

Disciplina

## Processamento de Materiais I

### 4 - Metais

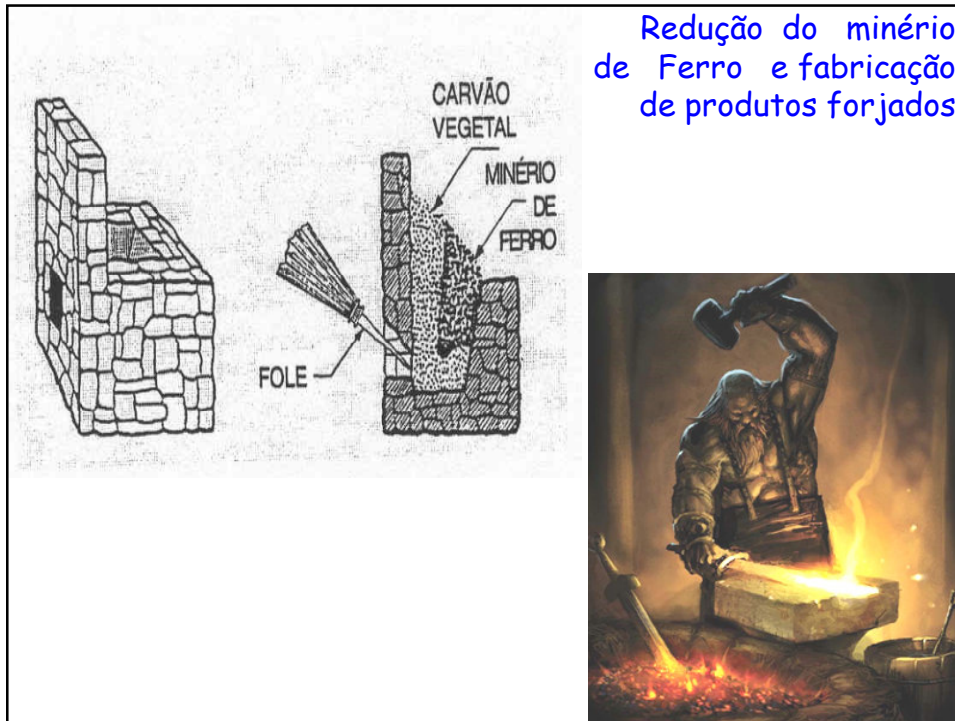
Professor Sandro Donnini Mancini

Sorocaba, Março de 2012

A utilização dos *materiais* teve importância histórica:

- Idade da Pedra;
- Idade da Pedra Lascada;
- Idade do Bronze (4000 a 1400 a.C.);  
Cobre foi o metal mais fácil de achar no estado nativo
- 4000 a.C. - utilizado na fabricação de armas e ferramentas;
  - ~2000 a.C. - primeiros indícios de Ferro (óxidos em meteoritos);
- 1400 a.C. - redução do minério de Ferro e fabricação de produtos forjados;
  - 1780 - popularização do aço, utilizando-se coque como fornecedor de carbono = possibilitou a Revolução Industrial;
- 1856 - Queima do C com sopro de  $O_2$  = aço de %C inferiores.

Redução do minério de Ferro e fabricação de produtos forjados



- Brasil: Fábrica de Ferro São João do Ipanema: 1818 ~1895.
- Local possuía reservas de magnetita ( $Fe_2O_2$ );
- E madeira (floresta) para fabricação de carvão.
- Produção principal: armas.

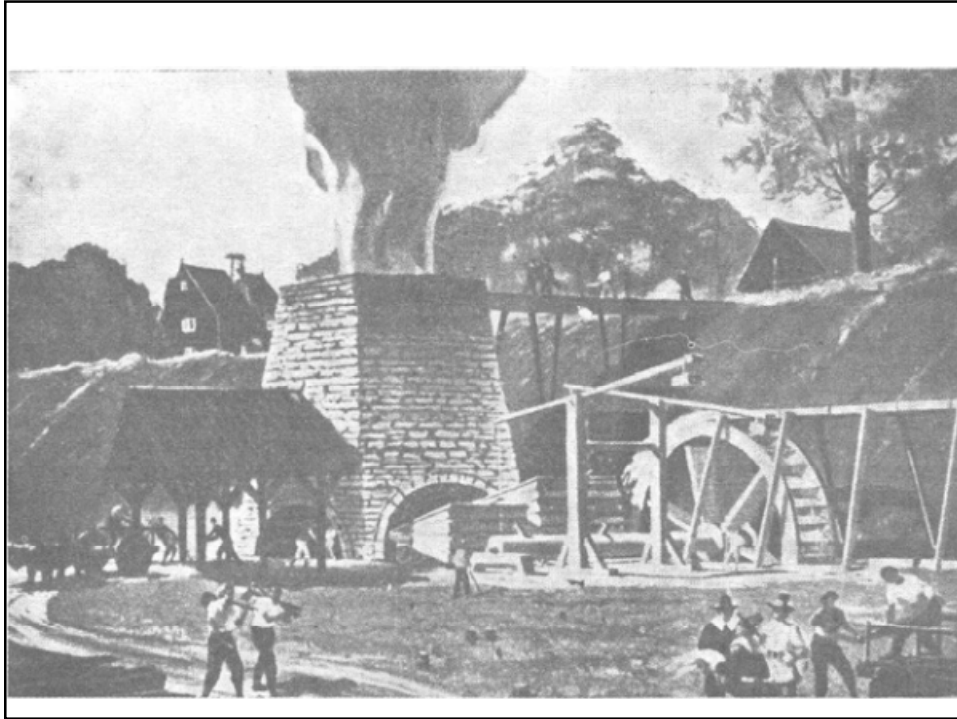


Carvoaria



"Alto"-forno

Fotos: André Bonacin



### Características típicas de metais:

- capacidade de deformar plasticamente (segurança estrutural);
  - condutividade térmica e elétrica elevada;
  - alguns apresentam propriedades magnéticas;
  - alguns são refratários (suportam altas T);
  - alguns resistem muito a intempéries e oxidação;
- agüentam solicitações mecânicas críticas (trem de pouso, p.ex.);
  - as propriedades se relacionam com densidade e custo adequados.



## Definições

**Metalurgia** - obtenção de metais ferrosos e não-ferrosos

**Metalurgia Extrativa** (alguns exemplos no próximo slide):

Pirometalurgia (altas T)

Hidrometalurgia (lixiviação de matérias primas com soluções)

Eletrometalurgia (movimento de cargas elétricas)

**Siderurgia** - obtenção de produtos a base de ferro e aço.

Pirometalurgia	Extração	Redução de Óxidos	Carbotérmica (por C)	Fe-gusa, Fe-esponja, Fe-ligas (Mn, Si, Cr), Pb, Sn, Zn, Si, Cu, Ni
			Metalotérmica (por Al)	Nb, Cr Fe-ligas (Nb, Ti, V)
			Metalotérmica (por Al)	Mn Fe-ligas de baixo C
		Redução de Cloretos e outros halogenetos	Metalotérmica (por Mg)	V, Zr, Ti
	Refino	Oxidação de Impurezas (refino a fogo)		Aço, Cu, Pb
		Redução de Cloretos e outros halogenetos	Por H <sub>2</sub>	Si, Ge
Eletrometalurgia	Extração			Al
	Refino e Purificação			Cu, Zn, Pb, Ni
Hidrometalurgia	Pré-extração			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Extração			Ni, Co
	Refino e Purificação			Si

Em 2008 o mundo consumiu aproximadamente 1,525 bilhão de toneladas de metais (polímeros: 130 milhões de toneladas) :

➤88% de Aço

Brasil é o 9º maior produtor, com 2,5% da produção mundial ;

➤6,4 % de Ferro Fundido

Brasil é o 7º maior produtor, com 3,4% da produção mundial;

➤1,5% de Ferroligas;

Brasil é o 6º maior produtor, com 4% da produção mundial;

➤4,1% de Não Ferrosos.

Al - Brasil era o 6º maior produtor (1,66 Mt), com 5% da produção mundial;

Cu - Brasil era o 20º maior produtor (184 kt), com 1,2% da produção mundial;

Ni - Brasil era o 13º maior produtor (36 kt), com 3% da produção mundial;

Zn - Brasil era o 12º maior produtor (249 kt), com 3% da produção mundial;

Sn - Brasil era o 7º maior produtor (11 kt), com 2,5% da produção mundial.

A partir dos dados do Ministério das Minas e Energia - Prévia da Indústria Mineral 2009/2008 e Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2009, disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Principais Bens Minerais	2009					2010 <sup>F</sup>				
	PRODUÇÃO		EXPORTAÇÃO		SALDO	PRODUÇÃO		EXPORTAÇÃO		SALDO
	P	P/C	Qtde	10 <sup>6</sup> US\$	10 <sup>6</sup> US\$	P	P/C	Qtde	10 <sup>6</sup> US\$	10 <sup>6</sup> US\$
Ferro	331 Mt	5,1	266 Mt	13.247	13.247	372,3 Mt	6,07	311 Mt	28.912	28.898
Minério	299 Mt	4,7	236 Mt	10.582	10.582	314,3 Mt	6,1	259 Mt	21.354	21.340
Pelotas	32 Mt	16,0	30 Mt	2.665	2.665	58 Mt	9,7	52 Mt	7.558	7.558
Bauxita	28 Mt	1,12	3,04 Mt	158	156	31,7 Mt	1,27	6,79 Mt	177	263
Alumina	7,8 Mt	3,4	5,52 Mt	1.298	1.284	9,5 Mt	3,1	6,42 Mt	1.716	1.716
Ouro	56,1 t	5,1	45 t	1.384	1.384	57,9 t	4,79	46 t	1.786	1.784
Cobre (Cu contido)	216 kt	1,32	179,2 kt	803	179	213 kt	4,26	189 kt	1.238	286
Manganês (concentrado)	2,3 Mt	3,33	1,61 Mt	186	184	2,6 Mt	7,37	2,3 Mt	357	352
Rochas Ornamentais	7,5 Mt	1,3	1,7 Mt	724	687	8,5 Mt	1,3	2,24 Mt	959	905
Caulim (beneficiado)	2,0 Mt	n.d.	2,04 Mt	253	246	2,4 Mt	n.d.	2,29 Mt	275	267
Crisotila	288 kt	2,2	156 kt	78	74	312 kt	1,85	143 kt	78	72
Magnesita (beneficiada)	410 kt	1,38	129,3 kt	45,8	32,4	439,5 kt	1,51	148,68 kt	53	34
Grafita	59,4 kt	1,2	13 kt	14	13	84 kt	1,33	22 kt	24	22
Gemas (brutas e lapidadas)	n.d.	n.d.	19,2 kt	112	104	n.d.	n.d.	21,88 kg	127	120
Diamantes (brutos)	n.d.	n.d.	58 kg	2,1	(6,7)	n.d.	n.d.	106 kg	3,7	(12,6)
Fosfato (concentrado)	6,1 Mt	0,98	915 kt *	84 *	(84)	6,3 Mt	0,00	1,40 Mt *	135 *	(135)
Potássio (K <sub>2</sub> O)	453 kt	0,10	3,87 Mt *	2.079 *	(2.070)	417 kt	0,10	3,67 Mt *	2.234 *	(2.234)
Enxofre	444 kt	0,29	1,51 Mt *	197,1 *	(196,8)	470 kt	0,20	1,90 Mt *	247 *	(247)
Areia	266 Mt	1,0	-	-	-	280 Mt	1,0	-	-	-
Pedra Britada	207 Mt	1,0	-	-	-	236 Mt	1,0	-	-	-
Argila p/ Cerâmica Vermelha	152 Mt	1,0	-	-	-	166 Mt	1,0	-	-	-
Calcário	62 Mt	1,0	-	-	-	67 Mt	1,0	-	-	-
Carvão Energético	5,6 Mt	1,0	628 t	0,44	0,442	6,0 Mt	1,0	497 t	0,33	0,333
Carvão Metalúrgico	0,3 Mt	0,01	14,5 Mt *	2.261 *	(2.261)	0,2 Mt	0,01	19,5 Mt *	3579 *	(3.579)
Água Mineral	6,0 (10 <sup>6</sup> L)	1,0	1,14 (10 <sup>6</sup> L)	1,0	0,254	8,5 (10 <sup>6</sup> L)	0,0	0,22 (10 <sup>6</sup> L)	0,078	(0,885)

Prévia da Indústria Mineral 2011/2010 - Disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Metais e Ligas	2009					2010 <sup>F</sup>				
	PRODUÇÃO		EXPORTAÇÃO		SALDO	PRODUÇÃO		EXPORTAÇÃO		SALDO
	P	P/C	Qtde	10 <sup>6</sup> US\$	10 <sup>6</sup> US\$	P	P/C	Qtde	10 <sup>6</sup> US\$	10 <sup>6</sup> US\$
Aço	26,5 Mt	1,33	8,9 Mt	4.938	2.123	32,8 Mt	1,10	9,0 Mt	5.794	310
Ferro-gusa	4,3 Mt	3,91	3,2 Mt	1.090	1.089	6,0 Mt	1,63	2,3 Mt	971	619
Fundidos	2,3 Mt	2,15	0,30 Mt	764	764	3,2 Mt	1,17	0,43 Mt	1.184	1.184
Ferro-ligas	560 kt	1,61	260 kt	1.427	1.301	560 kt	1,78	336 kt	2.039	1.788
FeNb [1%; 95%]	49 kt	16,3	45 kt	1.060	1.060	n.d.	n.d.	67 kt	1.557	1.277
FeSi [5%; 3%]	174 kt	3,35	142 kt	227	213	n.d.	n.d.	165 kt	294	267
FeMn [3%; 13%]	154 kt	1,05	36 kt	41	(9,5)	n.d.	n.d.	58 kt	78	(16)
FeNi	32 kt	1,60	12,2 t	47	44	n.d.	n.d.	0,102 t	1,8	1,8
FeCr [6%; 3%]	91 kt	0,99	5 kt	6	(6,8)	n.d.	n.d.	9,6 kt	15	(6,0)
Outras ligas	60 kt	1,67	18 kt	39	1,2	n.d.	n.d.	36,3 kt	94,4	(12,4)
Alumínio	1,54 Mt	1,55	914 kt	1.687	1.051	1,54 Mt	1,18	737,3 kt	1.766	624
Cobre	227 kt	0,64	122 kt	599	(715)	246 kt	0,53	103 kt	668	(1.796)
Níquel	23,4 kt	6,31	31 kt	221	151	41,9 kt	10,27	42 kt	431	323
Silício (metálico)	210 kt	2,97	143 kt	347	336	220 kt	4,60	179 kt	460	446
Zinco	242 kt	1,23	76 kt	99	48	288,1 kt	1,16	81 kt	143	42
Estanho	10,4 kt	1,42	3,8 kt	48	42	10,5 kt	1,2	1,9 kt	32	12
Chumbo	0	0	82 kt *	135	(135)	0	0	90 kt *	194	(194)

(\*) importação.

Fundidos: 83% ferro, 10% aço e 7% não ferrosos

Prévia da Indústria Mineral 2011/2010 - Disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Metal	Produção (kt)	Produção (%)	Exportação (kt)	Exportação (%)	Consumo (kt)	Consumo (%)
Aço	32.800	73,0	9.000	68,1	29.818	77,0
Gusa	6.000	13,4	2.300	17,4	3.681	9,5
Fundidos	3.200	7,1	430	3,3	2.735	7,1
Fe-Ligas	560	1,2	336	2,5	314	0,8
Alumínio	1.540	3,4	737	5,6	1.305	3,4
Cobre	246	0,5	103	0,8	464	1,2
Níquel	42	0,1	42	0,3	4	0,0
Si-metálico	220	0,5	179	1,4	48	0,1
Zinco	288	0,6	81	0,6	248	0,6
Estanho	10,5	0,0	2	0,0	9	0,0
Chumbo	0	0,0	0	0,0	90	0,2
Total	44.906,5	100,0	13.210	100,0	38.716	100,0

Importação: Produção + Consumo - Exportação  
 Fundidos: ~ 93% ferrosos; 7% não ferrosos

Tabela gerada com base em :  
 Prêvia da Indústria Mineral 2011/2010 - Disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Produção: 93,9% ferrosos; 6,1% não ferrosos;

Exportação: 91,1% ferrosos; 8,9% não ferrosos;

Consumo: 93,9% ferrosos; 6,1% não ferrosos.

Em 2009 a metalurgia no Brasil representou 2,7% do PIB.

(9% do PIB industrial)

Em 2008 a metalurgia no Brasil empregava 283 mil pessoas

(empregos diretos)

METALURGIA	unid.	2007	2008	2009	2010 <sup>p</sup>	10/09 (%)
FATURAMENTO	10 <sup>6</sup> US\$	64,1	78,2	53,5	70,0	
EXPORTAÇÕES (*)	10 <sup>6</sup> US\$	17,7	21,2	13,1	16,0	22,1
Participação Exportações Brasileiras	%	11,0	10,7	8,6	7,9	
IMPORTAÇÕES (*)	10 <sup>6</sup> US\$	7,2	9,7	6,3	11,3	79,4
Participação Importações Brasileiras	%	6,0	5,6	4,9	6,2	
SALDO da METALURGIA	10 <sup>6</sup> US\$	10,5	11,5	6,8	4,7	(30,9)
Participação no Saldo Brasileiro	%	26,0	46,2	26,8	23,5	

(\*) Inclui compostos químicos e outros manufaturados metálicos.

Prévia da Indústria Mineral 2011/2010

Em 2010 o Brasil produziu 44,906 Mt de metais (cimento: 55 Mt)  
exportou 13,5 Mt de metais

A partir dos dados do Ministério das Minas e Energia - Prévia da Indústria Mineral 2011/2010 e Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2008, disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Sucata é considerada fonte secundária de matéria-prima, não por qualidade e sim por quantidade.

Na metalurgia, de 30-60% da matéria-prima é sucata.

Considera-se quanto mais maduras são as indústrias, maior o uso de sucata.

Uso do Sucata no Brasil (2008) - EUA (2005)

- 27% no aço (54% nos EUA);
- 35% no alumínio (36% nos EUA);
- 27% no cobre (30% nos EUA);
- 62% no chumbo (75% nos EUA).



Consumo de Energia e emissões na reciclagem e no uso de matéria virgem com metais ferrosos (valores por tonelada produzida)

Item	Reciclados	Matéria Virgem	Economia
<b>Consumo de Energia (GJ/t)</b>	<b>20,0</b>	<b>33,5</b>	<b>13,5</b>
<b>Emissão atmosférica (g/t)</b>			
Particulados	864	26.955	26.091
CO	1.909	1.381	-528
NO <sub>x</sub>	2.350	2.733	383
N <sub>2</sub> O	226	417	191
SO <sub>x</sub>	5.347	8.450	3.130
HF	0	0,5	0,5
Hidrocarbonetos total	5.262	16.527	11.265
Amônia	1,6	73,5	71,9
<b>Emissões aquosas (g/t)</b>			
DBO	0,5	5,2	4,7
DQO	1,4	1,3	-0,1
Sólidos suspensos	301	318	17
Orgânicos totais	515	514	-1
Fenol	0	0,3	0,3
Amônia	0,7	6,5	5,8
Ferro	100	100	0
Cloreto	0	0	0
Fluoreto	21,6	33,4	11,8
Nitrato	0,4	0,3	-0,1
Sulfeto	0	0,2	0,2
<b>Resíduos sólidos (kg/t)</b>	<b>121,1</b>	<b>398,6</b>	<b>277,5</b>

Consumo de Energia e emissões na reciclagem e no uso de matéria virgem com alumínio (valores por tonelada produzida)

Item	Reciclados	Matéria Virgem	Economia
<b>Consumo de Energia (GJ/t)</b>	<b>15,6</b>	<b>171,2</b>	<b>155,6</b>
<b>Emissão atmosférica (g/t)</b>			
Particulados	1.222	37.388	36.166
CO	474	17.713	17.239
NO <sub>x</sub>	2.527	27.711	25.184
N <sub>2</sub> O	252	1.673	1.421
SO <sub>x</sub>	7.090	75.793	68.703
HCl	760	50	-710
HF	0	254	254
Hidrocarbonetos total	4.753	39.870	35.117
Amônia	3	20	17
<b>Emissões aquosas (g/t)</b>			
DBO	1	799	798
DQO	3	19.020	19.017
Sólidos suspensos	1	6	5
Orgânicos totais	28	173	145
Fenol	0	0	0
Amônia	0	1	1
Chumbo	0	1	1
Cloreto	0	0	0
Fluoreto	1	3	2
Nitrato	0	0	0
<b>Resíduos sólidos (kg/t)</b>	<b>237,6</b>	<b>876,5</b>	<b>638,9</b>

Consumo de energia na produção de metais primários e secundários					
Nº	Metal	Energia empregada na produção de 1 tonelada		Energia poupada na reciclagem	
		Metal primário (kWh/t)	Metal secundário (kWh/t)	(kWh/t)	(%)
1	Níquel	23 000	600	22 400	97
2	Alumínio	17 600	750	16 850	96
3	Zinco	4 000	300	3 700	93
4	Magnésio	18 000	1 830	16 170	90
5	Chumbo	3 954	450	3 504	89
6	Cobre	2 426	310	2 116	87
7	Estanho	2 377	360	2 027	85

Mano, E.B.; Pacheco, E.B.A.V. e Bonelli, C.M.C. *Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem*. Rio de Janeiro: Ed. Edgard Blucher, 2005.

### O Déficit em Carvão

- O setor metalúrgico consumiu em 2007 quase 15 milhões de toneladas de carvão mineral (99% importado), sendo 70% para fabricação de coque, o que gerou 8,3 milhões de toneladas de coque (se somou a outras 1,5 milhão t de coque importado);
- O setor consumiu, também em 2007, 8 milhões de toneladas de carvão vegetal (86% do consumo nacional, sem importação), produzidas a partir de 39 milhões de toneladas de lenha (total consumido de lenha em 2007 = 92 milhões de toneladas);
- 73% do carvão vegetal consumido na produção de ferro-gusa no pólo de Carajás (PA e MA, ~40% da produção de gusa nacional) é proveniente de lenha da mata nativa.

Morello, T.F. e Piketty, M.G. Transição das Siderúrgicas do Polo de Carajás para um Padrão de Baixa Contestabilidade Socioambiental. Disponível em [http://www.fipe.org.br/publicacoes/downloads/bif/2010/10\\_20-24-thiag-marie.pdf](http://www.fipe.org.br/publicacoes/downloads/bif/2010/10_20-24-thiag-marie.pdf)  
 Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2009. Disponível em <http://www.mme.gov.br/sgm/menu/publicacoes.html>

Tabela 3.7.2.a | Setor Industrial – Ferro-gusa e Aço  
Table 3.7.2.a | Industrial Sectors – Pig-Iron and Steel

FONTES	10 <sup>1</sup> tep (toe)										SOURCES
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
GÁS NATURAL	779	781	900	911	936	1.113	1.105	1.214	1.158	866	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL	1.651	1.587	1.902	2.182	2.455	2.374	2.352	2.516	2.655	2.048	STEAM COAL
ÓLEO DIESEL	30	22	35	36	40	44	40	14	14	14	DIESEL OIL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	110	103	105	117	79	82	107	145	142	114	FUEL OIL
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	113	105	81	82	56	100	85	88	97	77	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NAPHTHA
QUEROSENE	5	2	2	1	1	1	1	0	0	1	KEROSENE
GÁS DE COQUERIA	932	891	879	972	1.037	1.016	980	1.039	1.065	1.011	GAS COKE
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GASWORKS GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL	6.413	6.221	6.582	6.470	6.574	6.067	5.763	6.320	6.289	4.969	COAL COKE
ELETRICIDADE	1.265	1.200	1.289	1.382	1.452	1.397	1.452	1.579	1.602	1.279	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	3.660	3.439	3.561	4.057	4.902	4.804	4.636	4.775	4.679	2.724	CHARCOAL
ALCATRÃO / OUTRAS SEC. PETRÓLEO	328	415	392	492	413	462	464	551	528	533	COAL TAR / OTHER PETROLEUM SECONDARIES
TOTAL	15.285	14.767	15.729	16.701	17.945	17.459	16.985	18.240	18.229	13.636	TOTAL

Tabela 3.7.6.b | Setor Industrial – Não Ferrosos e Outros Metálicos  
Table 3.7.6.b | Industrial Sectors – Non-Ferrous and Other Metallurgical

FONTES	%										SOURCES
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
GÁS NATURAL	3,4	4,1	6,2	6,5	8,5	9,0	9,3	10,6	11,3	11,8	NATURAL GAS
ÓLEO COMBUSTÍVEL	22,4	22,9	19,3	22,7	21,5	21,1	19,2	18,8	17,8	17,6	FUEL OIL
ELETRICIDADE	57,1	56,4	58,2	55,1	55,0	55,2	55,7	54,7	56,3	55,4	ELECTRICITY
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE PETRÓLEO	9,7	9,5	9,6	10,1	9,4	9,4	9,6	9,8	9,9	10,5	OTHER PETROLEUM SECONDARIES
OUTRAS NÃO ESPECIFICADAS	7,5	7,1	6,8	5,6	5,6	5,2	6,2	6,2	4,7	4,6	OTHERS
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	TOTAL

[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2\\_-BEN\\_-\\_Ano\\_Base/1\\_-BEN\\_2010\\_Portugues\\_-\\_Inglxs\\_-\\_Completo.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-BEN_-_Ano_Base/1_-BEN_2010_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf)

## Outros Impactos Ambientais da Metalurgia

- Responsável por 25% da emissão brasileira de 300 Mt de CO<sub>2</sub>: 63,8 Mt para o segmento de ferro-gusa e aço; 3,9 Mt para o de ferroligas e 8,1 Mt para o de não-ferrosos (2005);
- Setor metalúrgico foi responsável por 24,2% do consumo energético do setor industrial e 12,1% do consumo total de energia do país (2008);
- Setor foi responsável por 33,2% do consumo de eletricidade do setor industrial e 15,4% do consumo total de energia elétrica do país (2008).

POSIÇÃO DO BRASIL NAS RESERVAS MUNDIAIS 2003	POSIÇÃO	MINERAL	PARTICIPAÇÃO (%)
	1ª	Nióbio	97,5
		Tantalita	46,2
	2ª	Grafita Natural	26,8
	3ª	Vermiculita	5,7
	4ª	Estanho	11,9
		Magnesita	8,7
		Manganês	2,5
5ª	Ferro	6,8	

Fonte: DNP/DEEM; USGS.

POSIÇÃO DO BRASIL NA PRODUÇÃO MUNDIAL 2003	POSIÇÃO	MINERAL	PARTICIPAÇÃO (%)
	1ª	Nióbio	91,0
	2ª	Ferro	20,9
		Tantalita	19,2
	3ª	Manganês	16,0
		Alumínio	12,1
		Caulim	11,5
	4ª	Grafita	9,0
		Magnesita	8,5
	5ª	Vermiculita	5,4
		Crisolita (amianto)	11,0
		Estanho	4,6

Fonte: DNP/DEEM; USGS.

Os elementos mais abundantes da crosta terrestre

Componentes	Símbolo	Porcentagem (em massa)
Oxigênio	O	49,20
Silício	Si	25,67
Alumínio	Al	7,50
Ferro	Fe	4,71
Cálcio	Ca	3,39
Sódio	Na	2,63
Potássio	K	2,40
Magnésio	Mg	1,93
Hidrogênio	H	0,87
Titânio	Ti	0,58
Cloro	Cl	0,19
Fósforo	P	0,11
Manganês	Mn	0,09
Carbono	C	0,08
Enxofre	S	0,06
Demais elementos		

[http://www.profpc.com.br/Qu%C3%ADmica\\_descritiva.htm](http://www.profpc.com.br/Qu%C3%ADmica_descritiva.htm)

A fabricação de produtos metálicos pode envolver:

- Preparo do metal e/ou liga (geralmente fusão e solidificação);
  - Usinagem;
  - Conformação Plástica;
  - Soldagem;
  - Metalurgia do Pó.

Processos Mecânicos Aplicação de Tensões ( $\sigma$ )	Conformação por Deformação Plástica ( $\sigma < \sigma_{ruptura}$ )	Forjamento Extrusão Laminação Trefilação
	Conformação por Corte de Usinagem ( $\sigma > \sigma_{ruptura}$ )	Torneamento Fresamento Plainamento Retificação
Processos Metalúrgicos Aplicação de Temperaturas ( $T$ )	Conformação por Solidificação ( $T > T_{fusão}$ )	Fundição Lingotamento Soldagem
	Conformação por Sinterização ( $T < T_{fusão}$ )	{ Metalurgia do pó

CAMPOS FILHO, M.P. e DAVIES, G.J. Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978

## FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO

Pela fundição ou lingotamento, o metal é fundido em fornos (elétricos, a gás etc.) e depois derramado para solidificação. Apesar da aparente simplicidade dos processos, muito tem que ser estudado de cada etapa para que haja a maximização das propriedades finais do produto metálico, a minimização dos custos ( $\downarrow$  tempo e energia gasta) e reprodutibilidade.

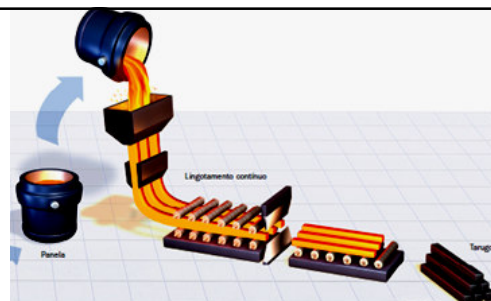
A fundição tem o objetivo de dar forma adequada ao metal, após vertê-lo em estado líquido dentro da cavidade de um molde com a forma desejada (batelada).



O lingotamento convencional é conceitualmente semelhante à fundição, porém há uma sequência de moldes.

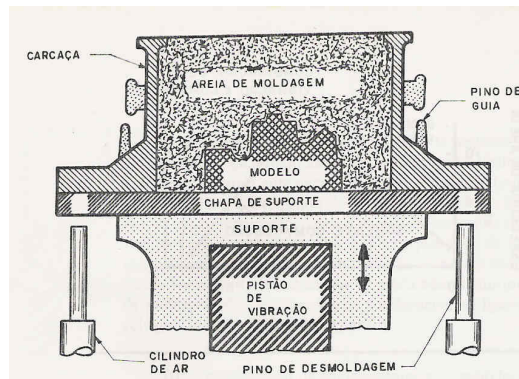


No lingotamento contínuo o molde é um perfil (duas dimensões fixas e a terceira "infinita"), que será resfriado e cortado.



## Fundição:

**MODELO** - macho - reutilizável - em madeira, normalmente  
**MOLDE** - fêmea - de areia, gesso, cerâmica, metal  
permanente ou não  
problemas - recuperação dos materiais do molde  
pó



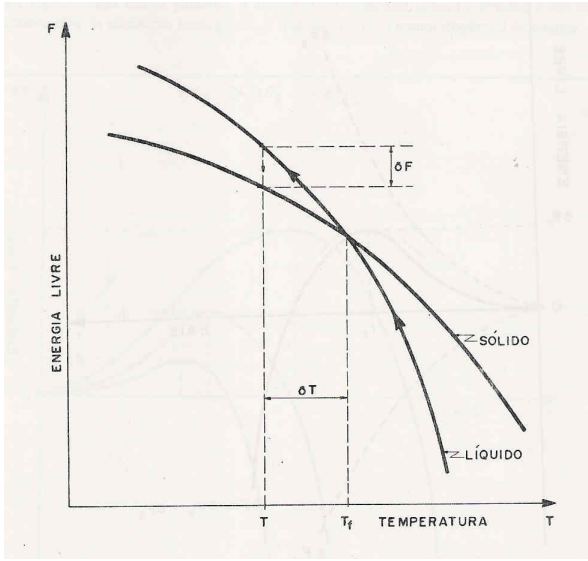
CAMPOS FILHO,  
M.P. e DAVIES,  
G.J. Solidificação  
e Fundição de  
Metais e suas  
Ligas. Rio de  
Janeiro: Livros  
Técnicos e  
Científicos  
Editora, 1978

Eventos da solidificação: nucleação, crescimento,  
redistribuição do soluto e variações da morfologia da interface  
sólido/líquido

Variáveis da solidificação: velocidade, gradientes térmicos e  
composição química do metal

Fatores de qualidade do metal solidificado: estrutura,  
segregação e defeitos (bolhas, vazios, rechupes, trincas de  
contração, rebarbas etc)

Nucleação traduz o modo pelo qual a fase sólida surge de  
forma estável no seio da fase líquida, sob a forma de pequenos  
núcleos cristalinos. Normalmente com a contribuição de  
elementos ou agentes estranhos (substratos) ao sistema metal  
líquido / metal sólido.

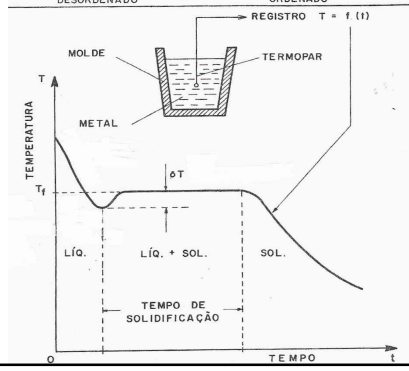
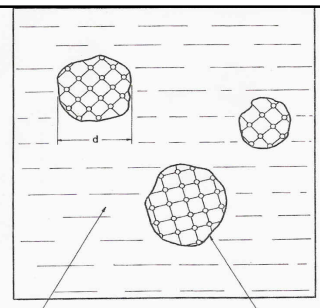


$\delta T$  é o super-resfriamento, variação de temperatura que deve haver para que haja a nucleação. O valor de  $\delta T$  é para nucleação com auxílio de substratos (heterogênea)

Para solidificar a fase sólida precisa ser mais estável termodinamicamente, ou seja, ter menor energia livre.

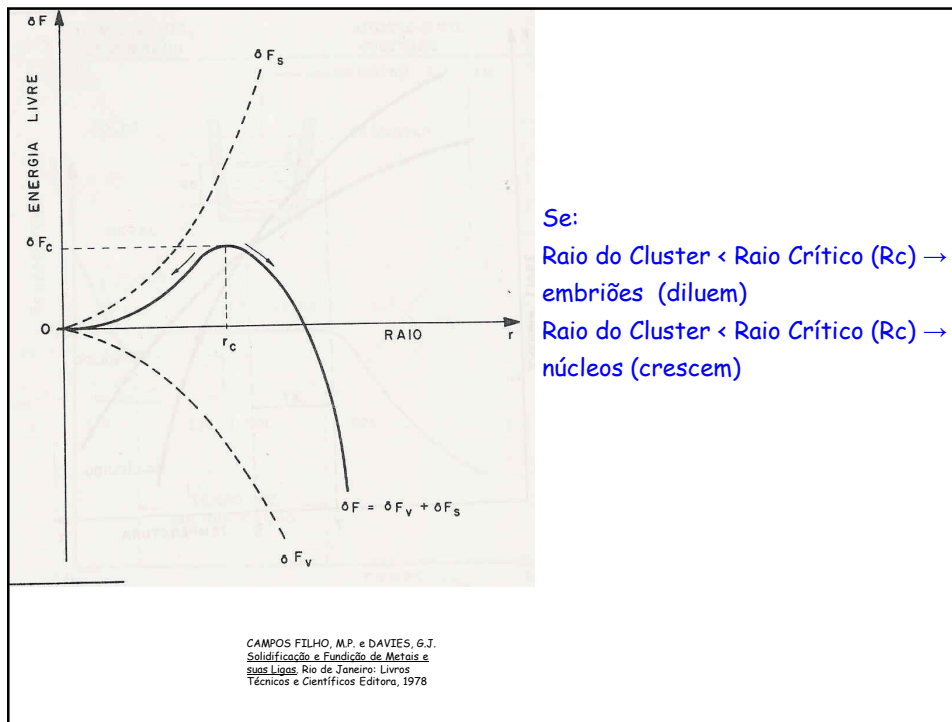
CAMPOS FILHO, MP e DAVIES, G.J. Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978

A estabilidade de um embrião pode ser analisada pelo seu tamanho (raio médio, considerando o formato esférico).



CAMPOS FILHO, MP. e DAVIES, G.J. Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978

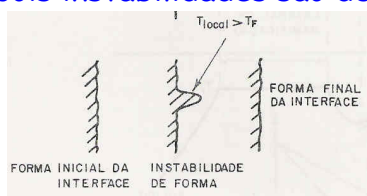




Refino de grão : O desempenho, principalmente mecânico, da peça fundida é melhor quanto menor o tamanho do grão. Inoculantes (p.ex., sais de B-Ti com hexaclorotetano no alumínio) são adicionados e funcionam como substratos.

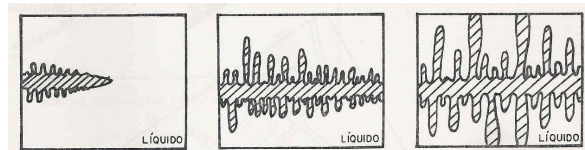
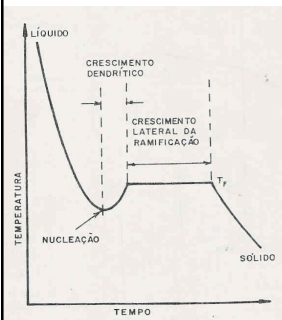
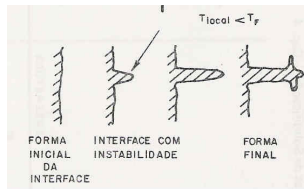
Crescimento : traduz o modo pelo qual esses núcleos crescem sob a forma de cristais ou grãos cristalinos, a qual vai depender da interface sólido-líquido (difusa ou facetada). A Temperatura da interface é igual à  $T_{fusão}$ .

Para  $T_{local} > T_{fusão}$ , avanço da interface (crescimento) é uniforme, planar, pois instabilidades são destruídas



CAMPOS FILHO, M.P. e DAVIES, G.J.  
 Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978

Para  $T_{local} < T_{fusão}$ , avanço da interface se dá pela sua descaracterização morfológica, crescendo de uma forma ramificada semelhante a uma árvore (em grego *dendrida*).



CAMPOS FILHO, M.P. e DAVIES, G.J. Solidificação e Fundição de Metais e seus Ligas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978

### USINAGEM - $\sigma > \sigma_{ruptura}$

Processo pelo qual a forma de uma peça é modificada pela remoção progressiva de cavacos ou aparas de material.

Permite:

- acabamento superficial de superfícies fundidas ou conformadas;
- possibilidade de abertura de furos, roscas, rebaixos, etc;
- reduzir custos, pois possibilita a produção de muitas peças;
- fabricação de somente uma peça a partir de um bloco metálico.

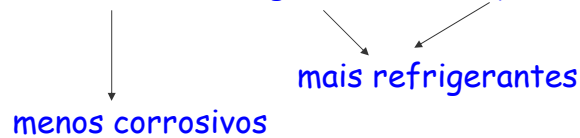
Operações de usinagem {  
 Torneamento  
 Fresagem  
 Retífica  
 Furação  
 Corte  
 Limagem  
 Aplainamento

A usinagem é basicamente um processo de cisalhamento, ou seja, ruptura por aplicação de uma força cortante. É realizada com o auxílio de conjunto de máquinas/ferramenta.

A ferramenta é o que vai efetivamente cortar a peça (p. ex., uma broca). As máquinas são os equipamentos que levam as ferramentas às peças (p.ex., furadeiras). As ferramentas devem ser mais duras que o material a ser cortado.

O cavaco formado pode aderir ao gume da ferramenta cortante e/ou à peça, o que piora o acabamento e dificulta a refrigeração da peça. Deve então ser removido conforme se forma, periodicamente. É reciclável, porém é leve, tem preço relativamente baixo e transporte difícil.

Fluido de corte (óleos, óleo + água, soluções aquosas):



- refrigera e diminui o atrito entre o conjunto ferramenta-peça-cavaco;
- aumenta a vida útil do equipamento e das ferramentas;
- protege a peça contra a oxidação (geralmente com o auxílio de aditivos) e o superaquecimento;
- afasta cavacos e aparas;
- Dependendo da máquina e da peça, uso chega a ser de milhares de litros por hora;
- pode ser recirculação (geralmente após filtração);
- É um efluente: deve ser tratado.



## Torneamento

Ferramenta de um só gume fica parada e retira o cavaco com o auxílio da rotação da peça.

3 movimentos - corte

avanzo (horizontal)

profundidade (vertical)

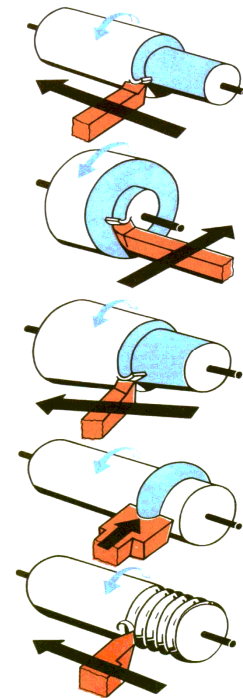
### Objetivos:

- tornear superfícies cônicas ou cilíndricas;
- abrir roscas;
- perfilar;
- facear;
- furar;

### Equipamento de torneamento:

Torno mecânico - Universal

CNC (comando numérico computadorizado)



<http://www.amq.com.br/redir/Oficina/Torno/Torneamento.htm>

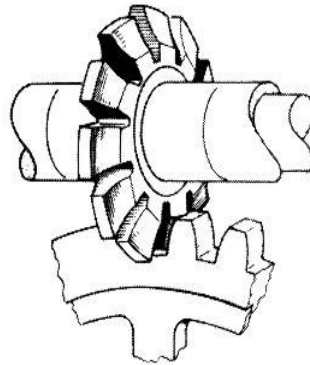
## Fresagem

Processo de usinagem que consiste na retirada de material da superfície de uma peça pela combinação de dois movimentos:

- rotação da fresa (a ferramenta);
- Avanço da mesa da máquina (onde se fixa a peça)

Várias superfícies cortantes: enquanto uma corta, as outras resfriam.

Utilizações: abertura de rasgos e perfis  
confeção de dentes de engrenagem.



<http://www.em.pucrs.br/~edir/Oficina/torno/Torneamento.htm>

## Retífica

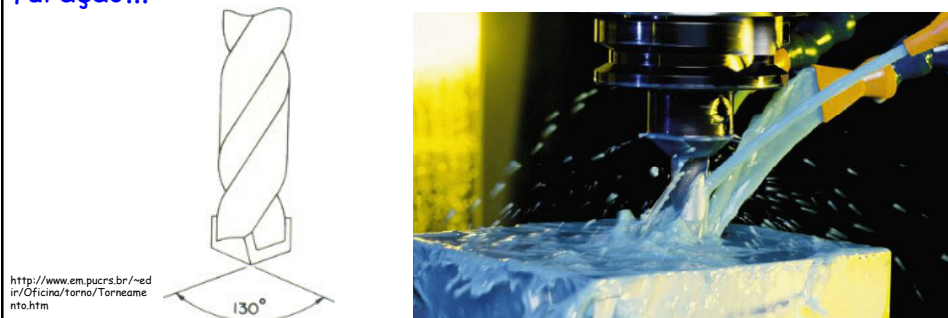
Processo de usinagem por abrasão que corrige irregularidades de superfícies (retífica): reduz rugosidades e saliências advindas de outros equipamentos de usinagem, remover camadas de material oxidado ou muito endurecido por têmpera.

Ferramentas: rebolos (discos grossos de alumina, carbetto de silício, etc)

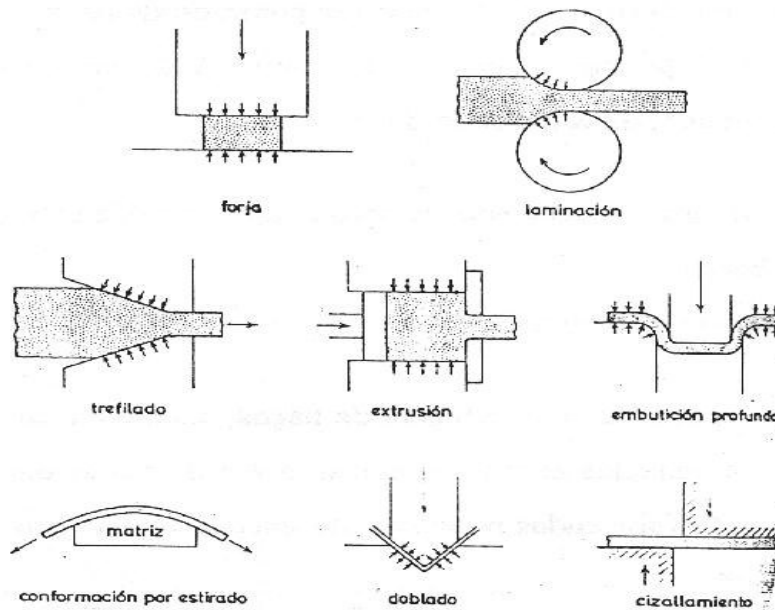


## Furação

Obtenção de furo cilíndrico pela ação de ferramenta giratória (brocas, normalmente helicoidais, de utilização industrial, doméstica e dentária), cuja ponta tem poder de penetração. Além do material que é feita a broca (pode ter ponta de diamante, vídia...), a penetração depende do ângulo de corte ( $130^\circ$  no desenho), do ângulo de hélice, da velocidade da furação...



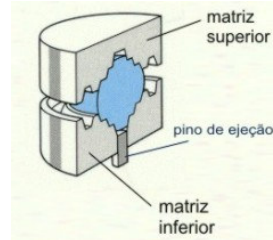
## CONFORMAÇÃO PLÁSTICA - $\sigma_{\text{escoamento}} < \sigma < \sigma_{\text{ruptura}}$



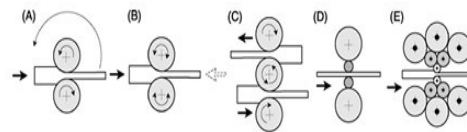
Operações típicas de conformação.

Dieter Jr., 6. Metalurgia Mecânica. Trad. F.M. Dal Corral. Madri, Ed. Aguilar, 1967/68pp.

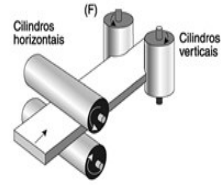
# Forja



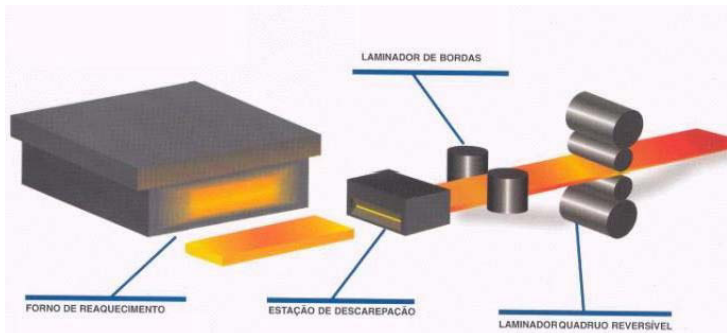
# Laminação

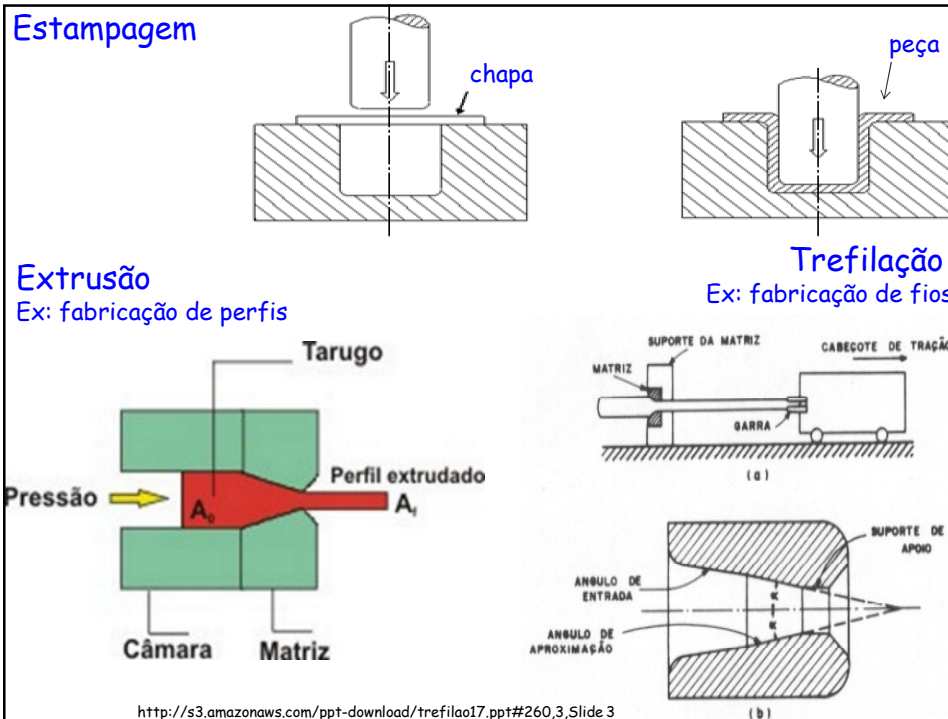


[http://www.abal.org.br/aluminio/processos\\_laminacao.asp](http://www.abal.org.br/aluminio/processos_laminacao.asp)



- (A) - Laminador duo não reversível;
- (B) - Laminador duo reversível;
- (C) - Laminador trio;
- (D) - Laminador quádruo;
- (E) - Laminador Sendzimir;
- (F) - Laminador universal





Principais fatores que afetam a conformação de metais:

Microestrutura Inicial (por exemplo, perlita grossa ou fina)

Temperatura:  $\uparrow T \downarrow \sigma \uparrow \text{oxidação}$   
 melhor a restauração microestrutural,  
 + diferenças entre centro e superfície

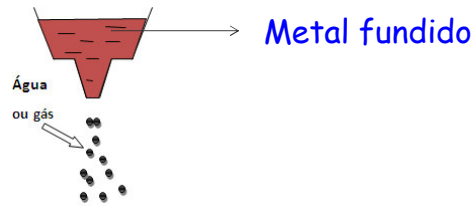
$T_{\text{trabalho}}$ : aço =  $\sim 1.100^{\circ}\text{C}$   
 $W \sim 2.500^{\circ}\text{C}$ ,  
 $Sn = T_{\text{amb}}$   
 trabalho a frio, geralmente necessita de recozimentos intermediários

Velocidade de Deformação:  $\uparrow v \downarrow t \text{ na } T_{\text{trabalho}} \uparrow T_{\text{trabalho}}$   
 Pior para dissipar o calor  
 Pior para recuperação elástica da deformação



## METALURGIA DO PÓ

Metal em pó pode ser produzido por atomização.

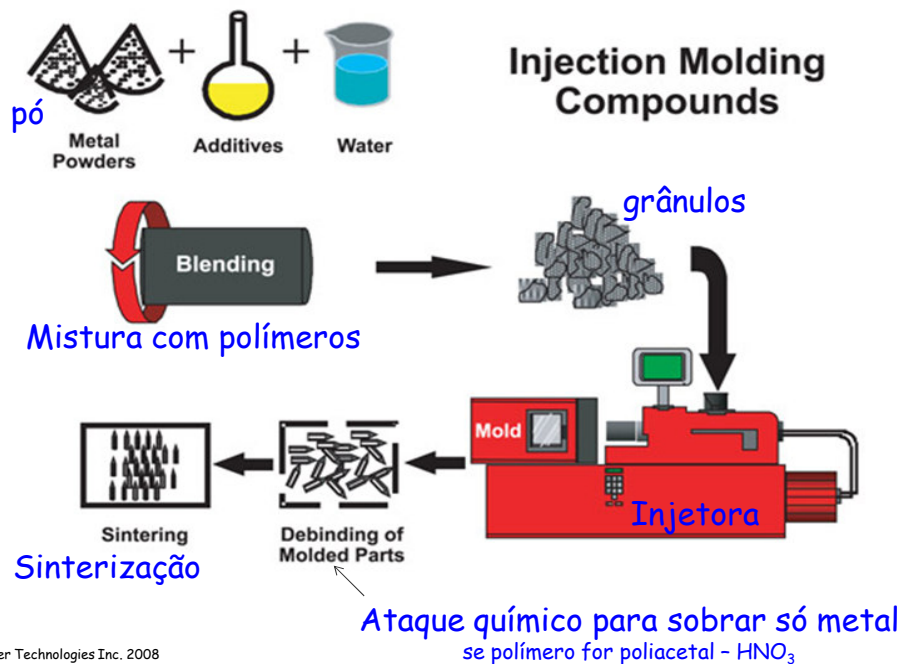


PÓ → COMPACTAÇÃO EM MOLDE → SINTERIZAÇÃO



Prensagem  
Injeção

## INJEÇÃO - MIM - METAL INJECTION MOLDING



## SOLDAGEM

União localizada de metais produzida por aquecimento e pressão. Pode se dar a partir da fusão das peças ou contar com metais de adição, o que formará soluções sólidas e/ou microestruturas diferenciadas próximas à região de solda. Essas alterações podem modificar propriedades, fazendo com que, normalmente, a junta soldada seja mais frágil que o resto da peça.

Metais de adição:

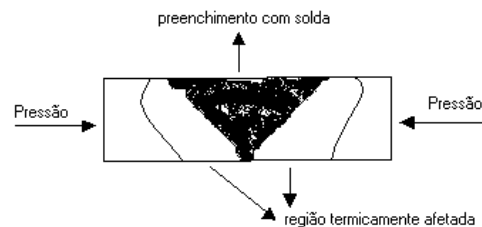
- componentes eletrônicos: Pb-Sn  
tendência: soldas "lead-free" (Sn/Ag/Cu, p.ex.)
- Metal de composição próxima a dos metais base a serem soldados.

A peça pode funcionar como um eletrodo (negativo) havendo a necessidade de outro: com o material da solda (eletrodo consumível) ou não. Para facilitar a fusão, utilizam-se gases comburentes: oxigênio (gás ativo, ↓ preço, ↑ T da chama), acetileno (gás inerte, ↓ oxidação, inflama rápido), mistura dos dois, etc.

Nos eletrodos consumíveis, o revestimento, quando aquecido, libera gases desoxidantes e formadores de escória.

Soldas mais comuns: TIG (tungsten inert gas) - eletrodo de tungstênio

MIG (metal inert gas) } Eletrodos consumíveis  
MAG (metal active gas)



## CORROSÃO

Tendência dos metais voltarem à forma de óxidos ao reagirem com agentes químicos do ambiente (água, ácidos, bases, maresia, oxigênio).

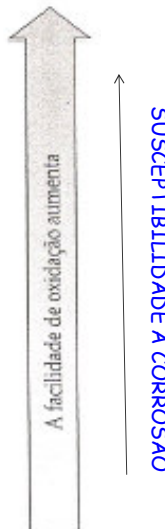
Perde-se superfícies metálicas → perda de propriedades.

Dois tipos de corrosão:

1) Reação química direta - ataque químico direto, que é uniforme na superfície e cujo produto adere a esta superfície. A espessura das camadas atingidas (e aderentes) é proporcional ao  $(t_{\text{exposição}})^{1/2}$ .

Ex:: Escurecimento da prata,  
Esverdeamento do cobre -  $\text{CuCO}_3$  ( $\text{Cu} + \text{CO}_2$ )  
Enferrujamento - corrosão de ferro e aço  
(fraca aderência)

Metal	Reação de Oxidação				
Lítio	$\text{Li}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Li}^+(aq)$	+	$e^-$
Potássio	$\text{K}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{K}^+(aq)$	+	$e^-$
Bário	$\text{Ba}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Ba}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Cálcio	$\text{Ca}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Ca}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Sódio	$\text{Na}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Na}^+(aq)$	+	$e^-$
Magnésio	$\text{Mg}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Mg}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Alumínio	$\text{Al}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Al}^{3+}(aq)$	+	$3e^-$
Manganês	$\text{Mn}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Mn}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Zinco	$\text{Zn}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Zn}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Cromo	$\text{Cr}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Cr}^{3+}(aq)$	+	$3e^-$
Ferro	$\text{Fe}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Fe}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Cobalto	$\text{Co}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Co}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Níquel	$\text{Ni}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Ni}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Estanho	$\text{Sn}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Sn}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Chumbo	$\text{Pb}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Pb}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
<b>HIDROGÊNIO</b>	$\text{H}_2(g)$	$\longrightarrow$	$2\text{H}^+(aq)$	+	$2e^-$
Cobre	$\text{Cu}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Cu}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Prata	$\text{Ag}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Ag}^+(aq)$	+	$e^-$
Mercúrio	$\text{Hg}(l)$	$\longrightarrow$	$\text{Hg}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Platina	$\text{Pt}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Pt}^{2+}(aq)$	+	$2e^-$
Ouro	$\text{Au}(s)$	$\longrightarrow$	$\text{Au}^{3+}(aq)$	+	$3e^-$



<http://www.rc.unesp.br/ib/bioquimica/aula10oxido.pdf>

2) Corrosão Eletrolítica ou galvânica - Podem ser formadas regiões anódicas (negativas) e catódicas (positivas), provocando o movimento de elétrons. Falhas superficiais (pequenas fendas, pregos, parafusos, rebites ou até sujeira bem aderida ao metal) podem funcionar como um ânodo. Esta corrosão também pode ocorrer quando dois metais diferentes estão unidos, pois um é mais sujeito a corrosão que outro.

Susceptibilidade à corrosão:

Mg > Al > Zn > Cr > Fe > Ni > Sn > Pb > Cu > Ag > Pt

Susceptibilidade à corrosão:

Mg > Al > Zn > Cr > Fe > Ni > Sn > Pb > Cu > Ag > Pt

**PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO**

➤ Eletrodo de sacrifício: colocação de elementos com maior susceptibilidade para atrair a corrosão.

➤ Passivação - em alguns metais, como Al, Ni e Zn, a película de material corroído adere tão bem à superfície que funciona como proteção futura. Para ferros e aços a passivação é feita com elementos de liga, principalmente com Cr (originando o aço inoxidável -  $Cr_2O_7$  mantém aderência mesmo a altas T). Com alumínio a passivação pode ser feita com magnésio.

➤ Pintura

## PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO

Susceptibilidade à corrosão:  $Mg > Al > Zn > Cr > Fe > Ni > Sn > Pb > Cu > Ag > Pt$

➤ Eletrodo de sacrifício

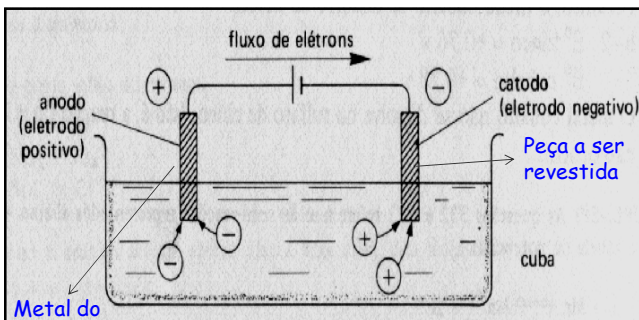
➤ Passivação

➤ Pintura

➤ Revestimento - Galvanização - processo eletrolítico (galvanoplastia)  
deposição química

Imersão a quente (revestimento fundido)

↓  
Zincagem  
Cromagem ou Cromação  
Douragem,  
Estanhagem  
Prateação  
Niquelação ou Niquelagem

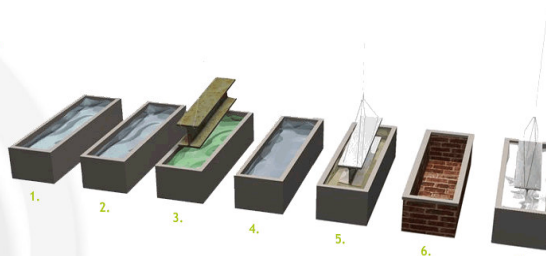


Metal do Revestimento ou Material Inerte

Galvanização por Eletrodeposição:  
Dois eletrodos são mergulhados numa solução eletrolítica ligados a uma fonte de corrente. A solução eletrolítica deve conter como eletrólito um sal que contém cátions do metal do revestimento.

### Processo de galvanização

1. Desengorduramento
2. Lavagem em água
3. Decapagem química em ácido
4. Lavagem
5. Fluxagem
6. Pré-secagem
7. Banho em zinco fundido ou Banho para Deposição Química



Esquema da Galvanização por Deposição Química e por Imersão a Quente

## FOLHAS DE FLANDRES

Folhas/bobinas laminadas de aço, de baixo teor de carbono, revestidas em uma ou ambas as faces com camada de cerca de  $\frac{1}{4}$  de mm de estanho metálico (~0,2% ou 4,5 kg de Sn/t de flandres) e óxido de cromo (0,007%), aplicado por processo eletrolítico contínuo (~90% no Brasil) ou por imersão a quente (os outros ~10%).

É usado primariamente para a produção de latas de aço para contato com alimento, conferindo: maior afinidade à soldagem, melhor aparência, resistência mecânica, inviolabilidade e opacidade. Permite acondicionar alimentos por até 2 anos, inclusive envasados a quente.

Brasil - 6 bilhões de embalagens em aço/ano

14% de "market-share" (Al: 21%)

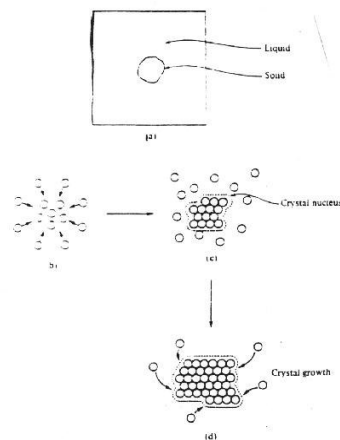
Consumo: 750 mil t de folha de flandres por ano

Produção: 1 milhão de t/ano

## TRATAMENTOS TÉRMICOS

A solidificação dos metais normalmente leva tempo para ser completa. Dependendo do resfriamento, podem ser formadas microestruturas diferentes e, conseqüentemente, metais com propriedades diferentes.

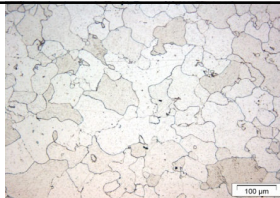
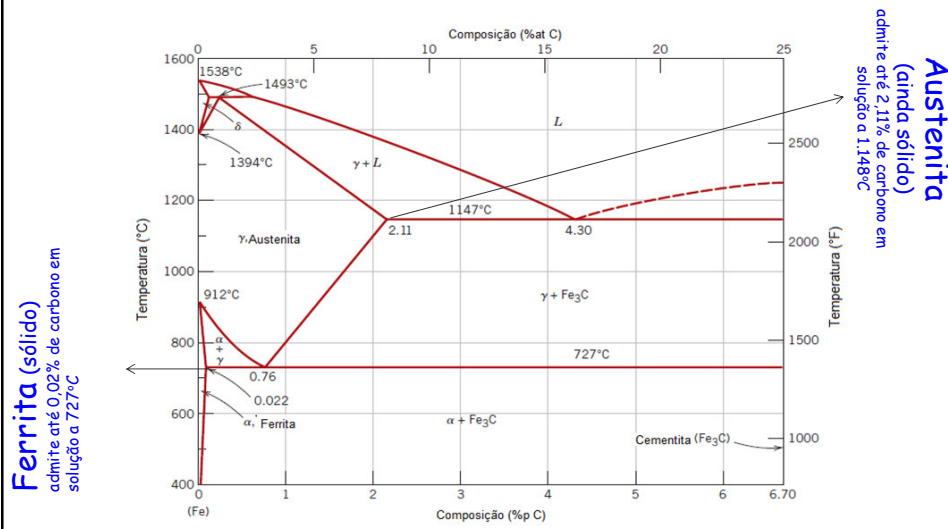
Shackelford, J.F. *Introduction to Materials Science for Engineers* - 3ª Ed. McMillan Publishing Company, Nova Iorque, 1992, 793p.



(a) On a microscopic scale, a solid precipitate in a liquid matrix. The precipitation process is seen on the atomic scale as (b) a clustering of adjacent atoms to form (c) a crystalline nucleus followed by (d) the growth of the crystalline phase.

Cristalização: nucleação + crescimento

Não é necessário formar o sólido a partir do fundido. No caso de aços ( $T_{\text{fusão}} \sim 1500^{\circ}\text{C}$ ), é suficiente chegar à região da austenita ( $\text{Fe } \gamma - \text{cfc} - T_{\text{austenitização ou solubilização}} \sim 750^{\circ}\text{C}$ ), onde todo carbono fica em solução.



Aço: ferrita ( $\text{Fe}_\alpha - \text{ccc}$ ) + cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) → PERLITA  
matriz branca riscos pretos

Resfriamento rápido: muitos riscos, riscos finos  
bainita

Resfriamento médio: número e espessura dos riscos médios  
perlita fina

Resfriamento lento: poucos riscos, porém riscos bem grossos  
perlita grossa

Resfriamento brusco: forma-se martensita, como\* se "congelasse" a austenita ( $\text{Fe } \gamma - \text{cfc}$ ) na temperatura ambiente. A martensita é a mais dura das microestruturas dos aços.

\* forma-se uma estrutura tetragonal de corpo centrado supersaturada de carbono - frágil e alta dureza

↑  
dureza

## Tratamentos Térmicos de Aços

Só de aquecer e resfriar convenientemente um metal podem ser mudadas as propriedades, inclusive da peça pronta, sem fundir ou mudar a composição.

Ex: Estampagem de teto de carro → chapa com pouca dureza  
Teto pronto → alta dureza para proteger usuário.

Importância comercial para modificar propriedades, como:

- Remoção de tensões (oriundas de resfriamento, trabalho mecânico, etc);
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Altera propriedades magnéticas (austenita é não magnético);
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora ou piora a Dutilidade;
- Melhora ou piora a Usinabilidade.

Para aços, os tratamentos térmicos se baseiam na formação de perlita grossa, perlita fina, bainita ou martensita.

dureza →

As etapas são:

1) Aquecimento até região da austenita

2) Permanência para completar austenitização.

Fator importante: atmosfera do forno pode gerar oxidação

- do ferro (forma casca ou carepa)
- carbono (amolecimento superficial).

Por isso recomenda-se atmosfera inerte (N<sub>2</sub>).

3) Resfriamento até completar transformação

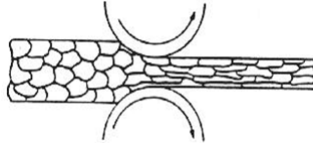
Fatores importantes: meio de resfriamento (água, óleo, ar)  
agitação

temperatura do meio de resfriamento.



Tratamentos térmicos mais comuns:

Recozimento - taxas lentas para formação de perlita grossa (menor dureza) para melhorar processabilidade), para remoção de tensões devido a tratamento mecânico e regularizar microestrutua (uniformiza propriedades).



Shackelford, J.F. *Introduction to Materials Science for Engineers* - 3ª Ed. McMillan Publishing Company, Nova Iorque, 1992. 793p.

Têmpera - taxas altas para formar a martensita (maior dureza, porém baixas ductilidade e resistência ao impacto e muitas tensões internas).

Revenimento - novo aquecimento para aliviar tensões e recuperar ductilidade e resistência ao impacto perdidas na têmpera.

**METAIS MAIS IMPORTANTES**

## COBRE E SUAS LIGAS

- Alta condutividade, propriedade depreciada pela introdução de elementos de liga (pureza facilita reciclagem);
- PF = 1083°C;  $d_{20} = 8,96 \text{ g/cm}^3$ ;
- É maleável e tem boa soldabilidade;
- Minerais - cuprita, calcopirita, covelita, calcocita, azurita, malaquita (geralmente sulfetos);
- Principais produtores: EUA, Zaire, Zâmbia e Chile;
- Síntese: geralmente fusão dos minérios, oxidação (do S e Fe) e eletrólise para refino.

## Latão (Cu-Zn)

- 5% de Zn - bijouterias assemelhadas a ouro
- 10% de Zn - bronze comercial - mais barato que os bronzes a base de Sn e com mesma cor;
- 15% de Zn - latão vermelho - resistente a corrosão;
- 30% de Zn - alta resistência mecânica e ductilidade - indicado para conformações a frio.

Tensile Properties of Brasses in the Form of 0.040-in Strip

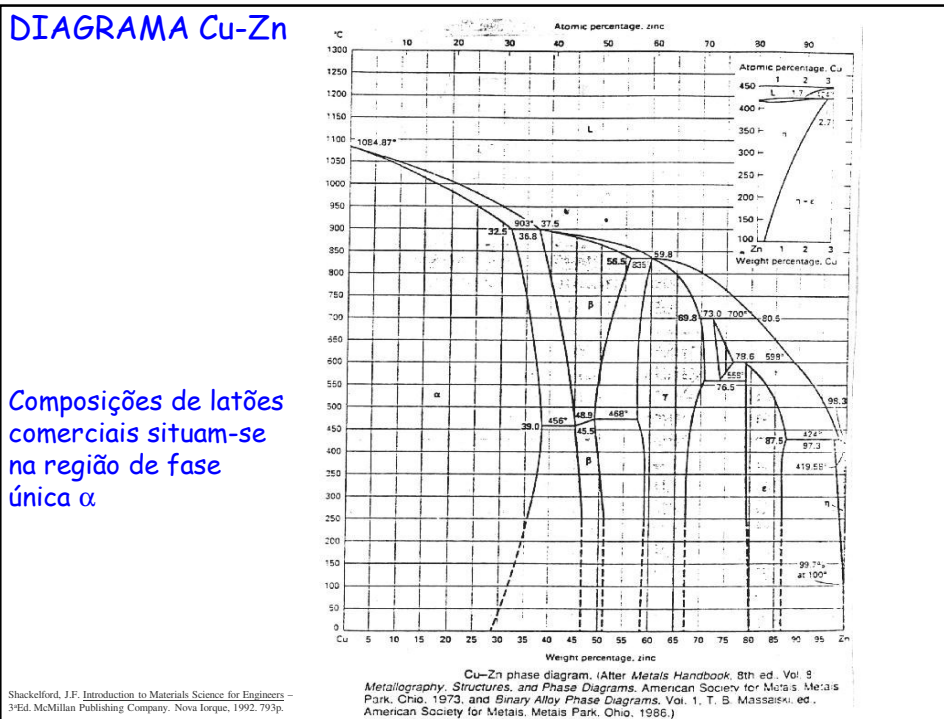
Zinc, %	CDA alloy no.†	Structure	Properties as annealed to 0.050-mm grain size		Properties as cold-rolled to half hard temper	
			Tensile strength, $10^3 \text{ lb/in}^2$	Elongation in 2 in, %	Tensile strength, $10^3 \text{ lb/in}^2$	Elongation in 2 in, %
0	110	$\alpha$	32	45	42	14
10	220	$\alpha$	37	45	52	11
20	240	$\alpha$	44	50	61	18
30	260	$\alpha$	47	62	62	23
40	280	$\alpha + \beta$	54	45	70	15

† Copper Development Association number

Shackelford, J.F. Introduction to Materials Science for Engineers  
- 3ª Ed. McMillan Publishing Company, Nova Iorque, 1992. 793p.

## DIAGRAMA Cu-Zn

Composições de latões comerciais situam-se na região de fase única  $\alpha$

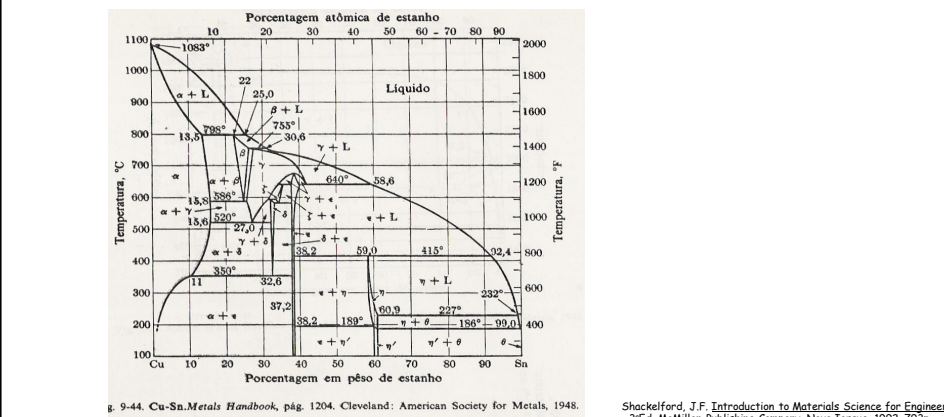


## Bronzes (Cu-Sn, geralmente)

Alia dureza com resistência a corrosão. Utilizados na indústria naval e de fabricação de máquinas e em estátuas.

De Sn - ~ 5% de Sn, 95% de Cu

De Si e Al - cor e diagramas binários semelhantes

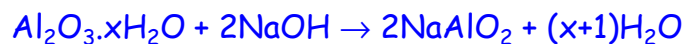


## ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

- boa parte de suas propriedades e aplicações advém da baixa densidade:  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (aço  $\sim 8 \text{ g/cm}^3$ ). PF =  $660^\circ\text{C}$ ;
- Resistência a corrosão (película oxidada é proteção);
- Alta condutividade térmica (só perde para Ag, Cu, Au).
- boa parte de suas propriedades e aplicações advém da baixa densidade:  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (aço  $\sim 8 \text{ g/cm}^3$ ). PF =  $660^\circ\text{C}$ ;
- Resistência mecânica:  $\sigma_{\text{escoamento}} \sim 60 \text{ MPa}$  - 99,99% de pureza  
 $\sim 90 \text{ MPa}$  - 99,90% de pureza
- Minério - bauxita, criolita, feldspato...
- Principais produtores: Brasil (2,5% das reservas mundiais);
- Síntese: processo Bayer (obtenção da alumina)  
Hall-Héroult (obtenção do Al via alumina)

### Bayer

Da bauxita (óxido hidratado) moída, seca e numa solução de NaOH a altas P (30 atm) e T ( $200\text{-}240^\circ\text{C}$ ) obtém-se aluminato de sódio:



O aluminato é solúvel na solução aquosa de hidróxido de sódio é então filtrado. A fração sólida da filtração é descartada (lama vermelha). À fração líquida é adicionada água e forma-se a alumina trihidratada, que precipita:



Removidas, as partículas precipitadas vão sofrer calcinação a  $1.100^\circ\text{C}$ , onde liberam a água ligada quimicamente ao óxido.



**Barragem de Lama Vermelha - CBA - Alumínio-SP**

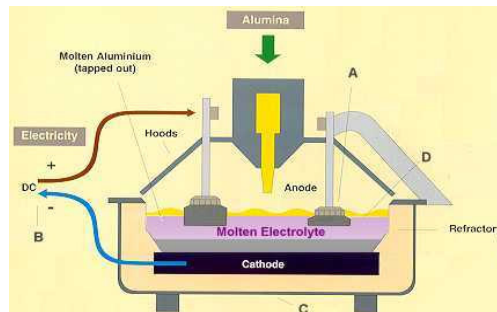
**5,3 ton de bauxita - 2 ton de alumina - 1 ton de Al**

**Barragem de Lama Vermelha que estourou no oeste da  
Hungria em 4 de outubro de 2010.**



## Hall-Héroult

Alumina é dissolvida em criolita fundida a 970°C ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) e o óxido é eletrolisado (altas correntes, p.ex ~300.000 A): o oxigênio vai para o ânodo (de carvão, o que forma depósitos de  $\text{CO}_2$ ) e o alumínio puro cai e é recolhido pelo cátodo (também a base de carvão).



Energia (por kg): gasta 10 vezes mais que na fabricação do Fe  
4 vezes mais que na fabricação do Cu

Fornos para  
a redução  
eletrolítica  
da alumina  
CBA  
Alumínio-SP

Produto  
final:  
Alumínio  
Fundido



~20% do Alumínio é utilizado em ligas

~80% do Alumínio utilizado é puro

~30% chapas - utensílios de cozinha, embalagens

~23% extrudados - barras condutoras

~23% fios/cabos - linhas de eletricidade (ppalmente aéreas)

~ 4% - outros

## Ligas

Vantagens: ponto de fusão menor, podendo ficar tão ou mais resistentes que os aços (+leves, com menos problemas de corrosão)

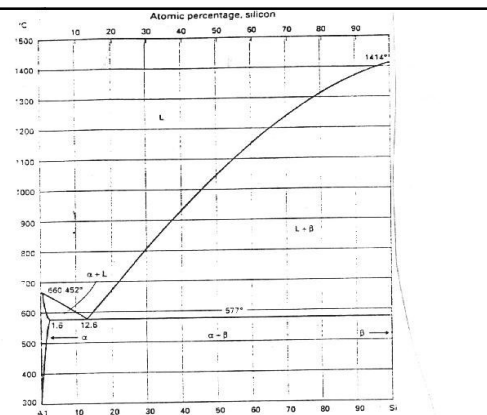
Elementos de liga mais comuns: Si, Al e Mg.

## Duralumínio

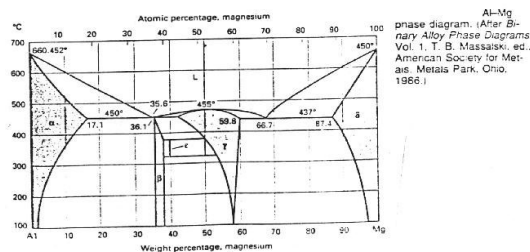
Exemplo de composição: 96% de Al, 3,5% de Cu e 0,5% de Mg.

Utilização em aeronaves, indústria espacial, automobilística, materiais esportivos

## DIAGRAMAS Al-Si; Al-Mg



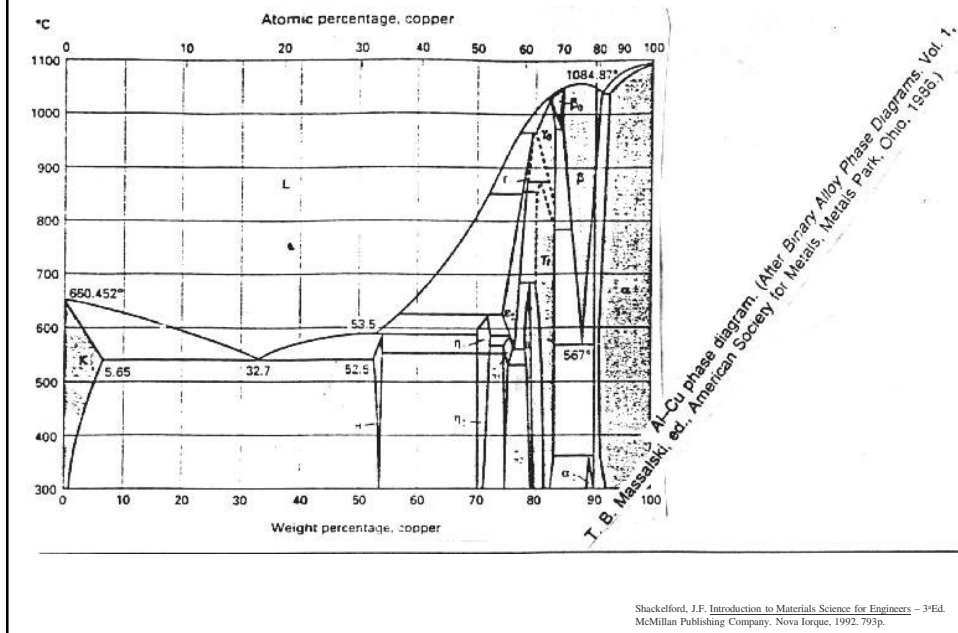
Al-Si phase diagram. (After Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 1, T. B. Massalski, ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1986.)



Al-Mg phase diagram. (After Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 1, T. B. Massalski, ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1986.)

Shackelford, J.F. Introduction to Materials Science for Engineers - 3ª Ed. McMillan Publishing Company, Nova Iorque, 1992, 793p.

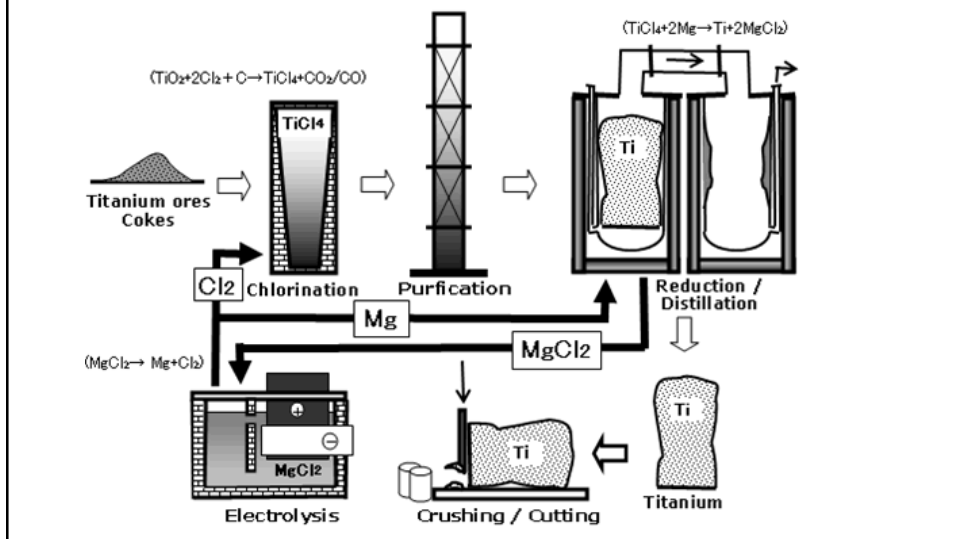
## DIAGRAMA Al-Cu



## TITÂNIO

➤ PF = 1660°C;  $d_{20} = 4,54 \text{ g/cm}^3$ ;

➤ Minério: rutilo (Austrália-TiO<sub>2</sub>), ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>);



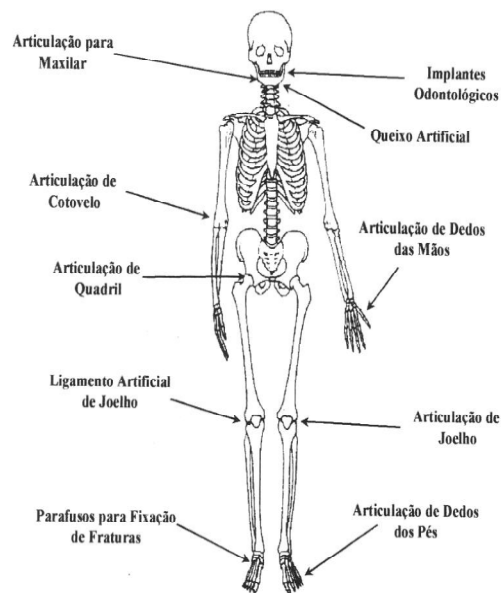


- Altamente resistente à esforços mecânicos, a corrosão e à temperatura e é relativamente leve;
- Forma soluções sólidas com Al, Zr, Mo, Cu, C, V, Nb etc. aumentando a dureza e a resistência.
- Usos: motores e estrutura de aeronaves, equipamentos militares, tubulações para troca de calor, reatores, bioaplicações (implantes)...



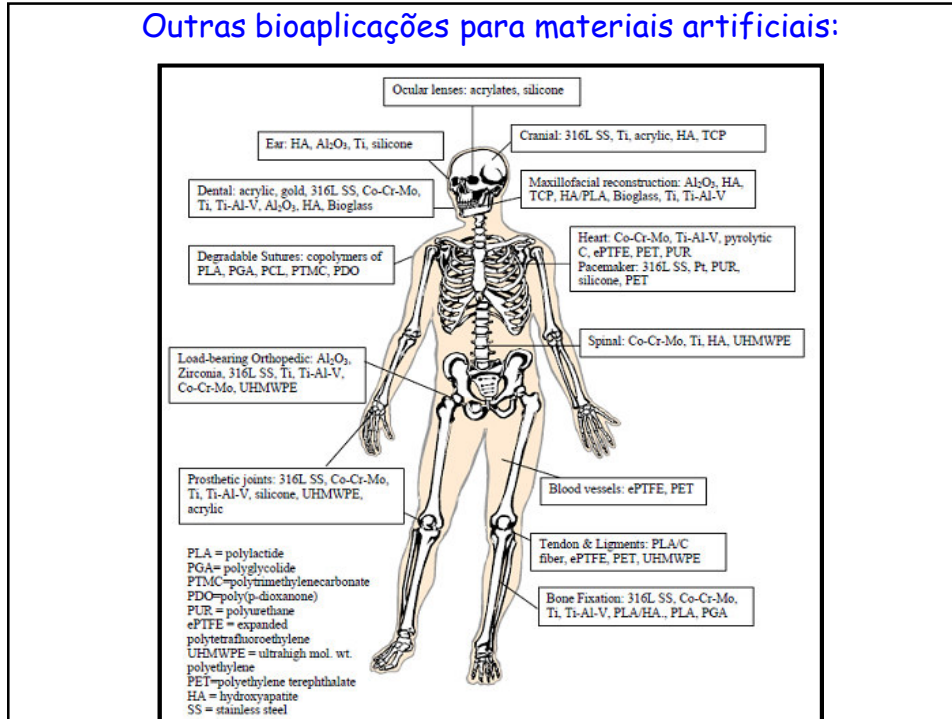
[www.caodontologia.com.br/implantodontia.htm](http://www.caodontologia.com.br/implantodontia.htm)

### Outras possibilidades para o titânio:



Fonte: Adaptado de Zavaaglia, 1993.

## Outras bioaplicações para materiais artificiais:



## NIÓBIO

- PF = 2478°C
- $d_{20} = 8,6 \text{ g/cm}^3$ ;
- Metal mole e dúctil, inerte, resistente à corrosão;
- Minérios: columbita e pirocloro (Brasil);
- Principal produtor: Brasil - 91% das reservas (5,2 Mt)  
91% da produção
- Utilizações = ligas para aços (ferroligas para aços micro-ligados ~80% do consumo de Nb - refratários e estruturais), ligas super-condutoras, joalheria, etc;
- Produção Mundial em 2008: 89 kt
- Produção brasileira em 2008: 86kt  
Araxá (MG) 60,7%, Catalão (GO) 21%, Taboca (AM) 12,8%, Outros (5,5%)

## AÇOS

Além de C, no Fe estão presentes outros elementos de liga (adicionados intencionalmente ou não): Mn, S, Si, P, Ni, Cu, Cr, Sn, etc. em quantidades pequenas e que não necessariamente modificam o diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C mas que podem provocar alterações significativas nas propriedades.

- PF ~ 1500°C;
- d<sub>20</sub> ~ 8 g/cm<sup>3</sup>;
- Minério empregado - hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - Brasil;
- Altos fornos - fornos tubulares de até 95m de altura, onde ocorre a fabricação do gusa (produção chega a 11.000 ton/dia.forno);
- Aciaria - onde o gusa é transformado em aço.

➤ Além do minério, no alto forno também é colocado um agente redutor (carbono) em excesso:

coque (de carvão mineral ou de petróleo)	} Produto final: Ferro-gusa
carvão mineral (menos comum)	
carvão vegetal	

- É adicionado oxigênio, para a combustão do carbono e geração do calor necessário;
- também é colocado calcário, que facilita a formação da escória (atrai impurezas);
- Gusa sai líquido do alto-forno (escória é sobrenadante) e separação é por derrame.

Obs: É possível a utilização de gás natural, CO ou H<sub>2</sub> → produto final é o ferro-esponja, obtido por redução sem fase líquida e formando um sólido de aspecto muito poroso (esponjoso).

## Coque de Carvão Mineral

Coqueificação: aquecimento do carvão mineral, podendo chegar a temperaturas de até ~1300 °C, o que retira voláteis e ↑% C.



Tabela 3.7.2.a | Setor Industrial – Ferro-gusa e Aço  
Table 3.7.2.a | Industrial Sectors – Pig-Iron and Steel

FONTE	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	SOURCES
GÁS NATURAL	779	781	900	911	936	1.113	1.105	1.214	1.158	866	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL	1.651	1.587	1.902	2.182	2.455	2.374	2.352	2.516	2.655	2.048	STEAM COAL
ÓLEO DIESEL	30	22	35	36	40	44	40	14	14	14	DIESEL OIL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	110	103	105	117	79	82	107	145	142	114	FUEL OIL
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	113	105	81	82	56	100	85	88	97	77	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NAPHTHA
QUEROSENE	5	2	2	1	1	1	1	0	0	1	KEROSENE
GÁS DE COQUEARIA	932	891	879	972	1.037	1.016	980	1.039	1.065	1.011	GAS COKE
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GASWORKS GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL	6.413	6.221	6.582	6.470	6.574	6.067	5.763	6.320	6.289	4.969	COAL COKE
ELETRICIDADE	1.265	1.200	1.289	1.382	1.452	1.397	1.452	1.579	1.602	1.279	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	3.660	3.429	3.561	4.057	4.902	4.804	4.636	4.775	4.679	2.724	CHARCOAL
ALCATRÃO / OUTRAS SEC. PETRÓLEO	328	415	392	492	413	462	464	551	528	533	COAL TAR / OTHER PETROLEUM SECONDARIES
TOTAL	15.285	14.767	15.729	16.701	17.945	17.459	16.985	18.240	18.229	13.636	TOTAL

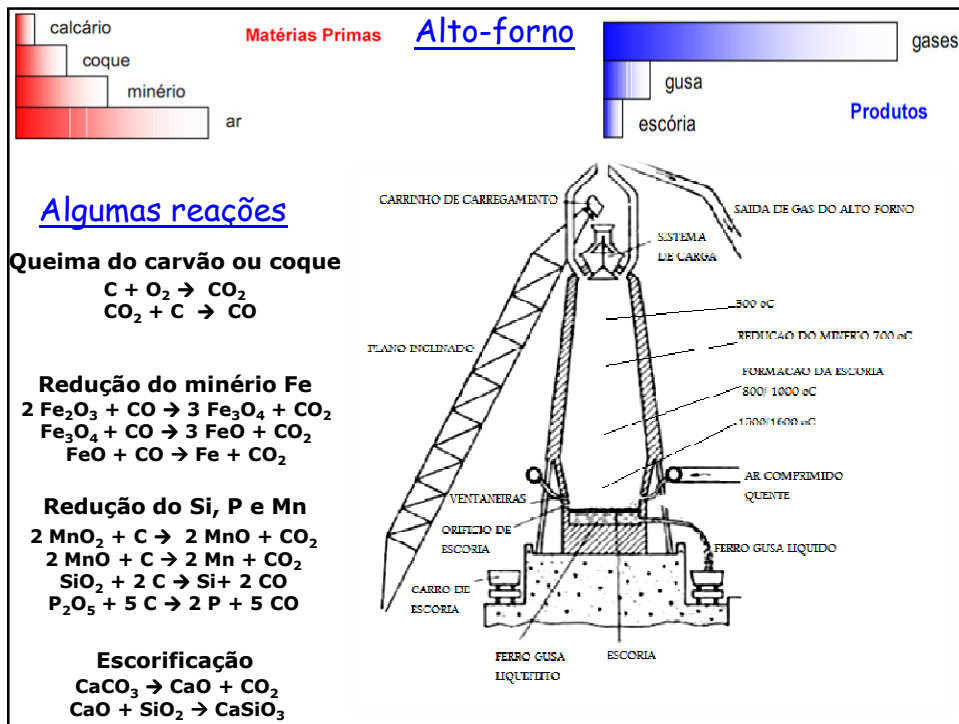
[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2\\_-\\_BEN\\_-\\_Ano\\_Base/1\\_-\\_BEN\\_2010\\_Portugues\\_-\\_Inglxs\\_-\\_Completo.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_2010_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf)

## Coque de petróleo

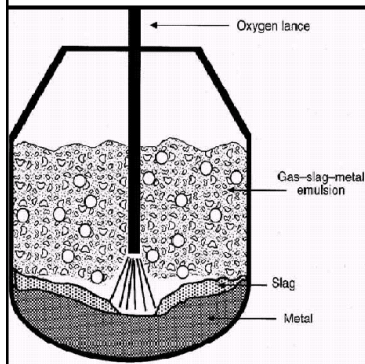
Beneficiamento de subproduto sólido da destilação do petróleo, com % C semelhantes do coque de carvão mineral.

## Esquema da operação do alto forno

- Sólidos são carregados por cima e o ar quente (~1.100°C) por baixo (no 1/3 inferior do forno, aproximadamente);
- a temperatura aumenta de cima para baixo, chegando a 2000°C na região de entrada de ar, onde o carvão é oxidado a CO;
- o CO, em contra-corrente, reduz o minério a FeO e parte do FeO a Fe; a outra parte do FeO é reduzida pelo carvão;
- por gotejamento são obtidos, na parte mais baixa do forno, o ferro gusa (pig-iron) e a escória (mais leve e sobrenadante), que são normalmente vazados para carros-torpedo e potes, respectivamente;
- os subprodutos gasosos saem pelo topo do forno, são conduzidos para um sistema de despoejamento e limpeza, seguindo para recuperadores de calor (onde o CO de excesso sofre combustão e libera calor, fundamental para o processo).



Aciaria - onde o gusa líquido é refinado em aço no teor de carbono necessário, basicamente por reações de oxidação ( $O_2$  por baixo). É onde são introduzidos elementos de liga (ferros-liga). Além do gusa, a aciaria pode ser alimentada com o ferro esponja, sucata e/ou calcário.



### Tipos de Aço

Aço Carbono - na sua composição possui apenas quantidades limitadas de C, Si, Mn, Cu, S e P. Outros elementos existem apenas em quantidades residuais.

Aço Baixo carbono - até 0,2% de C. São os mais usados. Excelente soldabilidade e trabalhabilidade.

Aço Médio Carbono - 0,2 a 0,5% C. Chamados de aços de engenharia, são utilizados em componentes que exijam alta resistência mecânica.

Aço Alto Carbono - mais que 0,5% de C, duros e frágeis, para ferramentas.

Aço Doce - entre 0,15 a 0,25% de C

Aço Acalmado - aço fundido tratado agente desoxidante (ex. Si ou Al) que evita a formação de gases, em especial de CO.

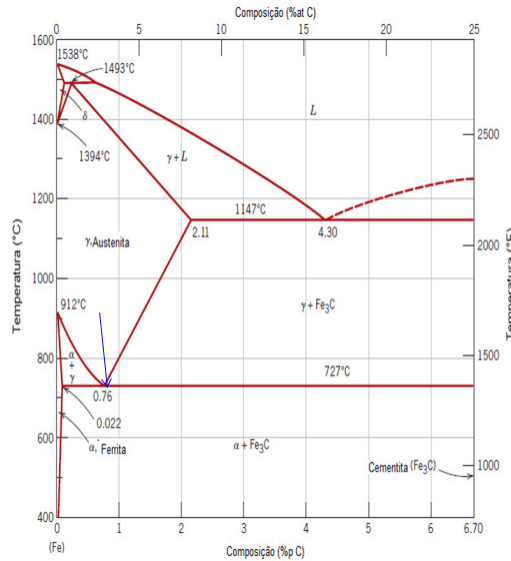
## DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C

[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula\\_5\\_Diagrama\\_de\\_fases.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula_5_Diagrama_de_fases.pdf)

**Aço Hipoeutetóide** - liga Fe-C com  $0,008 < \%C < 0,77$

**Aço Eutetóide** - liga Fe-C com 0,77% de C

**Aço Hipereutetóide** - liga Fe-C com  $0,77 < \%C < 2,11$



## Tipos de Aço

**Aço liga** - liga de ferro-carbono com elementos de adição (níquel, cromo, manganês, tungstênio, molibdênio, vanádio, silício, cobalto e alumínio) para conferir a esse aço características especiais, tais como: resistência à tração e à corrosão, elasticidade e dureza, entre outras, tornando-os melhores do que os aços-carbono comuns.

- Designados de acordo com os elementos predominantes, como, por exemplo, aço-níquel, aço-cromo e aço-cromo-vanádio.
- Encontrados em praticamente todos os segmentos industriais
- Aços de alta liga:  $\sum$  elementos  $> 5\%$ .

## Tipos de Aço

Aço microligado - Aço que contém, em geral, menos de 0,15% de carbono e pequenas quantidades de Nb, V, Ti, Mo e N. Soldagem desses aços é similar à dos aços de baixo carbono e temperabilidade maior.

Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) - até 10% de elementos de liga (C, Mn, S, P, Si, Ni, Cr, Mo, V, Zr, B e Cu) e temperados, associando altas tensão de escoamento e resistência ao impacto. Usos: reatores, construção civil, criogenia etc.

Aço Ferramenta - com pelo menos 0,5% de C e caracterizam por produção baixa, mas preço pelo menos 50 vezes maior em peso. Elementos de liga (Mn, Cr, V, W, Mo ou Co) facilitam a formação de carbonetos que endurecem o metal. Usos: serras, brocas, fresas...

Aço rápido - aços-ferramenta que suportam altas velocidades de corte em usinagem e possuem teores altos de W e Mo. Alta dureza, mesmo em altas T, mesmo quando o gume fica rubro.

Aço Inoxidável - aços com pequenas quantidades de Ni e pelo menos 12% e normalmente no máximo 30% de Cr, que realiza a passivação do aço. Acima de 16% não é possível mais austenitizar, logo não obtém-se aço inox temperado (facas: 12-16% de Cr). Usos: indústria automobilística, naval, aeroespacial, ferramentas, matrizes, moldes, medicinal, bélica.



## **Ferros Fundidos**

Liga Fe-C com mais de 2,11% de C e menos de 6,67% de C e com teores de silício um pouco inferiores aos de carbono (1 a 3%). Os teores de carbono são em quantidade superior aos que podem ser retidos em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios, nódulos ou lamelas de grafita.

### Usos dos Ferros Fundidos:

Bases de Máquina, peças estruturais com pouca solicitação

### Vantagens:

- baixo preço, pois não é preciso uma redução tão grande
- baixa temperatura de fusão, a mínima com 4,3%C (eutético);

### Desvantagens

- Propriedades mecânicas relativamente inferiores

(+ frágeis que aços)