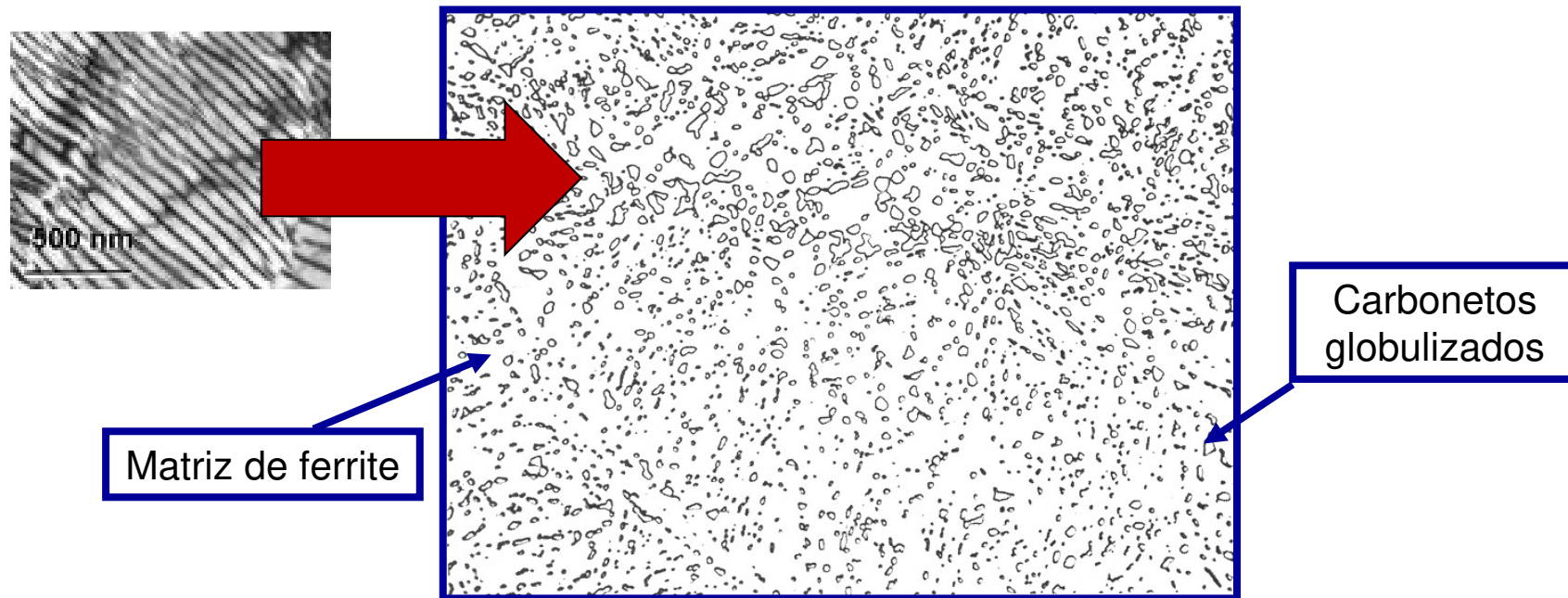
Nota: os aços temperáveis ao ar, de muita liga, não são normalizáveis a não ser por intermédio de reozidos isotérmicos.

Reozido Completo vs Reozido de Normalização



3.3. 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.**



3.3. Reozido de Amaciamento ou Globulização

A boa ductilidade de estruturas globulizadas é importante para aços com pouco carbono para serem trabalhados a frio.

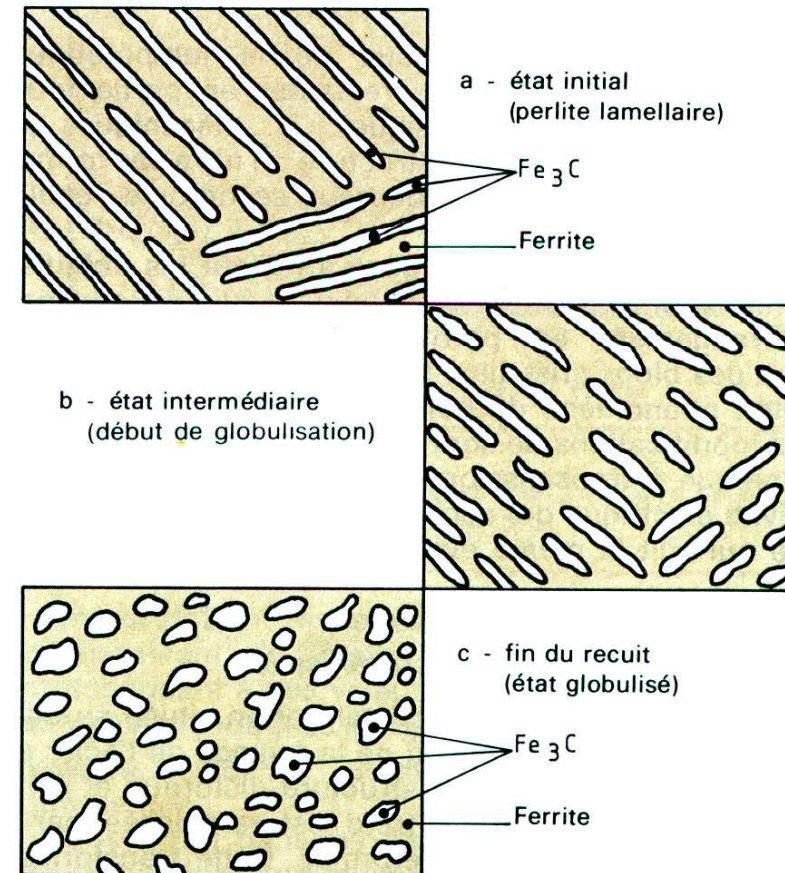
Para aços com muito carbono, melhora a maquinabilidade.



3.3. Reozido 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 química
- Arrefecimento lento até 500°C e depois livre.



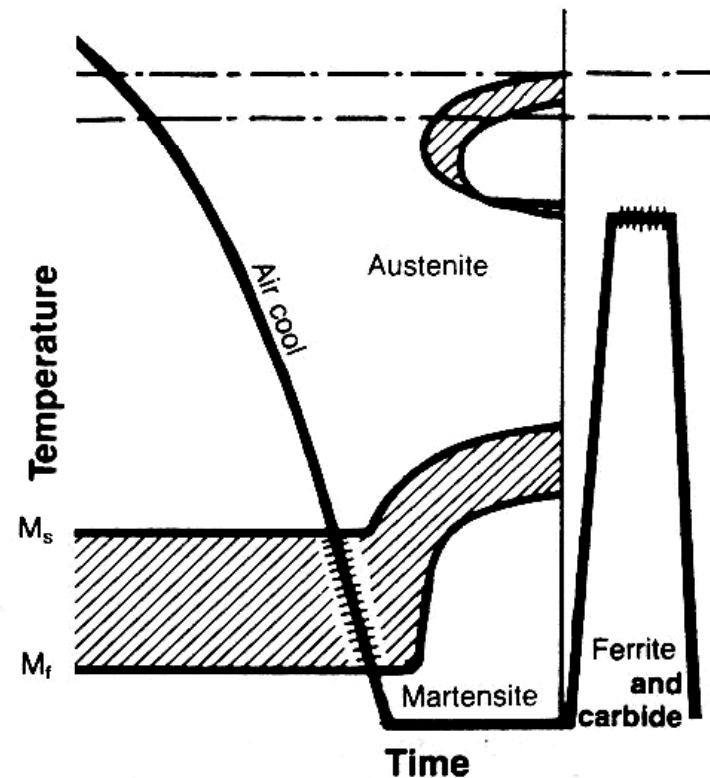
3.3. Reozido de Amaciamento ou Globulização

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



3.4. Reozido 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 reozido de distensão não modifica as propriedades mecânicas.

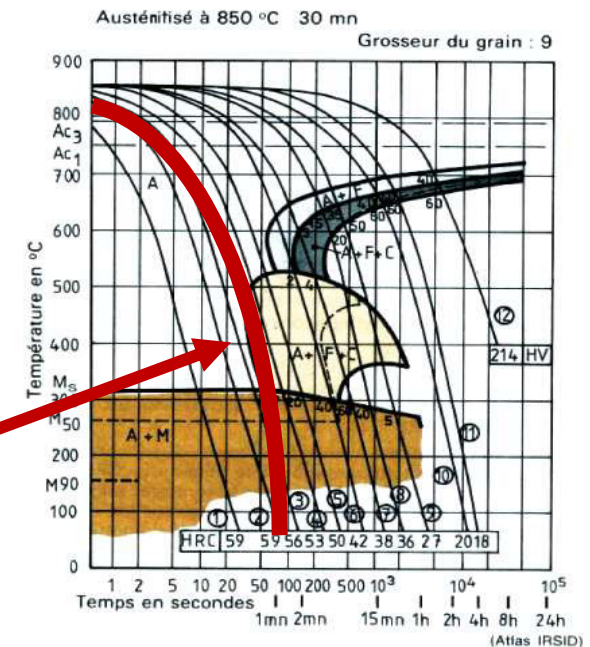
- Aquecimento até 500/620°C
- Estágio de 0,5 a 2 horas
- Arrefecimento lento, para evitar o aparecimento de novas tensões

3.5. TEMPERABILIDADE

Temperabilidade

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.

Temperabilidade

Factores que influenciam a temperabilidade

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

- Os **elementos de liga** em solução na γ (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 γ , G_a** . Um aumento de G_a melhora a temperabilidade mas piora as propriedades mecânicas.

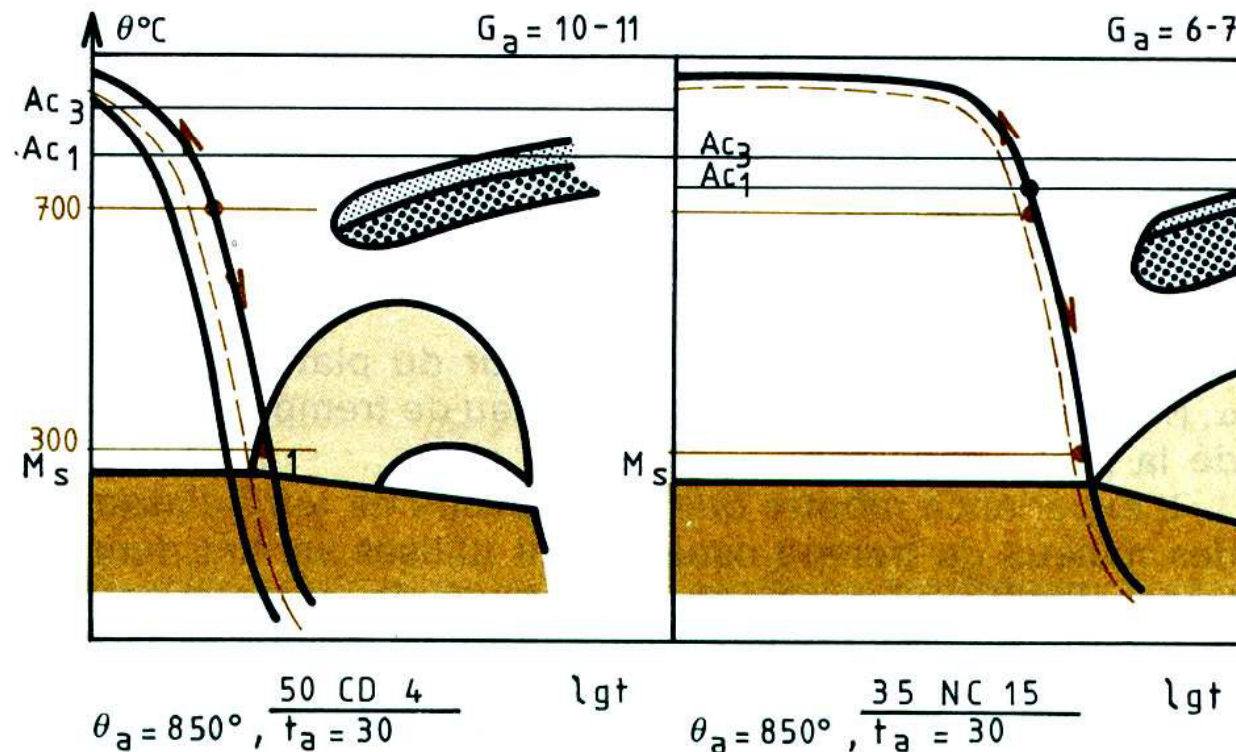
Temperabilidade

O conhecimento da temperabilidade é feito através de:

- 1. Diagramas TRC**
- 2. Curvas em U** (curvas de penetração de têmpera)
- 3. Diâmetro Crítico**
- 4. Ensaio Jominy**

1. Temperabilidade – Diagrama TRC

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.



2. Temperabilidade – Curvas em U

As velocidades de arrefecimento variam dum 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).

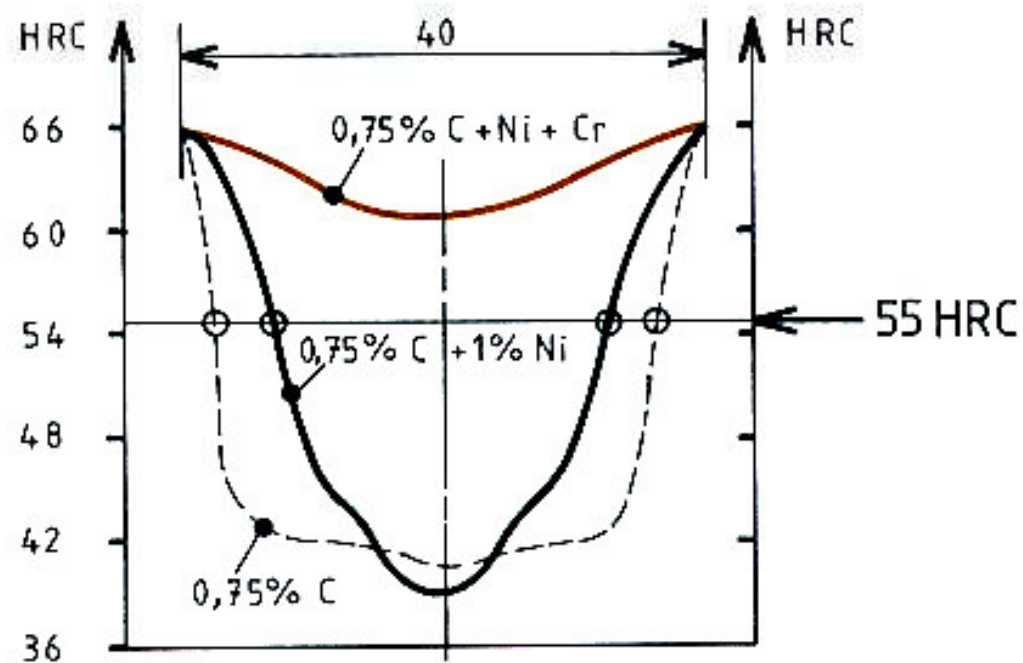
Assim a diferença de temperabilidade entre 2 aços traduz-se por uma diferença de **penetração de têmpera**.

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

2. Temperabilidade – Curvas em U

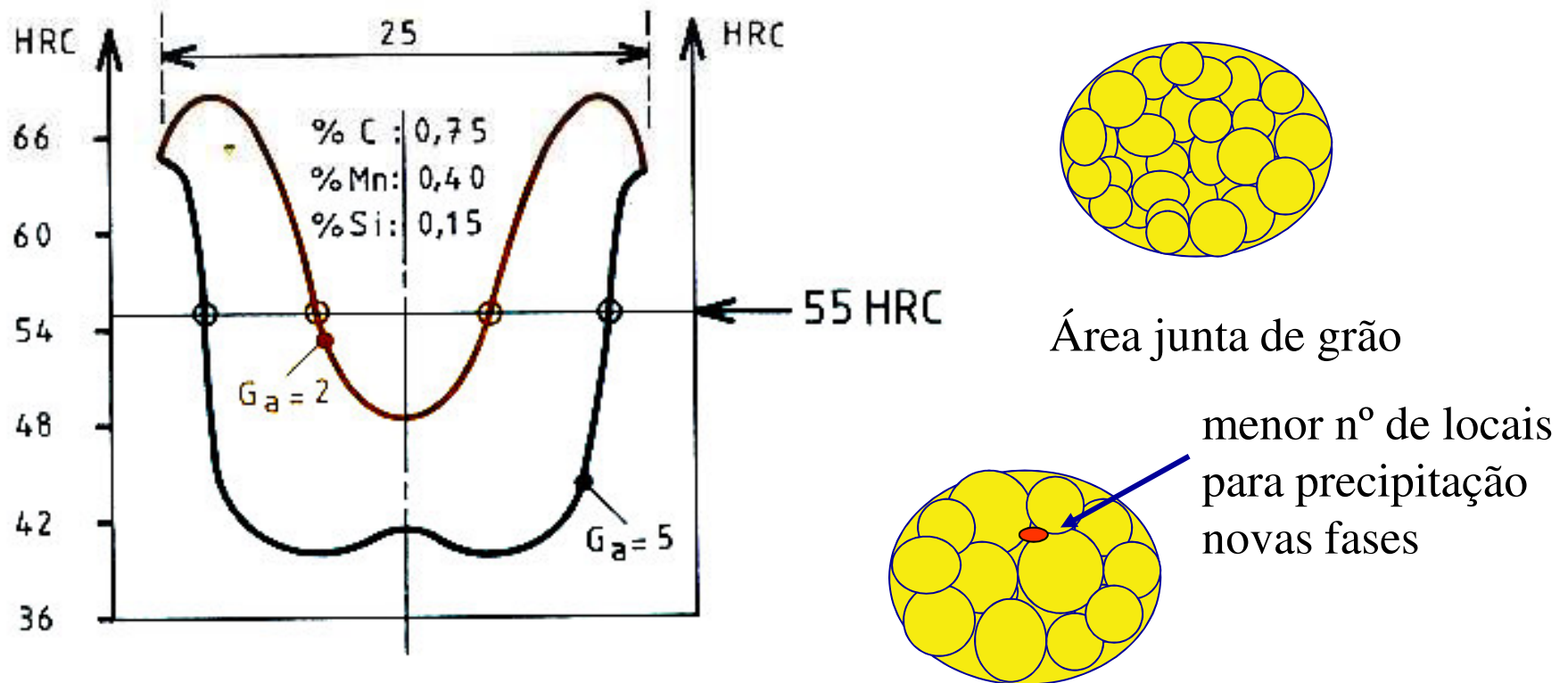
Influência do Ni e Cr num aço com 0,7% de C: a adição de **elementos de liga** aumenta a penetração de têmpera.

A dureza 55 HRC corresponde à dureza crítica (50% de martensite).



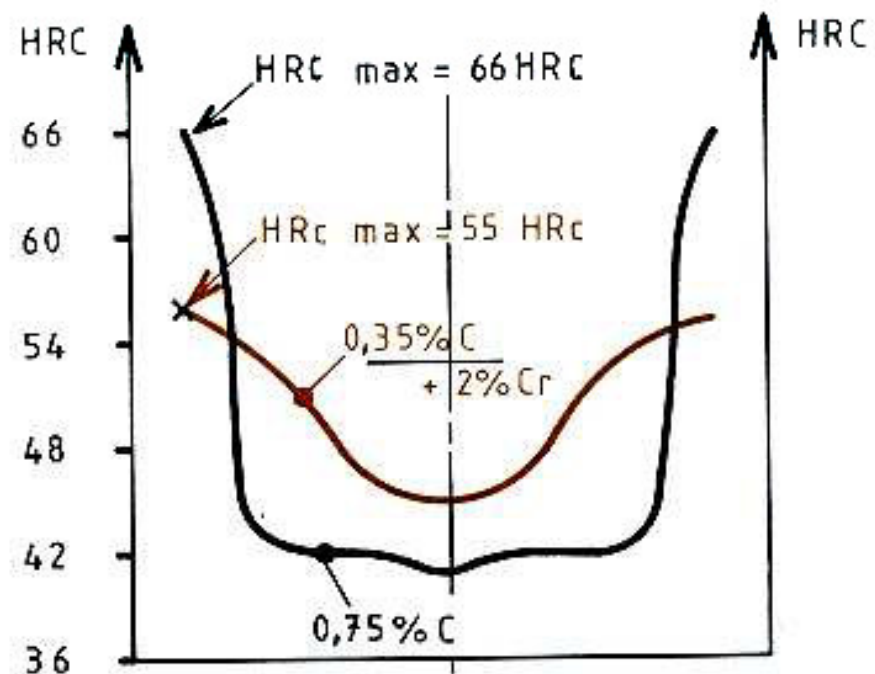
2. Temperabilidade – Curvas em U

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



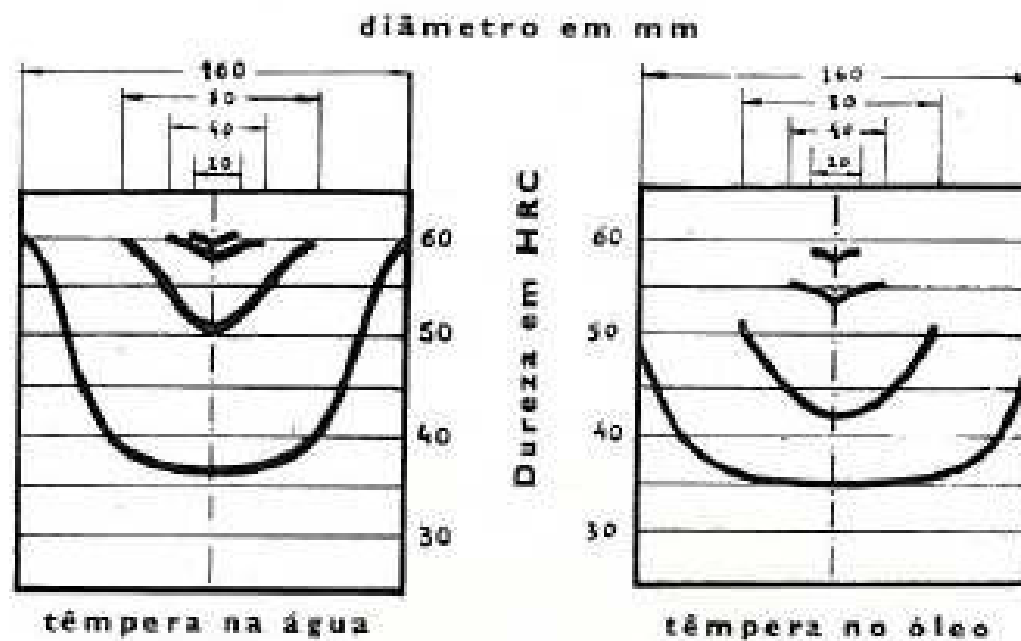
2. Temperabilidade – Curvas em U

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



2. Temperabilidade – Curvas em U

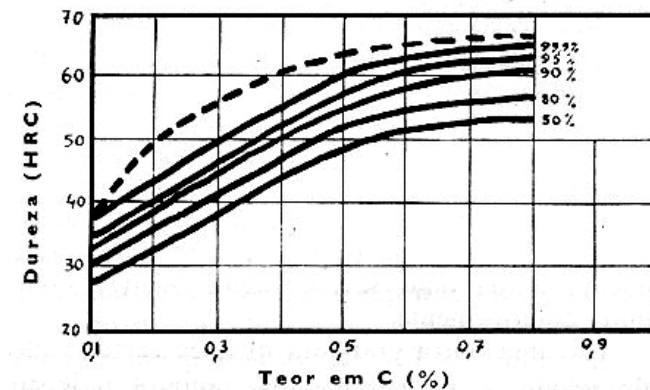
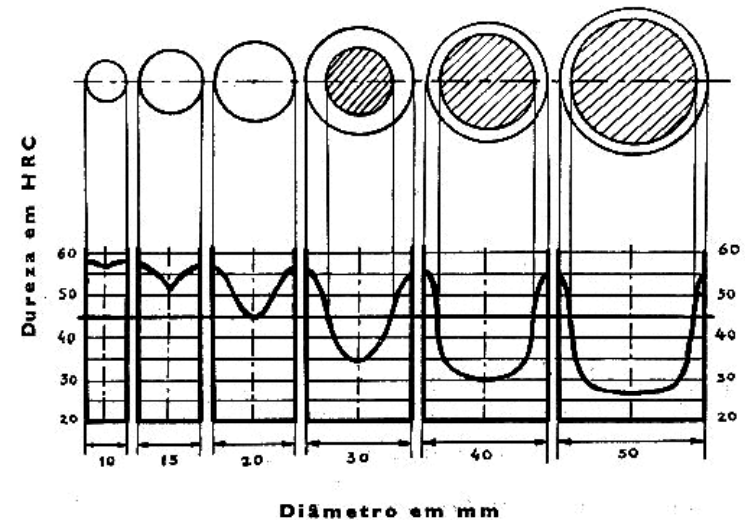
Influência do meio de arrefecimento



3. 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.

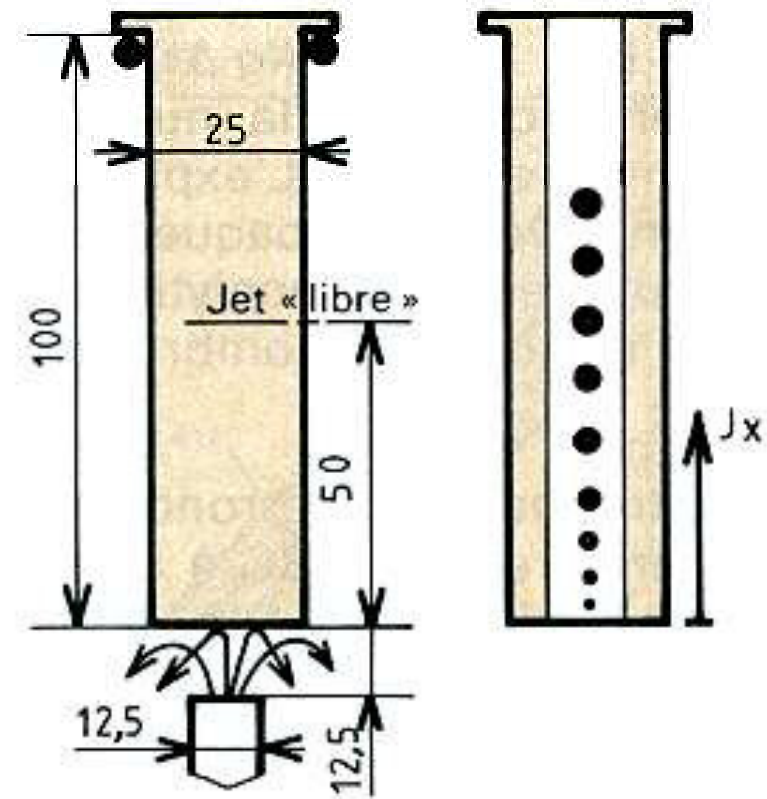


4. Temperabilidade – Ensaio Jominy

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.

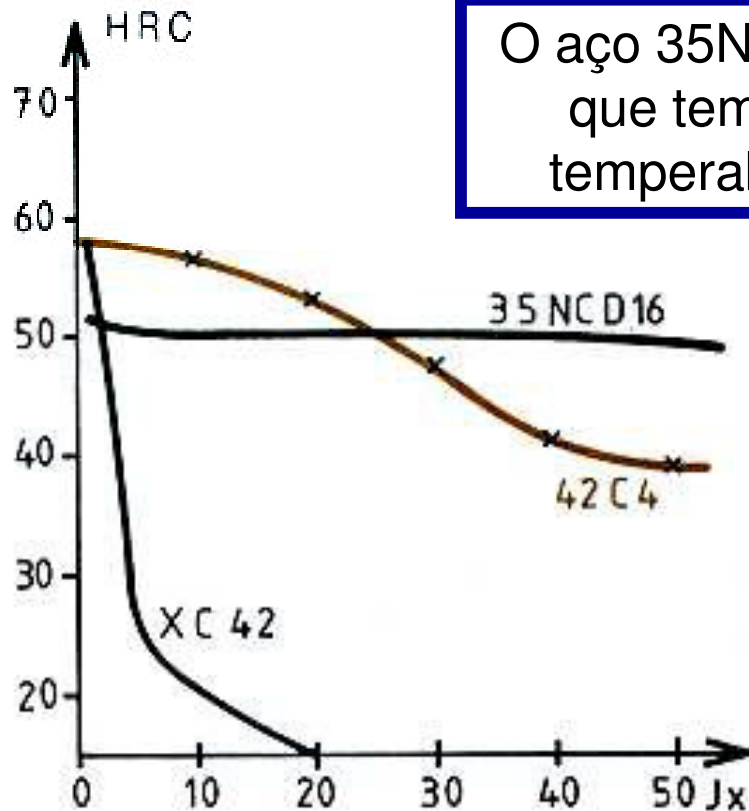
É realizado em **3 etapas**:

1. **Austenitização** dum provete maquinado no aço a testar e de dimensões normalizadas. A temperatura depende do aço e o tempo é de 30 min.
2. **Arrefecimento** na extremidade do provete por um jacto de água de acordo com a norma.
3. 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 .



4. 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

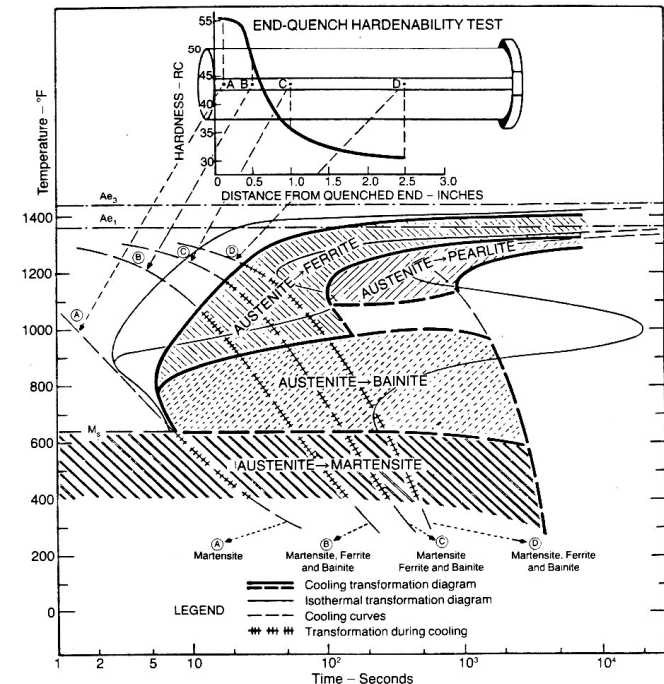
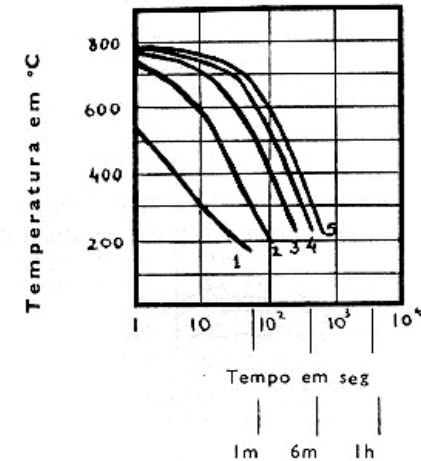
Os aços 42C4 e XC42 possuem a mesma % de C



4. 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.**



3.6. TÊMPERA

Têmpera

Introdução

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



Aumenta: dureza, Rm, Re, resistência ao desgaste

Diminui: tenacidade ao choque, extensão após rotura, ductilidade

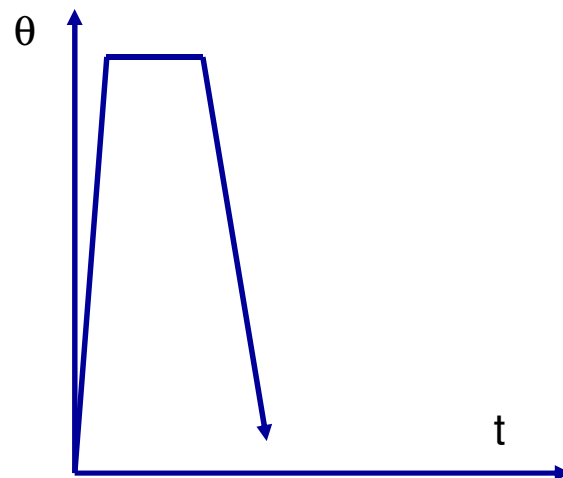
Têmpera

Aquecimento

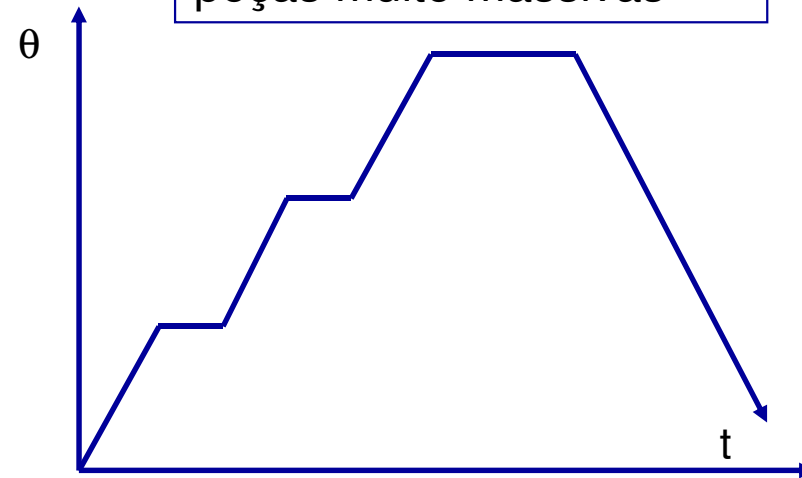
Evitar tensões residuais

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.

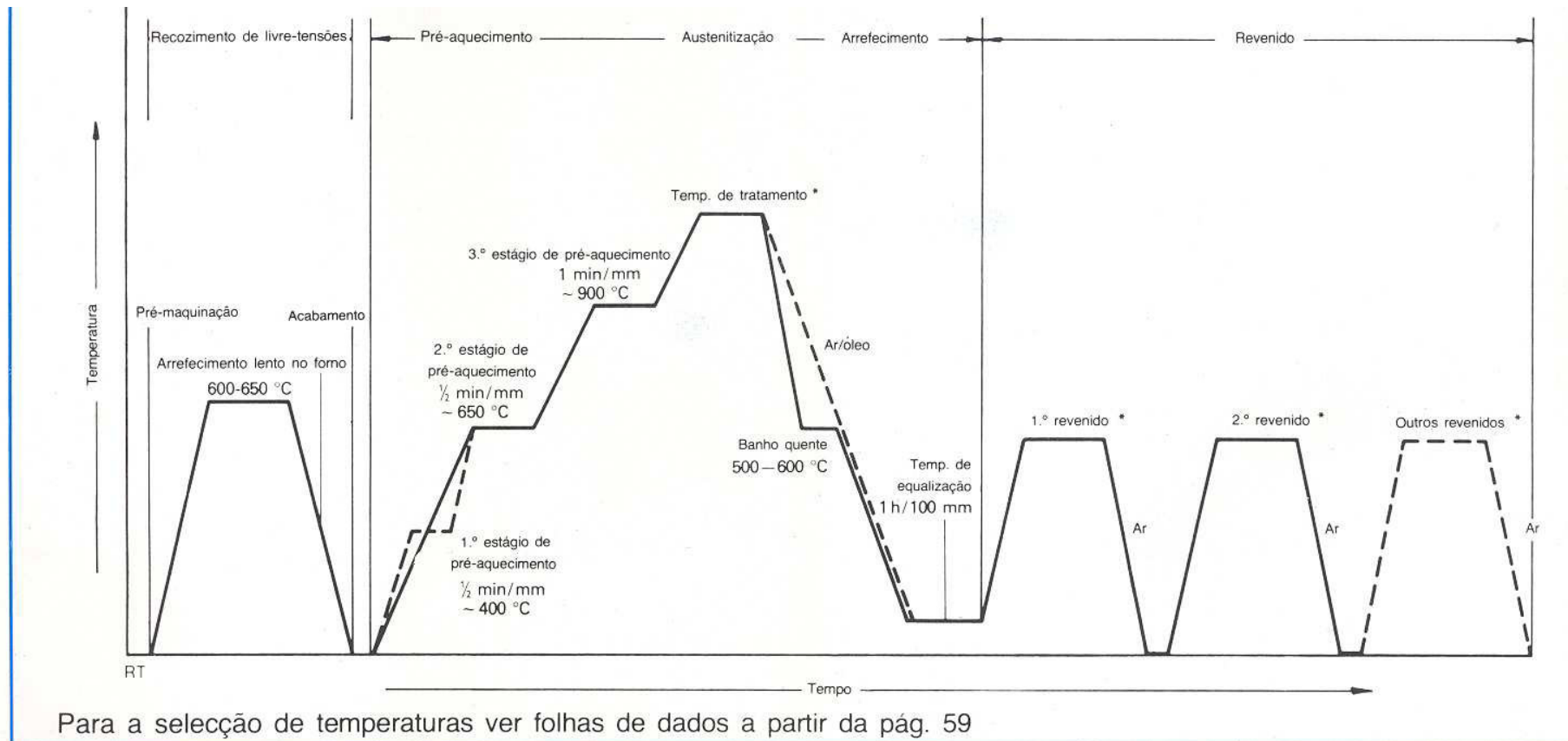
Aços pouco ligados ou peças de baixa massividade



Aços muito ligados ou peças muito massivas



Têmpera



Têmpera

Aquecimento

Evitar oxidação superficial

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

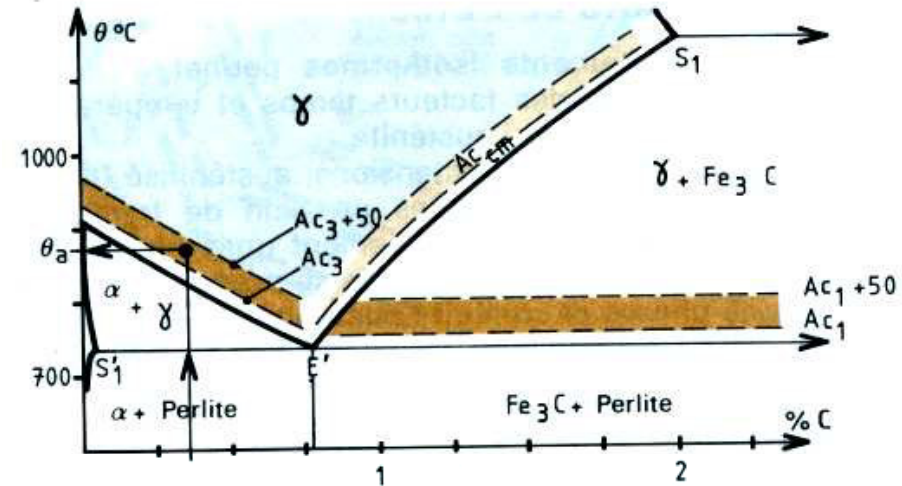
Potencial em carbono da atmosfera = teor em carbono do aço:

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

Têmpera Estágio

Temperatura

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



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°C por vezes) de maneira a dissolvê-los e enriquecer a A em carbono.

Têmpera

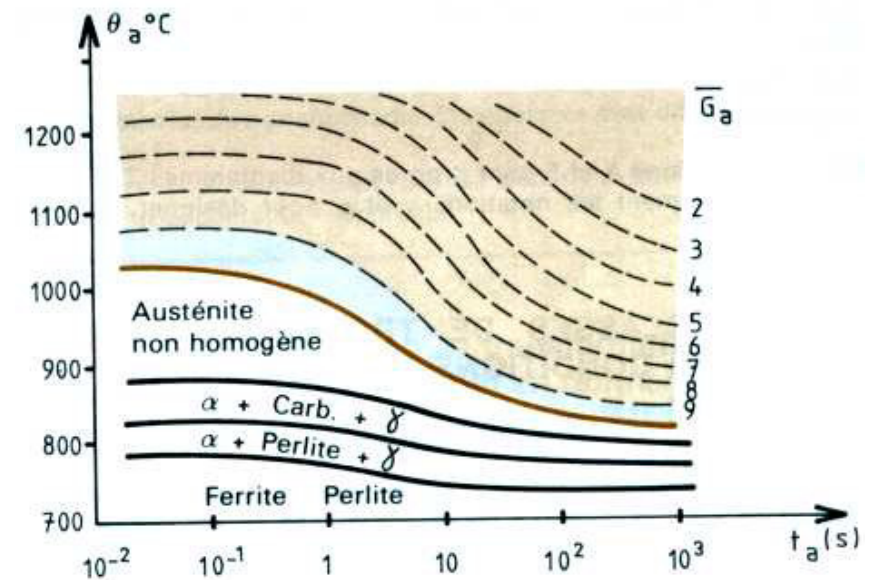
Estágio

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.



Têmpera

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.

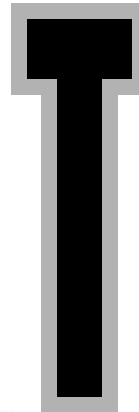
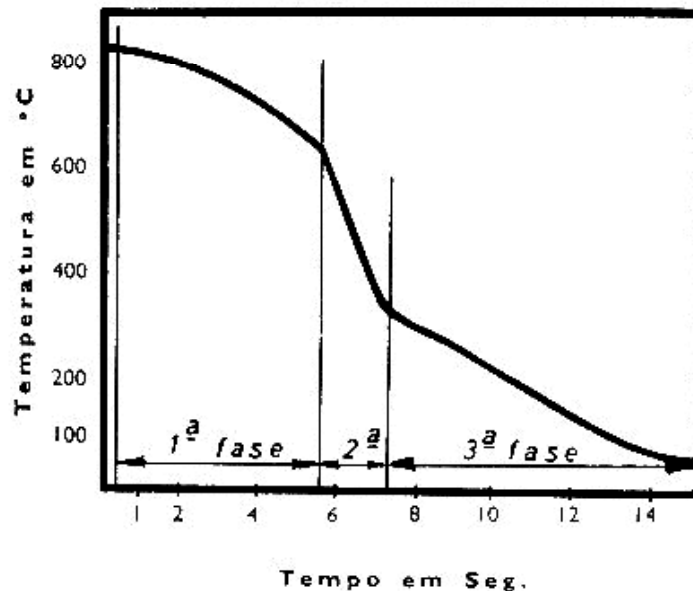
Grossman classificou os fluidos de têmpera em função da sua **severidade**, expressa em mm^{-1} ou em in^{-1} .

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	—

Têmpera

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

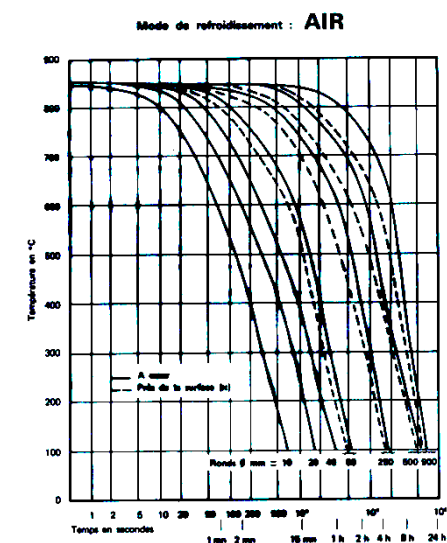
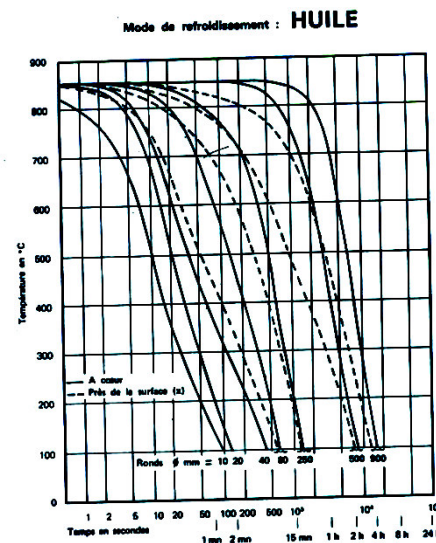
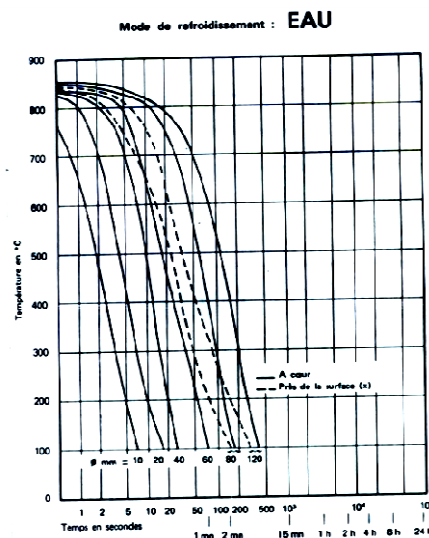
Quando a temperatura do aço está abaixo da temperatura de ebulição, a vaporização pára e o arrefecimento é por líquido. Arrefecimento lento.

Têmpera

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.

Têmpera

Arrefecimento

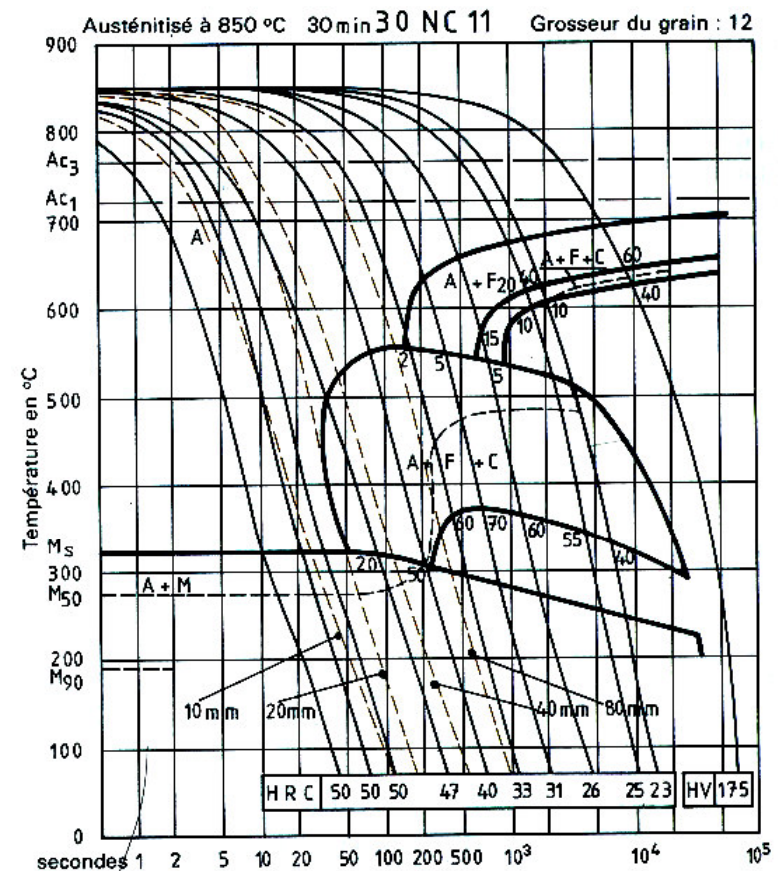
Utilização das curvas de arrefecimento sobre transparentes

Exemplo: aço 30NC11 arrefecido em 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:

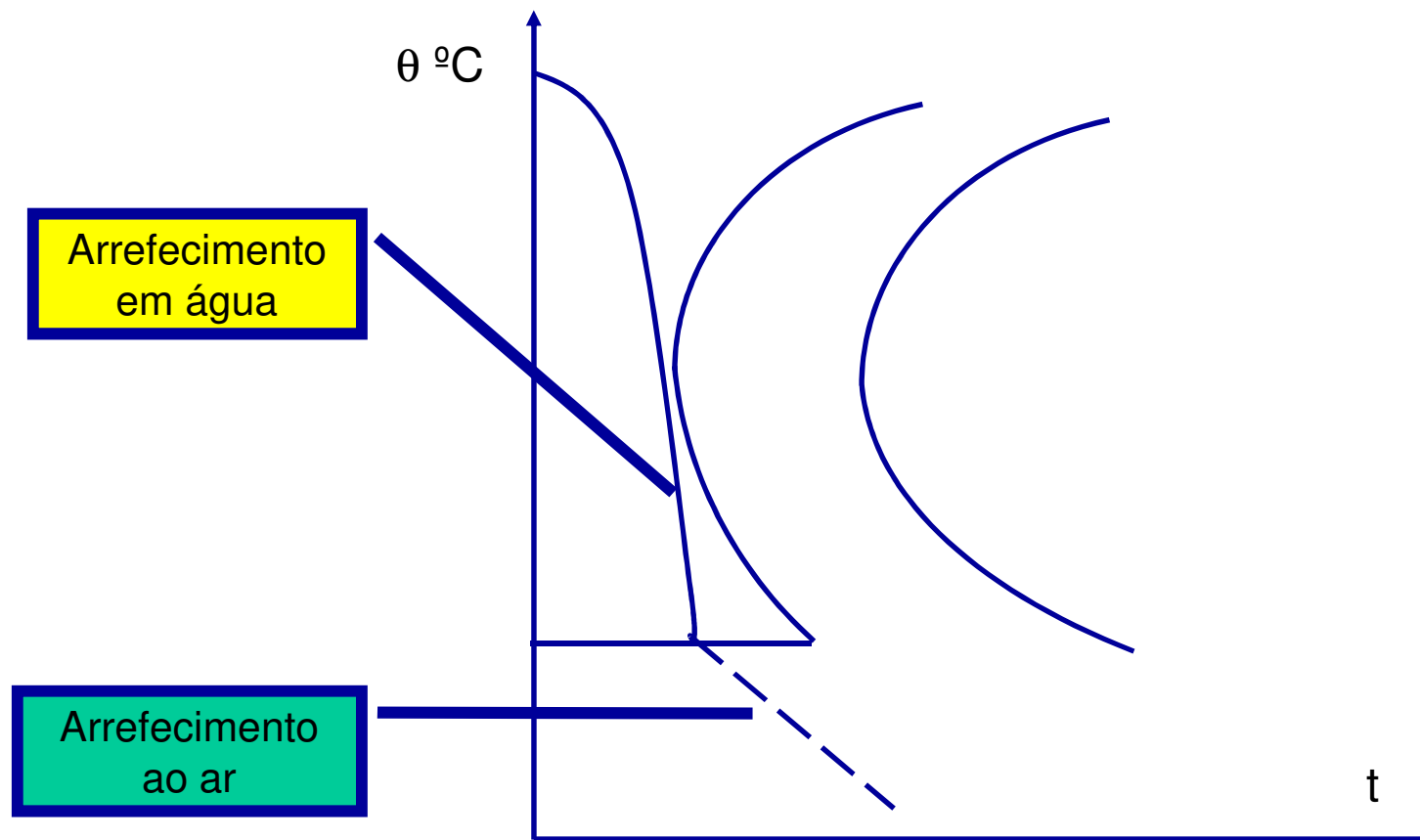
- Escolher uma qualidade de aço que permita obter, para uma peça de determinadas dimensões, arrefecida de forma definida, as características mecânicas exigidas.
- A partir de uma peça, fabricada num dado aço, determinar o tratamento térmico necessário para obter as características requeridas.



Têmpera

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

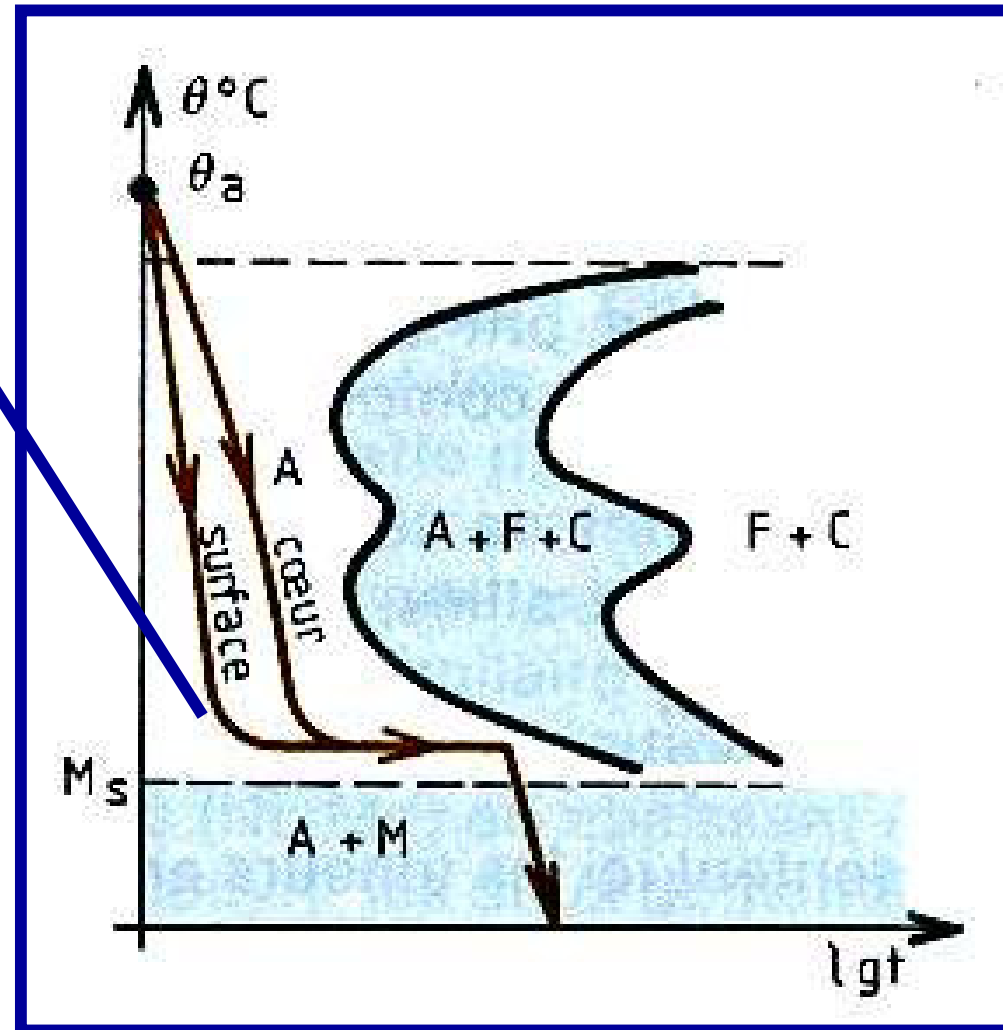
Têmpera interrompida



Têmpera

Martêmpera

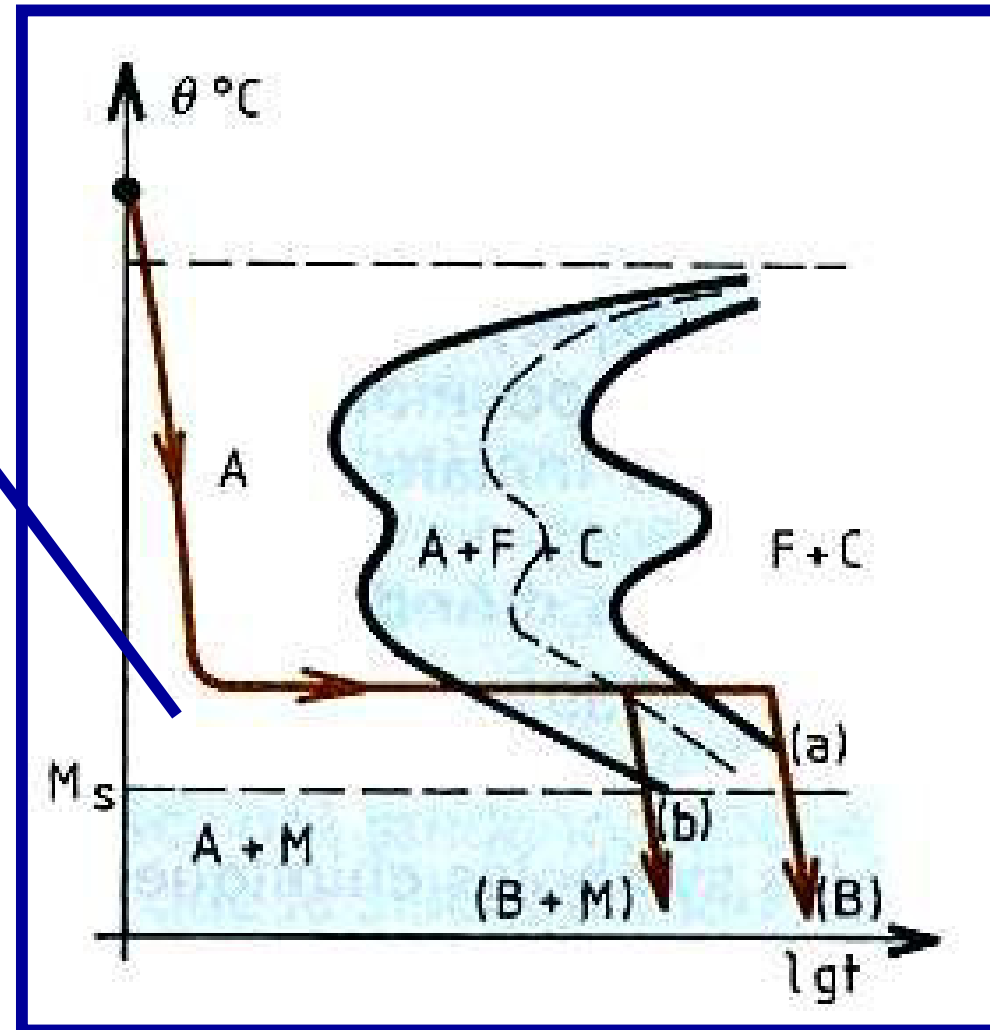
Arrefecimento num banho quente (sais) a uma temperatura ligeiramente superior a M_s , de maneira a garantir a uniformização da temperatura em toda a peça.



Têmpera

Austêmpera

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



Têmpera

Erros Cometidos na Têmpera

Causas mais frequentes residem em aspectos defeituosos na execução do tratamento.

Dureza inferior ao esperado:

- Aquecimento insuficiente
- Arrefecimento lento
- Descarbonização superficial
- Revenido elevado



Voltar a temperar

Deformações:

- Aquecimento exagerado
- Aquecimento não uniforme
- Arrefecimento demasiado brusco
- Posição de têmpera incorrecta



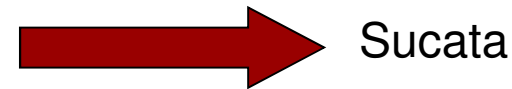
Recozido de amaciamento
e nova têmpera
(desempeno)

Têmpera

Erros Cometidos na Têmpera

Fissuras e fendas:

- Aquecimento demasiado rápido e não uniforme
- Arrefecimento demasiado rápido
- Demora no revenido
- Micro-fissuras pré-existentes



Sucata

Dureza irregular:

- Aquecimento irregular (falta de austenitização)
- Arrefecimento defeituoso (peças encostadas)



Recozido de amaciamento
e nova têmpera

3.7. REVENIDO

Revenido

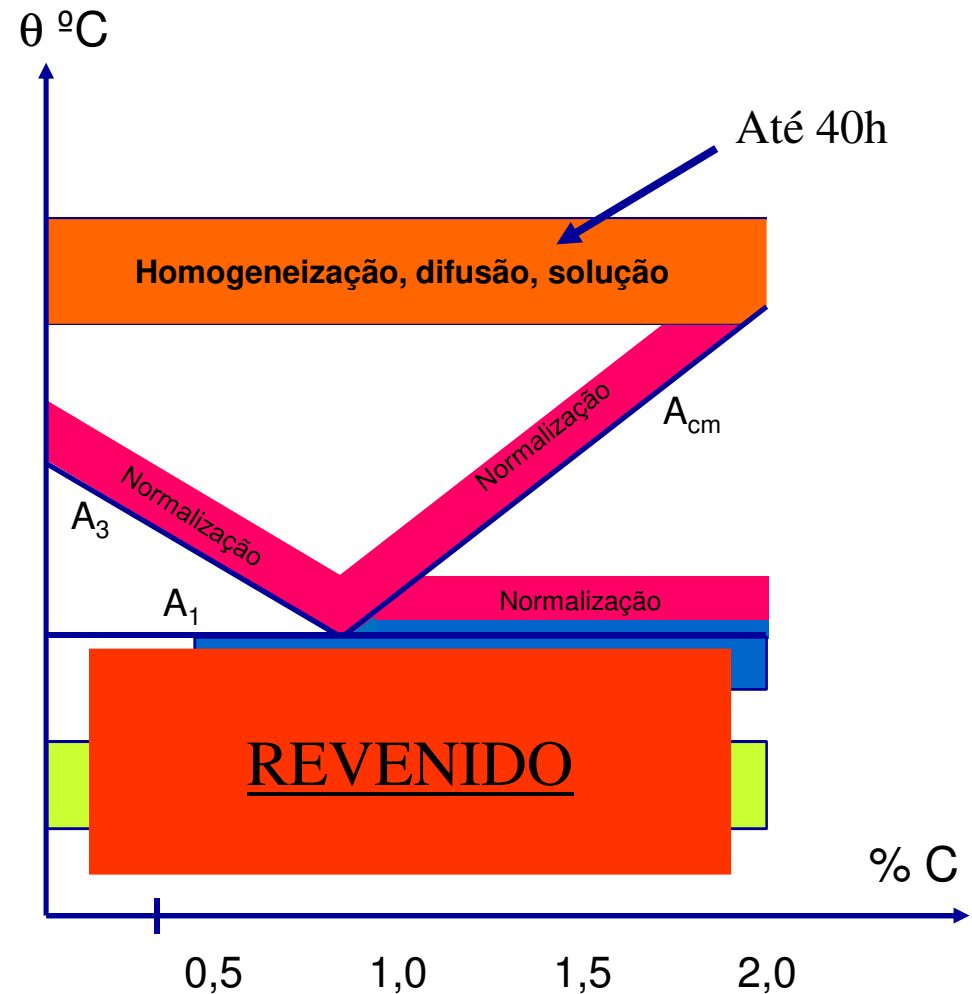
Introdução

Depois da têmpera o aço tem:

- Rm, Re e H elevados
- A(%) e tenacidade ao choque (K) baixas
- Muitas tensões internas.

O revenido destina-se a corrigir estes inconvenientes.

Fica-se com um compromisso satisfatório entre Rm, Re, H e A(%) e K.



Revenido

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



Revenido

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 pelas alterações significativas das propriedades mecânicas.

Revenido

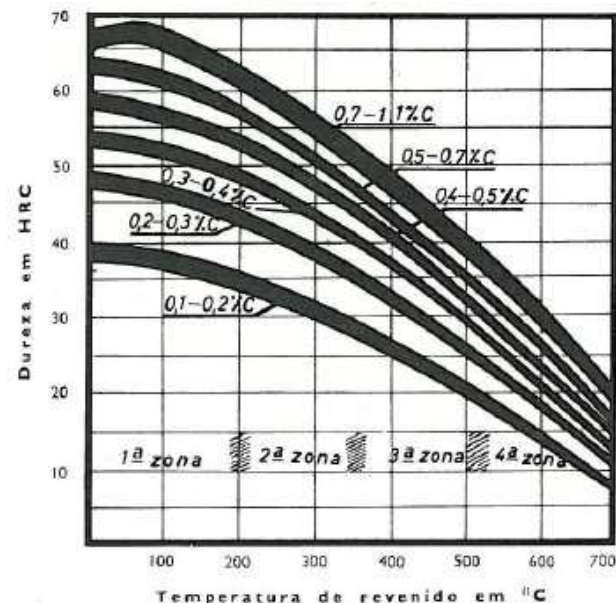
A martensite liberta sempre carbono, distende-se e formam-se diferentes carbonetos com diferentes disposições, dependentes unicamente das temperaturas a que os revenidos são realizados.

1ª zona - até 200°C

Diminuição do teor em C e formação do carboneto ϵ (percarboneto de ferro ϵ)

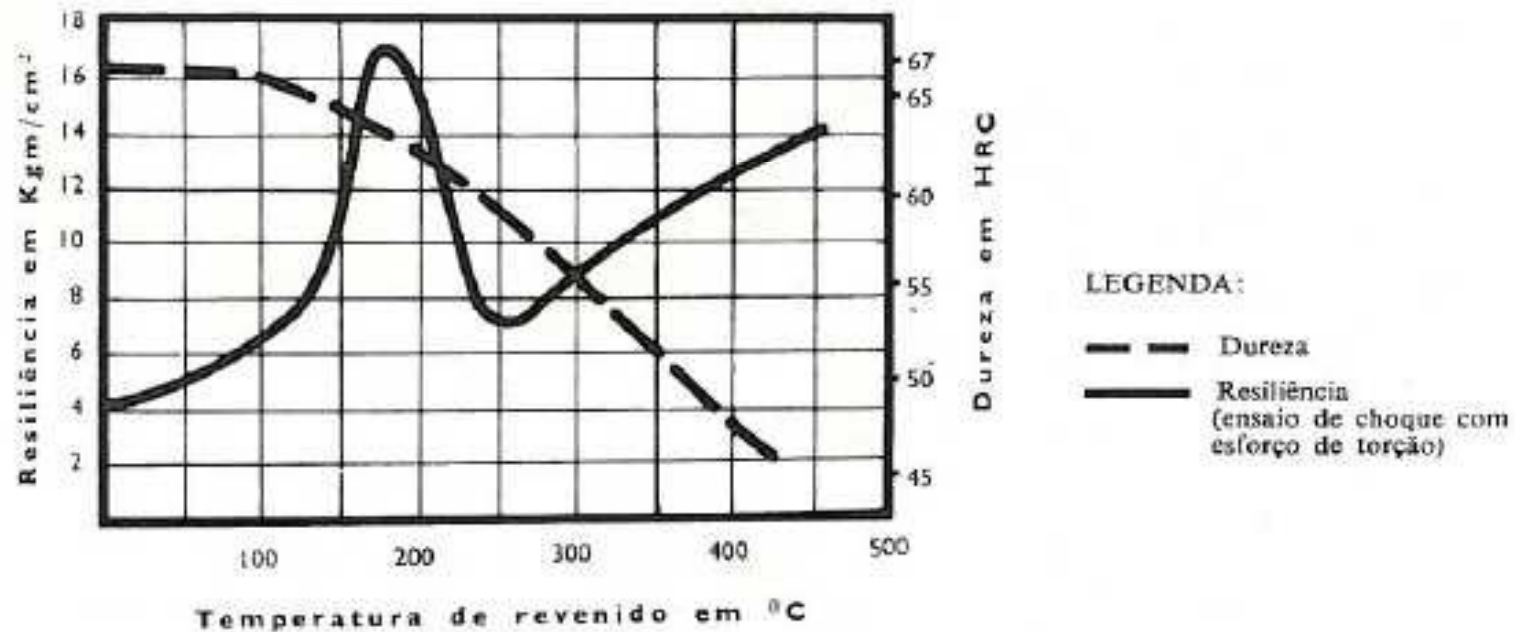
Se $C \geq 0.8\%$ então há um endurecimento por precipitação

Se $C \leq 0,8\%$ há uma diminuição de dureza



Revenido

- Diminuição das tensões internas por diminuição da deformação da martensite
- Aumento da tenacidade
- Martensite Tetragonal ► Martensite Cúbica



Revenido

2ª zona - 200 a 320°C

Transformação da austenite residual em **Bainite**.

Dissolução do carboneto ϵ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$), o que origina **Cementite** em forma de uma película que envolve as agulhas de **Martensite**.

Zona de fragilização – o Si desloca essa zona para os 500°C.

A causa da fragilização será a segregação de nitretos e impurezas (P, Sn) ou a cementite que rodeia a martensite.

Fragilização por Envelhecimento ou por Revenido Baixo

Queda acentuada da dureza

Revenido

3ª zona - 320 a 525°C

Rompe-se a película de **Cementite** que se mistura na matriz. Queda de dureza, a menos que existam elementos de liga que formem carbonetos.

Aços de liga (CrNi, Mn) – **Fragilização** (diminuição da tenacidade) por precipitação de carbonetos – **Fragilidade Krupp ou por Revenido.**

O Mo elimina esta fragilidade. Outra solução será revenir os aços a temperaturas acima de 550°C e arrefecer rapidamente ao passar nesta zona de temperaturas.

Revenido

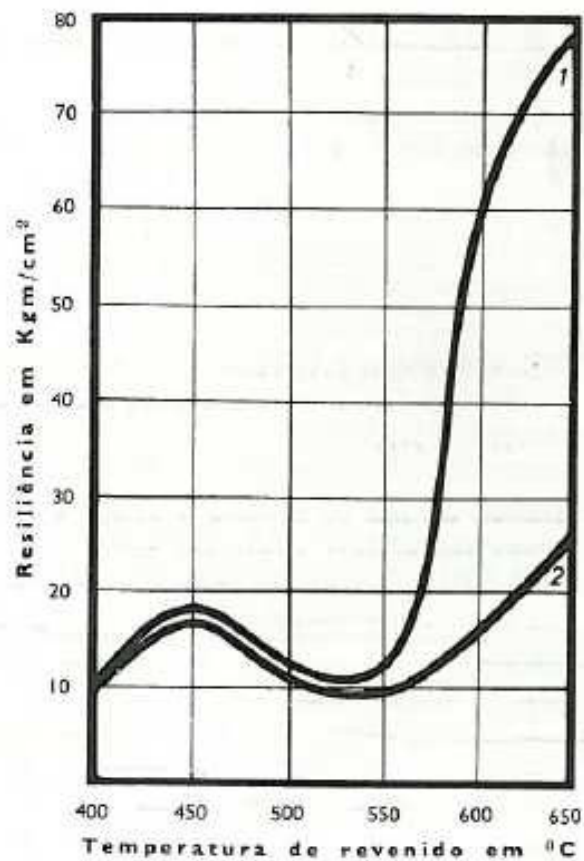


Fig. 59 — Influência da velocidade de arrefecimento sobre a tenacidade (obtida por ensaio Izod) em função da temperatura de revenido. Note-se a zona de fragilidade Krupp entre 450 e 600° C.

Aço: C 0,35 %, Cr 1,0 %, Ni 3,5 %.

Curvas: 1 — arrefecimento na água
2 — arrefecimento no forno

Revenido

4ª zona – Acima de 500°C

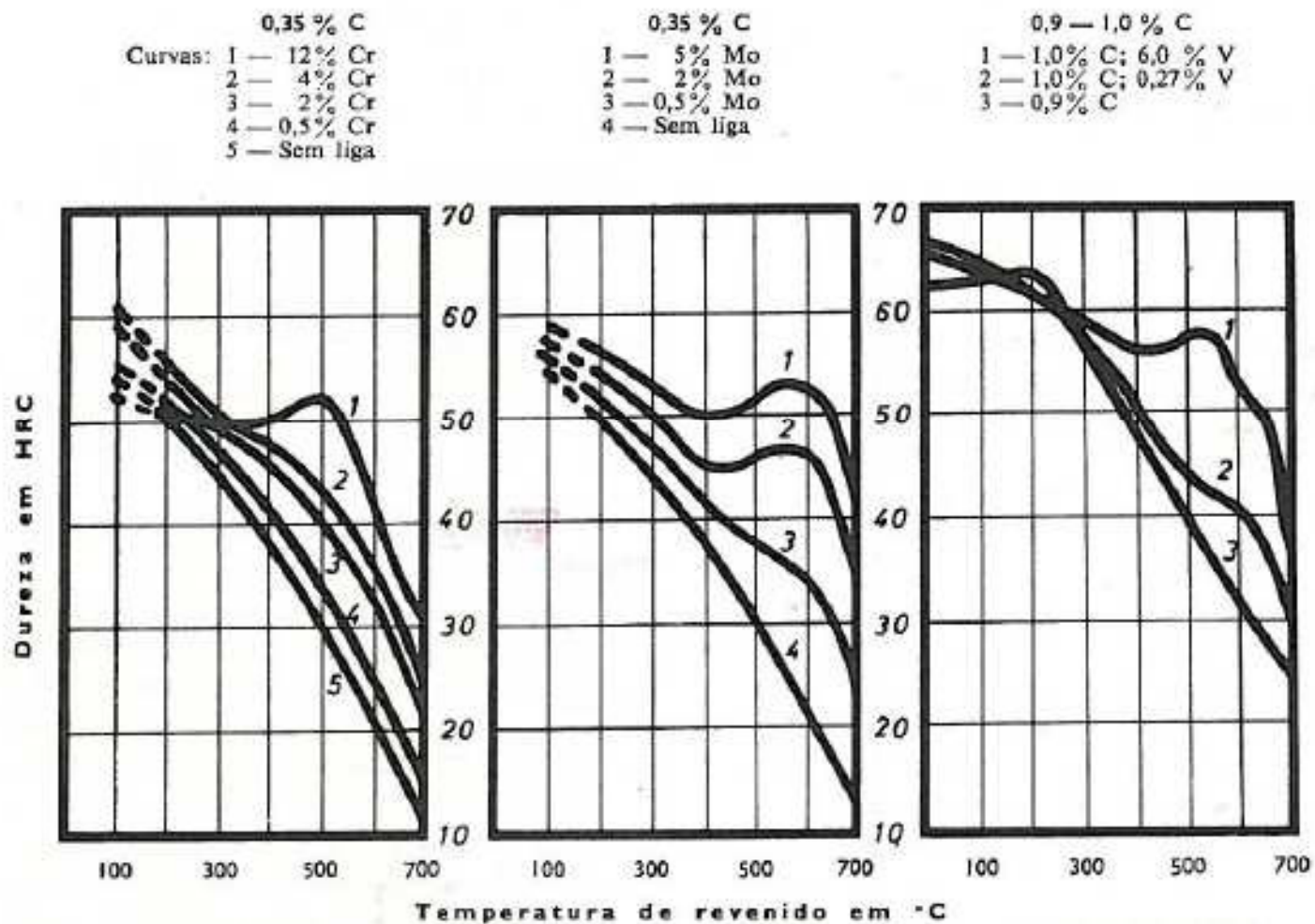
Globulização da Cementite (queda de dureza e aumento de tenacidade).

Se o aço possuir Mo, V ou Cr há formação de finos carbonetos destes elementos que impedem a queda de dureza sem perda de ductilidade

Endurecimento Secundário, por Revenido ou Têmpera Secundária

O tempo de revenido influencia muito pouco as propriedades mecânicas e as estruturas obtidas, a partir de 1 hora. O máximo efeito do revenido só pode ser obtido com uma duração suficiente.

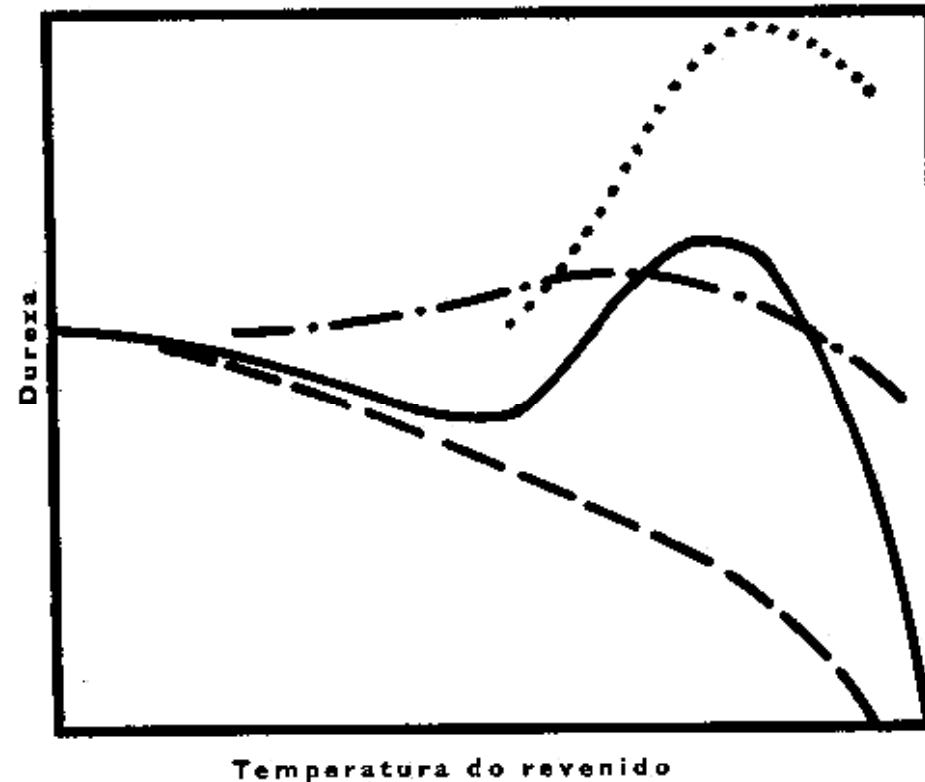
Revenido



Revenido

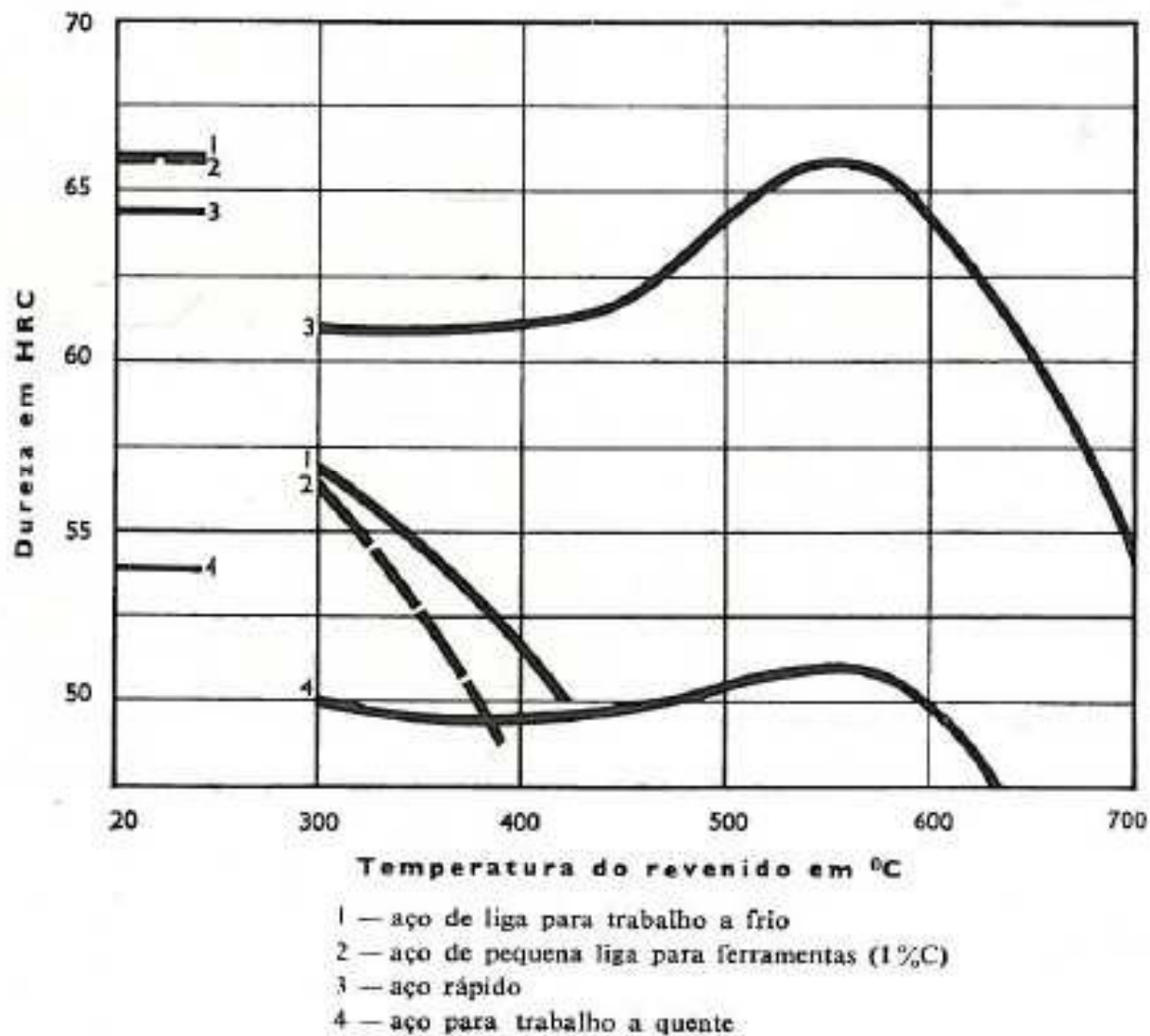
Evolução das propriedades mecânicas

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).

Revenido



3.8. TRATAMENTOS TÉRMICOS SUPERFICIAIS

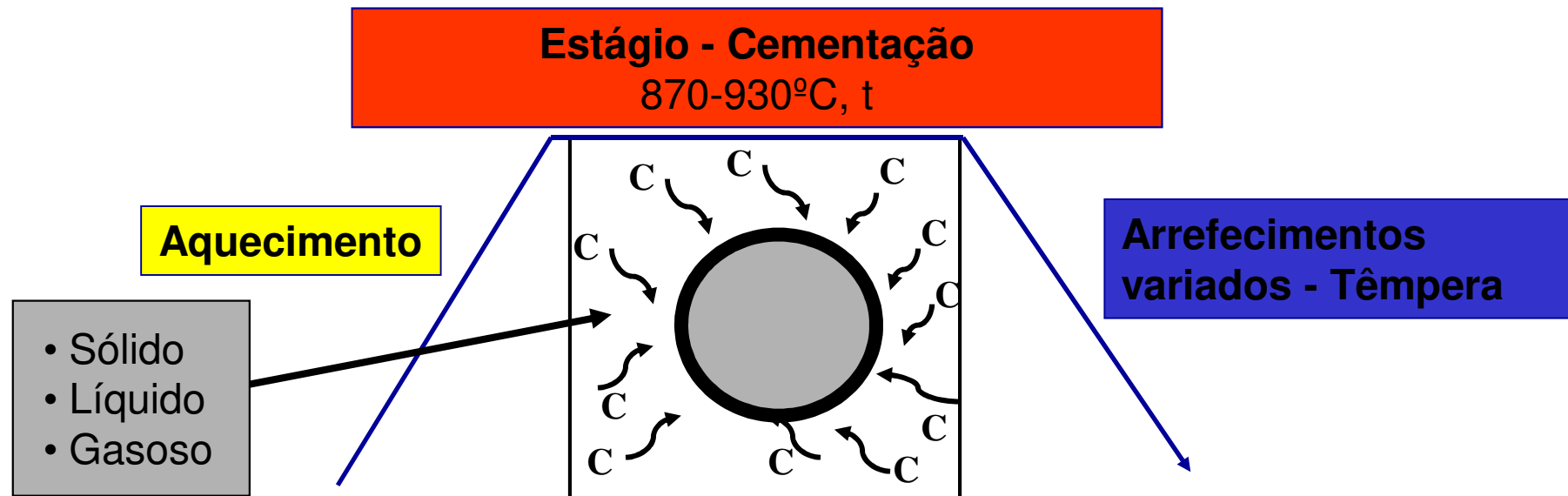
Tratamentos Superficiais

- 1. Cementação**
- 2. Nitruração**
- 3. Carbonitruração**
- 4. Endurecimento por Chama e Indução**



3.8.1. Cementação

A cementação é um tratamento termoquímico, que se aplica especialmente aos aços ferrítico-perlíticos.



- O teor em C dos aços de cementação é normalmente $<0.2\%$, podendo ir até 0.25% .
- Após a carbonização atingem-se valores de 0.8% , podendo ir até aos 1.10% .
- A difusão do carbono é feita sempre pela fase gasosa (0.1mm/h em meio sólido e $0.4\text{-}0.5\text{mm/h}$ em banho de sais – mais homogénea).

Cementação

Carbonização:

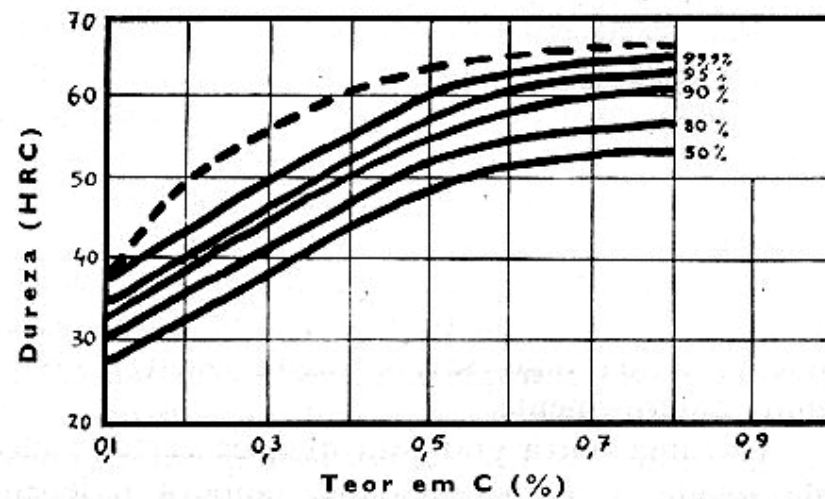
1. Transferência de átomos de C
2. Difusão do C da superfície para o interior da peça

Profundidade da camada cementada:

Distância da superfície até ao ponto em que %C da camada cementada desce até ao mínimo de 0.40%C (55-60HRC).

Profundidade de têmpera após cementação:

É a espessura da camada para a qual a dureza é inferior em 9 HRC à dureza teórica da periferia (0.8-1.1%C – 67HRC, 0.4% - 58HRC)



Cementação

- Normalmente a camada cementada vai até aos 2mm de profundidade.
- No caso de se pretender camadas cementadas mais profundas usam-se misturas de sais especiais.
- A cementação em meios gasosos produz uma carbonização muito regular, e atendendo a problemas ambientais, é hoje o processo mais comum.



Cementação

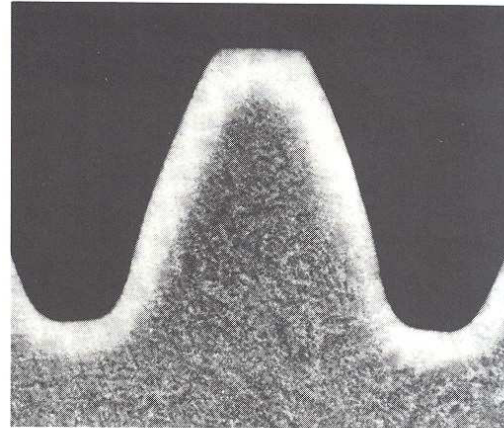


Fig. 68
Same steel and processing as Fig. 67. Uniform case depth on a 40-tooth gear. Effective case depth is 0.8 to 1.0 mm (0.03 to 0.04 in.). See Fig. 69 for microstructure. Nital, 6 x.

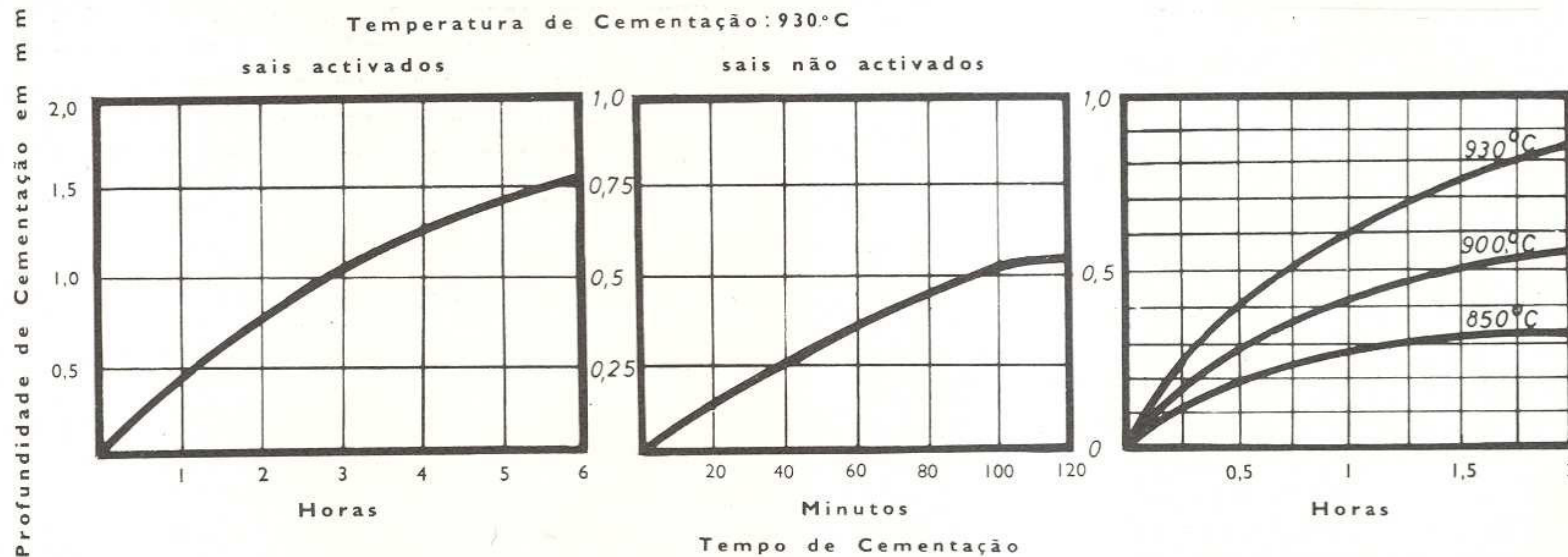


Fig. 69 — Influência da duração de cementação sobre a profundidade da camada cementada para 2 tipos de sais. a 930°C

Fig. 70 — Influência do tempo de cementação e da temperatura de cementação na profundidade de cementação (banhos de sais).

Cementação

Table 1 Principal gases used as sources of carbon in gas carburizing

Constituent	Natural gas			Coke oven gas	Commercial (normal) butane	Commercial propane
	Pittsburgh	Kansas City	Indianapolis			
Composition, vol %						
CO ₂	0.8	0.4	2.2	...	...	...
O ₂.....	...	...	0.4	0.8	...	...
N ₂	0.8	8.4	6.0	8.1	...	...
CO.....	...	...	...	6.3	...	...
H ₂.....	...	...	...	46.5	...	...
CH ₄ (methane).....	83.4	84.1	87.2	32.1	...	...
C ₂ H ₆ (ethane).....	15.8	6.7	6.0	...	...	...
C ₂ H ₄ (ethylene).....	...	...	...	3.5	...	2.5
C ₆ H ₆ (benzene).....	...	...	...	0.5	...	...
C ₄ H ₁₀ (butane).....	...	...	...	...	93.0	...
C ₃ H ₈ (propane).....	...	...	...	...	7.0	96.0
C ₄ H ₁₀ (isobutane).....	...	...	...	...	...	1.5
Specific gravity	0.61	0.63	0.61	0.44	1.95	1.52

Cementação

Table 1 Compositions of case hardening steels

Steel	Composition, %								
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	
Carbon steels									
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...	...
1012 mod	0.10-0.15	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	0.30	0.30	...	...
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...	...
1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...	...
1039	0.37-0.44	0.70-1.00	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...	...
Resulfurized steels									
1113	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	...	...	...	...	...
1117	0.14-0.20	1.00-1.30	0.040 max	0.08-0.13	...	...	...	...	...
Alloy steels									
3310	0.08-0.13	0.45-0.60	0.025 max	0.025 max	0.20-0.35	3.25-3.75	1.40-1.75	...	...
3310H	0.07-0.13	0.30-0.70	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	3.20-3.80	1.30-1.80	...	...
4118	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.40-0.60	0.08-0.15	...
4118H	0.17-0.23	0.60-1.00	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.30-0.70	0.08-0.15	...
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.80-1.10	0.15-0.25	...
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30	...
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	1.65-2.00	...	0.20-0.30	...
8617	0.15-0.20	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	...
8617H	0.14-0.20	0.60-0.95	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.15-0.25	...
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	...
8620H	0.17-0.23	0.60-0.95	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.15-0.25	...
8720	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30	...
8822H	0.19-0.25	0.70-1.05	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.30-0.40	...
9310	0.08-0.13	0.45-0.65	0.025 max	0.025 max	0.20-0.35	3.00-3.50	1.00-1.40	0.08-0.15	...
AMS 6470 (a)	0.38-0.43	0.50-0.70	0.040 max	0.040 max	0.20-0.40	...	1.40-1.80	0.30-0.40	...
Tool steel									
H13 (b)	0.35	...	...	...	...	...	5.0	1.50	...
Maraging steel									
18% Ni (300 CVM) (c)	0.03 max	0.10 max	0.010 max	0.010 max	0.10 max	18.5	...	4.8	...

(a) AMS 6470 also contains 0.90 to 1.35% Al. The steel for which structures are shown in Fig. 80 to 85 was modified by adding 0.15 to 0.35% Pb. (b) H13 steel also contains 1.0% V. (c) This steel also contains 0.10% Al, 0.60% Ti, 9.0% Co, 0.003% B, 0.02% Zr, and 0.05% Ca. Source: *Metals Handbook, Metallography and Microstructures*, Vol. 9, 9th ed., ASM, 1986, p. 219

Cementação

- Os aços Cr-Mo e Cr-Mn só devem ser carbonizados com cimentos macios em virtude da sua tendência para a hipercarbonização.
- Para grandes profundidades de cementação e em especial nos aços com crómio não é possível evitar a hipercarbonização em consequência da formação de carbonetos de crómio.
- Para se evitar a hipercarbonização será conveniente que se proceda, após a cementação, a um recozido de normalização à temperatura de cementação num forno com atmosfera neutra.



Cementação

Tratamento térmico das peças cementadas

1. Têmpera directa a partir da temperatura de cementação
2. Têmpera simples
 1. Sem regeneração do grão do núcleo
 2. Com regeneração do grão do núcleo
 3. Com recozido intermédio
 4. Transformação isotérmica e têmpera simples
3. Têmpera dupla
 1. Com regeneração do grão do núcleo
 2. Com a 1ª têmpera directa a partir da temperatura de cementação
4. Revenido

Cementação

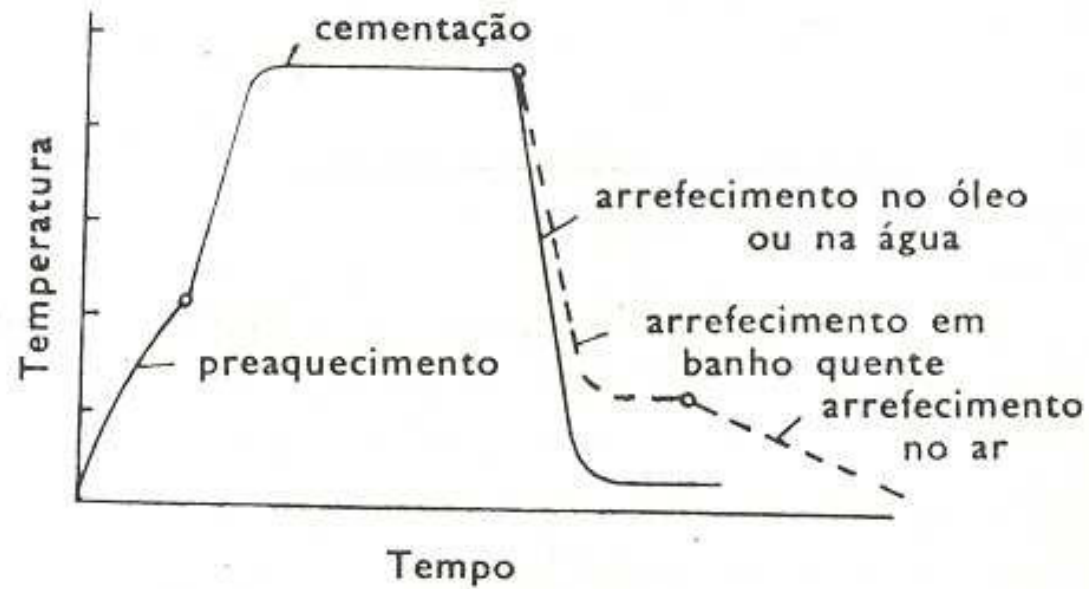


Fig. 71 — Têmpera directa a partir da temperatura de cementação

Cementação

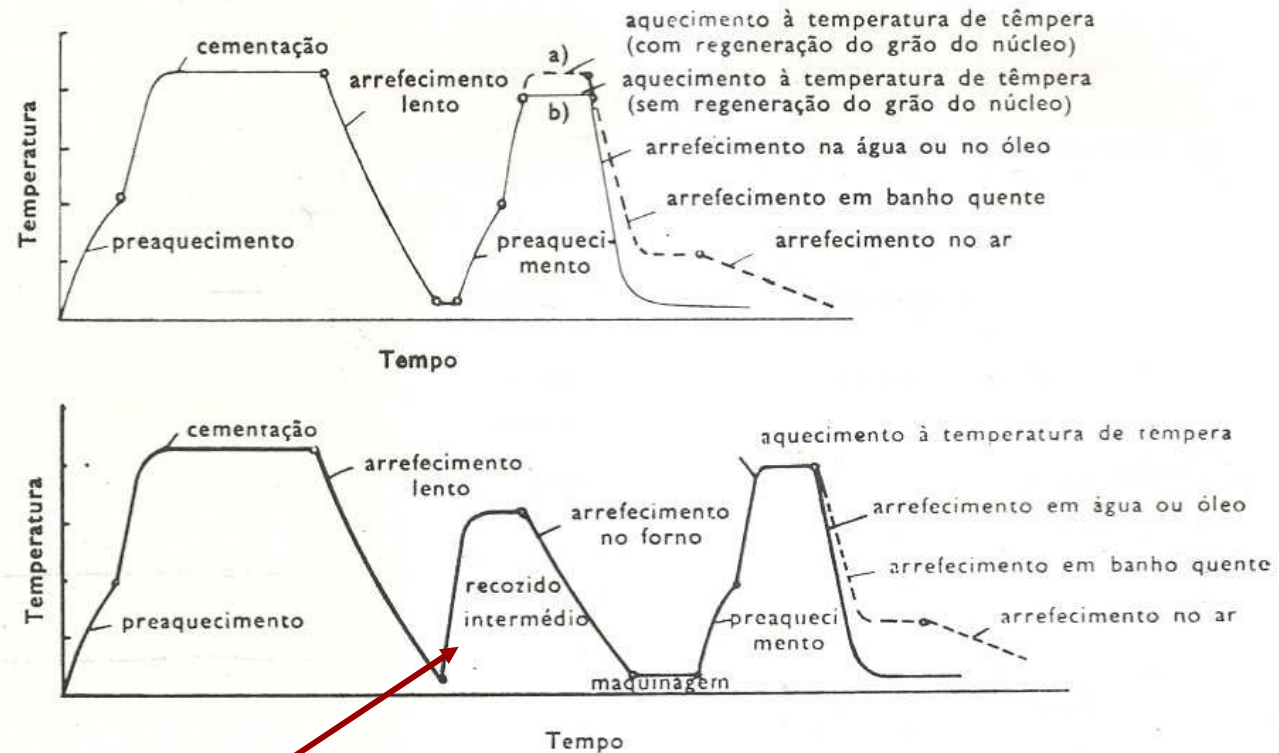


Fig. 72 — 3 hipóteses de tratamento por têmpera simples de peças cementadas.

- a) Com regeneração do grão do núcleo.
- b) Sem regeneração do grão do núcleo.
- c) Com recozido intermédio.

Deformação mínima

Cementação

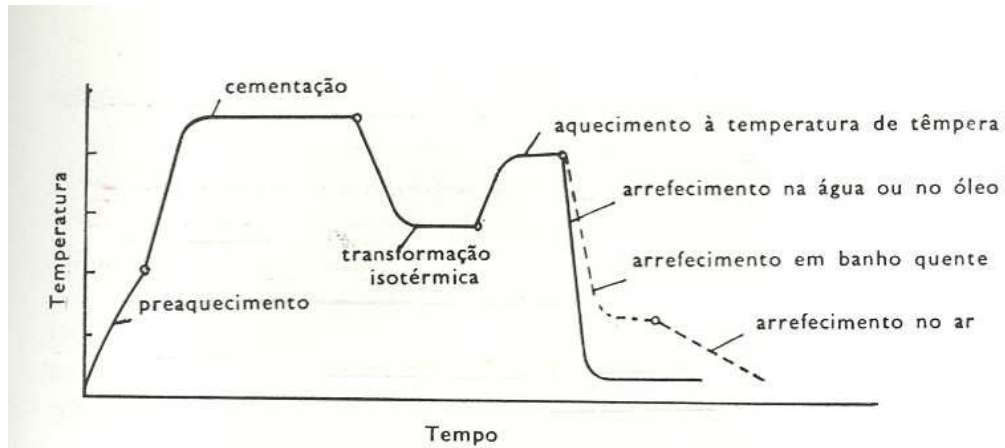


Fig. 73 — Transformação isotérmica e têmpera simples.

Quando se pretende um máximo de tenacidade e dureza

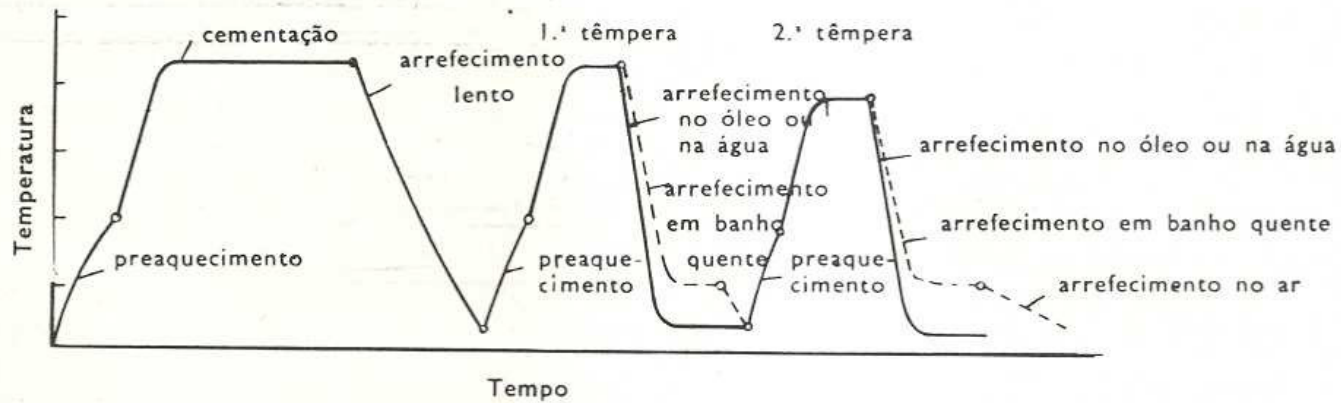


Fig. 74 — Têmpera dupla com regeneração do grão do núcleo.

Cementação



Fig. 75 — Têmpera dupla sendo a 1.^a têmpera directa a partir da temperatura de cementação.

Cementação

Revenido

- Aços de liga: 140-200°C
- Aços sem liga: 150-180°C
- O abaixamento da dureza é de 2HRC, podendo atingir 4HRC em casos extremos
- O revenido deve efectuar-se, sobretudo se as peças forem posteriormente rectificadas.

Cementação

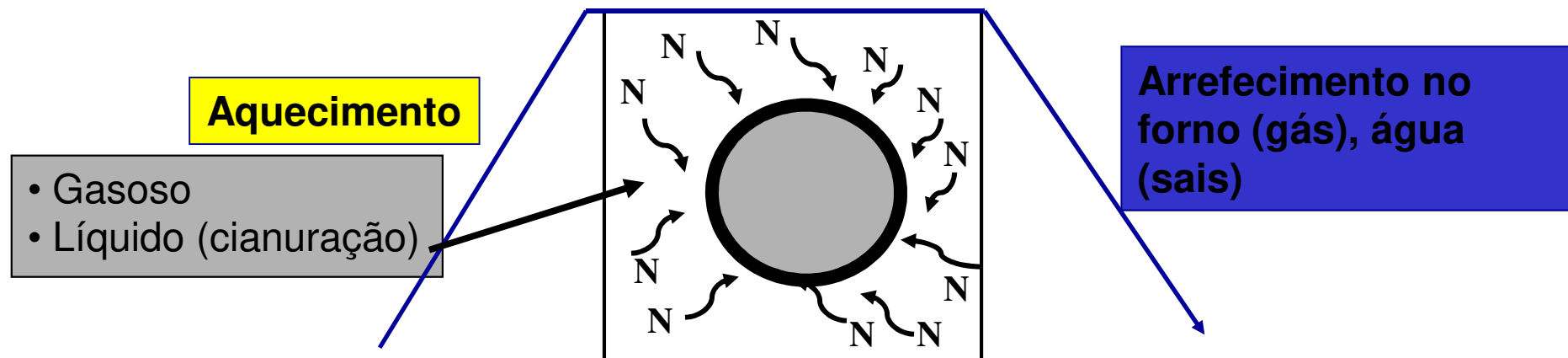
Deformações na cementação

- É a relação entre os volumes da película superficial e do núcleo que determina fundamentalmente as variações dimensionais.
- Os alongamentos verificados são tanto maiores quanto maior for a temperabilidade do núcleo não cementado.
 - Aço sem liga: encurtamento até 0.05%
 - Aço de liga 16MnCr5 alongamento de 0.05 a 0.15%
 - Aço de liga de maior temperabilidade 15CrNi6, 18CrNi8 o alongamento pode ir até 0.3%
- Uma estrutura com fibras provoca uma variação dimensional maior na direcção das fibras do que na direcção transversal

3.8.2. Nitruração

- A nitruração consiste na introdução de azoto, sob a forma de nitretos de ferro, aplicando-se quando se pretende conferir uma dureza máxima ou uma grande resistência ao desgaste.
- A camada nitrurada provoca tensões de compressão que aumentam consideravelmente a resistência à fadiga.

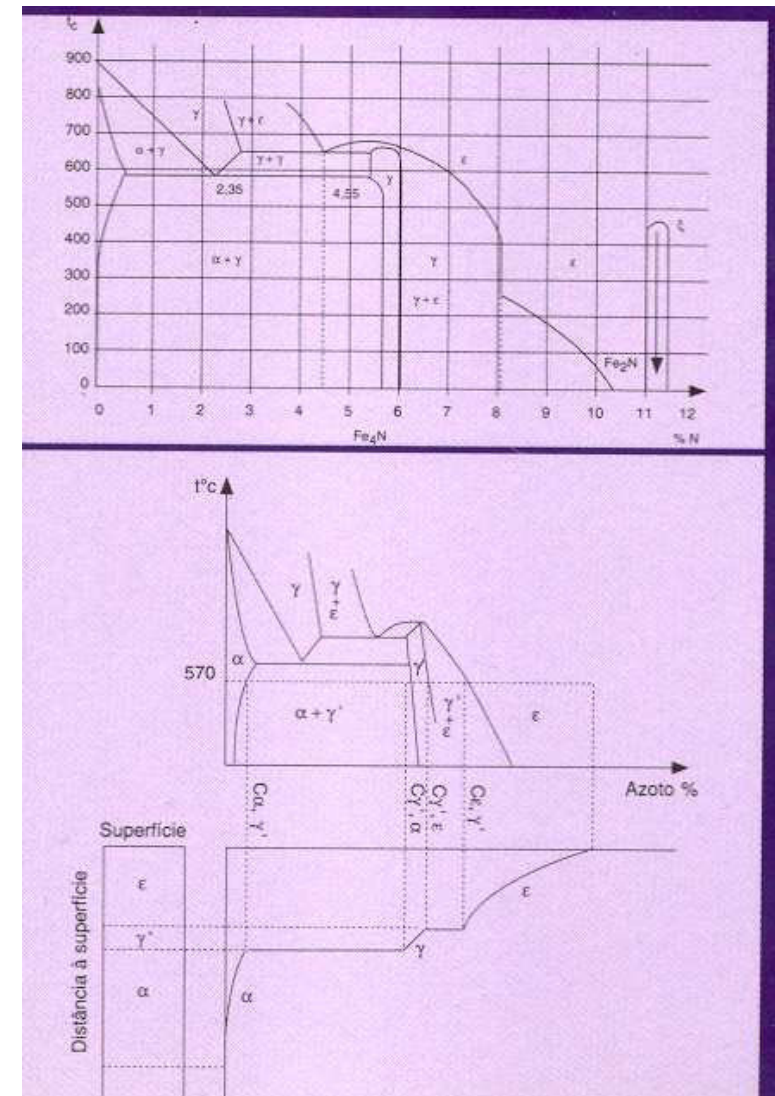
Estágio - Nitruração
500-520°C atmosfera azotada, 550-580°C banhos de sais



Nitruração

Nitruração iónica

- Tratamento de conversão química superficial conduzindo à formação de uma camada dita de “combinação” ou “camada branca” composta de nitretos de ferro. A espessura desta camada é normalmente variável entre 2 e 20 microns.
- Tratamento de difusão do azoto em solução sólida intersticial e de combinação com outros elementos de liga contidos no aço.
- Precipitação de nitretos finamente dispersos conduzindo a um reforço estrutural sobre uma profundidade denominada “camada de difusão”, subjacente à “camada branca”.



Nitruração

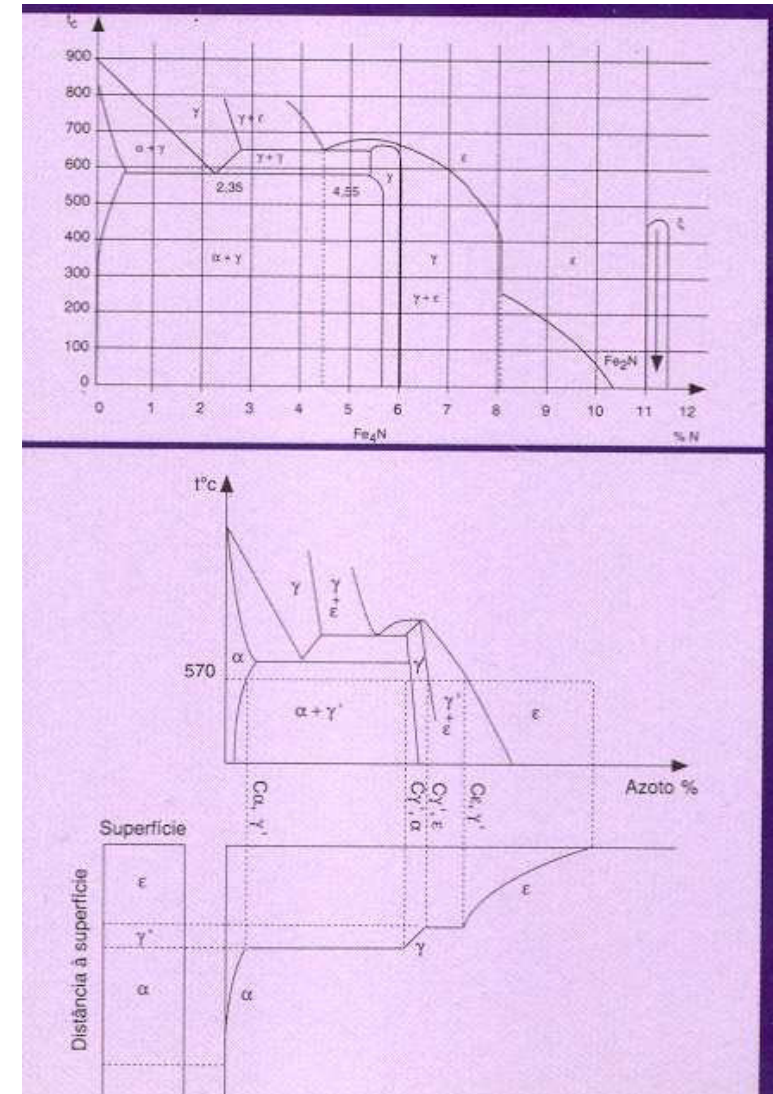
Nitruração iónica

α – muito fraca solubilidade no azoto

γ' - solução sólida secundária Fe 4N que apresenta uma dureza aproximadamente de 800HV

ϵ – Solução sólida secundária de composição (Fe 2-3N) e estrutura hexagonal compacta, com ductilidade superior à do nitreto γ' e propriedades de autolubrificação interessantes.

A “camada branca ou de combinação” joga um papel essencial no comportamento das peças em serviço, melhorando a resistência ao desgaste, à fadiga térmica e evitando certos problemas de gripagem.



Nitruração

Nitruração iónica

- A escolha do tipo de camada, γ' ou ϵ , a sua espessura e a sua qualidade monofásica ou bifásica, compacta ou porosa são elementos importantes na definição do tratamento de nitruração a efectuar.
- Do mesmo modo, pela sua dureza e profundidade, a chamada “zona de difusão”, joga um papel importante já que é o suporte da “camada superficial de combinação” extremamente dura e de muito baixa ductilidade.

Tipo de Aço	Temperatura de Nitruração °C	Tempo de tratamento	Características da camada de combinação			Características da camada de difusão			
			HV 0,1	Espessura verificada μm	Profundidade mm	HV 0,1	HV 5	HV 10	HV 20
ORVAR Supreme MG 50	530/540	16 H	1000/1200	2 à 6	0.15	1000/1150	1000/1100	950/1100	900/1050
		24 H	1000/1200	2 à 8	0.20	1000/1150	1000/1100	1000/1100	
		30 H	1000/1200	2 à 9	0.22/0.25	1000/1150	1000/1110	1000/1110	900/1050
		40 H	1000/1200	2 à 10	0.27/0.30	1000/1150	1000/1150	1000/1110	
ARK J 31	520/530	03 H	Camada de combinação inexistente		0.05	1200/1300	1100/1200	1000/1100	900/1050
		12 H			0.10/0.12	1200/1300			
		24 H			0.14/0.16	1150/1250	1150/1200	1100/1200	1000/1100
		40 H			0.22/0.25	1150/1250	1150/1200	1100/1200	1050/1150

Características possíveis de camadas obtidas por nitruração iónica (a 520-540 °C) para o caso de um aço de trabalho a quente ORVAR Supreme e para o caso de um aço rápido.

Nitruração

- Somente em aços que contêm quantidades suficientes de elementos capazes de formar nitretos especiais (Al, Cr, Mo, W, V) obterão durezas superficiais máximas.
- Nos outros aços dá-se uma nitruração macia.
- Aços de construção:
 - Melhora a resistência ao desgaste, diminui o perigo de “gripagem”
- Aços para trabalho a quente
 - Evita a adesão de certos materiais, especialmente o alumínio, às ferramentas e retarda a erosão.
 - Aumenta a duração do corte
- A zona exterior da camada é muito frágil e fina:
 - Evitar choques
 - Evitar esforços locais de compressão

Nitruração

- Só se aplica em peças que já tenham sido tratadas à dureza de utilização, sendo a limpeza superficial fundamental para se dar a penetração do N.
- As temperaturas de revenido necessárias à obtenção das resistências habituais devem estar situadas acima da T Nitruração.

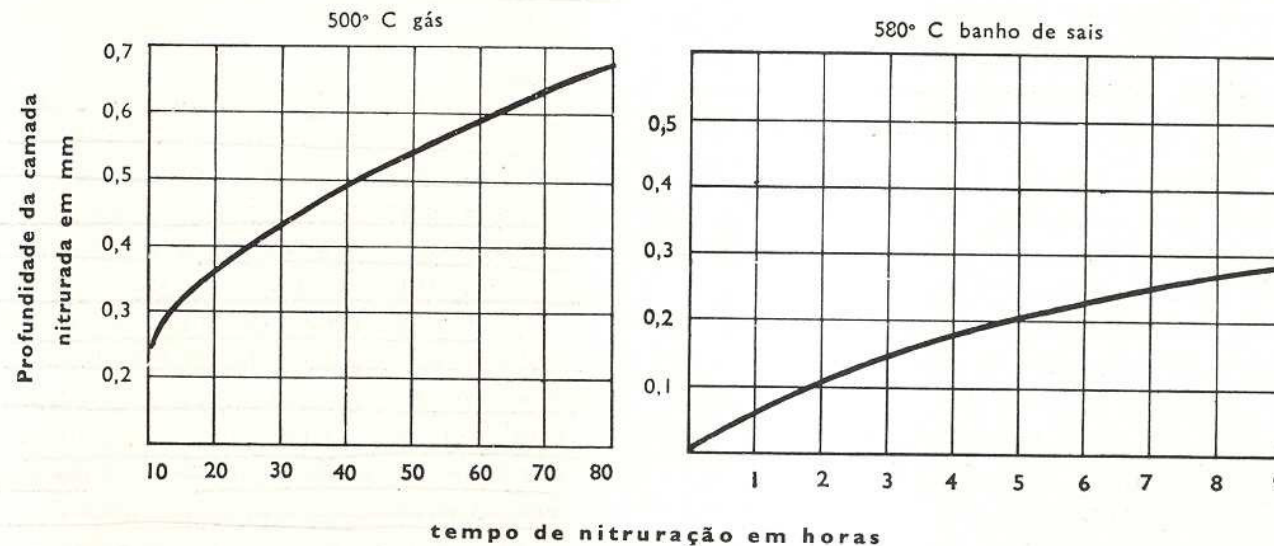


Fig. 77 — Influência do tempo de nitruração na profundidade da camada nitrurada.

O cianeto (25-30%) decompõe-se libertando N e C

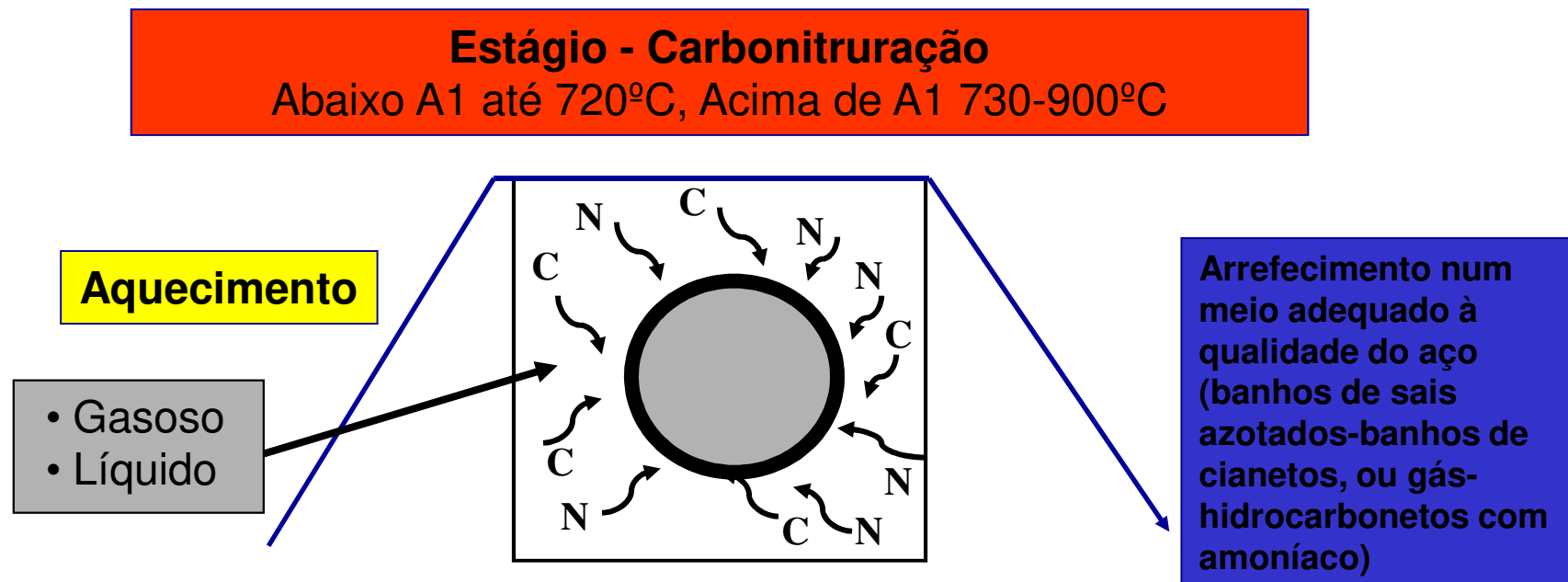
Nitruração

A zona nitrurada é composta por duas camadas:

- **ZONA DE LIGAÇÃO**, superficial com 0.015-0.02mm, constituída por nitretos e carbonetos.
- **ZONA DE DIFUSÃO**, com 0.1-0.3mm, formada pela absorção do azoto.

3.8.3. Carbonitruração

- Obtenção de camadas superficiais muito duras com cerca de 0.1mm, e pode ser efectuada em qualquer aço (convém sobretudo aos aços de pequena liga).
- Devido à absorção do N (forma nitretos), a transformação $\alpha-\gamma$, desce (austenite forma-se 600-750°C) e simultaneamente favorece-se a absorção do C (que se dissolve no ferro γ e vai originar Mart. contendo N).



Carbonitruração

Tipos de carbonitruração segundo o critério α - γ da zona profunda da peça:

- 1. Sem transformação do núcleo ou carbonitruração abaixo de A1**
 - Até 720°C, origina na camada carbonitrurada uma estrutura constituída por uma orla superficial de nitretos livres e por martensite contendo N.
- 2. Com transformação do núcleo ou carbonitruração acima de A1**
 - Entre 730-900°C, origina na camada nitrurada uma estrutura constituída por Mart. contendo N e eventualmente por uma fina orla superficial de nitretos livres, a maior parte das vezes apenas para o domínio inferior da Temp.

Intensificação da absorção de N na gama inferior de temperaturas e uma diminuição da carbonização. Na região superior passa-se o inverso.

As baixas temperaturas são extremamente favoráveis à diminuição de deformações e não são necessários tratamentos posteriores.

3.8.4. Endurecimento por Chama e Indução

- Aquecimento local da superfície das peças, previamente temperadas e revenidas, e arrefecimento rápido (utilizado em ferramentas e elementos de construção).
- Estes tratamentos conduzem essencialmente aos mesmos resultados técnicos que a cementação, no entanto, têm a vantagem de originar deformações ainda menores nas zonas temperadas.

Têmpera superficial:

- Chama directa (pode provocar uma têmpera até ao núcleo)
- Indução (permite a obtenção duma penetração de têmpera que acompanha com fidelidade os contornos, condição fundamental, por exemplo, para os flancos dos dentes das rodas dentadas).
- Imersão

Endurecimento por Chama e Indução

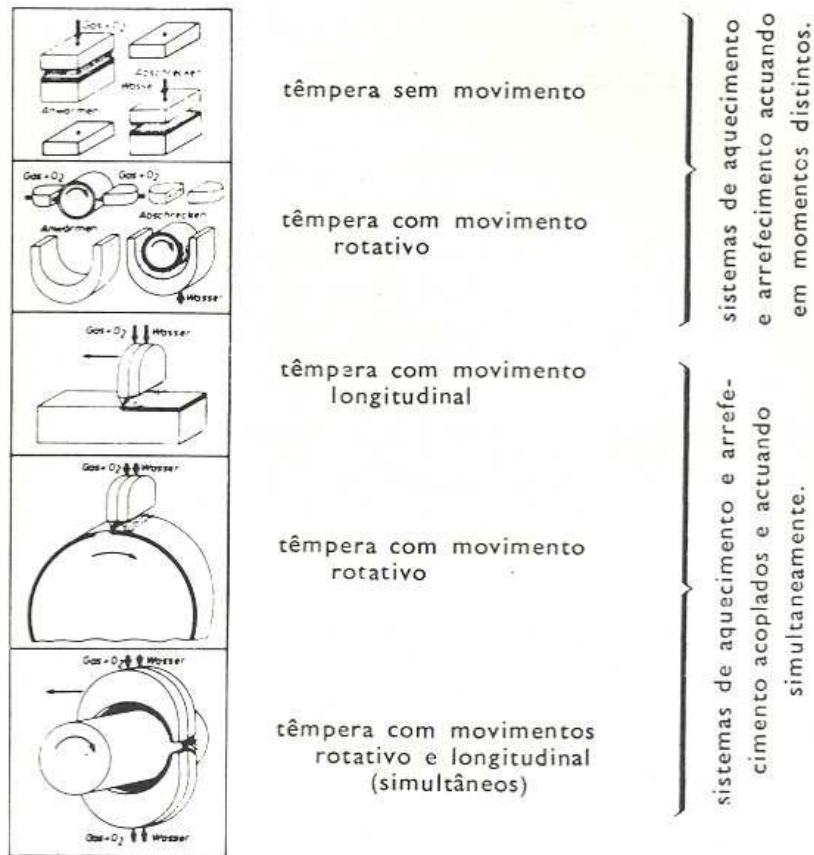
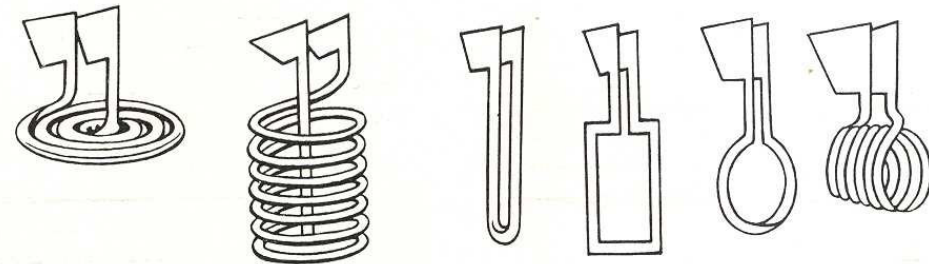
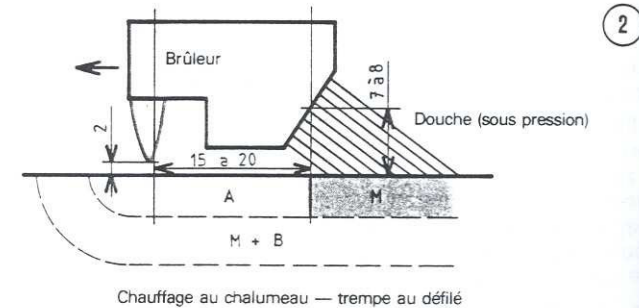
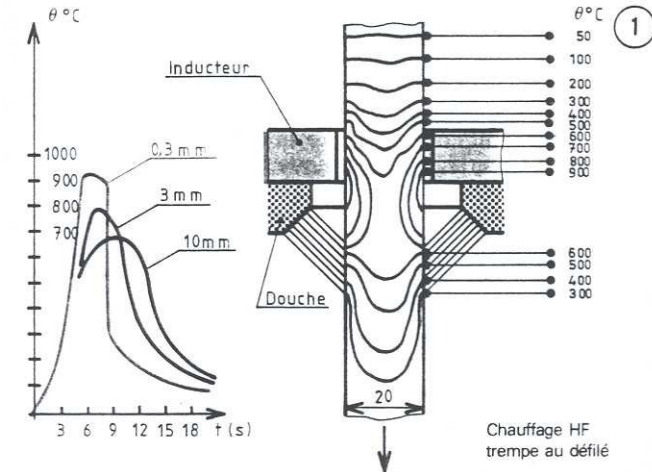


Fig. 37 — Esquema de vários tipos de dispositivos para têmpera por chama

Anwarmen = aquecimento
Abschrecken = arrefecimento
Wasser = água



3.9. TENSÕES RESIDUAIS

3.9. Tensões residuais

As tensões térmicas e de transformação são geradas no TT e deverão ser minimizadas no sentido de:

1. Evitar os riscos de fractura
2. Reduzir as variações dimensionais e as distorções de forma

Deve actuar-se nas seguintes fases

Nível de Projecto:

1. Evitar as quinas vivas.
2. Evitar as diferenças acentuadas de massa, por recurso à “fragmentação” apropriada das ferramentas.

3.9. Tensões residuais

Nível de Produção:

- Fazer uma limpeza superficial nos produtos laminados a quente ou forjados (uma placa, com forte relação área-massa, em que uma das faces se apresente com descarbonização superficial, empenará sobre essa face, dadas as diferenças de volume específico entre as estruturas geradas).
- Condicionar as condições de corte na operação de maquinagem por arranque de apara, por forma a que a elevação de temperatura resultante não diminua a dureza do fio de corte. Tal facto, teria como consequência o aumento da pressão e deformação plástica do aço a cortar, nas zonas mais próximas do contacto com a ferramenta.

Nível do Tratamento Térmico:

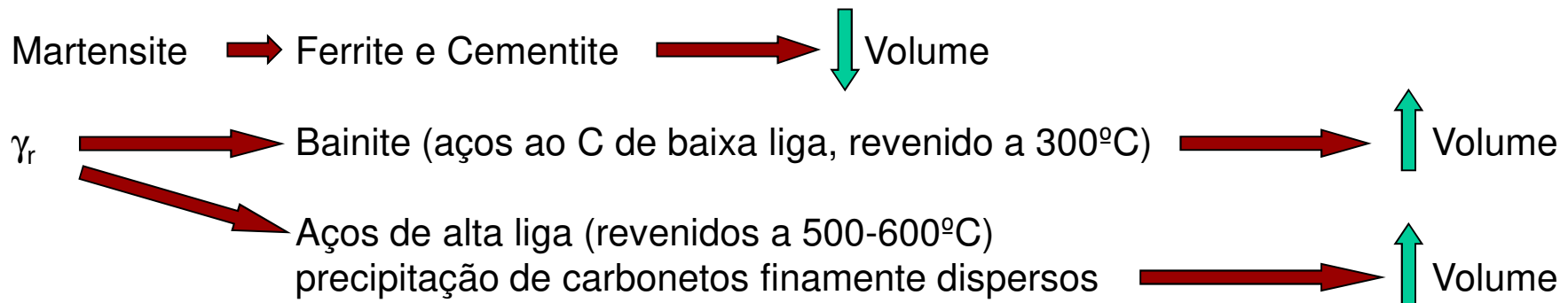
- Promover ciclos suaves de pré-aquecimento, de forma a evitar choques térmicos.
- Adequar o tempo e temp. de austenitização à configuração geométrica e características a obter na ferramenta. Tempos longos ou temperaturas elevadas conduzirão a um crescimento exagerado de grão, tornando o aço extraordinariamente frágil e promovendo maiores taxas de austenite residual.

3.9. Tensões residuais

Nível do Tratamento Térmico:

- Promover um arrefecimento tão suave quanto possível, optando pela têmpera por etapas, de forma a reduzir as distorções de forma.

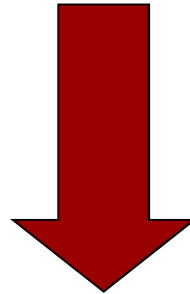
Revenido



Um revenido adequado deverá ser seleccionado de acordo com:

- Obtenção do melhor compromisso entre dureza e tenacidade
- A maior garantia da estabilidade dimensional da ferramenta em serviço

3.9. Tensões residuais



1. Transformação de γ_r
2. Realizar 2-3 revenidos para eliminar a martensite não revenida

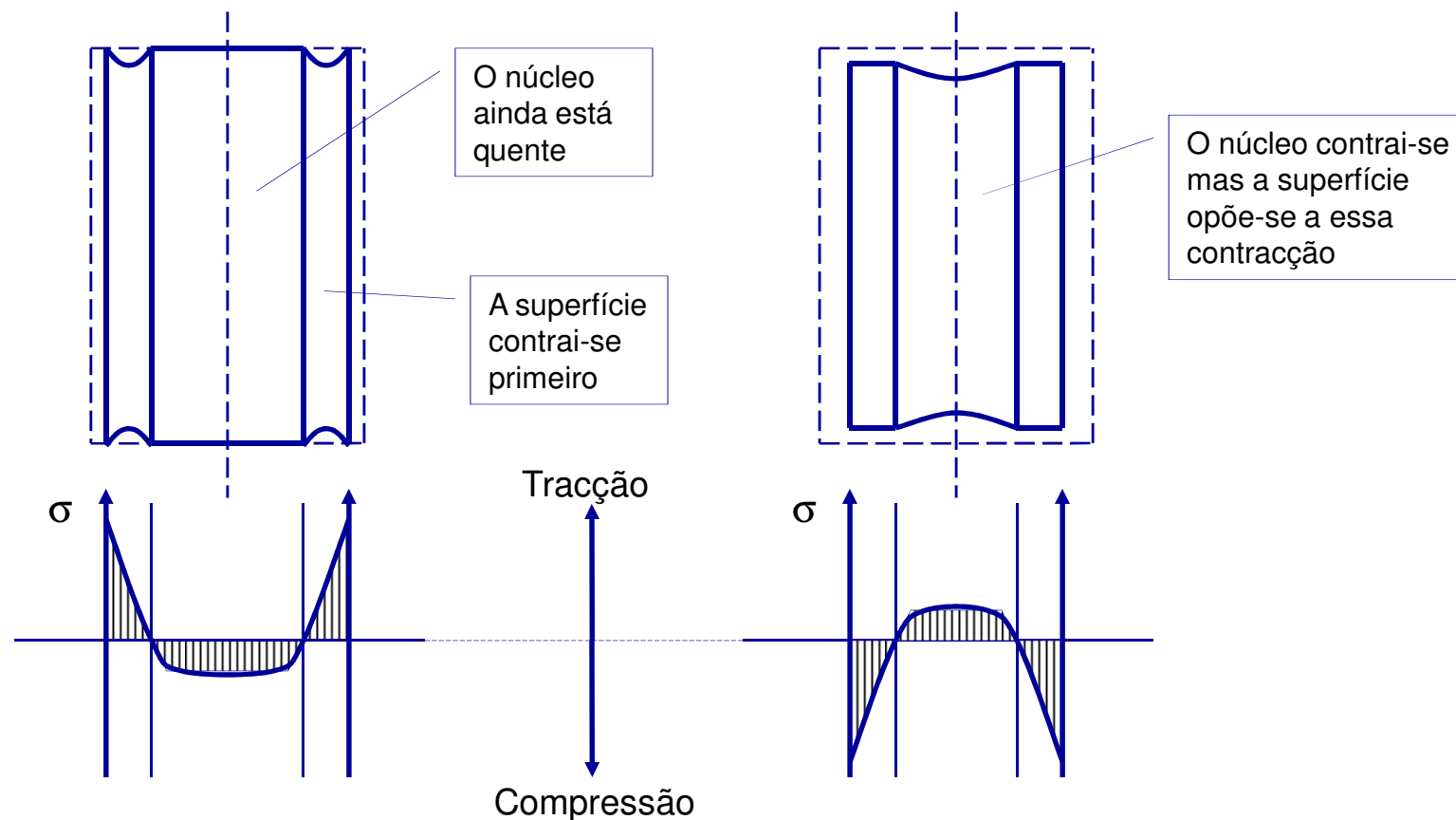
A temperatura do último revenido deverá ser sempre inferior em pelo menos 30-40°C à do revenido anterior

3.9. Tensões residuais

Arrefecimento

Tensões residuais devidas aos gradientes térmicos

Tensões criadas pela contracção

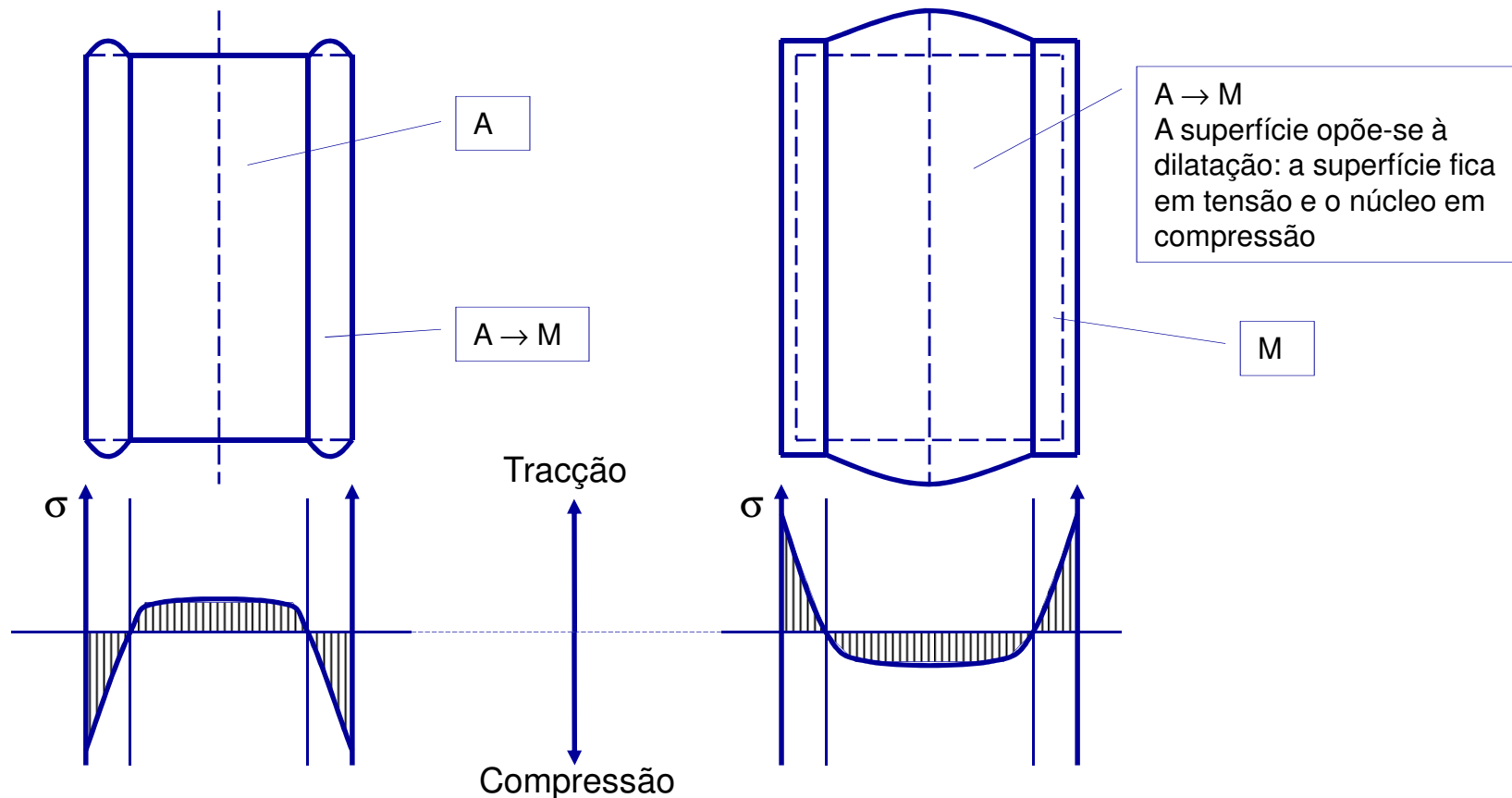


3.9. Tensões residuais

Arrefecimento

Tensões residuais devidas aos gradientes térmicos

Tensões criadas pela transformação $A \rightarrow M$, que se dá com uma dilatação



3.9. Tensões residuais

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.

