

Materiais para a Indústria Química

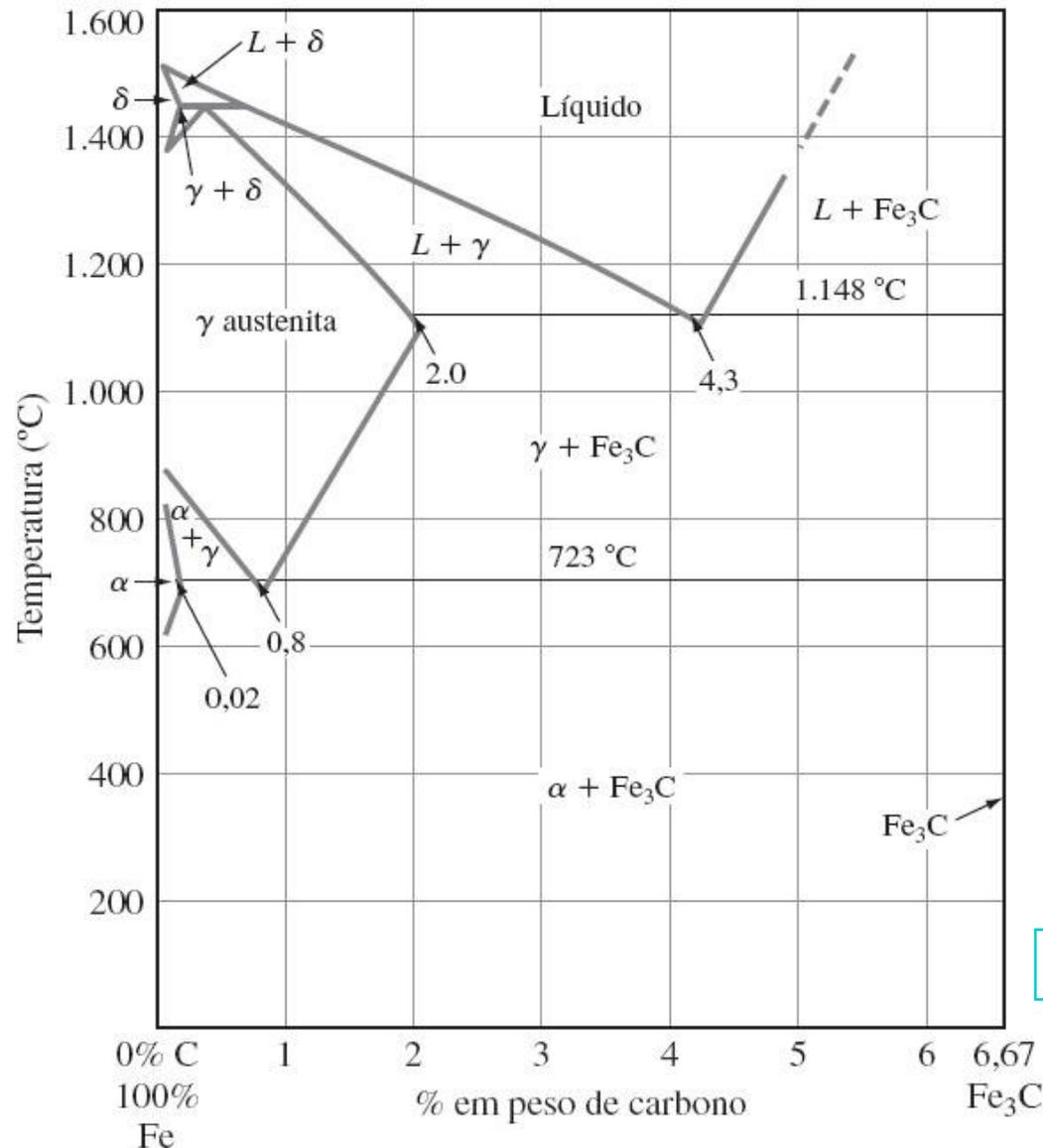
LOM3022

Prof. Carlos A.R.P. Baptista

2. Aços e Ferros Fundidos



Definição e Importância



Ligas ferrosas compõem cerca de 90% da produção mundial de ligas metálicas.

Definições

Aço: liga ferro-carbono com teor de C entre 0,03 e 2,06%.

Ferro fundido: liga ferrosa com teor de C superior a 2,06% até 6,67% (limite usual 4,5%). Liga ternária com 1 a 3% Si.

O teor de carbono da cimentoita (Fe₃C) é 6,67%. Ligas com teor de C acima desse valor não têm interesse comercial.

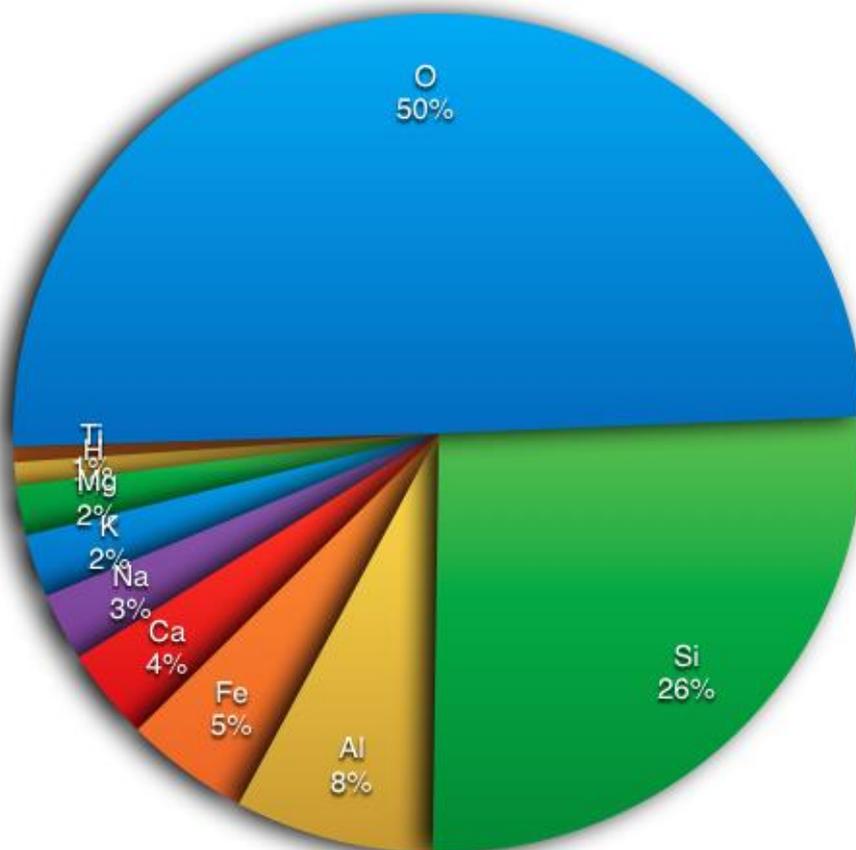
Diagrama Fe-Fe₃C



Definição e Importância

● O ● Si ● Al ● Fe ● Ca ● Na ● K ● Mg ● H ● Ti

Os dez elementos mais abundantes na crosta terrestre



A crosta terrestre tem aproximadamente 20 km de espessura e contém cerca de 50% em massa de O e 25% de Si (na forma de sílica e silicatos). Dos 25% restantes, cerca de 16% são constituídos de elementos metálicos, sendo Al e Fe os mais abundantes.

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre (5,01%).

Produção Mundial (em ton./ano):

Aço bruto	≈ 1.650.000.000
Ferro Fundido	≈ 100.000.000
Alumínio	≈ 69.740.000
Plásticos	≈ 200.000.000
Nióbio (85% CBMM)	≈ 100.000



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

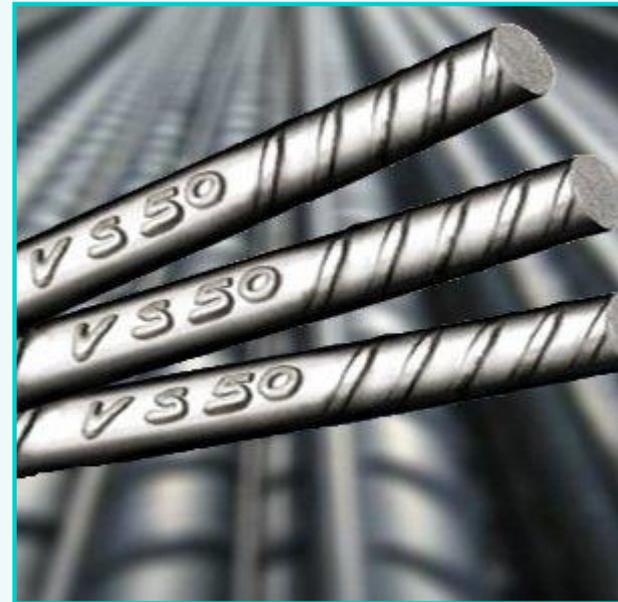
Definição e Importância



Por que o aço é tão importante?

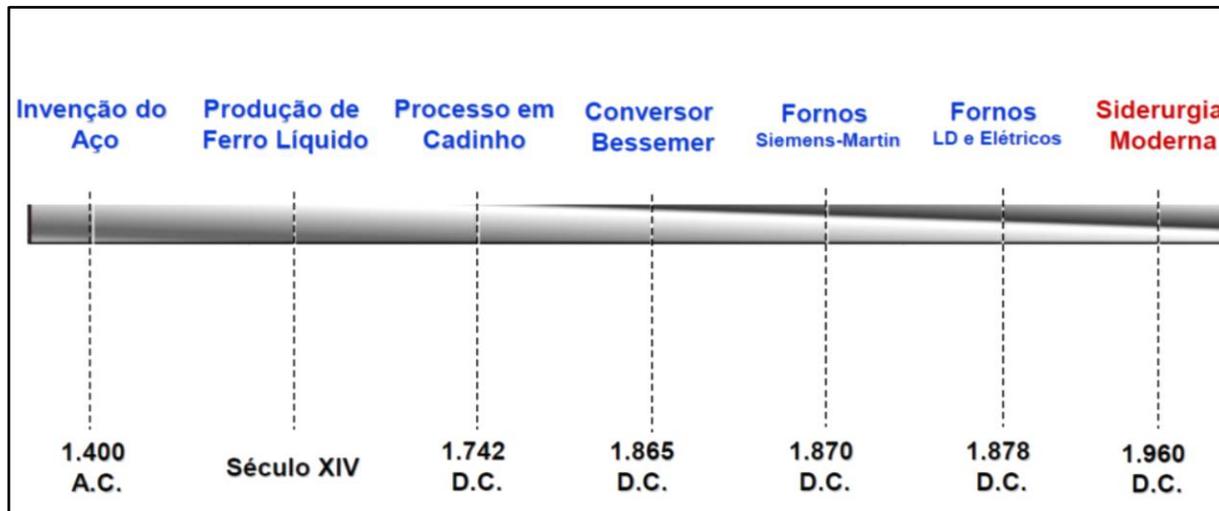
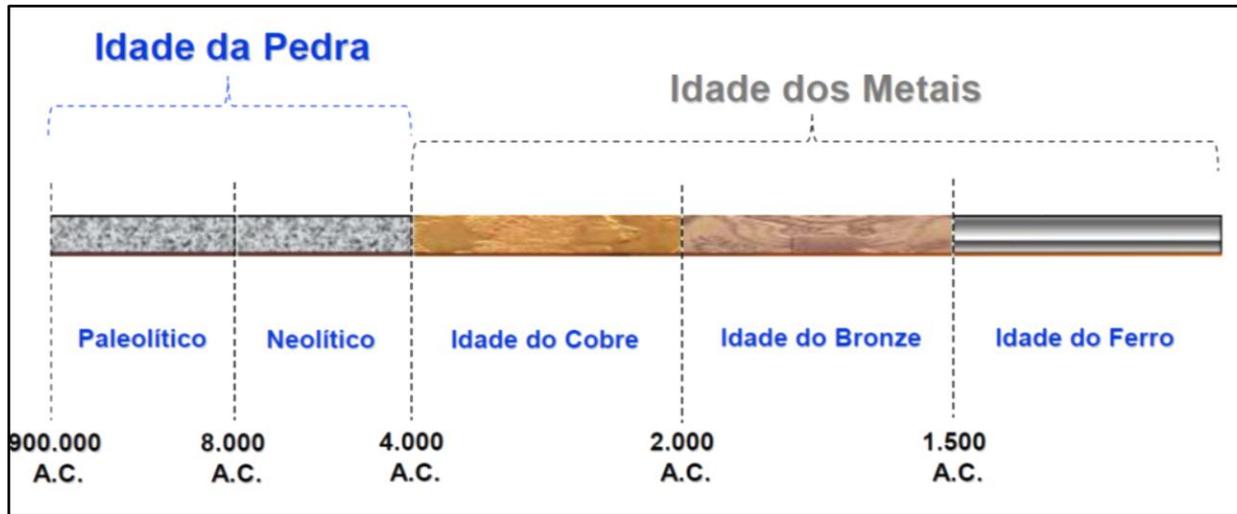
Combina minério abundante, baixo preço, facilidade de produção, resistência mecânica, tenacidade e ductilidade.

Adição de outros elementos de liga e controle da microestrutura por tratamentos térmicos aumenta a versatilidade dos aços



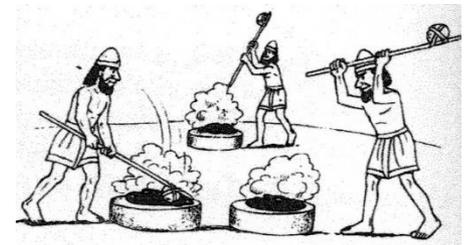
Definição e Importância

Histórico



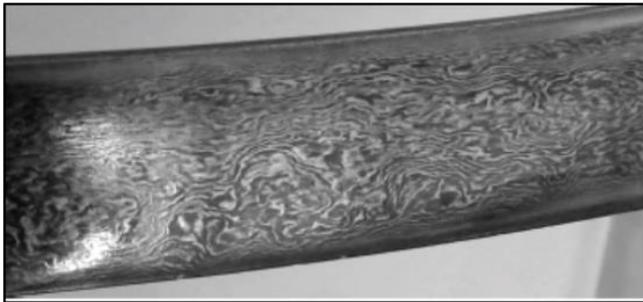
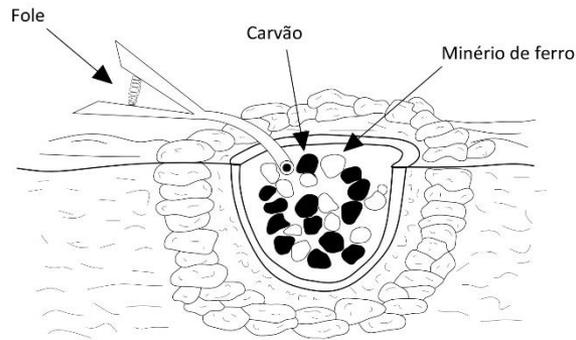
Surgimento do aço: Hititas (sul da Turquia), aprox. 1.400 a.C. – Processo para produção de espadas por meio de redução direta do ferro.

(Note que um dos maiores avanços tecnológicos da humanidade foi obtido visando produzir artefatos que tinham a função de matar outros seres humanos).



Definição e Importância

Histórico

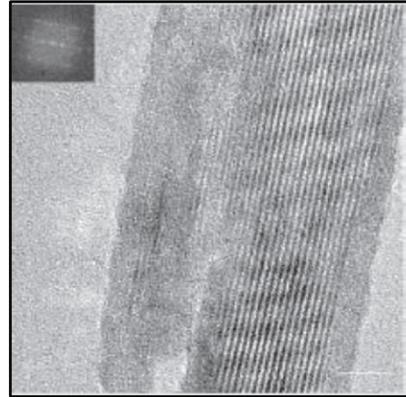
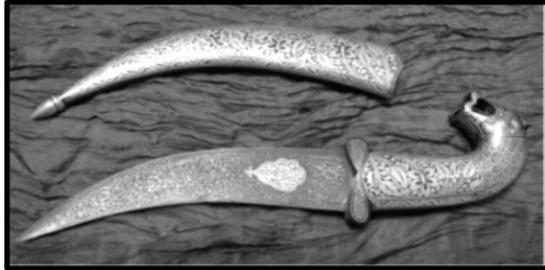


O aço de Damasco

No primeiro milênio d.C., espadas fabricadas com o aço wootz (versão anglicizada de “ukku”, termo que designava o aço na região da Índia onde ele era produzido) tinham a fama de ser quase inquebráveis. Era a época das cruzadas, e as espadas dos muçulmanos não brilhavam como as dos cristãos, apresentando linhas onduladas escuras. Os ferreiros da Europa tentaram imitar o aspecto das lâminas de Damasco ao cobrir a superfície de suas espadas com filigranas de prata ou cobre, mas obviamente jamais conseguiram reproduzir suas propriedades. Os experimentos realizados pelos ferreiros medievais na tentativa de replicar a criação do aço de Damasco podem ser considerados a origem da Ciência dos Materiais.

Definição e Importância

Histórico



Na idade média surgiram lendas de espadas mágicas e indestrutíveis.

Segundo antigos relatos, o aço wootz era produzido com um minério específico de determinadas minas da Índia, cuja composição apresentava traços de V, Mn, Cr, Co e Ni. Posteriormente, era reduzido juntamente com madeira da planta *Cassia auriculata* e folhas da *Calotropis gigantean*. Em seguida, o aço era enviado para Damasco para ser forjado e, após ciclos de tratamento térmico, apresentava uma textura peculiar. Atualmente, sabe-se que a maior parte desta textura se deve ao alinhamento de partículas de carboneto de ferro (Fe_3C) e grãos perlíticos, o que teoricamente fragilizaria o metal. A razão para a alta tenacidade e a não fragilização desse aço, mesmo com a microestrutura desfavorável, foi revelada por meio de uma investigação conduzida por M. Reibold e colaboradores, que mostrou que essa textura é formada por nanofios de Fe_3C envolvidos por nanotubos de C.



Processos Siderúrgicos

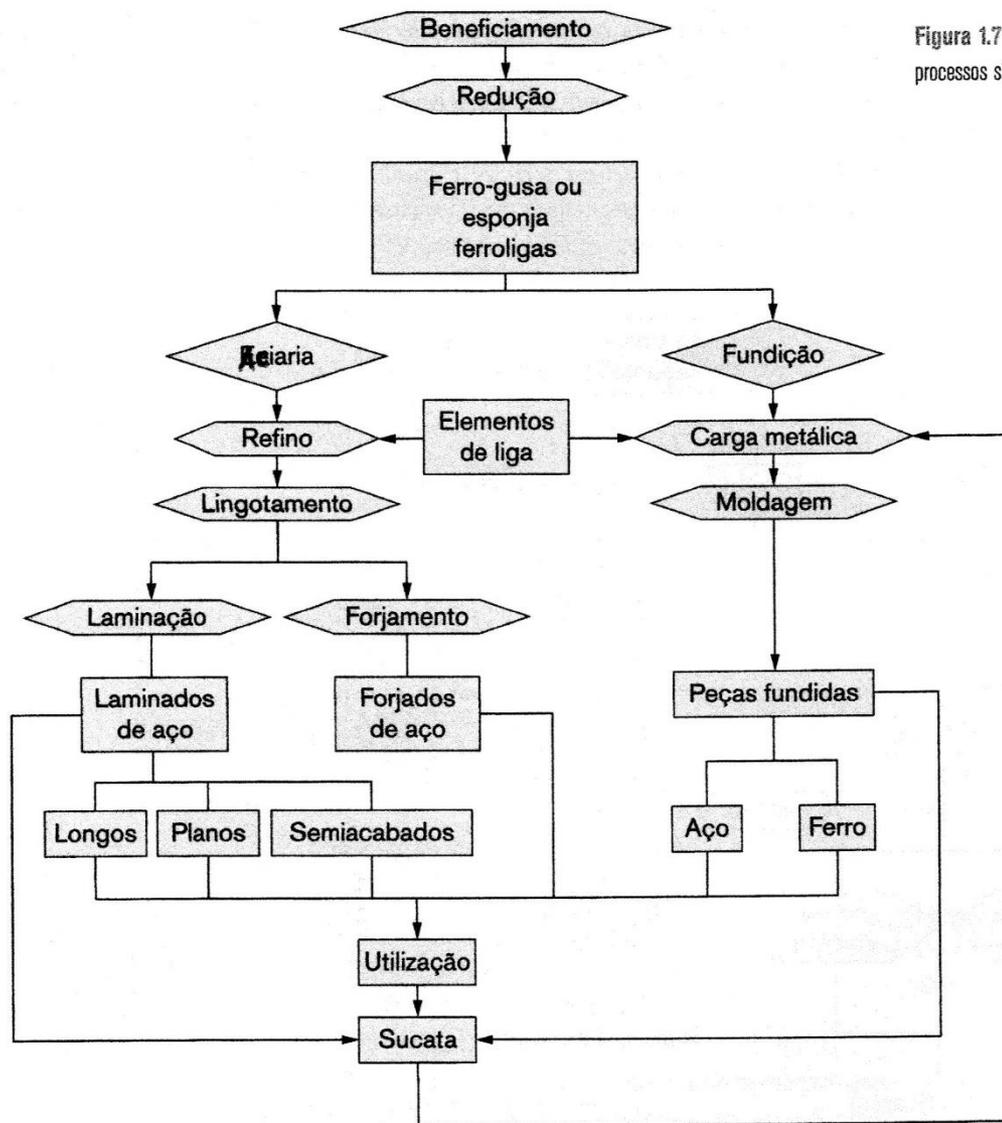


Figura 1.7 - Síntese dos processos siderúrgicos.

Siderurgia: é o conjunto de processos metalúrgicos usados na cadeia de produção de aços e ferros fundidos.

Origem do termo:
Latim “sidereus” (relativo aos astros) – os primeiros contatos da humanidade com o ferro foram através dos meteoritos. Artefatos de ferro mais antigos já encontrados (Egito, aprox. 3000 a.C.) foram forjados a partir de rocha extraterrestre contendo Ni (siderito).



Processos Siderúrgicos

Minério de ferro

Mineração a céu aberto

TIPO	DESIGNAÇÃO MINERALÓGICA	DESIGNAÇÃO QUÍMICA	FÓRMULA	TEOR METÁLICO	OBSERVAÇÕES
Carbonato	Siderita	Carbonato férrico	FeCO_3	25 a 45%	Existe pouco no Brasil
Óxidos	Magnetita	Óxido ferroso férrico	Fe_3O_4	45 a 70%	Tem propriedades magnéticas
	Limonita	Óxido férrico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	40 a 60%	Utilizada no alto-forno após pelotização ou sinterização
	Hematita	Óxido férrico	Fe_2O_3	45 a 70%	Abundante no Brasil



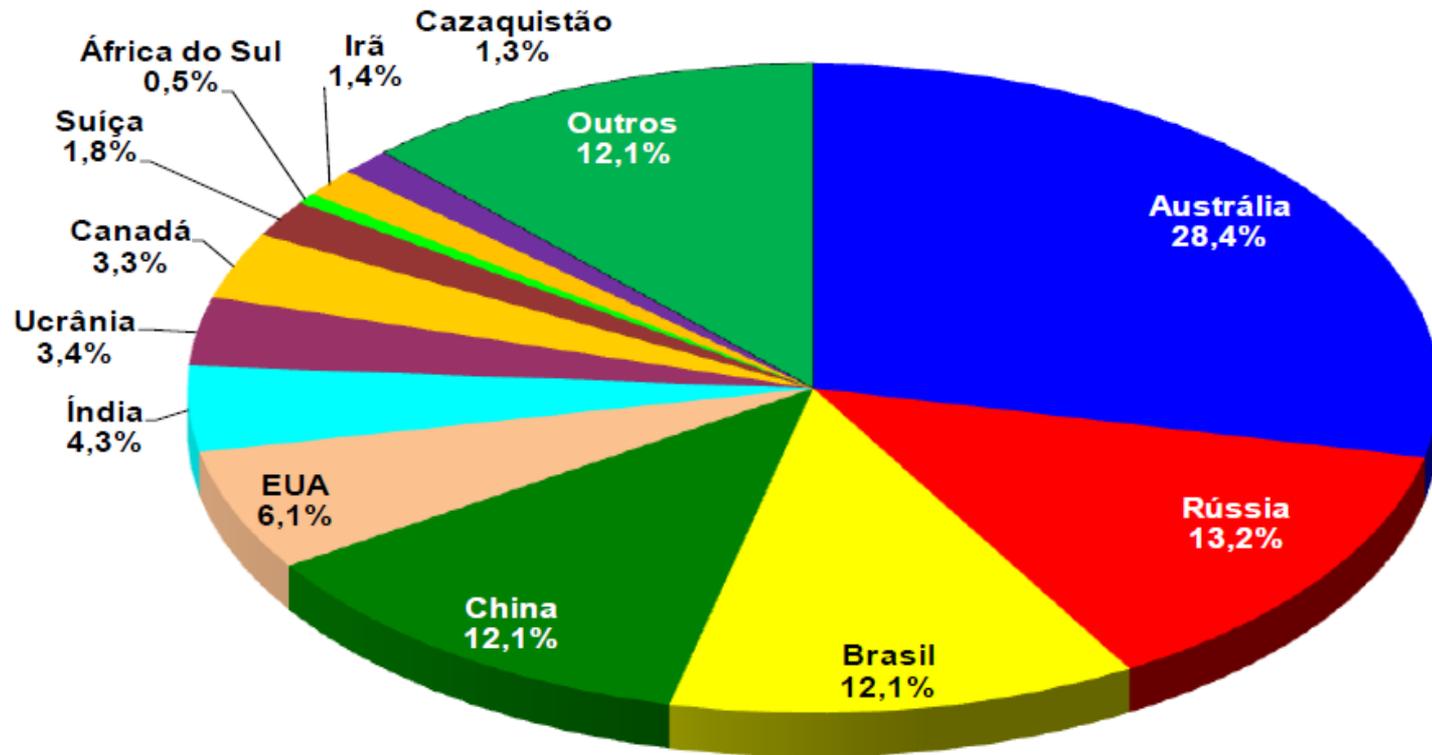
Hematita



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Processos Siderúrgicos

Reservas mundiais de minério de ferro (2015)

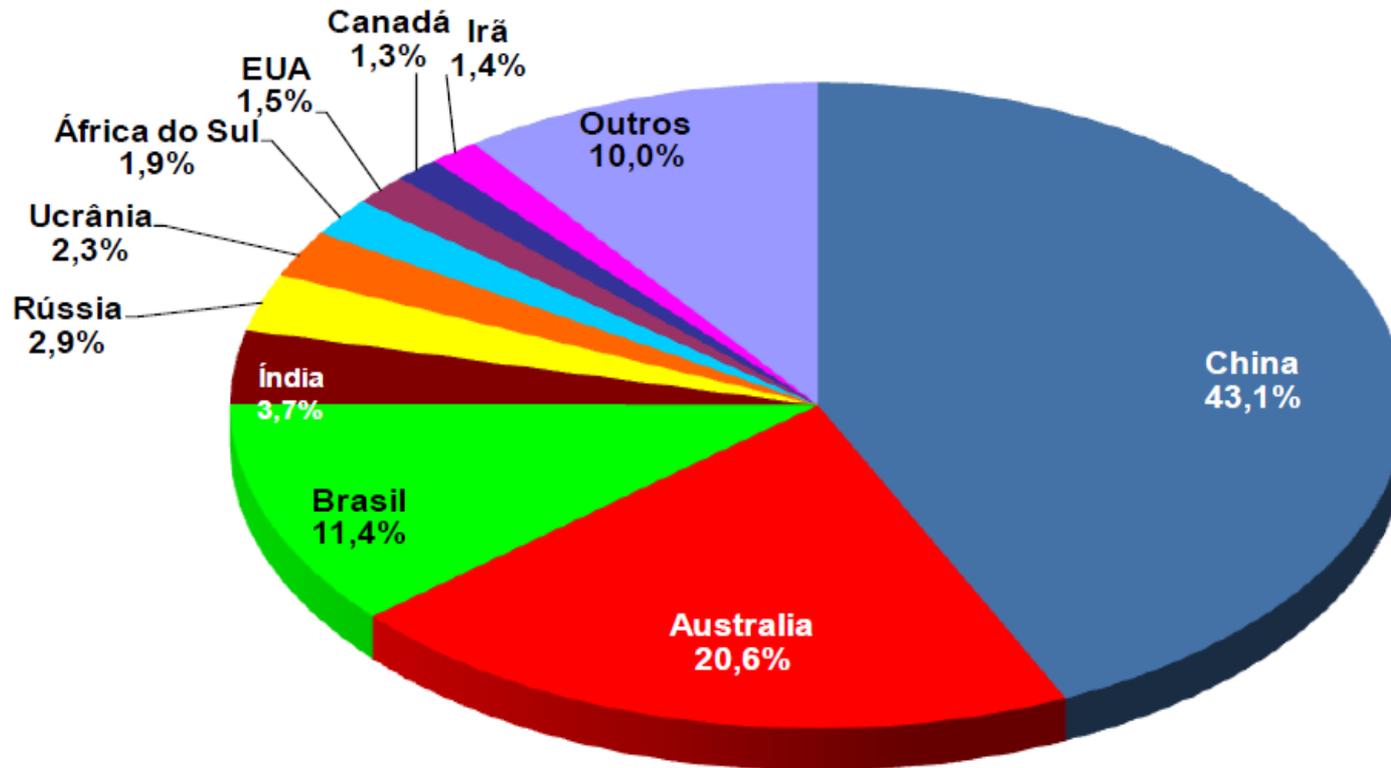


Brasil – Reservas de minério de ferro = 23 bilhões de toneladas (2013)



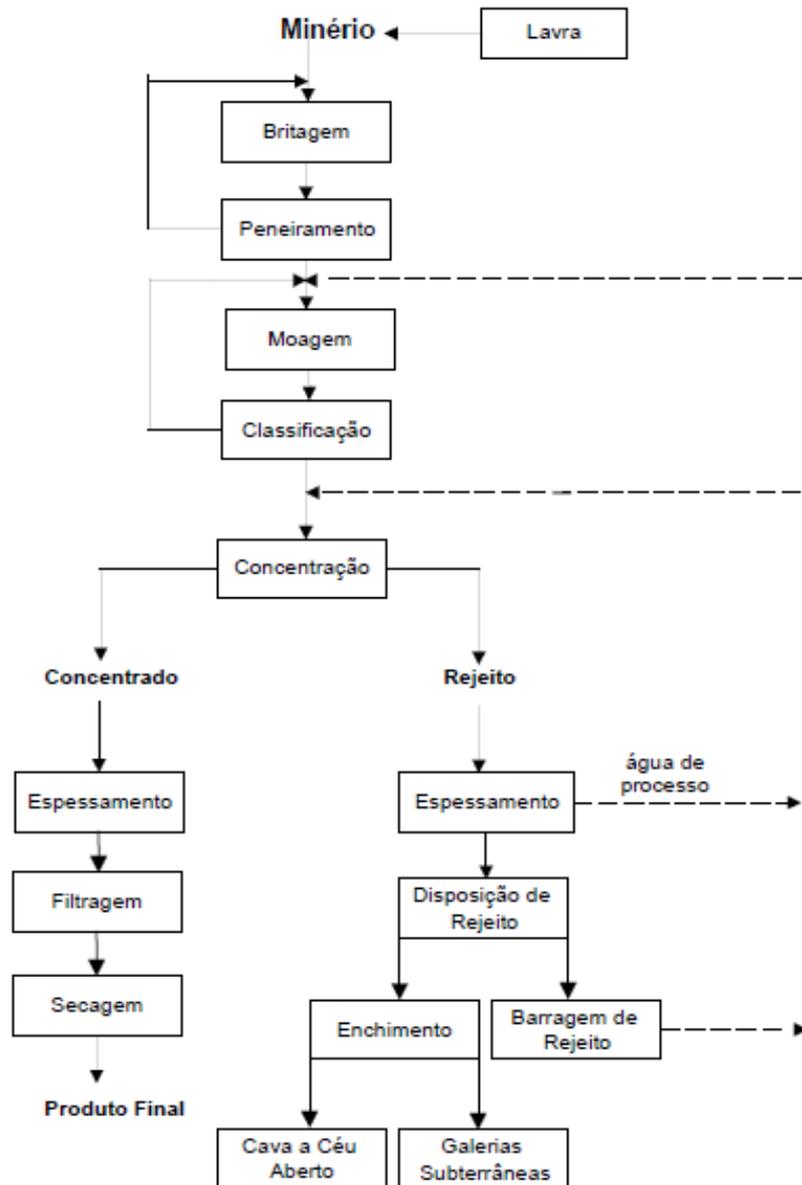
Processos Siderúrgicos

Produção de minério de ferro – *Players* mundiais (2015)



Brasil – 428 milhões de toneladas (2015) – Terceiro maior produtor mundial

Processos Siderúrgicos

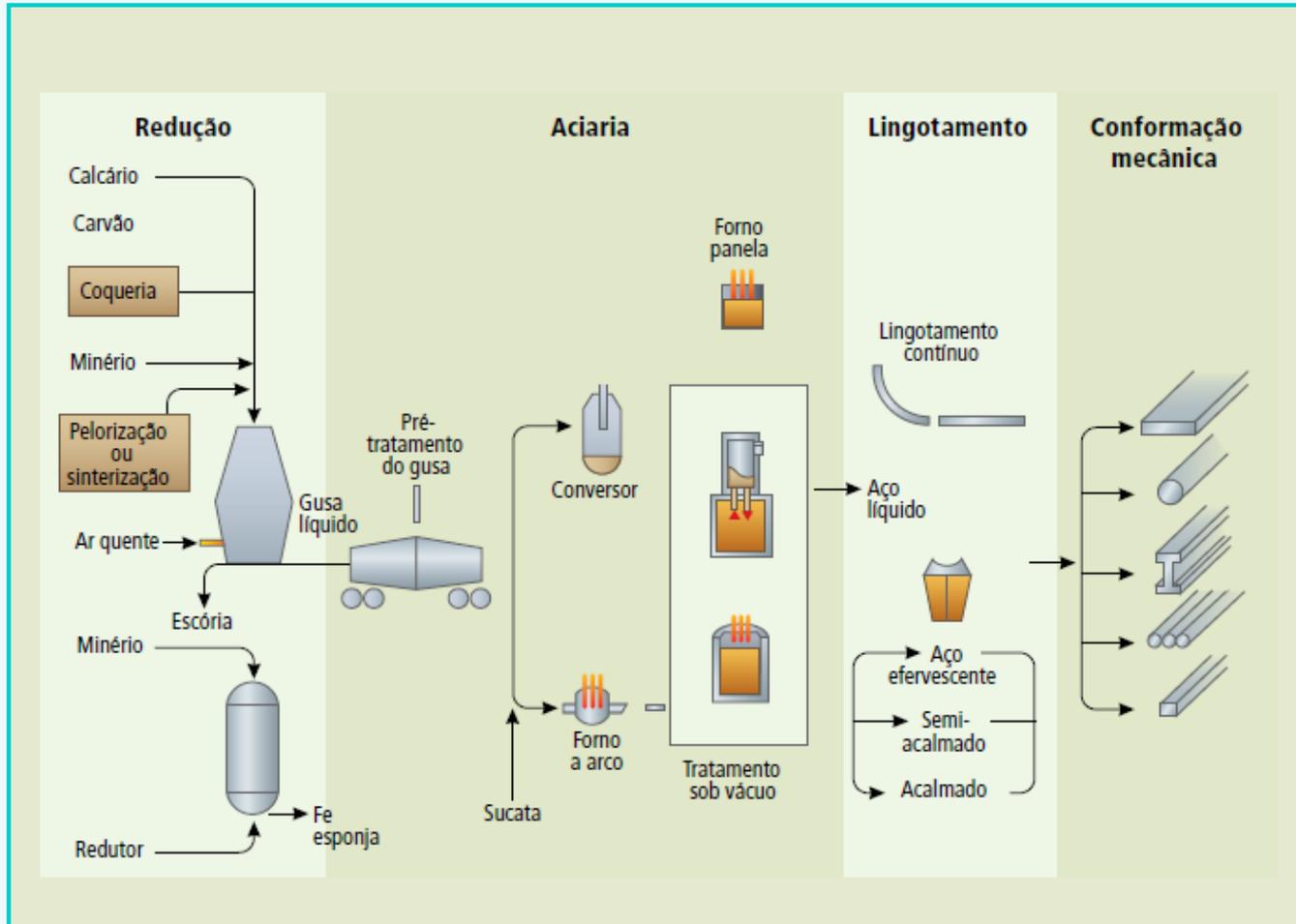


Beneficiamento de minério a seco em Carajás (PA) – processo mais caro.



Processos Siderúrgicos

Fluxograma de produção do aço com as várias alternativas do processo

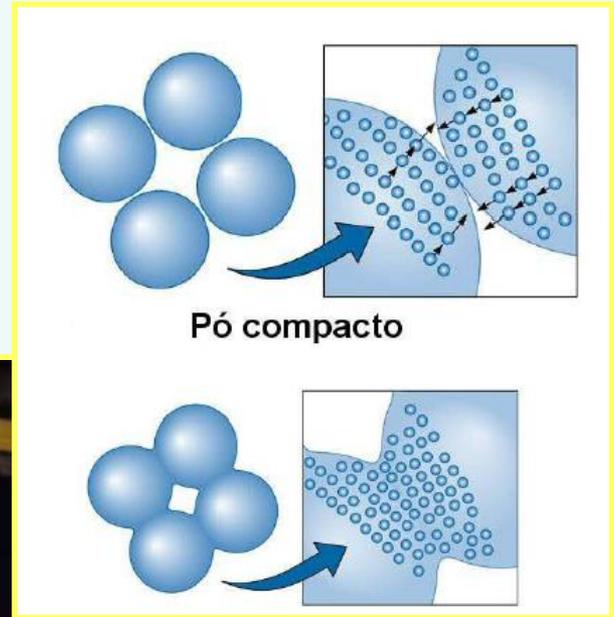
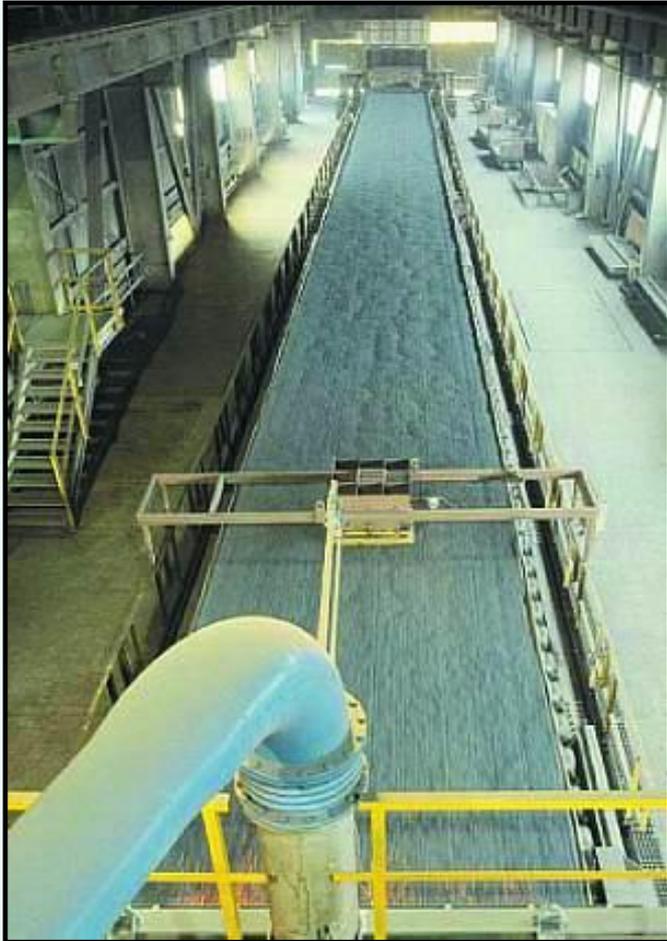


O ferro gusa responde por cerca de 73% da produção mundial de aço.



Processos Siderúrgicos

Sinterização: blocos feitos usando partículas de minério, carvão moído, calcário e água. A mistura é colocada em uma grelha com temperatura acima de 1000°C. O bloco formado é quebrado em pedaços menores, chamados sínter.



Processos Siderúrgicos

Pelotização: processo surgido em meados do século XX na Suécia e Alemanha. Aproveita frações ultrafinas de minério, que antes eram desprezadas. A técnica de processamento térmico usa o minério bem fino, umedecido para formar um aglomerado que é colocado em um tambor de mistura onde os aglomerados são unidos na forma de pelotas que depois são submetidas à secagem e queima.



Usina de Pelotização da Vale em Tubarão (ES).

Processos Siderúrgicos

Processos de aglomeração: Pelotização e Sinterização
(melhora a permeabilidade da carga do alto forno)



5mm<Pelotas<18mm



5mm<Sinter<50mm



6mm< Minério <40mm
granulado



Pelotas, sinter e minério granulado são inseridos no alto-forno



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Processos Siderúrgicos

Coqueria



Coqueria é a unidade industrial que transforma a mistura de carvões minerais em coque. O coque metalúrgico é empregado nos altos fornos como combustível, redutor, fornecedor de carbono ao gusa e permeabilizador da carga. O processo de coqueificação (destilação do carvão mineral) foi descoberto na Inglaterra no século XVIII.

Curiosidade: A CSN (em Volta Redonda), criada em 1941, foi a primeira siderúrgica brasileira a usar coque no alto-forno.



Típica Bateria de coqueificação

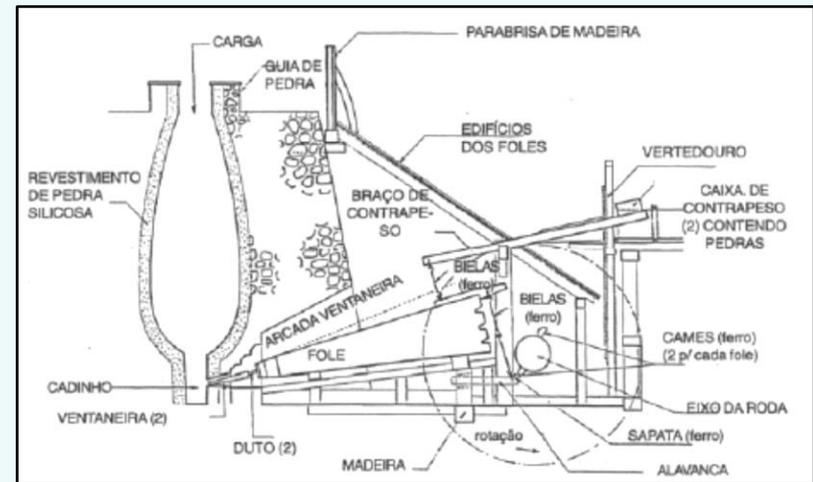


Coque incandescente pronto para ser descarregado



Processos Siderúrgicos

Alto-Forno: equipamento mais importante



Considera-se que o alto-forno surgiu na fase mais tardia da idade média, na forma dos Stückofen alemães



Modelo de Stückofen (Technisches Museum Wien)

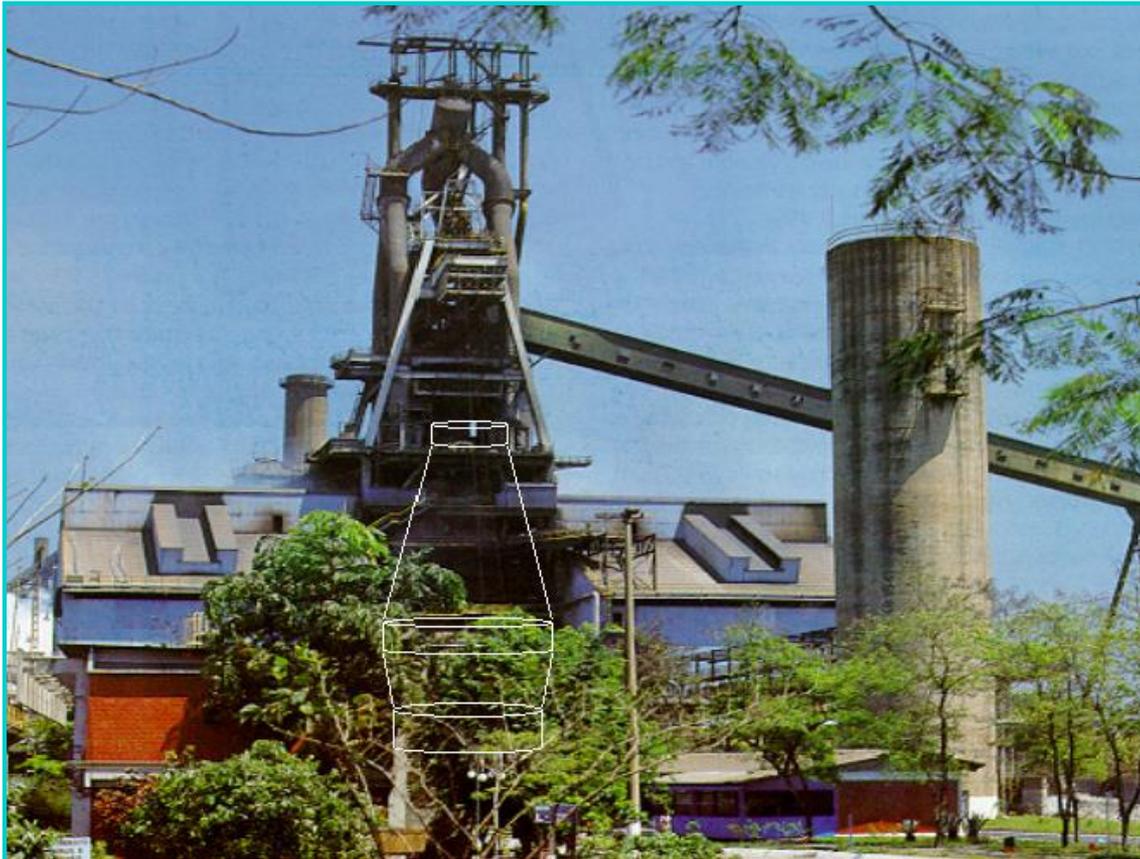
Alto-forno é um reator vertical no qual a redução do minério se dá de forma contínua. É alimentado na parte superior com carga sólida (minério e carvão ou **coque**) e na inferior com ar pré-aquecido.

No alto forno é produzido o **ferro gusa**, que é vazado no estado líquido para outros fornos.



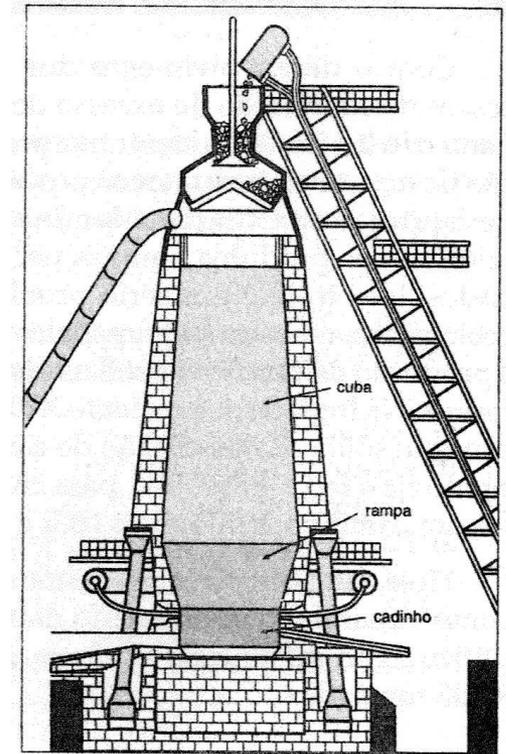
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Processos Siderúrgicos



Vista do alto-forno 3 da CSN, destacando o contorno do reator (Medeiros, 2006)

Um alto-forno típico tem 30 m de altura e 7 m de diâmetro. É vazado de 8 a 14 vezes por dia (duração do vazamento é de 1,5 a 3 horas). Produção diária aproximada = 8.000 ton.



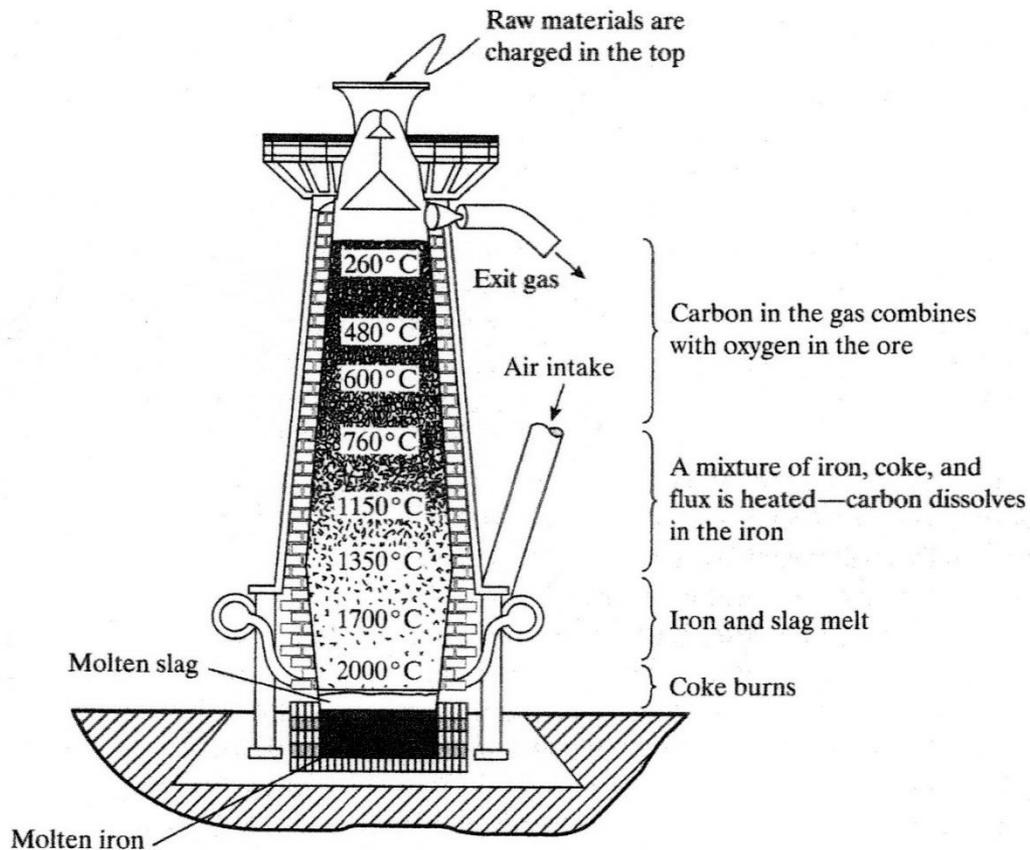
Zonas de um alto-forno

Curiosidade: O alto-forno 1 da CSN operou de forma ininterrupta entre 9/1/1946 e 20/1/1992.

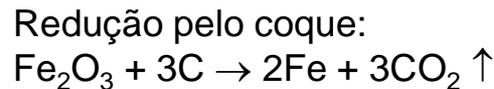
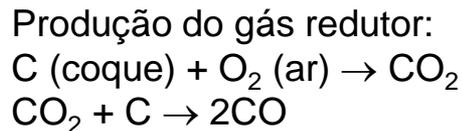
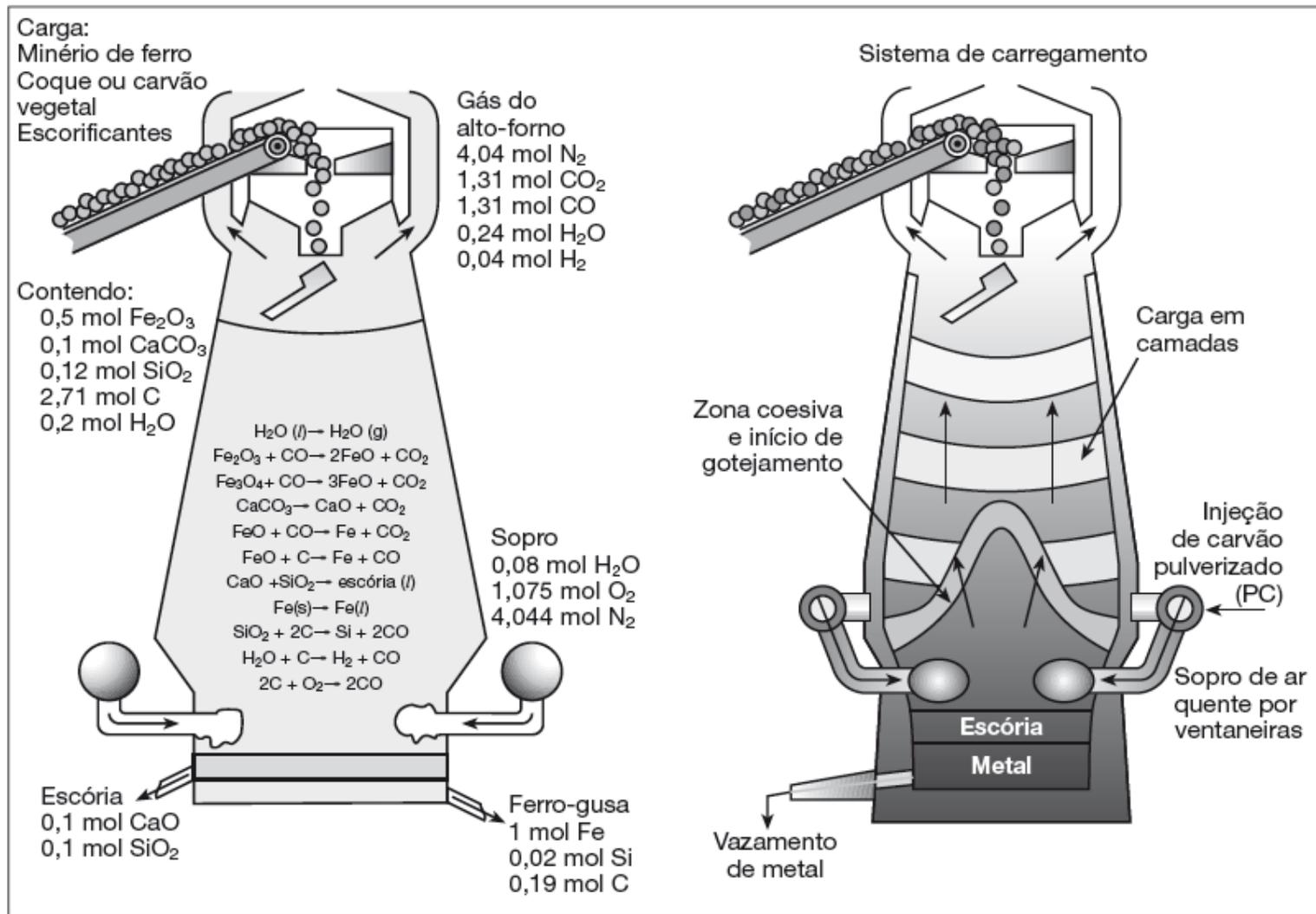


Processos Siderúrgicos

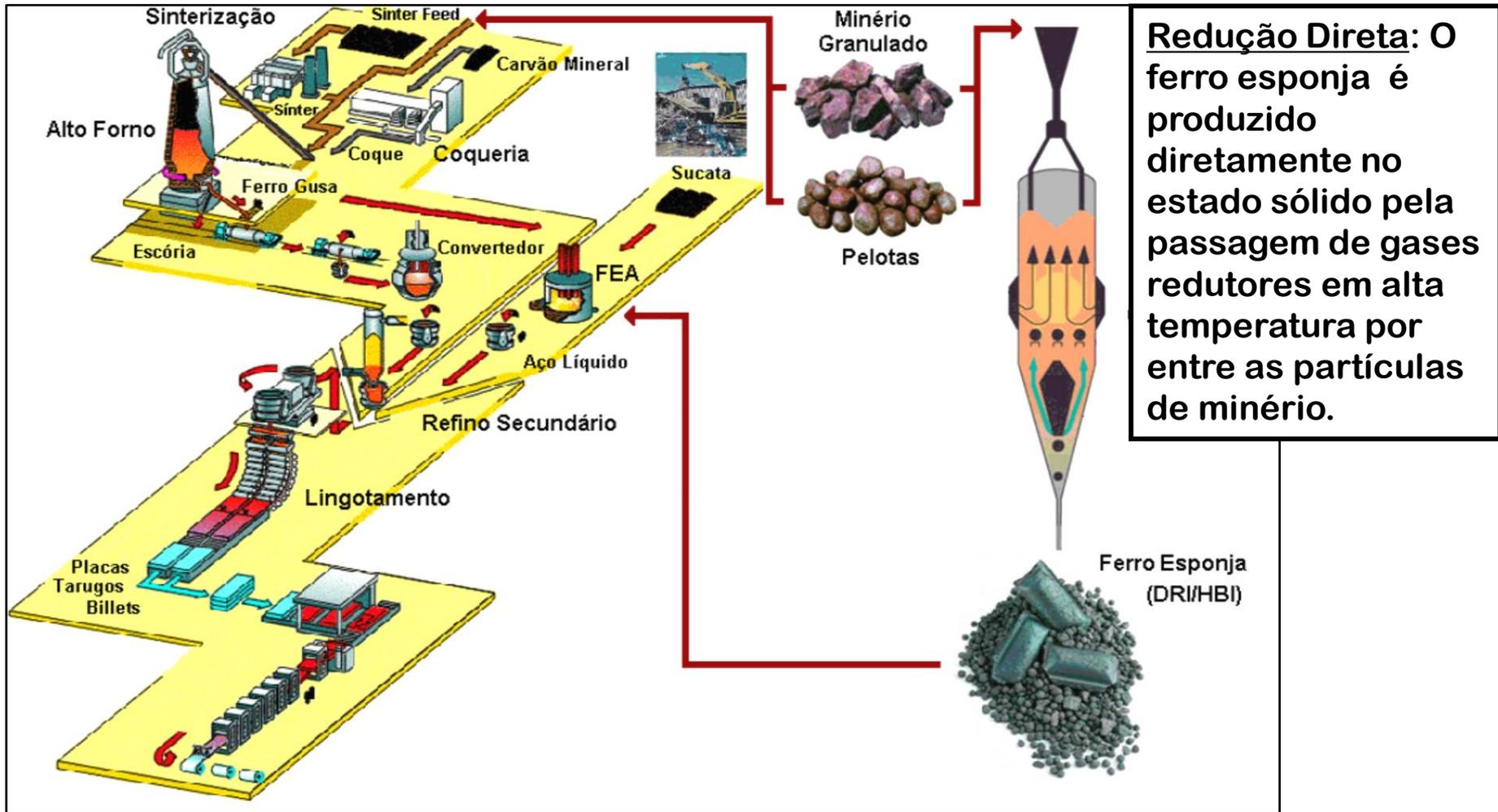
Regiões do alto-forno



Processos Siderúrgicos



Processos Siderúrgicos



Processos Siderúrgicos

Fabricação do aço: conversão do gusa

TIPO DE FORNO	COMBUSTÍVEL	TIPO DE CARGA	CAPACIDADE DE CARGA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Conversor Bessemer	Injeção de ar comprimido.	Gusa líquido.	10 a 40 ton.	Ciclo curto de processamento (10 a 20 minutos).	Impossibilidade de controle do teor de carbono. Elevado teor de óxido de ferro e nitrogênio no aço. Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Conversor Thomas	Injeção de ar comprimido.	Gusa líquido, cal.	Em torno de 50 ton.	Alta capacidade de produção. Permite usar gusa com alto teor de fósforo.	O gusa deve ter baixo teor de silício e enxofre. Elevado teor de óxido de ferro e nitrogênio no aço. Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Conversor LD	Injeção de oxigênio puro sob alta pressão.	Gusa líquido, cal	100 ton.	Mínima contaminação por nitrogênio.	Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Forno a arco elétrico	Calor gerado por arco elétrico.	Sucata de aço + gusa, minério de ferro, cal.	40 a 70 ton.	Temperaturas mais altas. Rigoroso controle da composição química. Bom aproveitamento térmico.	Pequena capacidade dos fornos. Custo operacional.
Forno de indução	Calor gerado por corrente induzida dentro da própria carga.	Sucata de aço.	Em torno de 8 ton.	Fusão rápida. Exclusão de gases. Alta eficiência.	Pequena capacidade dos fornos. Custo operacional.

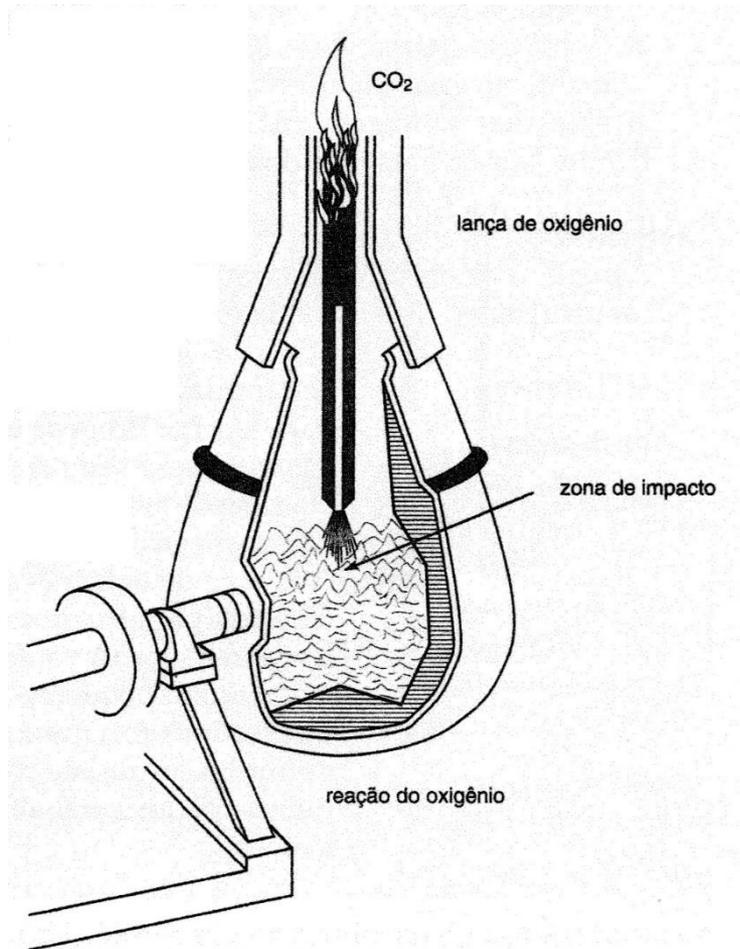
Descarregamento do gusa para o conversor



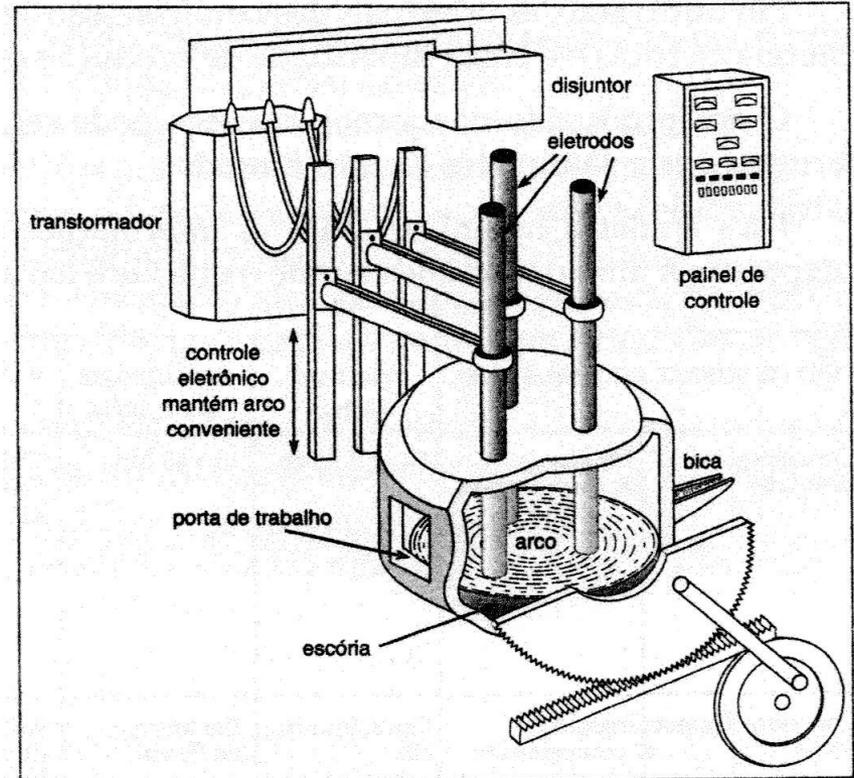
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Processos Siderúrgicos

Fabricação do aço: conversor e fornos elétricos



Conversor LD



Forno a arco



Processos Siderúrgicos

Fabricação do aço (vídeo)

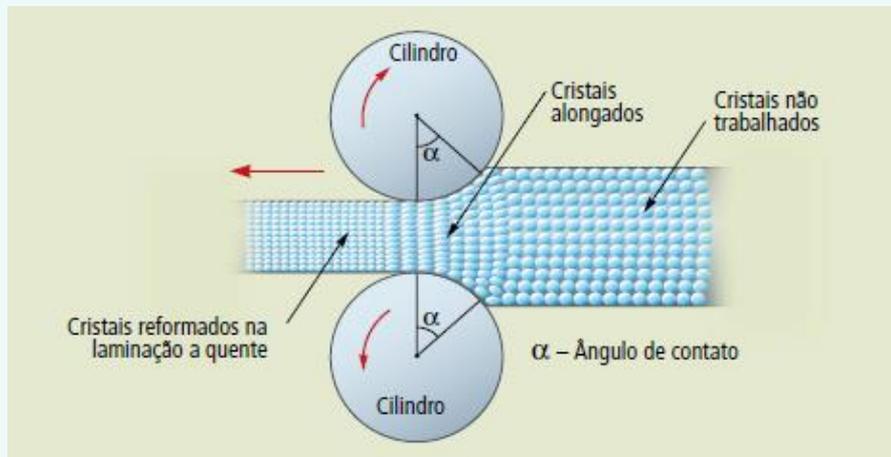


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Processos de Fabricação

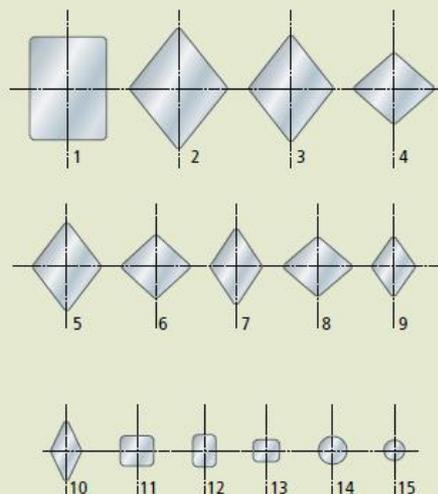
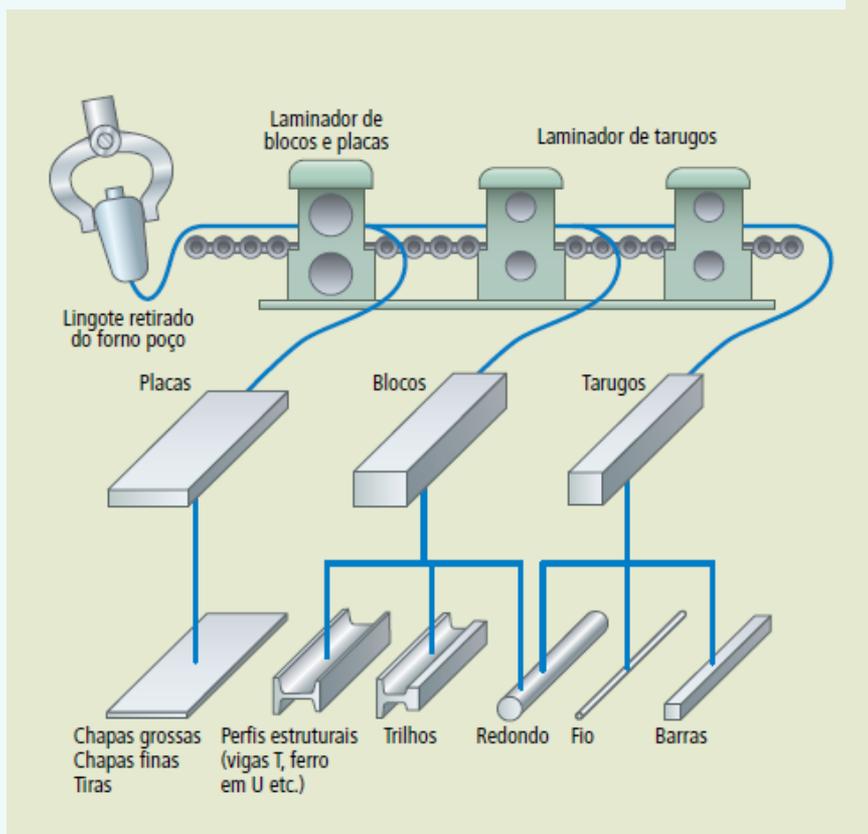
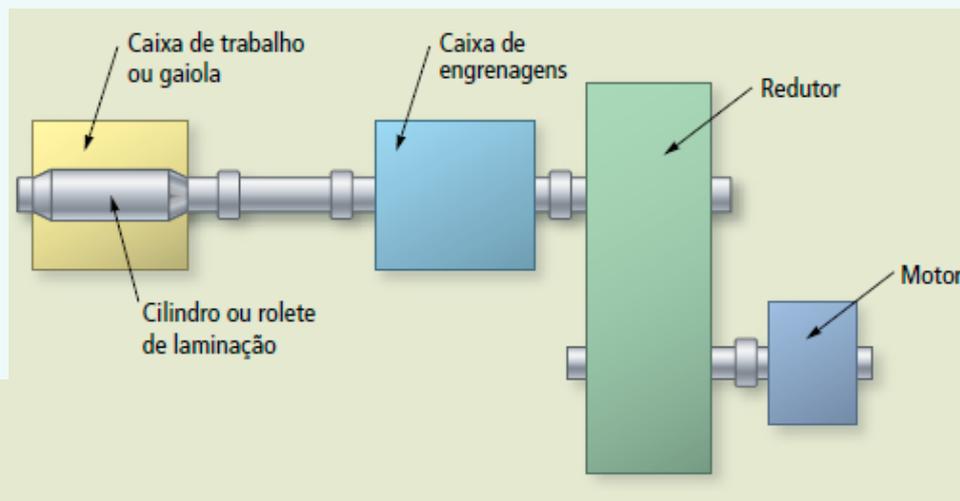
Processos de conformação mais comuns:

- Laminação
- Trefilação
- Forjamento
- Extrusão
- Estampagem



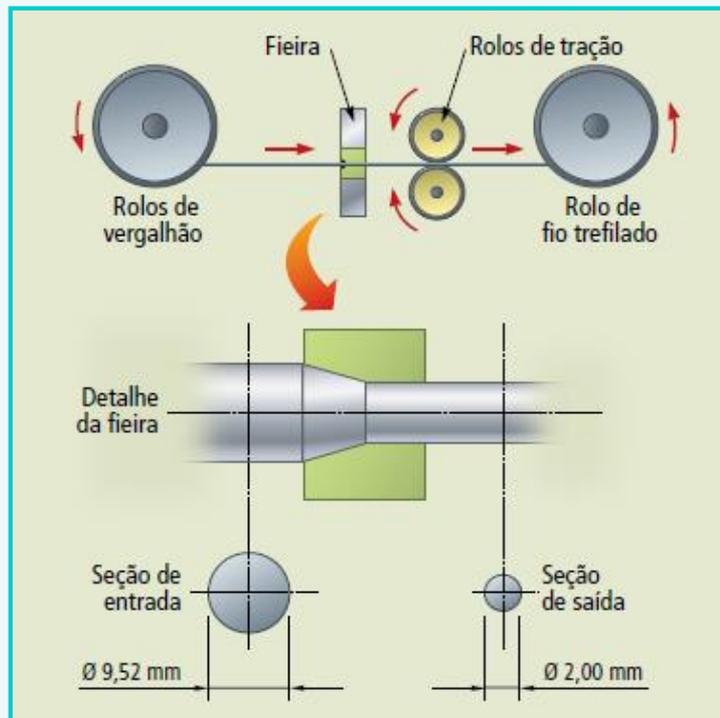
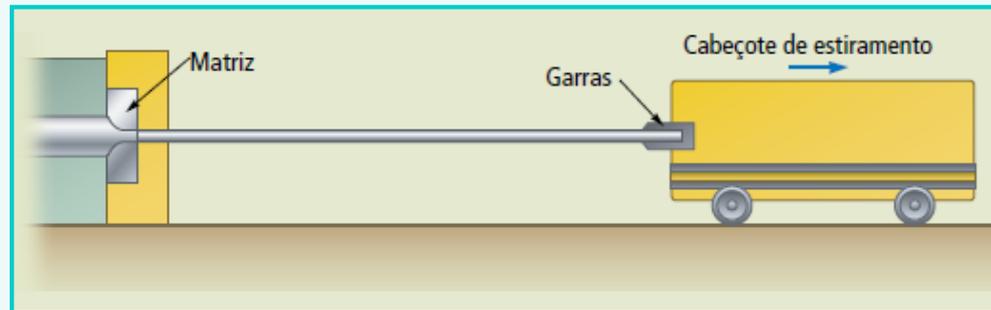
Processos de Fabricação

Laminação



Processos de Fabricação

Trefilação



Processos Siderúrgicos e de Fabricação



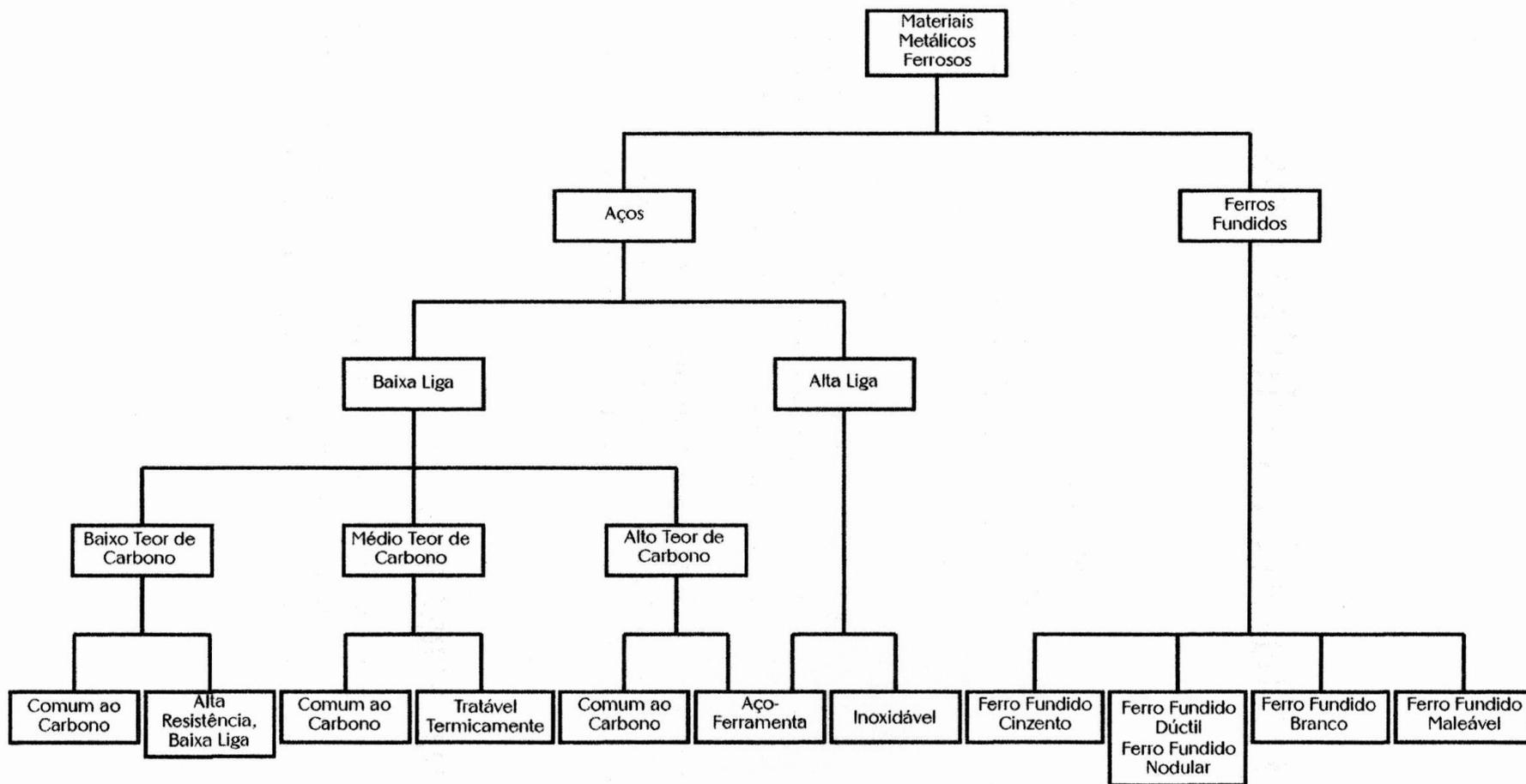
Processos Siderúrgicos e de Fabricação

Processo completo (vídeo)



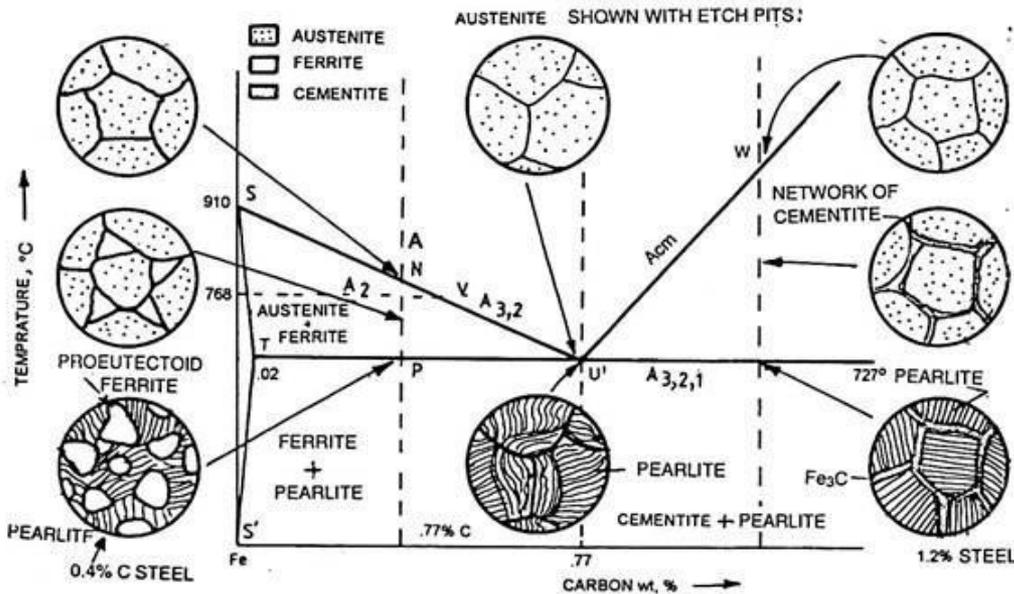
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Classificação das Ligas Ferrosas



Constituintes dos aços

- **Ferrita (δ):** Solução sólida de C em Fe CCC – 1.394°C a 1.538°C. Solubilidade máxima de 0,09% de C em 1.495°C ($a=2,91\text{\AA}$)
- **Austenita (γ):** Solução sólida de C no Fe CFC- 727°C a 1.495°C. Solubilidade máxima de C-2,11 % a 2,14%, em 1148°;
- **Ferrita (α):** Solução sólida de C no Fe CCC – até 912°. Solubilidade máxima 0,020% de C em 723°C a 727°C ($a=2,88\text{\AA}$);
- **Cementita (Fe_3C):** ortorrômbico, alta dureza;
- **Perlita:** *microconstituente* formado por α e Fe_3C .



Impurezas nos aços

Mn, Si, P, S, Al

Essas impurezas fazem parte das matérias primas usadas na fabricação do aço e muitas vezes podem ser prejudiciais.

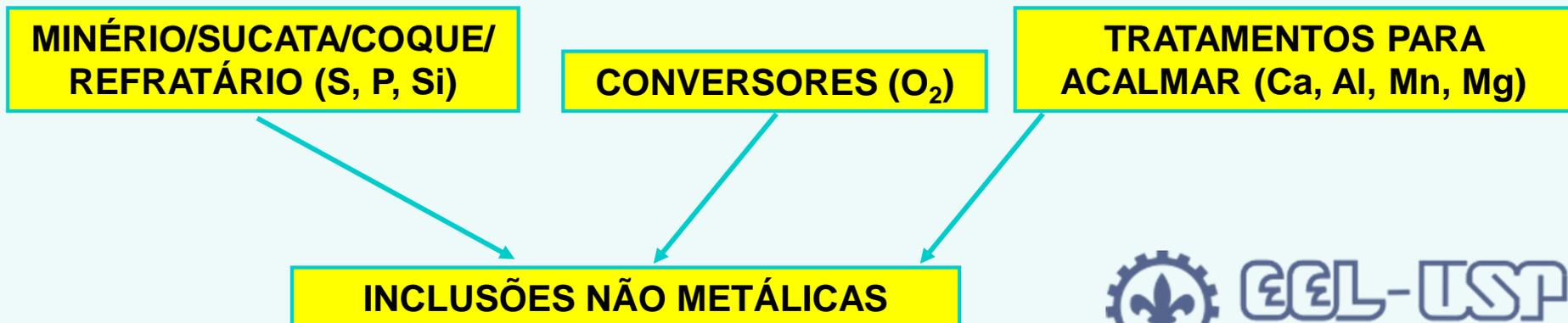
Mn = Adicionado para ajudar na desoxidação e para neutralizar o efeito nocivo do S (forma MnS). Em quantidades acima de 1,65% pode se combinar também com o C (formando Mn_3C), o que reduz a ductilidade.

Al = usado para acalmar o aço. Pode formar inclusões de Al_2O_3 .

P = fragiliza o aço e também é prejudicial na deformação à quente, pois forma composto que se funde a $1000^\circ C$, causando ruptura durante a conformação.

S = Pode se combinar com o ferro (FeS), que causa ruptura durante a laminação; o máximo teor permitido é 0,05%. É controlado pela adição de Mn, pois o MnS se solidifica em temperatura semelhante ao aço e não é tão nocivo.

Si = Proveniente do gusa, também é adicionado para ajudar na desoxidação. Não tem grande influência nas propriedades dos aços carbono.



Classificação dos Aços

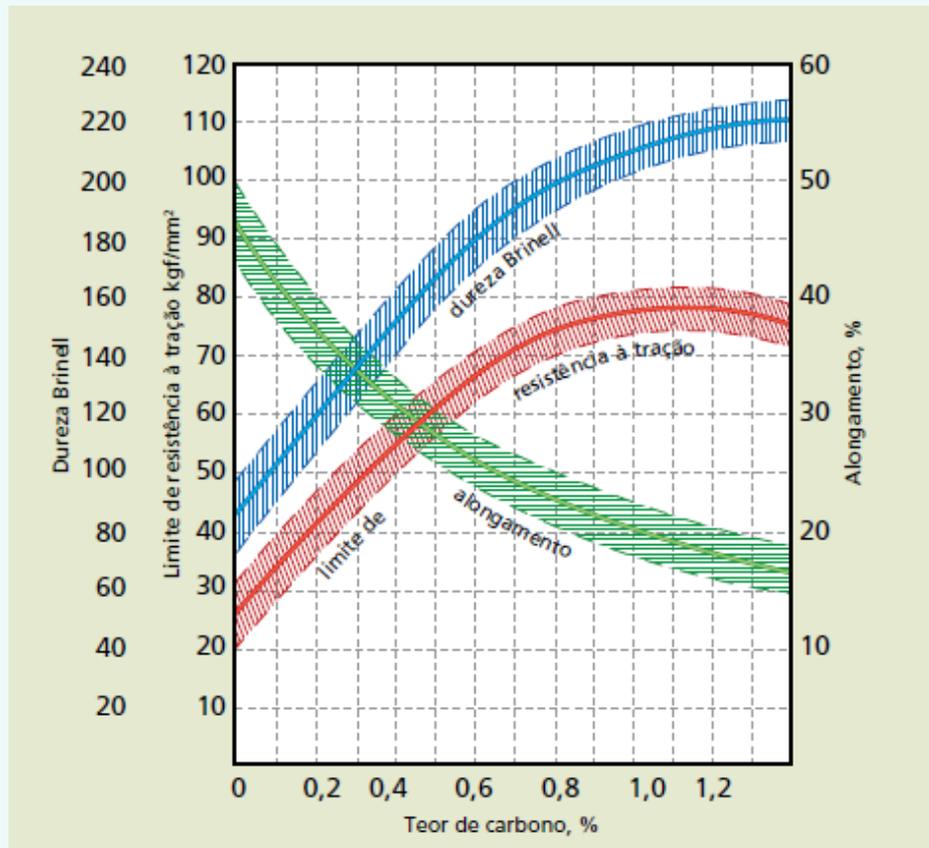
Aço-carbono: é o principal material estrutural.

Quanto ao teor de carbono, é classificado em:

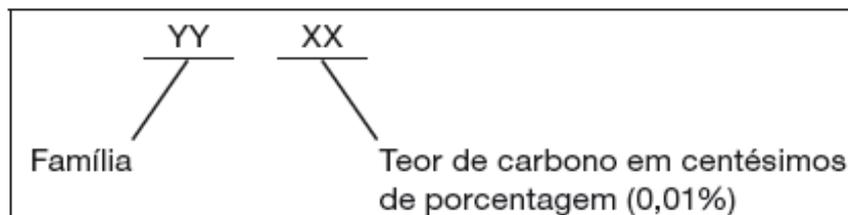
Baixo – até 0,25% C

Médio – de 0,25% até 0,6% C

Alto – acima de 0,6% até 2,0% C



Classificação dos Aços quanto à Composição



Grupo	Exemplo	Tipo de aço
10XX	SAE 1020	aço-carbono comum
11XX	SAE 1120	aço de alto teor de enxofre
13XX	1322	aços ligados ao manganês
23XX	2340	aços ligados ao níquel
31XX	3135	aços ligados ao níquel e ao cromo
41XX	4140	aços cromo-molibdênio
43XX	4340	aços cromo-níquel-molibdênio
51XX	5160	aços ligados ao cromo
61XX	6140	aços ligados ao cromo e ao vanádio
86XX	8620	aços níquel-cromo-molibdênio

- 1 = aço-carbono;
- 2 = aço-níquel;
- 3 = aço níquel-cromo;
- 4 = aço-molibdênio;
- 5 = aço-cromo;
- 6 = aço cromo-vanádio;
- 7 = aço-tungstênio;
- 8 = aço níquel-cromo-molibdênio;
- 9 = aço silício-manganês.



Elementos de liga mais comuns

Elemento de liga	Influência na estrutura	Influências nas propriedades	Aplicações	Produtos
Níquel	Refina o grão. Diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço.	Aumento da resistência à tração. Alta ductilidade.	Aço para construção mecânica. Aço inoxidável. Aço resistente a altas temperaturas.	Peças para automóveis. Utensílios domésticos. Caixas para tratamento térmico.
Manganês	Estabiliza os carbonetos. Ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera. Diminui a velocidade de resfriamento.	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça. Resistência ao choque.	Aço para construção mecânica.	Peças para automóveis e peças para uso geral engenharia mecânica.
Cromo	Forma carbonetos. Acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e à oxidação. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços para construção mecânica. Aços-ferramenta. Aços inoxidáveis.	Produtos para indústria química; talheres; válvulas e peças para fornos. Ferramentas de corte.
Molibdênio	Influência na estabilização do carbono.	Alta dureza ao rubro. Aumento de resistência à tração. Aumento de temperabilidade.	Aços-ferramenta. Aço-cromo-níquel. Substituto do tungstênio em aços rápidos.	Ferramentas de corte.
Vanádio	Inibe o crescimento dos grãos. Forma carbonetos.	Maior resistência mecânica. Maior tenacidade e temperabilidade. Resistência à fadiga e à abrasão.	Aços cromo-vanádio	Ferramentas de corte.
Tungstênio	Forma carbonetos muito duros. Diminui a velocidade das transformações. Inibe o crescimento dos grãos.	Aumento da dureza. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos. Aços-ferramenta	Ferramentas de corte.



Efeito de alguns elementos sobre as propriedades

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	x	x	x		x				x	
Aumento da Dureza	x	x	x		x					
Aumento da Resistência ao Impacto						x				
Redução da ductilidade	x		x	x						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								x		
Aumento da Temperabilidade							x	x		
Ação Desoxidante		x			x					x
Aumento da Resistência à Corrosão							x			
Aumento da Resistência à Abrasão							x			
Redução da Soldabilidade	x									



Propriedades e aplicações de alguns aços

TABELA 3.10 Propriedades mecânicas de materiais laminados a quente em aços carbono e aços de alta resistência e baixa liga

TIPOS PRINCIPAIS AISI/SAE ou ASTM	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	DUCTILIDADE EM % DE ALONGAMENTO	APLICAÇÕES TÍPICAS
AÇOS DE ALTO CARBONO				
1 010	325	180	28	Painéis de automóveis, pregos e arames
1 020	380	205	25	Tubos; aços estruturais e em chapas
A36	400	220	23	Estrutural (pontas e edificações)
A516 Classe 70	485	260	21	Vasos de pressão para baixa temperatura
AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA				
A440	435	290	21	Estruturas aparafusadas ou rebitadas
A633 Classe E	520	380	23	Estruturas usadas para baixa temperatura ambiente
A656 Classe 1	655	552	15	Chassis de caminhões e vagões ferroviários



Propriedades e aplicações de alguns aços

TABELA 3.5 Aplicações dos materiais metálicos ferrosos – aços para construção mecânica, civil, naval e tubos

TIPOS PRINCIPAIS (ver nota)	PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS	APLICAÇÃO	PRINCIPAIS ELEMENTOS NA LIGA	OBSERVAÇÕES (Entidades Normalizadoras)
Estrutural A36 A570 NBR 7480 Folhas, tiras Chapas finas Barras chatas Chapas grossas Vergalhões	Excelente deformabilidade. Boa soldabilidade. Boa ductilidade. Baixo custo. Fácil revestimento. Superfície sem defeitos	Estrutura metálicas e construção civil. Armadura de concreto	Mn, Si	ASTM/ABNT
Estrutural A572 A588	Alta resistência mecânica	Estrutura metálicas e construção civil	Mn, Si, Cr, Cu	
Construção naval DH-36	Resistência mecânica. Baixa temperatura de transição	Chapas para construção naval	Mn, Si, Nb, V	ABS/DNV/BV
Construção mecânica A516 Folhas, tiras Chapas finas Barras chatas Chapas grossas	Excelente deformabilidade. Boa soldabilidade. Boa ductilidade	Chapas para construção mecânica, por exemplo, vasos, tanques, estruturas metálicas	Mn, Si	ASTM
Tubos para dutos API 5L	Alta resistência mecânica	Dutos de petróleo e derivados. Dutos em geral	Mn, Ti	API

Nota: Tipos de acordo com as normas mencionadas na última coluna.



Propriedades e aplicações de alguns aços

Materiais de Temperaturas Elevadas

Material	Temperaturas-limite (°C)	
	Resistência à fluência aceitável	Início de formação de carepas ao ar
Aço-carbono acalmado com Si (grão grosso)	450	530
Aço-liga 1/2 Mo	510	530
Aço-liga 1/4 Cr-1/2 Mo	550	550
Aço-liga 9 Cr-1 Mo	600	700
Aço inoxidável tipo 405	500	750
Aço inoxidável tipo 410	550	800
Aços inoxidáveis tipos 304, 316, 321, 347	600	900
Aços inoxidáveis tipos 304H e 316H	650	900
Aço inoxidável tipo 446	550	1.100
Aço inoxidável tipo 310	600	1.100
Inconel	900	1.200



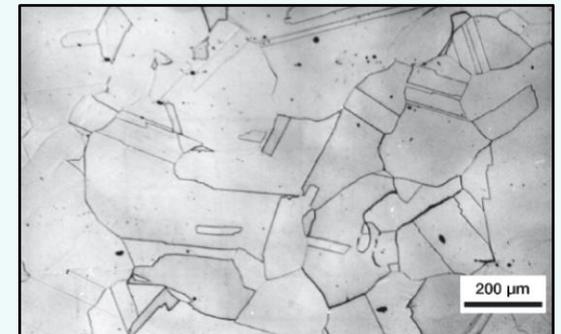
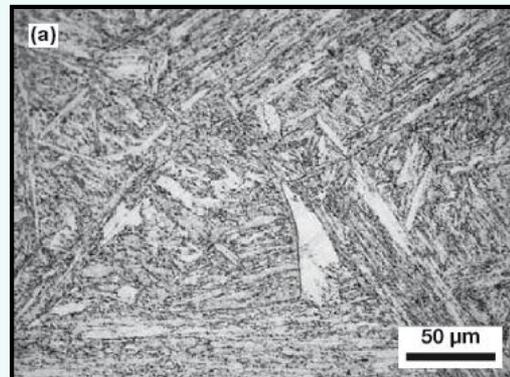
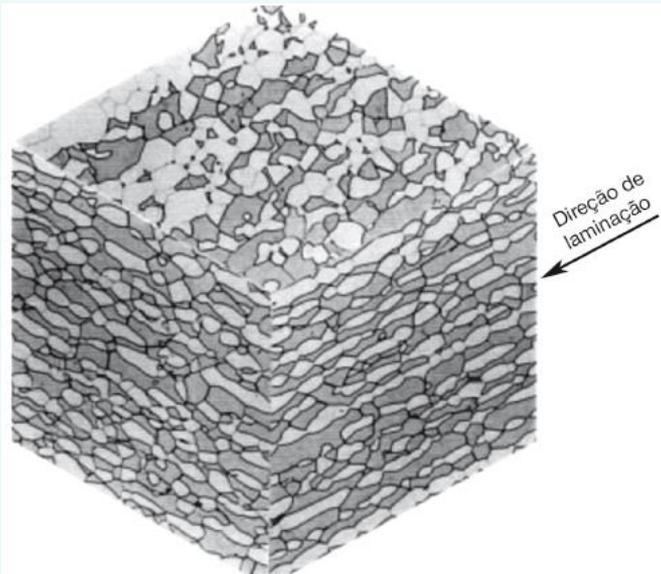
Aços Inoxidáveis

ÁÇOS INOXIDÁVEIS: ALTO Cr > 12% CARBONO ABAIXO DE 0,10%.

AUSTENÍTICOS: SÉRIE 300 – Cr (16- 30%) E Ni (8-35%) EX: 316, 304.

MARTENSÍTICOS: SÉRIE 400- Cr(11-18%) EX: 410, 420.

DUPLEX: Cr(18-27%), Ni(4-7%) E Mo(1-4%). EX: 2205.



Aços Inoxidáveis

TABELA 3.12 Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis

TIPOS PRINCIPAIS AISI		COMPOSIÇÃO (%)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	DUCTILIDADE % ALONGAMENTO PARA 50 mm	APLICAÇÕES
Ferrítico AISI – 409 Recozido		0,08 C; 11,0 Cr; 1,0 Mn; 0,50 Ni; 0,75 Ti	380	205	20	Componentes de exaustão automotivos. Tanques para pulverizadores agrícolas
Ferrítico AISI – 446 Recozido		0,20 C; 25 Cr; 1,5 Mn	515	275	20	Válvulas (alta temperatura). Moldes para vidro, câmara de combustão
Austenítico AISI – 304 Recozido		0,08 C; 19,0 Cr; 2,0 Mn; 9,0 Ni	515	205	40	Equipamentos para processamento químico e de alimentos. Vasos criogênicos
Austenítico AISI – 316L Recozido		0,03 C; 17,0 Cr; 12,0 Ni; 2,5 Mo; 2,0 Mn	485	170	40	Construções soldadas
Martensítico	410	0,15 C; 12,5 Cr; 1,0 Mn	Recozido 485 Temperado e Revenido 825	Recozido 275 Temperado e Revenido 620	20 12	Cutelaria. Peças de motores de jatos. Canos de rifles
Martensítico	440A	0,70 C; 17,0 Cr; 0,75 Mo; 1,0 Mn	Recozido 725 Temperado e Revenido 1 790	Recozido 415 Temperado e Revenido 1 650	20 5	Cutelarias. Mancais e rolamentos. Instrumentos cirúrgicos

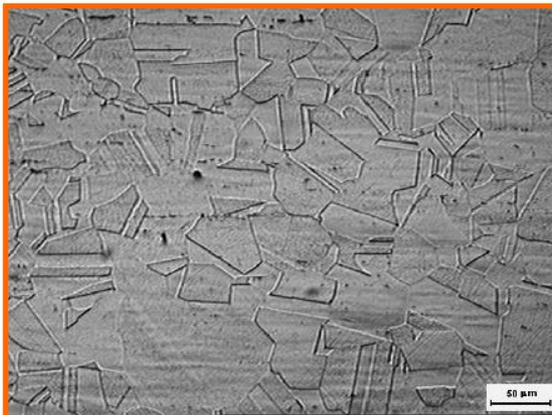


Aços Inoxidáveis

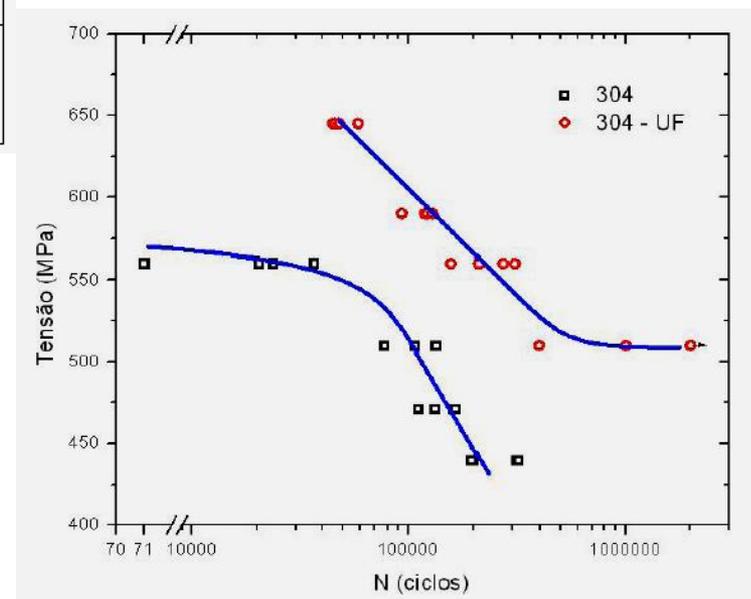
Propriedades de fadiga do aço inoxidável 304 com diferentes teores de cálcio.

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	P	S	N	Ca
V 304	0,027	0,29	1,80	18,30	8,75	0,46	0,007	0,42	0,034	0,003	0,049	0,0011
V304 UF	0,058	0,38	1,90	18,30	8,57	0,42	< 0,005	0,46	0,031	0,026	0,037	0,0036
Norma AISI	< 0,08	< 1,00	< 2,00	18,00- 20,00	8,00 - 10,50	-	-	-	< 0,045	< 0,030	< 0,10	-

Microestrutura



Curvas S/N



Ferros Fundidos

TIPO DE FERRO FUNDIDO	PROPRIEDADES	PRODUTOS
Ferro fundido cinzento	Boa usinabilidade. Capacidade de amortecer vibrações.	Blocos e cabeçotes de motor, carcaças e platôs de embreagem, discos e tambores de freio; suportes, bases e barramentos de máquinas industriais.
Ferro fundido branco	Dureza e fragilidade. Elevada resistência à compressão. Resistência ao desgaste e à abrasão.	Equipamentos de manuseio de terra, mineração e moagem; rodas de vagões; revestimentos de moinhos.
Ferro fundido maleável (preto ou branco)	Alta resistência mecânica e alta fluidez no estado líquido. Resistência ao choque e às deformações.	Suportes de molas, caixas de direção, cubos de roda; conexões para tubulações hidráulicas e industriais; suportes de barras de torção, corpos de mancais, flanges para tubos de escapamento.
Ferro fundido nodular	Ductilidade, tenacidade, usinabilidade. Resistência mecânica e à corrosão.	Mancais, virabrequins, caixas de diferencial, carcaças de transmissão, caixas satélites para automóveis, caminhões e tratores.

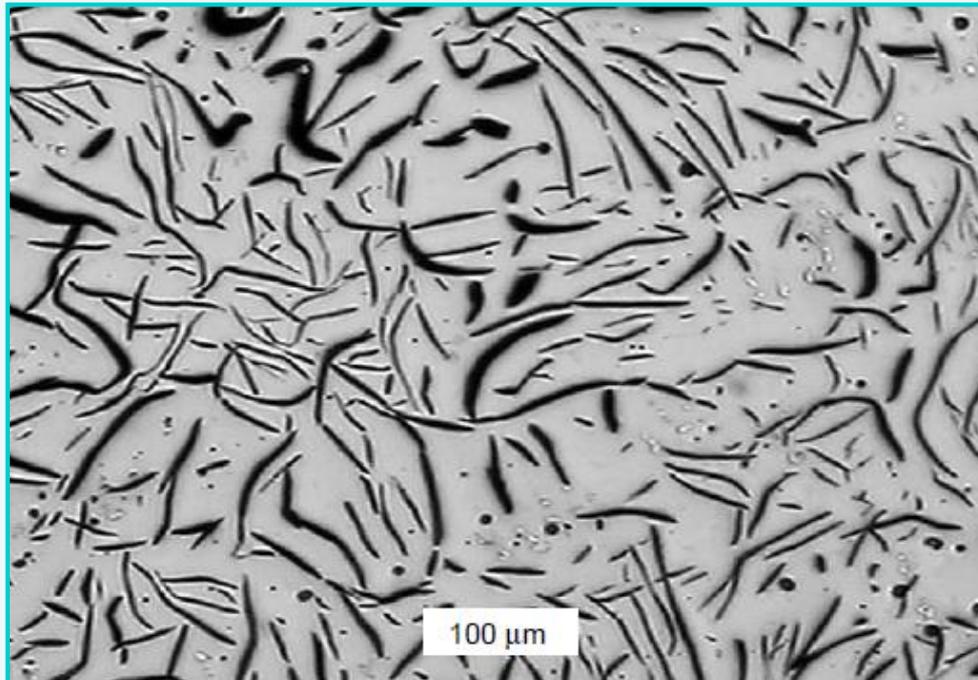
Dependendo da quantidade dos elementos de liga e do modo como o material é resfriado ou tratado térmicamente, o ferro fundido é classificado como cinzento, branco, maleável ou nodular. A diferença entre cinzento e branco é dada pela aparência da fratura, que depende da forma como o carbono se apresenta no material solidificado.



Ferros Fundidos

FoFo CINZENTO:

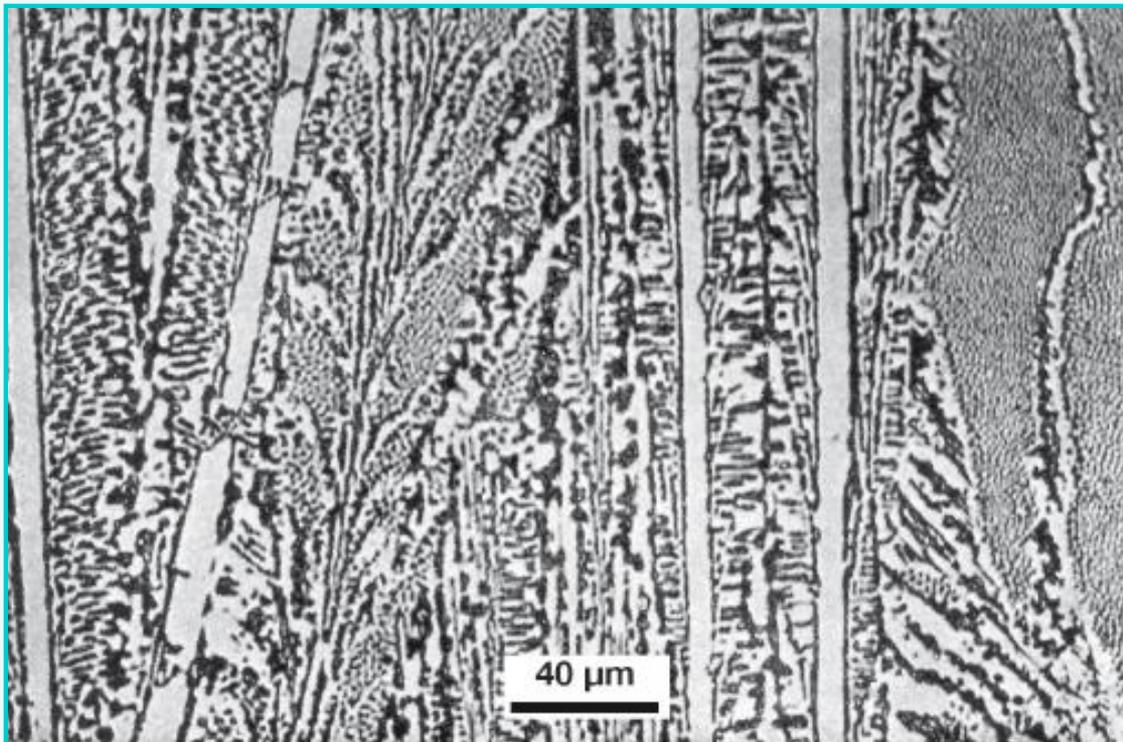
- **GRAFITA EM VEIOS;**
- **FRÁGIL SOB TENSÃO TRATIVA;**
- **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO;**
- **RESISTÊNCIA AO DESGASTE;**
- **EXCELENTE ABSORÇÃO DE VIBRAÇÕES.**



Ferros Fundidos

FoFo BRANCO:

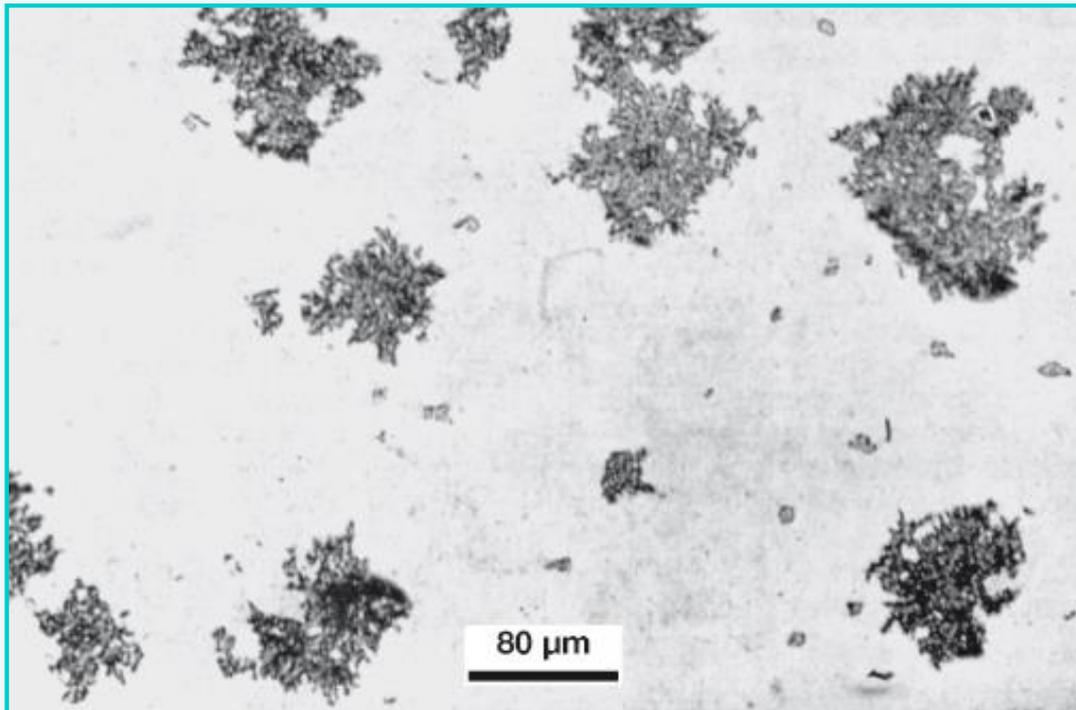
- DURO E FRÁGIL;
- EXCELENTE RESISTÊNCIA AO DESGASTE;
- <1,0%Si.



Ferros Fundidos

FoFo MALEÁVEL:

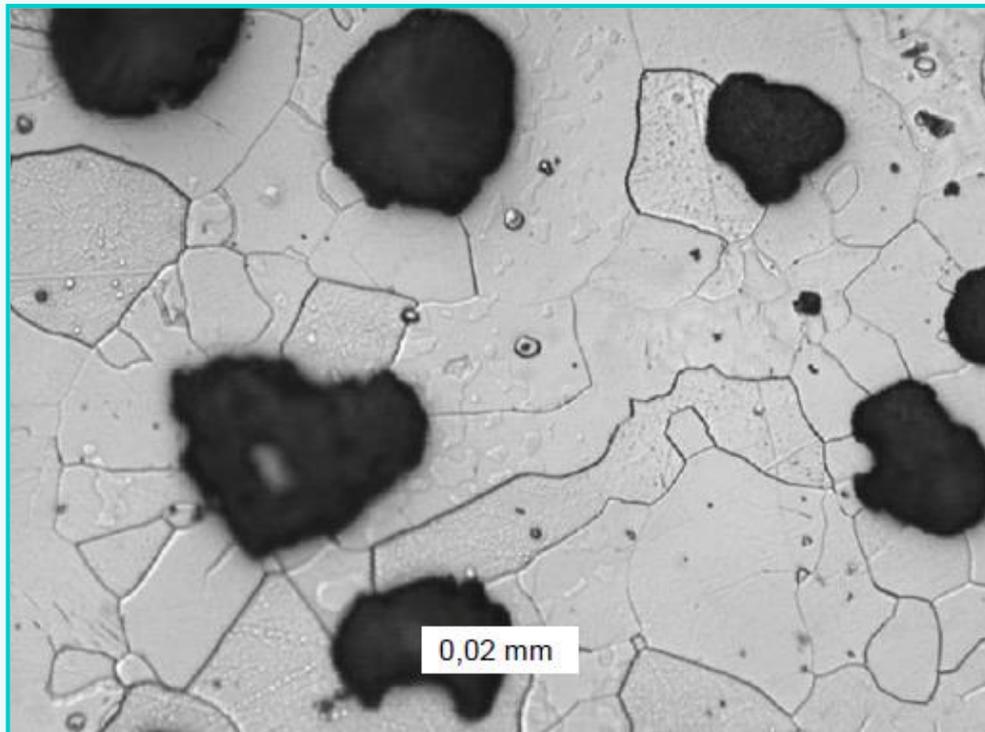
- MODIFICAÇÃO DO FoFo BRANCO POR MEIO DE TRATAMENTO TÉRMICO;
- MAIOR DUTILIDADE QUE O BRANCO;
- GRAFITA EM NÓDULOS DIFUSOS.



Ferros Fundidos

FoFo DÚCTIL OU NODULAR:

- ADIÇÃO DE Mg OU Ce NO FoFo CINZENTO;
- GRAFITA EM NÓDULOS;
- TRATAMENTOS TÉRMICOS → DUCTILIDADE.



Ferros Fundidos - Aplicações



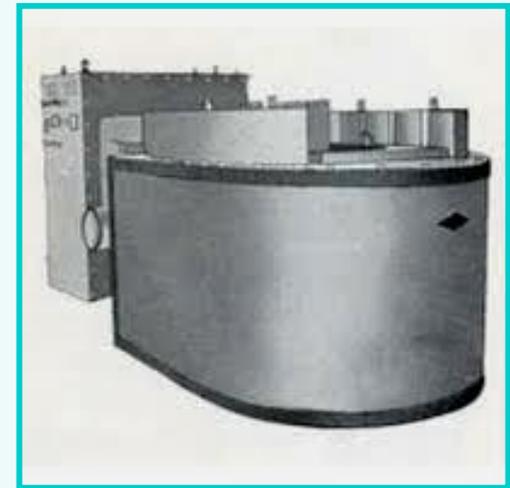
Melhoria das Propriedades Mecânicas dos Aços

Basicamente três possibilidades:

- Processos de fabricação por conformação mecânica
- Adição de elementos de liga
- Tratamentos térmicos e termoquímicos



Forjamento rotativo a frio

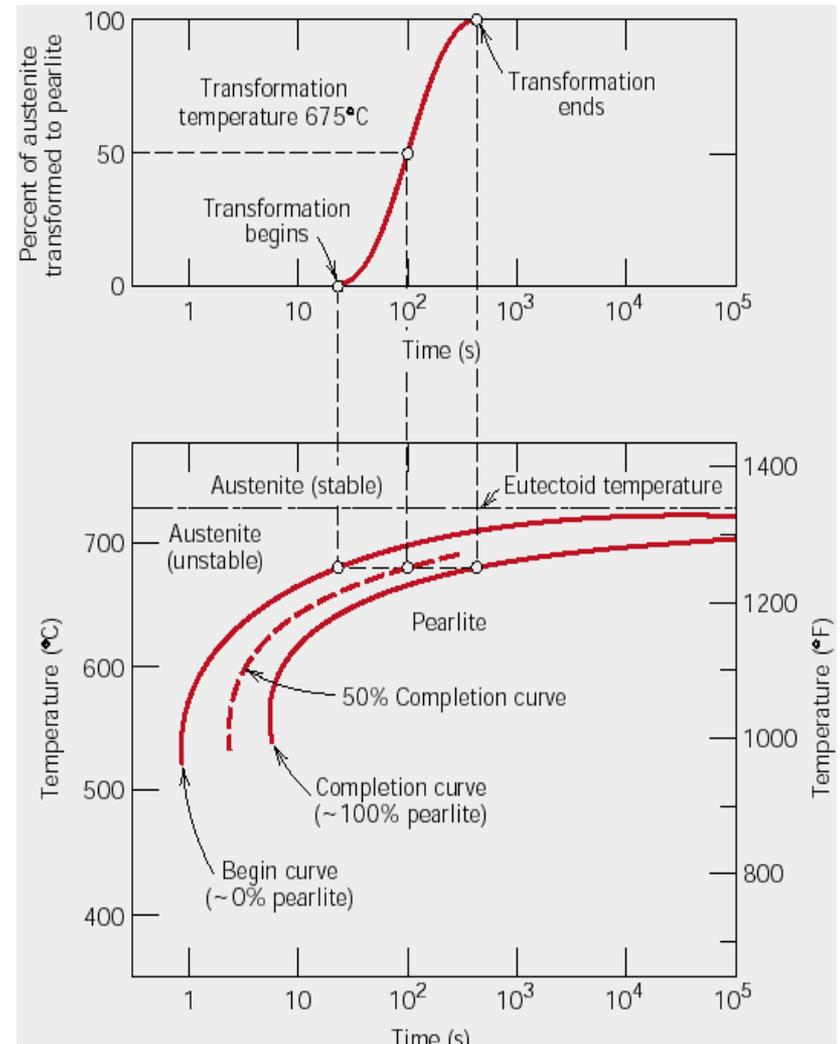


Banho de sal para tratamento térmico

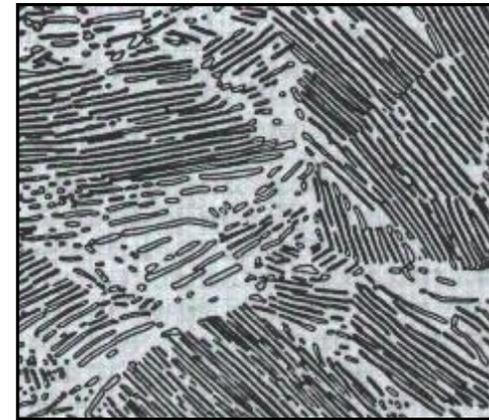
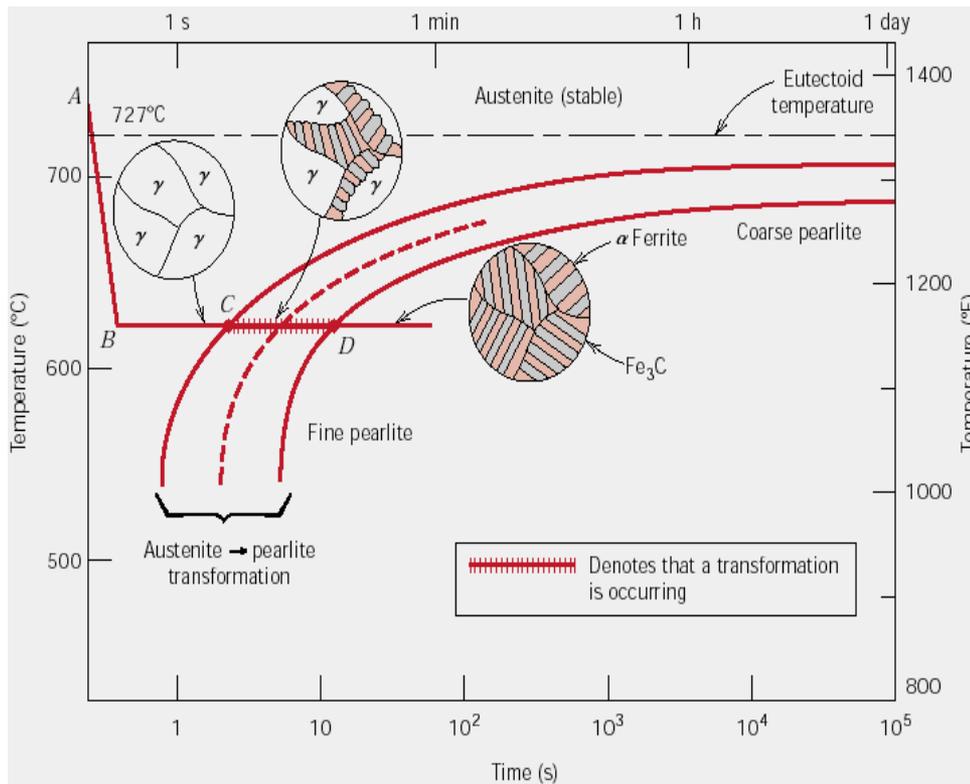


Características gerais de curvas TTT

- Cada curva T.T.T. é específica para determinado aço de composição conhecida.
- O eixo das ordenadas refere-se às temperaturas de aquecimento. As temperaturas máximas de interesse vão até a região da austenita (Fe- γ , com estrutura CFC) que em geral é a estrutura de partida dos tratamentos térmicos.
- As abscissas correspondem aos tempos decorridos para a transformação da austenita em outras estruturas, em escala logarítmica.
- A curva TTT discrimina as estruturas formadas no aço em questão, dependendo da velocidade de resfriamento (considera o efeito cinético).
- As estruturas formadas convergem para as estruturas indicadas no diagrama de equilíbrio sempre que as taxas de resfriamento forem lentas.



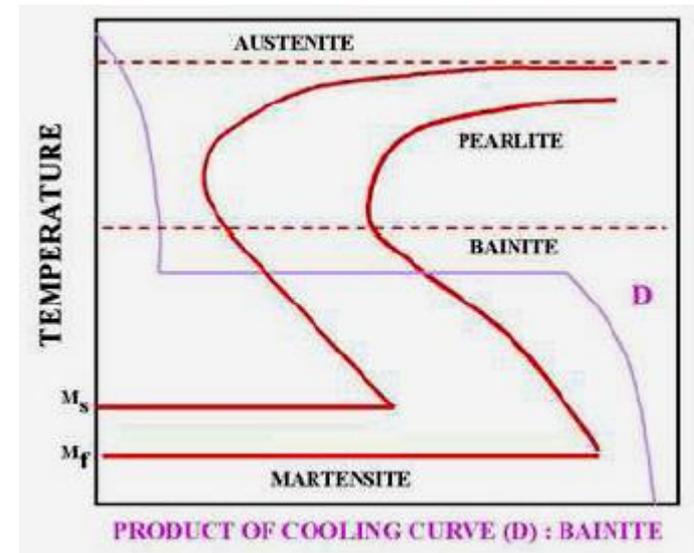
Resfriamento isotérmico de um aço eutetóide



Micrografia: perlita grosseira

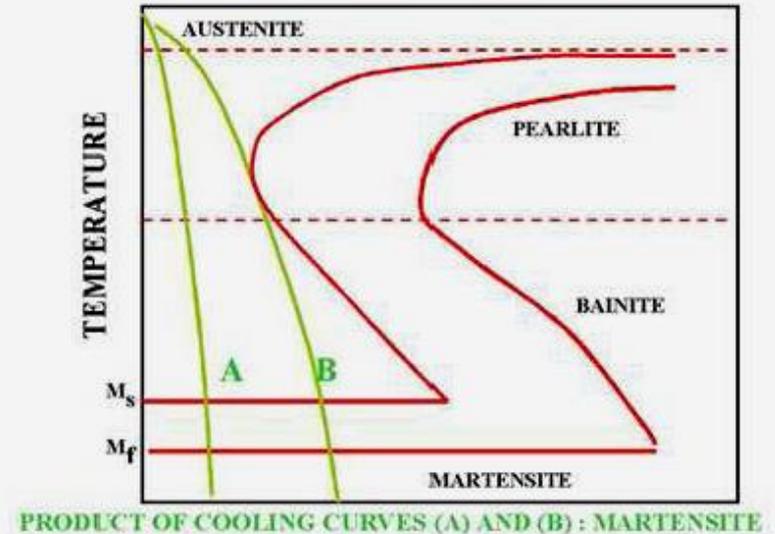


Micrografia: bainita



Têmpera: transformação martensítica

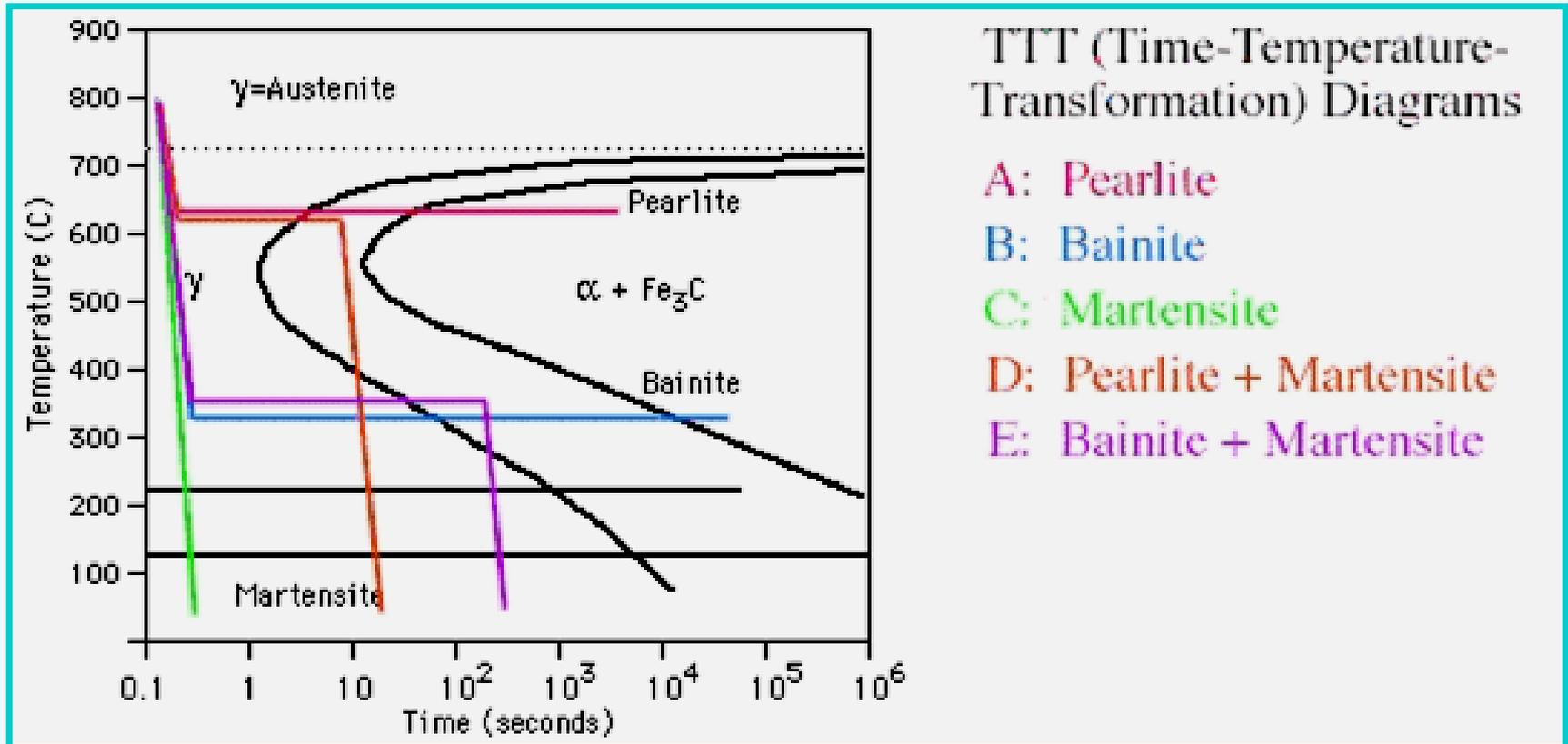
- Martensita: é uma estrutura monofásica que ocorre por uma transformação sem difusão e não se encontra em equilíbrio (metaestável).
- Ocorre uma transformação polimórfica da austenita (CFC) para a martensita (TCC); um grande número de átomos experimentam um movimento cooperativo; há apenas um pequeno deslocamento entre átomos vizinhos.
- A transformação ocorre a partir da austenita e independe do fator tempo, no entanto, o resfriamento deve ser rápido o bastante de tal forma que a austenita não se transforme antes em outra estrutura.
- É uma solução super saturada de carbono no ferro α de aspecto acicular e de reticulado tetragonal.



Micrografia: martensita em aço temperado

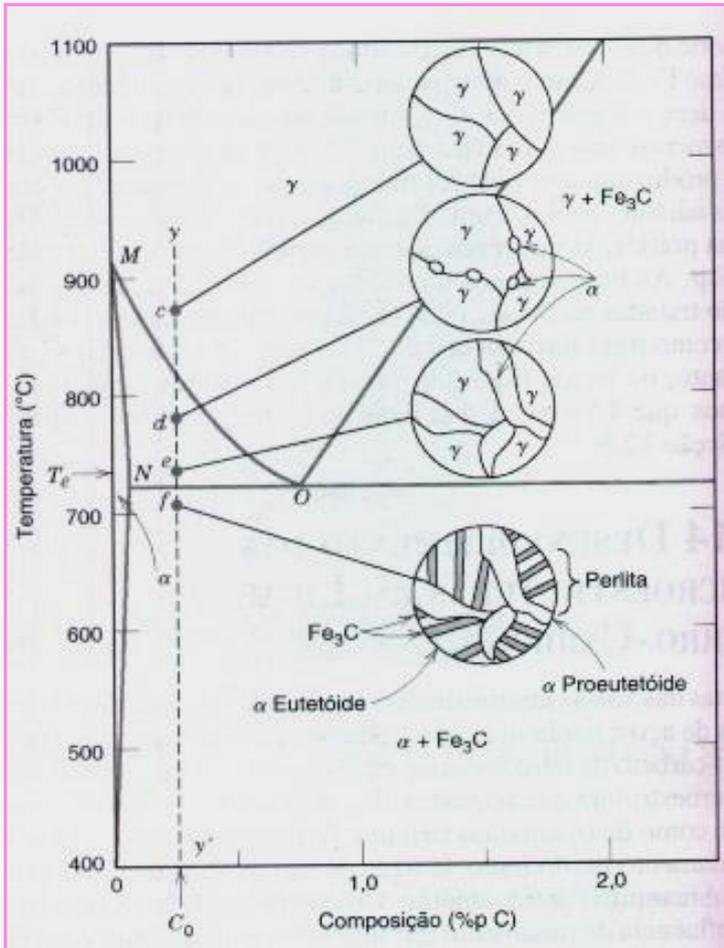


Curvas de resfriamento e estruturas formadas em aço eutetóide

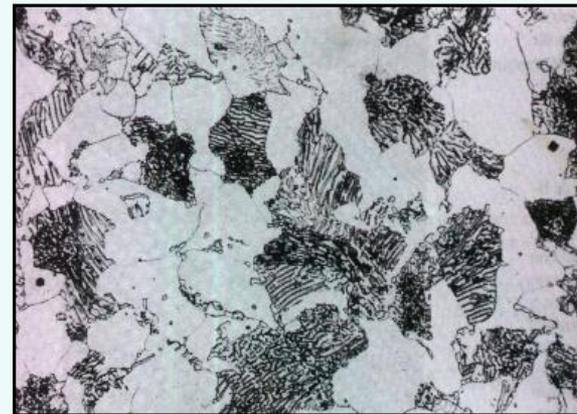


Resfriamento lento de um aço hipoeutetóide (%C < 0,77)

- Ao resfriar lentamente uma estrutura austenítica na faixa de composição mostrada, esta entrará inicialmente na região $\alpha + \gamma$, onde ocorrerá a formação da fase ferrita.
- Abaixo de 723°C a porção restante da austenita se transformará em perlita.



Microestrutura : ferrita + perlita.



Curva TTT de um aço hipoeutetóide

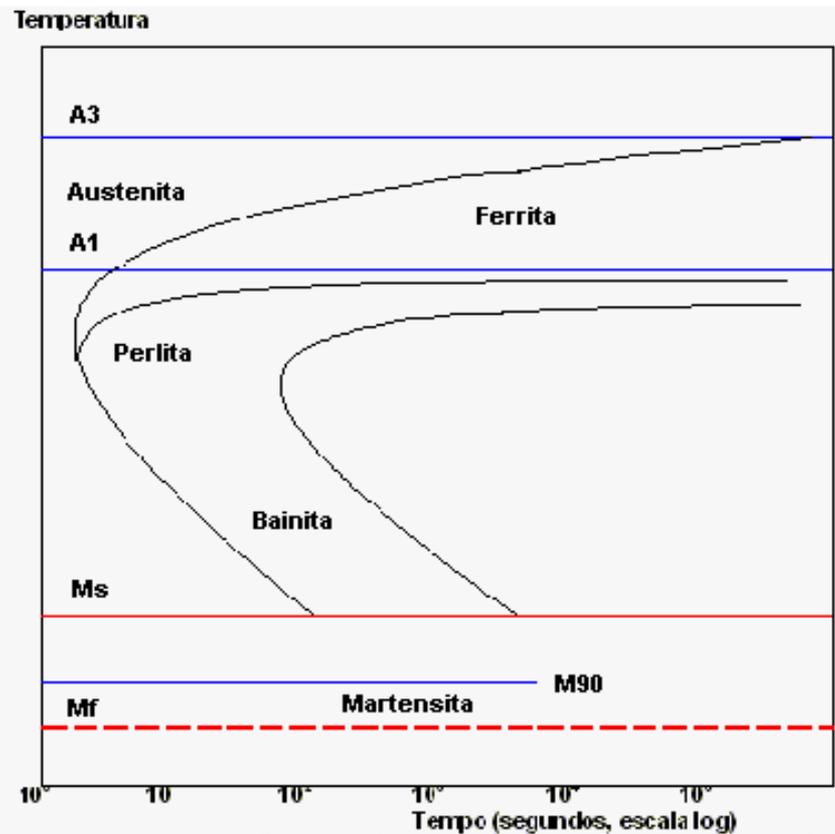
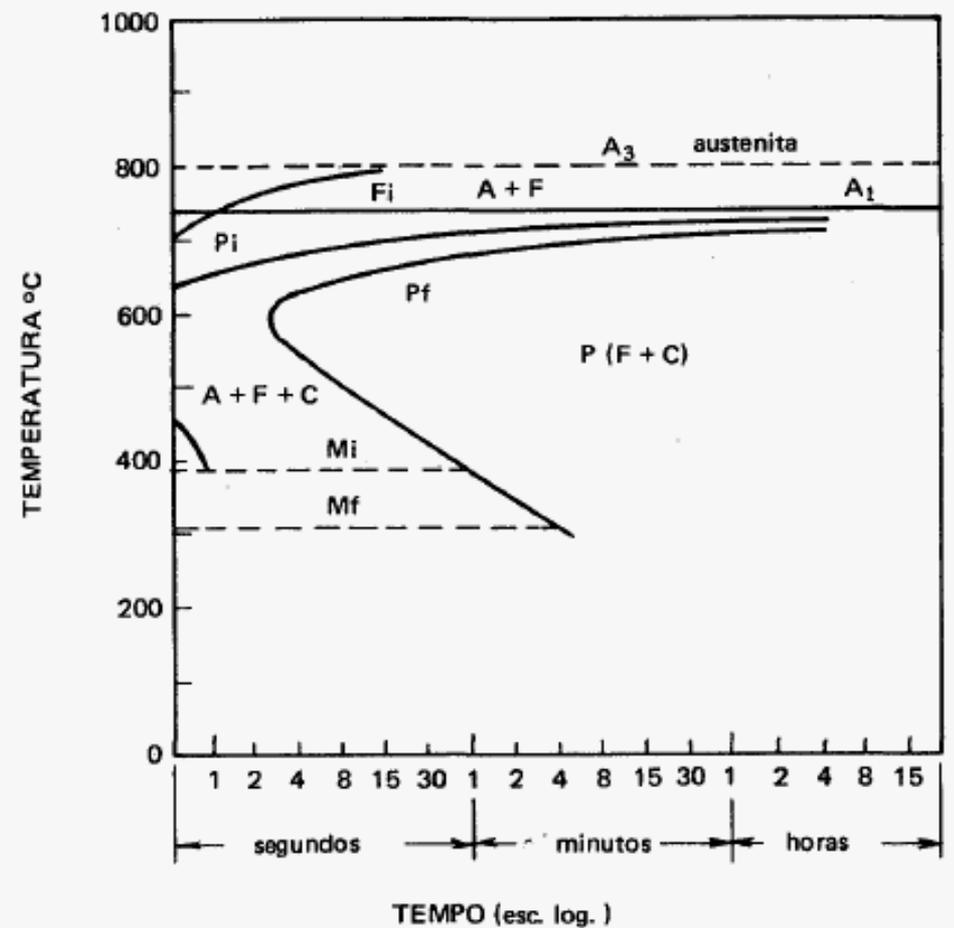
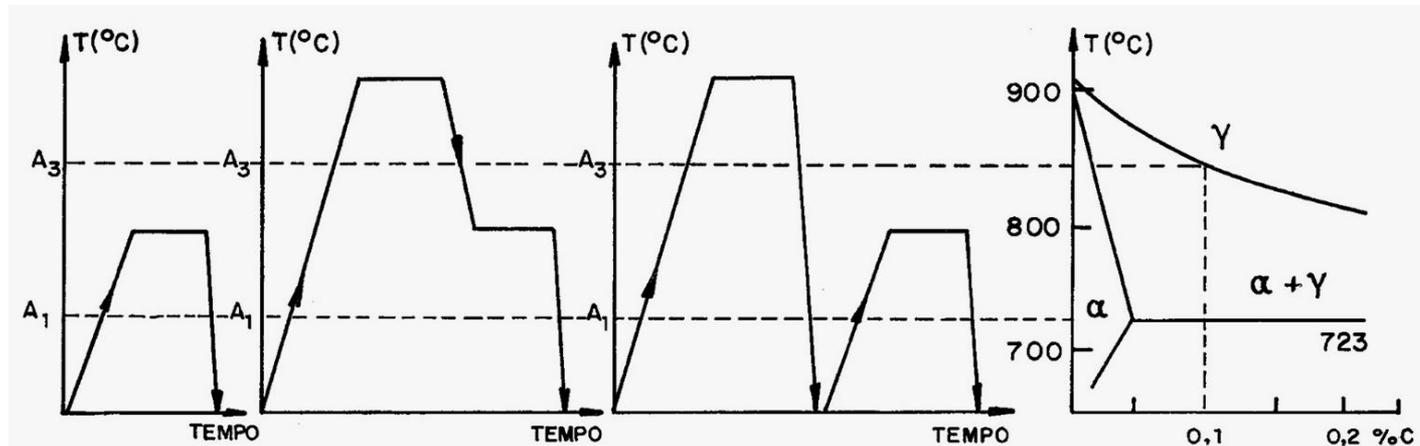


Figura 1 - Representação esquemática da Curva TTT de um aço hipoeutetóide

Aço de baixo carbono:



Tratamentos térmicos intercríticos para obtenção de aços bifásicos

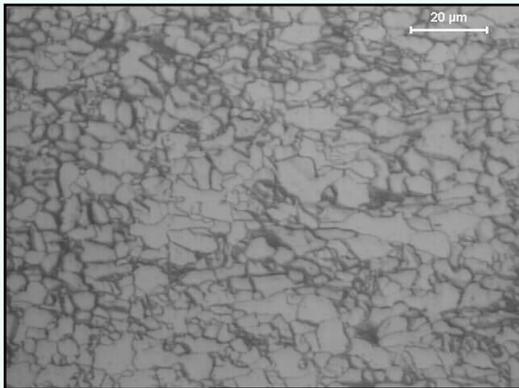
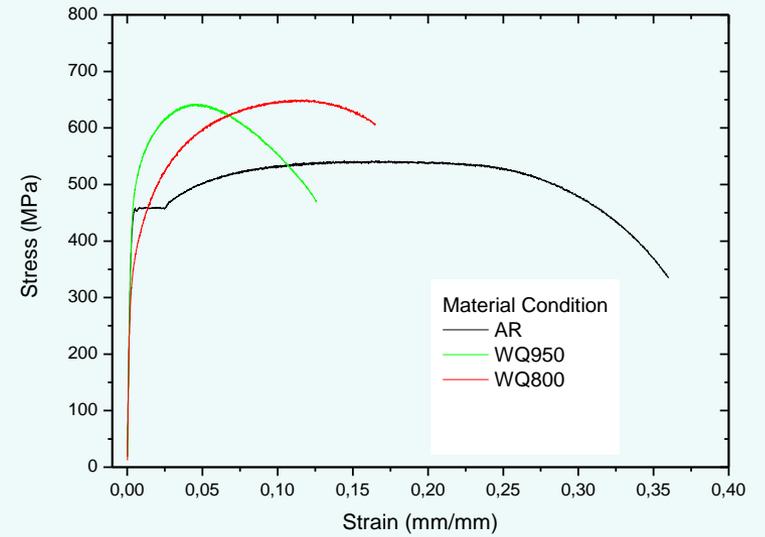


- Resfriamento rápido a partir do campo $\alpha + \gamma$
- Diferentes rotas possíveis

Teor de C do aço	→	Morfologia das fases
Rota de tratamento		Teor de Martensita
Patamar intercrítico		Dureza da Martensita



- Exemplo: trabalho experimental



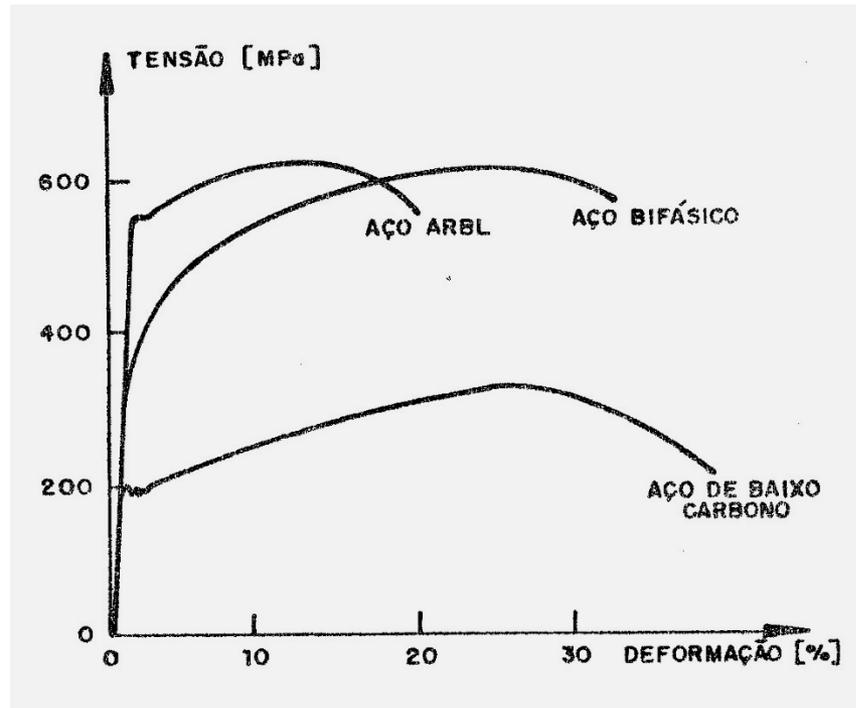
Material de partida.



Após tratamento térmico intercrítico.



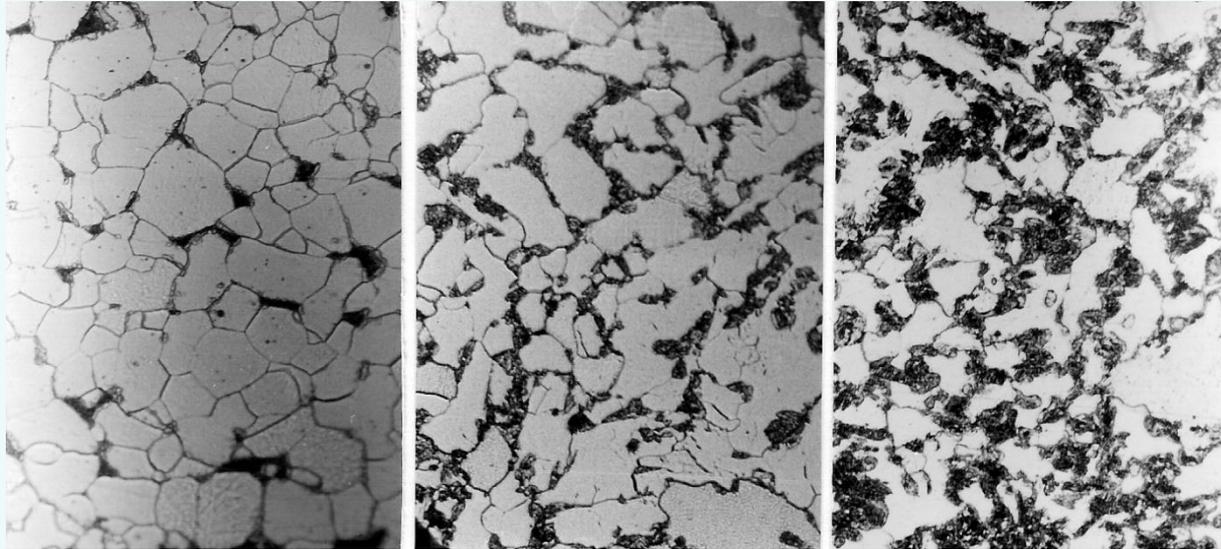
Aços Bifásicos: propriedades



- Elevada resistência à tração sem perda significativa da ductilidade.
- Ausência do patamar de escoamento e alta taxa inicial de encruamento.
- Formabilidade.
- Possibilidade de otimização de suas propriedades.



- Microestruturas bifásicas e propriedades mecânicas em aço de baixo carbono



NT750

NT800

NT850

Tratamentos térmicos de têmpera intercrítica

MATERIAL:

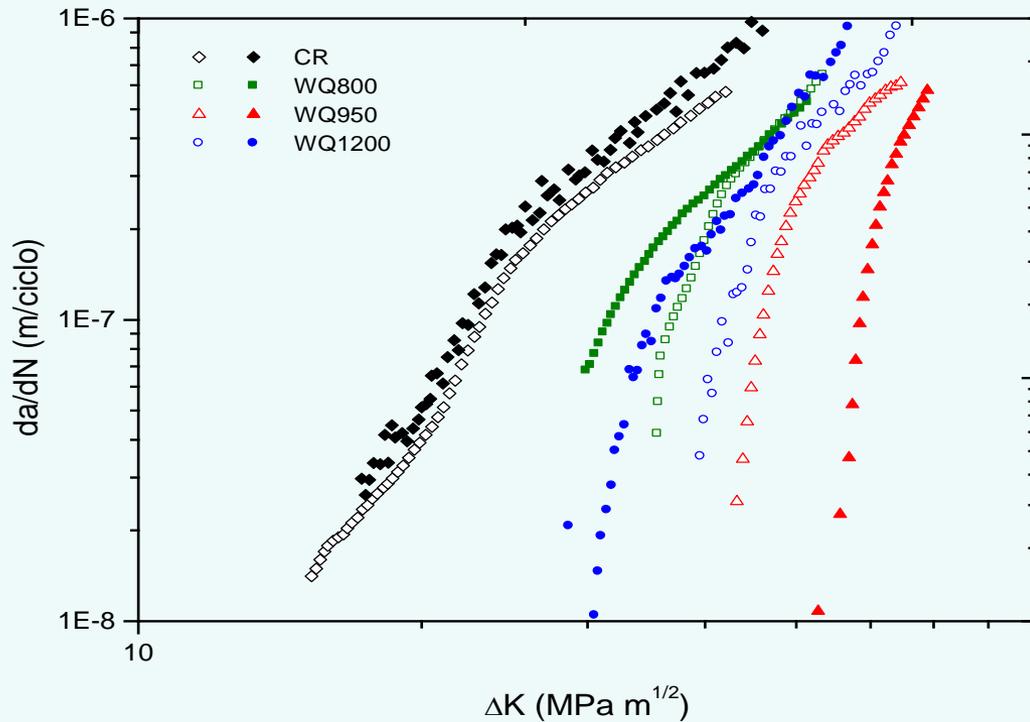
AÇO SAE 1010

(251 MPa / 367 MPa)

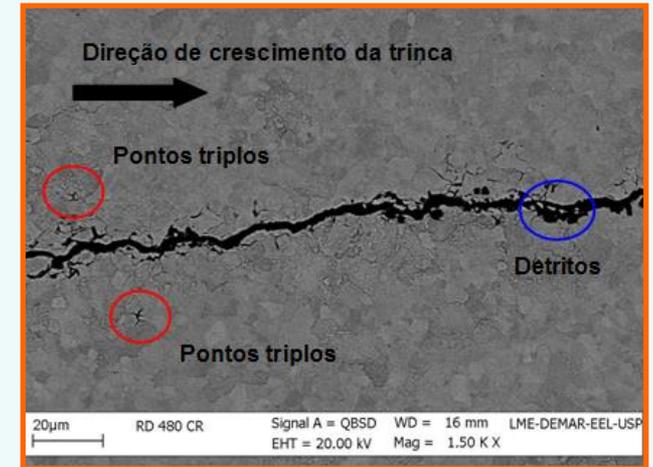
Material	Martensita (% vol.)	Martensita (HV)	σ_e (MPa)	σ_t (MPa)	RA (%)
NT750	23	551	387	593	58
NT800	30	454	400	615	61
NT850	51	331	364	547	68

- Propagação da trinca por fadiga

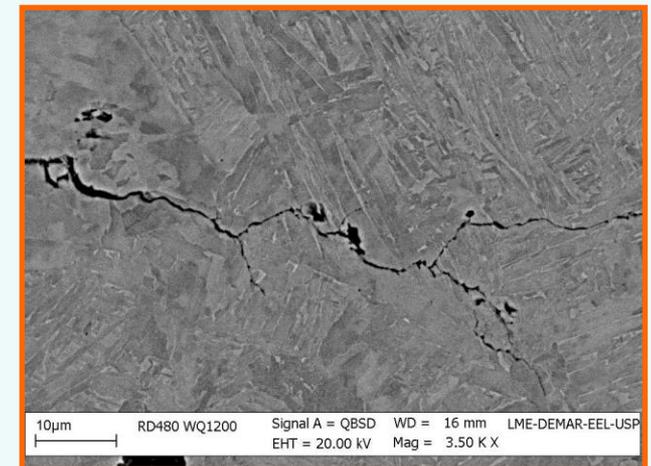
Curvas da/dN versus ΔK



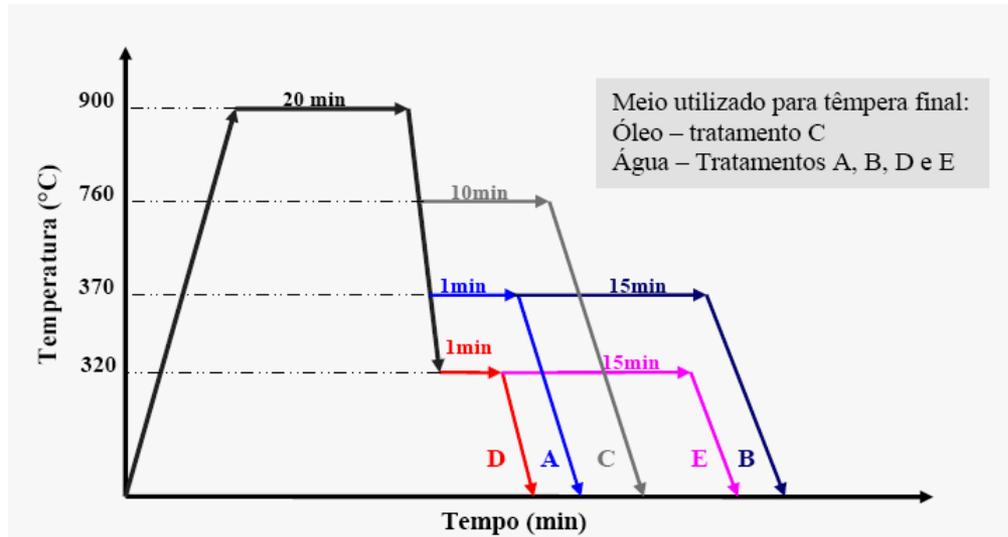
Condição CR



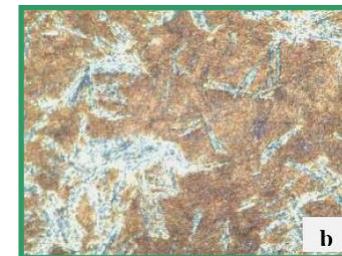
Condição WQ1200



- Tratamentos térmicos em aços ARBL para obtenção de estruturas multifásicas



*Reagente:
Le Pêra*

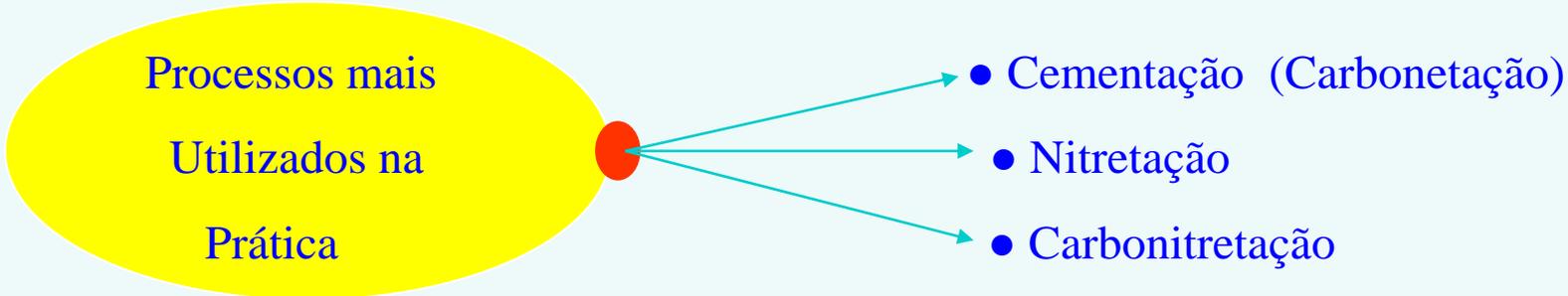


Tratamentos Térmicos Aplicados	Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)		Alongamento (%)		Estricção (%)		Dureza (Rockwell C)	
	4340	300M	4340	300M	4340	300M	4340	300M	4340	300M
Recozido	899	1531	1073	1673	14,2	17,7	32,0	35,3	24	32
A	1826	1982	2113	2215	6,8	5,8	8,7	17,2	30	34
B	1169	1372	1291	1588	13,7	7,3	49,1	18,7	22	29
C	1672	2035	2028	2154	13,1	14,8	33,3	24,4	27	41
D	2106	2180	2239	2322	3,9	1,9	15,8	4,1	34	45
E	1402	1387	1478	1592	14,3	10,7	50,8	29,6	32	37



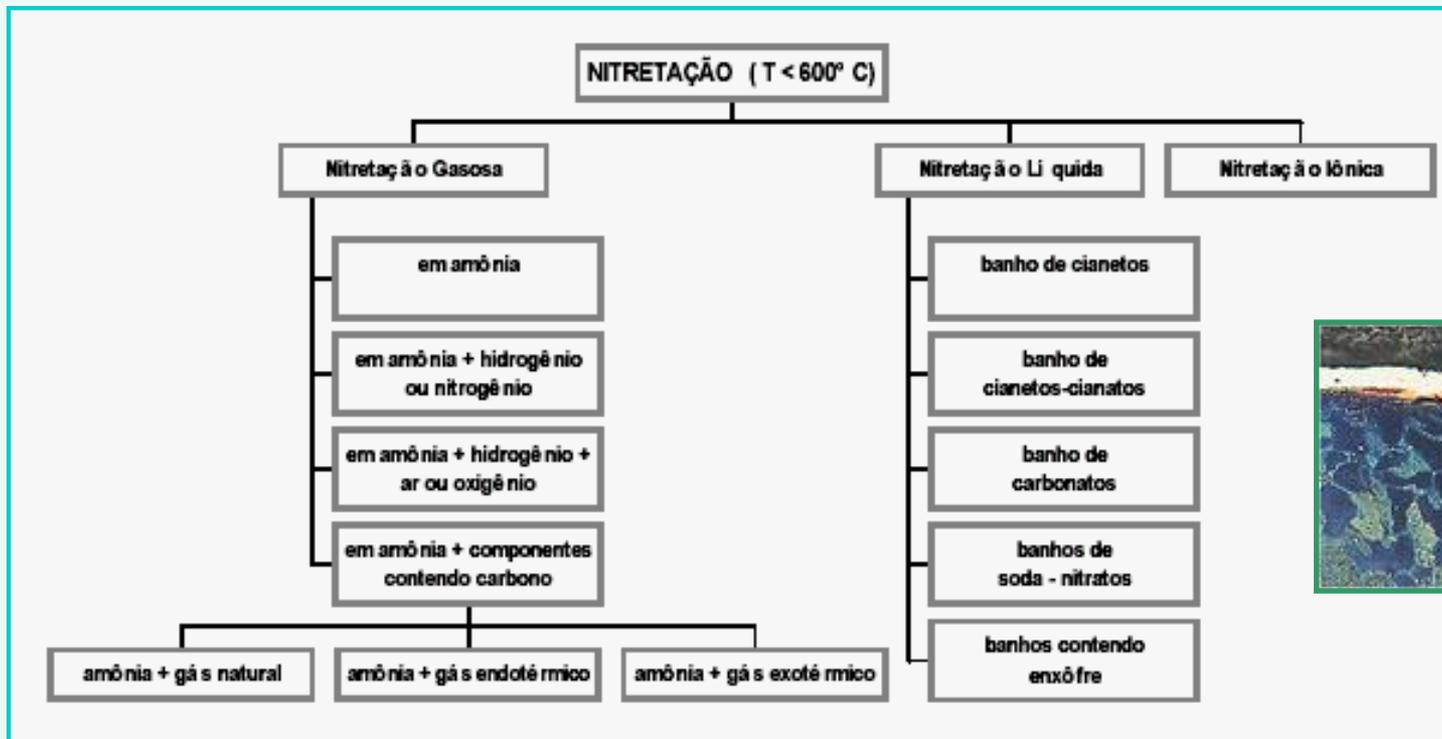
TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

- São tratamentos que visam o endurecimento superficial pela modificação parcial da sua composição química nas secções que se deseja endurecer
- A aplicação de calor em um meio apropriado pode levar a essa alteração da composição química até uma determinada profundidade.
- Esta profundidade depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência nesta temperatura.
- O objetivo principal é obter na superfície maior dureza e resistência ao desgaste ao mesmo tempo que se mantém um núcleo dúctil e tenaz.
- Em muitos casos é importante manter um núcleo tenaz, evitando fraturas frágeis (alcançados por exemplo com aços com elementos de liga) e a mantendo camadas de superfície duras com aumento na vida devido à resistência ao desgaste;



Nitretação

- Consiste na introdução de nitrogênio na superfície do aço, pelo aquecimento do mesmo a temperaturas da ordem de 500 a 570°C, para formar uma camada dura de nitretos. Por utilizar temperaturas menores que a cementação, a nitretação produz menor distorção e tem menor tendência a causar trincas no material. A nitretação melhora a resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão.



Superfície nitretada



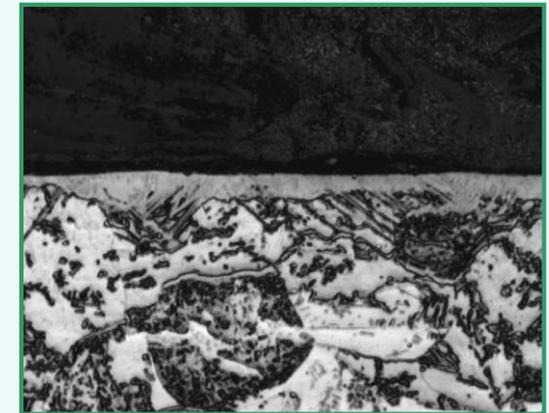
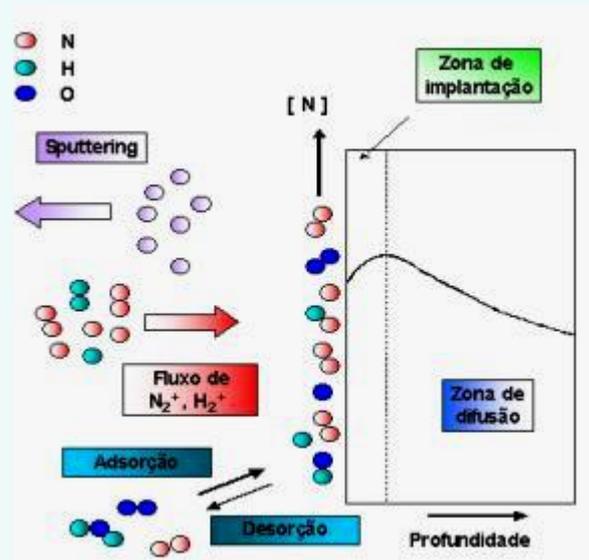
Nitreção

- Todos os processos de nitreção possuem em comum a criação de nitrogênio atômico necessário para a formação da camada nitretada, mudando apenas o meio saturante.
- O processo de nitreção consiste de três etapas:
 - 1 → A formação do nitrogênio atômico como resultado das diversas reações químicas;
 - 2 → A adsorção dos átomos de nitrogênio na superfície da peça; e,
 - 3 → A difusão dos átomos adsorvidos desde a superfície para o interior da peça.



Nitreção

- Nitreção a Plasma: realizado em níveis de vácuo que variam entre 100 Pa e 1.000 Pa. O processo de nitreção inicia-se pela aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, na presença de uma mistura gasosa composta basicamente de N_2 e H_2 parcialmente ionizados. os íons carregados positivamente são acelerados para a superfície do anodo (peça) e os elétrons são direcionados para o catodo (carcaça). Após a implantação, estes íons neutralizam-se e penetram por difusão térmica no material.

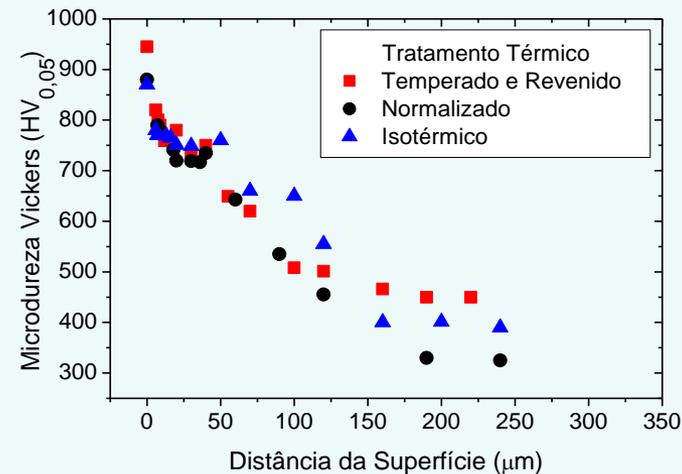


Nitreção

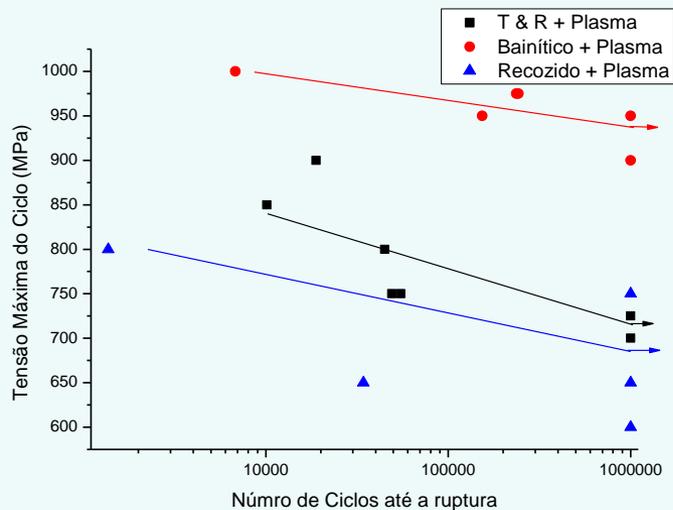
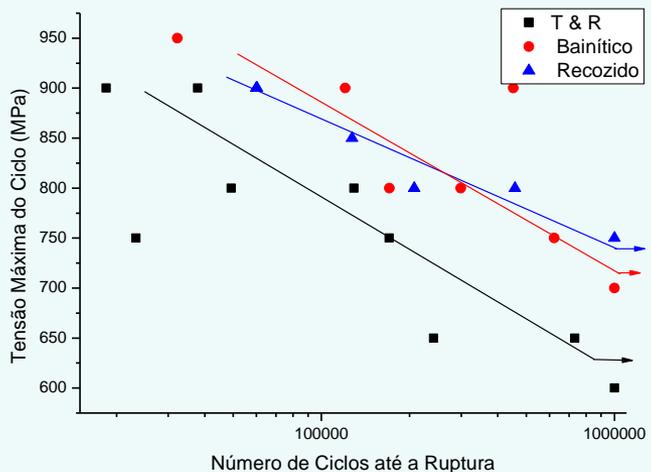
- Comportamento em fadiga do aço SAE 4340:

Elementos	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
4340 (% peso)	0,39	0,0010	0,017	0,26	0,64	0,80	1,82	0,22

Dureza Vickers em função da distância à superfície nitretada



Curvas S/N (fadiga axial)



FIM do Capítulo 2

