

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE PELOTAS – RS
UNIDADE DE ENSINO PASSO FUNDO**

**CURSO TÉCNICO EM
MECÂNICA INDUSTRIAL**

PRIMEIRO SEMESTRE

TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

Prof. Dr. Alexandre Pitol Boeira

Prof. Ms. Daniel Beck

Passo Fundo – RS - Outubro - 2007

ÍNDICE

1. Introdução ao estudo dos Materiais	1
1.1. Evolução histórica	1
1.2. Classificação e Características	2
1.2.1. Materiais Metálicos	2
1.2.2. Materiais Cerâmicos	3
1.2.3. Materiais Poliméricos	3
1.2.4. Materiais Compósitos	4
1.2.4. Materiais Semicondutores	4
1.2.4. Materiais Biomateriais	5
2. Materiais Metálicos	5
2.1. Atomística dos Materiais	6
2.1.1. Estrutura Atômica	6
2.1.2. Sólidos Cristalinos	7
Cúbico de Corpo Centrado	8
Cúbico de Face Centrado	8
Hexagonal Compacto	8
Alotropia ou Polimorfismo	8
2.1.3. Imperfeições em Sólidos	8
Defeitos Pontuais	9
Defeitos Lineares	9
Defeitos de Superfícies	10
2.1.4. Difusão Atômica	10
2.2. Transformações de Fases	11
2.2.1. Princípios de Solidificação dos Metais	11
Metais Puros e Ligas Eutéicas	12
Ligas Metálicas (Exceto Ligas Eutéicas)	13
2.2.2. Transformações no Estado Sólido	13
2.2.3. Diagrama de Fases	14
Reações características de ligas binárias	17
2.3. Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos	17
2.3.1. Conceitos de tensão e deformação	17
2.3.2. Resistência Mecânica	18
2.3.3. Ductilidade	18
2.3.4. Rigidez	19
2.3.5. Dureza	19
Dureza Brinell (HB)	19
Dureza Rockwell (HR)	19
Dureza Vickers (HV)	20
2.3.6. Mecanismos de aumento da resistência em metais	20
Aumento de Resistência por Redução do Tamanho de Grão	21
Aumento de Resistência por Solução Sólida	21
Encruamento	21
2.3.7. Recuperação, Recristalização e Crescimento de Grão	21
Recuperação	21
Recristalização	21
Crescimento de Grão	22
2.3.8. Falhas	23
Fratura	23
Fadiga (<i>creep</i>)	25
Fluência	26
2.4. Classificação dos materiais metálicos	27
2.5. Processos de obtenção e processamento dos metais	27
2.6. Sistema ferro-carbono	38
2.6.1. Diagrama de fases e desenvolvimento microestrutural	38
2.6.2. Elementos de liga	42
2.6.3. Fases Metaestáveis	43

2.7. Diagramas de Transformações	44
2.7.1. Isotérmicas	44
2.7.2. Resfriamento contínuo	46
2.8. Ligas Ferrosas	47
2.8.1. Aços	47
Classificação por Designação Normativa	48
Classificação Quanto ao Processamento	49
Classificação Quanto a Microestrutura	49
Classificação Quanto a Composição Química	50
Classificação Quanto as Propriedades	51
Classificação Quanto as Aplicações	53
Influência dos Elementos de Ligas nos Aços	54
2.8.2. Ferros Fundidos	55
Tipos de Ferros Fundidos	56
Grafita	57
Inoculação	58
Classificação dos Ferros Fundidos	58
Classe	59
2.8. Ligas Não-Ferrosas	59
2.9.1. Alumínio	59
2.9.2. Cobre	61
2.9.3. Magnésio	64
2.9.4. Titânio	65
2.9.5. Níquel	65
2.9.6. Zinco	66
2.9.7. Chumbo	67
2.9.8. Metais refratários	67
2.9.9. Superligas	68
2.9.10. Metais Nobres	68
2.9.11. Outros	68
3. Materiais Poliméricos	68
3.1. Grupos de plásticos	69
3.2. Propriedades dos polímeros	70
3.2.1. Termoplásticos	70
Olefinicos	70
Poliésteres	71
Vinílicos	71
Acrílicos	71
Nailon (poliamidas)	71
ABS ou acrilonitrila-butadieno-estireno	71
3.2.2. Fluoroplásticos	72
3.2.3. Plásticos termoeestáveis (ou termofixos)	72
Fenólicos	72
Poliésteres	72
Epóxis	73
Silicones	73
3.3. Processos de fabricação de peças em material plástico	73
4. Materiais Cerâmicos	74
4.1. Propriedades dos Materiais Cerâmicos	75
4.2. Tipos de Materiais Cerâmicos	75
Bibliografia	78
ANEXO I	79
ANEXO II	80
ANEXO III	81
ANEXO IV	86
ANEXO V	87
ANEXO VI	89
ANEXO VII	90
ANEXO VIII	91
ANEXO IX	92
ANEXO X	93

1. Introdução ao estudo dos Materiais

Muitos profissionais ligados ao ramo tecnológico sejam eles mecânicos, metalúrgicos, químicos, civis ou elétricos, irão uma vez ou outra ficar expostos a algum tipo de problema prático ou de projeto que envolva materiais. Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentro de milhares de materiais disponíveis (estimasse em 50.000). Existem vários critérios nos quais a decisão final esta normalmente baseada, no entanto, resumidamente, se distribuem em:

- Condições de serviço a que será submetido o material, ou seja, a análise global do ambiente a que será inserido este material, bem como de todas as forças que nele atuam;
- Possível deterioração deste material (propriedades e características) em virtude da atuação conjunta do meio ambiente, atuação mecânica e características do material;
- Fatores econômicos relacionados tanto a obtenção, extração, processamento e manutenção, quanto à própria logística (transporte e armazenamento).

Neste contexto, a correta especificação de um determinado material torna-se fator primordial na busca da melhor relação propriedades e custo deste material.

Particularmente, para o caso do técnico em mecânica, o conhecimento das propriedades do material é decisivo na elaboração de alguma ferramenta ou projeto. A noção de propriedades merece elaboração. Enquanto em uso, todos os materiais estão expostos a estímulos externos que provocam algum tipo de resposta. Por exemplo, uma superfície metálica polida irá refletir a luz. Propriedade é uma

peculiaridade do material em termos do tipo e da intensidade de resposta a um estímulo específico que lhe é imposto. Geralmente, as definições das propriedades são feitas de maneira independente da forma e do tamanho do material. Virtualmente, todas as propriedades importantes dos materiais sólidos podem ser agrupadas em seis categorias diferentes, sendo:

- Mecânica;
- Térmica;
- Elétrica;
- Magnética;
- Ótica;
- Deteriorativa;

Neste capítulo, a introdução ao estudo dos materiais é dicotomizada em evolução história do uso de materiais pela humanidade e classificação e características dos materiais.

1.1. Evolução histórica

É fácil avaliar a importância dos materiais em relação à existência e à evolução da espécie humana. Não é necessário aprofundar tal exame para se perceber que inúmeras etapas do desenvolvimento do homem foram marcadas pela variedade de materiais por ele utilizados. Desde o início da civilização os materiais são usados com o objetivo de permitir e melhorar a vida do ser humano. Na Figura 1, apresenta-se um resumo da importância relativa dos materiais ao longo da história. No início da pré-história, o principal material utilizado na confecção de objetos e ferramentas era o sílex lascado. Em seguida, o homem produziu seus utensílios a partir da pedra polida. Com a descoberta do fogo e com o início do uso do barro na fabricação de objetos, iniciou-se a fabricação de peças cerâmicas.

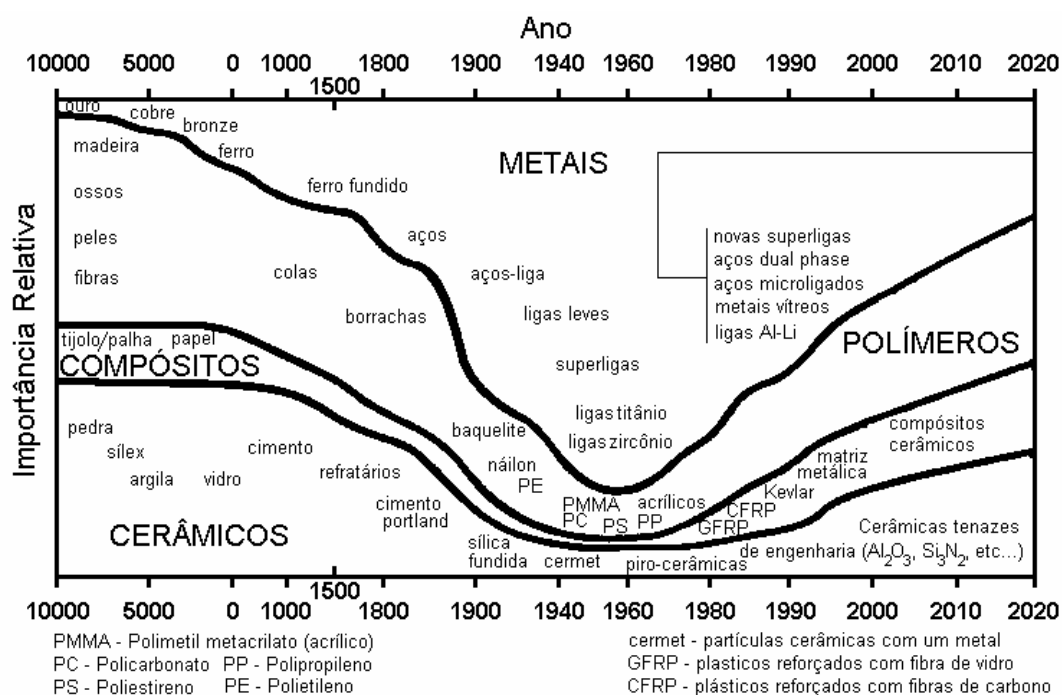


Figura 1: Evolução da importância relativa dos materiais utilizados pelo homem.

A possibilidade de transformar um material maleável em outro com propriedades mecânicas totalmente diferentes marcou o início da ciência e engenharia dos materiais. Nessa mesma época, o uso do barro reforçado com vigas de madeira e palha, que constitui um material compósito, possibilitou a construção de casas. Com a descoberta dos metais, finda-se a idade da pedra e inicia-se a idade dos metais. Inicialmente, o homem empregou o cobre em substituição à pedra. Para refinar e moldar apropriadamente esse metal foi utilizado o fogo, o que deu origem à metalurgia. A baixa resistência mecânica do cobre estimulou alternativas para se produzir um material mais resistente, o que levou à mistura desse metal, inicialmente com o arsênio e depois com o estanho, o que resultou no bronze. Há mais de 4.000 anos, o processo de fundição por cera perdida foi concebido. Nessa técnica, o objeto a ser produzido era esculpido em cera, que em seguida era recoberto com uma massa refratária. Ao se aquecer a escultura e seu recobrimento, a cera podia ser eliminada, resultando em uma cavidade no interior da massa refratária. A fundição era elaborada com o preenchimento dessa cavidade pelo metal líquido. O objeto fundido era obtido pela quebra do molde. Apesar desse procedimento existir há alguns milhares de anos, a fundição por cera perdida é ainda hoje utilizada na fabricação de uma gama muito diversificada de produtos, como próteses odontológicas e ortopédicas ou componentes de turbinas aeronáuticas. Ainda na pré-história, o homem processou e utilizou ferro na confecção de ferramentas, armamentos e utensílios. Milhares de anos mais tarde, o desenvolvimento de novos processos de produção dos aços e dos ferros fundidos permitiram a viabilização da revolução industrial. Neste século, o desenvolvimento dos materiais poliméricos, dos materiais compósitos avançados, das cerâmicas de engenharia, dos aços inoxidáveis, das ligas de titânio, dos materiais semicondutores, dos biomateriais, permitiu avanços significativos em inúmeras áreas, como a medicina, a odontologia, a indústria aeroespacial, eletrônica, automobilística, naval e mecânica.

Atualmente, a área do conhecimento denominada Ciência e Engenharia de Materiais (tecnologia dos materiais) é de fundamental importância em vários campos, como o da medicina, da indústria eletrônica, farmacêutica e mecânica. Tal área de estudo analisa o comportamento dos materiais no tocante às suas partículas sub-atômicas, aos seus átomos, aos seus arranjos atômicos e, finalmente, ao nível macroscópico. Geralmente, esta área do conhecimento trata os materiais em função de suas composições químicas, da natureza e disposições de seus átomos no espaço e da influência dos processos de transformação em suas propriedades e características. Enquanto a ciência dos materiais está associada ao desenvolvimento e geração de conhecimento fundamental sobre os materiais, tentando compreender o comportamento dos materiais em função de sua estrutura interna e dos processos utilizados em seu processamento, a engenharia dos materiais está ligada à utilização desse conhecimento na viabilização e

otimização de processos de transformação dos materiais em produtos finais.

1.2. Classificação e Características

Os materiais empregados industrialmente podem ser classificados no tocante a características particulares ligadas à constituição e arranjos de seus átomos. Tal classificação permite que os materiais sejam agregados em três classes principais, quais sejam: materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos. Além dos tipos citados, um estudo mais abrangente deve incluir outros tipos, que exibem, atualmente, grande importância tecnológica: os materiais compósitos (também denominados de materiais conjugados), semicondutores e biomateriais.

1.2.1. Materiais Metálicos

A principal característica dos materiais metálicos está relacionada à forma ordenada com que os seus átomos estão arranjos no espaço, o que pode ser melhor sintetizado pelo termo “estrutura cristalina”. Em função do arranjo atômico, os materiais metálicos apresentam, em geral, boa resistência mecânica e podem ser deformados permanentemente sob a ação de forças externas. Além, disso, como resultado das ligações metálicas, eles são bons condutores de calor e eletricidade. Os materiais metálicos são substâncias inorgânicas compostas por um ou mais elementos metálicos e podem também conter elementos não-metálicos, como o oxigênio, carbono e nitrogênio. Os metais são vitais para indústria moderna, pois seu uso ocorre em uma gama de aplicações excepcionalmente diversificada, da indústria de microeletrônica à automotiva. O uso de fios de ouro como condutor elétrico é visto em uma imagem ampliada de um circuito integrado, mostrada pela Figura 2.

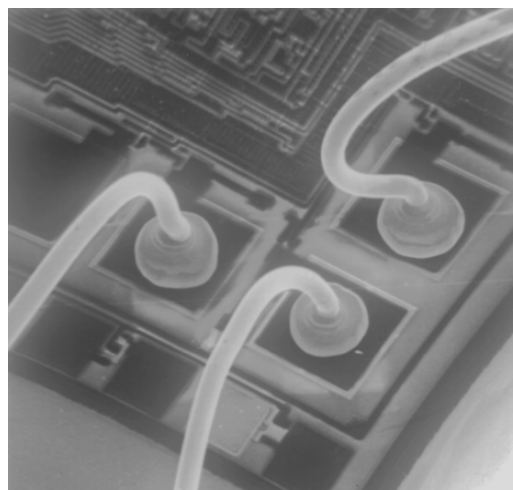


Figura 2: Circuito integrado exibindo fios de ouro como condutor de eletricidade (Microscopia Eletrônica de Varredura – 2.000x).

Por outro lado, a Figura 3 apresenta um turboalimentador utilizado em motores de combustão interna automotivos. Os gases de escape do motor impulsionam um dos rotores, o que permite que o outro rotor aumente a pressão de alimentação do motor, aumentando a eficiência do conjunto. É composto por

um rotor de impulsão construído em superliga de níquel e um rotor de compressão construído em liga de alumínio. Evidencia-se assim a forte variabilidade na aplicação dos materiais metálicos.

Os mais característicos exemplos de materiais metálicos são: aço, ferro fundido, alumínio, cobre, bronze, ouro, prata, chumbo, aço inoxidável, magnésio e titânio.

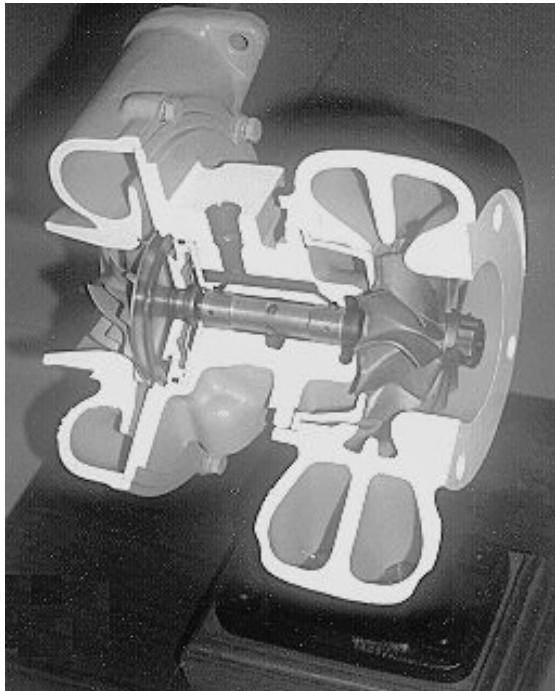


Figura 3: Turboalimentador automotivo.

1.2.2. Materiais Cerâmicos

Os materiais classificados como cerâmicos envolvem substâncias altamente resistentes ao calor e no tocante à estrutura atômica, podem apresentar arranjo ordenado e desordenado, dependendo do tipo de átomo envolvido e à forma de obtenção do material. Esses materiais são constituídos por elementos metálicos e não-metálicos (inorgânicos), formando reações químicas covalentes e iônicas. Em função do arranjo atômico e das ligações químicas presentes, os materiais cerâmicos apresentam elevada resistência mecânica, alta fragilidade, alta dureza, grande resistência ao calor e, principalmente, são isolantes térmicos e elétricos. Nas últimas décadas, uma gama bastante variada de novos materiais cerâmicos foi desenvolvida. Tais materiais caracterizam-se, principalmente, pelo controle de suas composições, das dimensões de suas partículas e do processo de produção dos componentes. Como resultado desse procedimento, é possível produzir dispositivos de alta resistência mecânica e resistentes a temperaturas elevadas, o que possibilita a aplicação dos mesmos em máquinas térmicas, onde o aumento do rendimento está ligado ao aumento da temperatura de trabalho. A Figura 4 mostra diferentes tipos de materiais cerâmicos.

Exemplos de materiais cerâmicos incluem a alumina, a sílica, o nitreto de silício, a zircônia e o dissiliceto de molibdênio, todos caracterizados como materiais cerâmicos de engenharia.



Figura 4: Exemplos de materiais cerâmicos comuns.

Em razão de sua excelente estabilidade térmica, os materiais cerâmicos têm um importante papel na fabricação de diversos componentes mecânicos, tais como inserts de pistões de motores de combustão interna ou ainda, na produção de componentes de turbinas a gás. Na Figura 5 visualiza-se todo o mecanismo de freio do Porsche® onde, as pastilhas são fabricadas com elementos cerâmicos



Figura 5: Pastilhas de disco de freio.

1.2.3. Materiais Poliméricos

Os materiais poliméricos, apesar de abrangerem diversos materiais classificados como naturais, envolvem ainda aqueles de natureza sintética e artificial. Na Figura 6 observam-se alguns exemplos de aplicações de materiais poliméricos.

Grande parte desses últimos teve sua utilização viabilizada a partir da década de 20, com os avanços da química orgânica. A principal característica que diferencia os materiais poliméricos dos outros tipos de materiais está relacionada à presença de cadeias moleculares de grande extensão constituídas principalmente por carbono.



Figura 6: Exemplos de aplicações de materiais poliméricos

O arranjo dos átomos da cadeia molecular pode levar a mesma a ser caracterizada como linear, ramificada ou tridimensional. O tipo de arranjo da cadeia controla as propriedades do material polimérico. Embora esses materiais não apresentem arranjos atômicos semelhantes ao cristalino, alguns podem exibir regiões com grande ordenação atômica (cristalina) envolvida por regiões de alta desordem (não-cristalina). Devido à natureza das ligações atômicas envolvidas (ligações covalentes e ligações secundárias), a maioria dos plásticos não conduz eletricidade e calor. Além disso, em função do arranjo atômico de seus átomos, os materiais poliméricos exibem, em geral, baixa densidade e baixa estabilidade térmica. Tal conjunto de características permite que os mesmos sejam frequentemente utilizados como isolantes elétricos ou térmicos ou na confecção de produtos onde o peso reduzido é importante.

Um dos materiais poliméricos mais versáteis é o polietileno, com um número de aplicações industriais bastante amplo. Outro exemplo de material polimérico inclui o poliuretano, que é usado na fabricação de implantes cardíacos ou a borracha natural utilizada na fabricação de pneus. A Figura 7 mostra um exemplo de uso de plástico na indústria automobilística.



Figura 7: Automóvel experimental projetado pela Chrysler® com carroceria produzida em uma única peça de plástico, o que pode resultar em redução de até 25% de seu preço final.

1.2.4. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos, também denominados de materiais conjugados, podem ser descritos como a combinação de dois ou mais diferentes materiais, o que resulta em propriedades não apresentadas pelos constituintes individuais. Além disso, os materiais constituintes do material compósito não dissolvem um no outro e exibem uma interface bem definida entre eles. Esses materiais podem ser divididos em materiais compósitos naturais ou tradicionais e em materiais compósitos avançados. No primeiro grupo enquadram-se a madeira, o concreto e o asfalto. Por outro lado, os materiais compósitos avançados surgiram há poucas décadas, como resultado de necessidades resultantes de avanços tecnológicos nas indústrias aeronáutica, naval e automobilística. Na Figura 8 visualiza-se duas direções características de uma fibra de carbono, neste caso ela está inserida em uma matriz plástica.

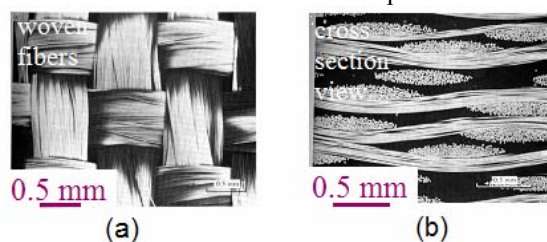


Figura 8: Seção de fibras de carbono numa matriz polimérica, sendo (a) seção longitudinal e (b) transversal.

Dentre os materiais compósitos mais comuns destacam-se os de matriz plástica reforçada com fibras de vidro ou carbono, ou ainda, as ligas de alumínio reforçadas com filamentos de boro.

1.2.4. Materiais Semicondutores

Os semicondutores possuem propriedades elétricas que são intermediárias entre aquelas apresentadas entre os condutores elétricos e pelos isolantes. Além disso, as características elétricas destes materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impureza, as quais podem ser controladas ao longo de regiões espaciais muito pequenas. Na Figura 9 evidencia-se um exemplo típico de elementos semicondutores aplicados na indústria eletrônica.

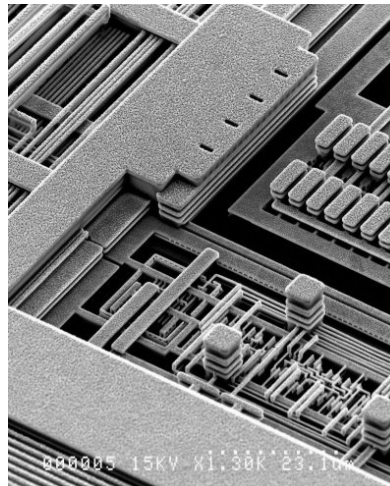


Figura 9: Elementos semicondutores em placas-mãe de computadores.

Numa forma global, são substâncias brilhantes, condutoras de calor e da eletricidade, dúcteis, maleáveis, tenazes, não voláteis e densas. Na prática entende-se por metal toda substância que possua "brilho metálico" próprio e plasticidade, fazendo com que o diferencie de outros materiais. A partir disto, o presente capítulo apresenta os princípios físicos presentes nos metais, seguido das definições das propriedades e transformações características e findando com a apresentação dos diferentes tipos de materiais metálicos comumente encontrados em planta industriais.

2.1. Atomística dos Materiais

Algumas das propriedades importantes dos materiais sólidos dependem dos arranjos geométricos dos átomos e também das interações que existem entre os átomos ou molécula constituintes. Os metais não são exceção a esta relação. Desta forma, um estudo completo da atomística dos materiais passa obrigatoriamente por algumas definições e apresentações de fenômenos importantes.

2.1.1. Estrutura Atômica

O átomo consiste de partículas elementares denominadas de Nêutrons, Prótons e Elétrons. Cada uma destas partículas apresenta características particulares, de massa e carga elétrica. Os nêutrons e os prótons formam o núcleo do átomo, ao redor do qual circula os elétrons em órbitas de translação formando uma espécie de "nuvem" eletrônica envoltória. Tanto os elétrons como os prótons possuem uma carga elétrica de $1,60 \times 10^{-19}$ C (Coulomb) que é negativa para os primeiros e positiva para os segundos. Os nêutrons não possuem cargas elétricas, mas possuem uma massa de aproximadamente $1,67 \times 10^{-27}$ kg, que é a mesma para os prótons e que é significativamente maior que a do elétron, $9,11 \times 10^{-31}$ kg. Cada elemento químico é caracterizado por um número de prótons no seu núcleo ou Número Atômico (Z). Para um átomo completo (eletricamente neutro), o número atômico é também igual ao número de elétrons. A Massa Atômica (A) de um átomo específico pode ser expressa pela soma do número de prótons e de nêutrons dentro do núcleo. Para o nosso estudo, consideraremos o Peso Atômico igual à Massa Atômica. Assim, qualquer elemento químico pode ser identificado na tabela periódica, pelos seus números característicos Z ou A. O ferro (Fe), por exemplo, apresenta-se na Figura 11, com número atômico 26 e peso atômico 55,847 (≈ 56) e assim, possui um átomo com 26 prótons, 26 elétrons (considerando eletricamente neutro) e 30 nêutrons (56-26).

Embora o número de prótons seja o mesmo para todos os átomos de um mesmo elemento, o número de nêutrons (N) pode variar. Assim átomos de um mesmo elemento têm duas ou mais diferentes massas atômicas, os quais são chamados de isótopos. Os átomos consistem então, de pequenos núcleos onde se encontram cargas positivas e neutras, com elétrons se movendo em volta deste núcleo. As órbitas eletrônicas podem ser consideradas essencialmente esféricas e

distribuídas ao redor do núcleo atômico segundo leis restritivas do ponto de vista energético. Cada órbita representa níveis de energia medidos em elétrons-volt ($1\text{ev} = 1,6 \times 10^{-19}$ joules), formando verdadeiras calotas energéticas denominadas de camadas eletrônicas. Em função do seu número de ordem (n), a partir do núcleo, estas camadas são identificadas por letras da seguinte forma, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Relação entre número de ordem e nome de cada camada eletrônica.

camada	K	L	M	N	O	P	Q
n	1	2	3	4	5	6	7

Cada camada eletrônica possui um número máximo de elétrons dado por:

$$E_{\text{máximo}} = 2 \cdot n^2 \quad [1]$$

Onde n é o número de ordem da camada também denominado de Número Quântico Principal. Assim, as camadas eletrônicas vão se preenchendo de elétrons segundo esta restrição, até que o átomo atinja um número total de elétrons igual ao seu número atômico Z. A Tabela 2 abaixo apresenta as camadas e seus números máximos de elétrons, segundo a Equação [1].

Tabela 2: Máximo número de elétrons permitido por camada eletrônica.

camada	K	L	M	N	O	P	Q
Número máximo	2	8	18	32	50	72	98

Por sua vez, cada camada eletrônica se subdivide em subcamadas energéticas ou Subníveis Quânticos, tanto quanto seja o seu número quântico principal. Cada um desses subníveis é identificado pelo Número Quântico Secundário (l), que pode variar desde $l = 0$ até $l = n-1$ em cada camada, como mostra a sequência de preenchimento da Tabela 3:

Tabela 3: Relação entre camadas, número de ordem (n), subníveis (número quântico secundário) e quantidade máxima de elétrons por subnível ($E_{\text{máx.}}$).

Camada / (n)	Subníveis	$E_{\text{máx}}$
K / (n = 1)	$l = 0$	2 elétrons
L / (n = 2)	$l = 0$	2 elétrons
	$l = 1$	6 elétrons
M / (n = 3)	$l = 0$	2 elétrons
	$l = 1$	6 elétrons
	$l = 2$	10 elétrons
N / (n = 4)	$l = 0$	2 elétrons
	$l = 1$	6 elétrons
	$l = 2$	10 elétrons
	$l = 3$	14 elétrons
O / (n = 5)	$l = 0$	2 elétrons
	$l = 1$	6 elétrons
	$l = 2$	10 elétrons
	$l = 3$	14 elétrons
	$l = 4$	18 elétrons
P / (n = 6)	$l = 0$	2 elétrons
	$l = 1$	6 elétrons
	$l = 2$	10 elétrons
	$l = 3$	14 elétrons
	$l = 4$	18 elétrons
	$l = 5$	22 elétrons

Q / (n = 7)	l = 0	2 elétrons
	l = 1	6 elétrons
	l = 2	10 elétrons
	l = 3	14 elétrons
	l = 4	18 elétrons
	l = 5	22 elétrons
	L = 6	26 elétrons

Como exemplo, vamos pegar o átomo de alumínio (Al) que não chega a preencher a terceira camada eletrônica, já que seu número atômico é 13. A sequência de preenchimento do átomo de alumínio é a seguinte:

Tabela 4: Sequência de preenchimento do átomo de alumínio.

K / (n = 1)	l = 0	2 elétrons
L / (n = 2)	l = 0	2 elétrons
	l = 1	6 elétrons
M / (n = 3)	l = 0	2 elétrons
	l = 1	1 elétron
	l = 2	vazio

Podemos sistematizar este preenchimento, por camadas, conforme a Figura 12.

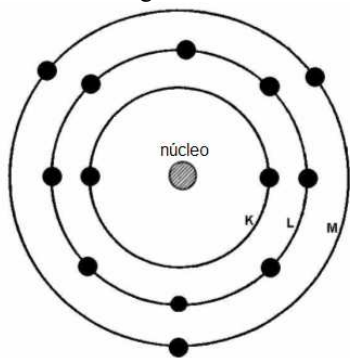


Figura 12: Distribuição eletrônica por camadas de um átomo de alumínio.

Na Figura 13 esquematiza-se a distribuição eletrônica nos subníveis de um átomo de alumínio.

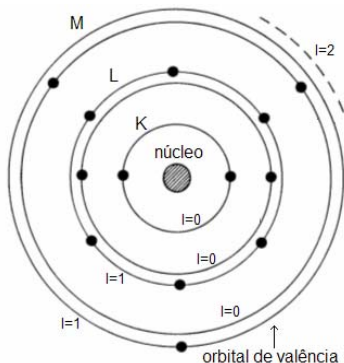


Figura 13: Distribuição eletrônica por subníveis quânticos de um átomo de alumínio.

As restrições energéticas da distribuição de elétrons nas camadas não terminam nos subníveis quânticos, pois, estes podem ainda ser subdividido em estados de energia. Entretanto para efeito de entendimento da estrutura dos materiais, tal refinamento se torna dispensável. Cabe apenas mencionar que os elétrons, além do movimento de translação ao redor do núcleo do átomo, apresentam também um movimento de rotação em torno de si mesmo o que é denominado de Spin Eletrônico.

Resta ainda mencionar que os elétrons não são necessariamente estáveis em suas órbitas. Os elétrons podem receber estímulos energéticos externos de modo a provocar saltos eletrônicos de uma órbita para a outra, sempre que as órbitas envolvidas não estejam preenchidas com seu número máximo de elétrons. Este salto orbital caracterizado por absorção ou emissão, sob forma de radiação, de uma energia quantizada denominada Fóton. A emissão do fóton corresponde a um salto do elétron para órbitas mais externas ao núcleo atômico. Nestas condições diz-se que o átomo encontra-se excitado.

De maneira simplificada, porém útil para o entendimento da estrutura dos materiais, o átomo pode ser considerado como uma esfera eletromagnética que possui uma massa e um raio atômico que é definido como a distância do núcleo à órbita eletrônica mais externa. O raio atômico é medido em Angstroms ($\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$) e seu valor depende de uma série de fatores, inclusive da temperatura, situa-se de 0,5 e 2,5 \AA para a maioria dos elementos conhecidos.

2.1.2. Sólidos Cristalinos

A estrutura dos materiais sólidos é resultado da natureza de suas ligações químicas, a qual define a distribuição espacial de seus átomos, íons ou moléculas. A grande maioria dos materiais comumente utilizados em engenharia, particularmente os metálicos, exibe um arranjo geométrico de seus átomos bem definido, constituindo uma estrutura cristalina. Um material cristalino, independente do tipo de ligação encontrada, apresenta um agrupamento ordenado de seus átomos, íons ou moléculas, que se repete nas três dimensões. Nesses sólidos cristalinos, essa distribuição é bem ordenada, exibindo simetria e posições bem definidas no espaço. Em estruturas cristalinas, o arranjo de uma posição em relação a uma outra posição qualquer deve ser igual ao arranjo observado em torno de qualquer outra posição do sólido, ou seja, qualquer posição em uma estrutura cristalina caracteriza-se por apresentar vizinhança semelhante.

Uma definição pertinente ao estudo de estruturas cristalinas refere-se à definição de célula unitária. Ela é definida como a menor porção do cristal que ainda conserva as propriedades originais do mesmo. Existem ao todo 14 tipos de células reunidas em 7 sistemas diferentes (sistemas Bravais). Em nossos estudos serão abordadas principalmente três células unitárias (CFC, CCC e HC) que pertencem a dois sistemas (cúbico e hexagonal). Como forma de classificar o nível de ocupação por átomos em uma estrutura cristalina define-se o Fator de Empacotamento (F.E.), assim, F.E. representa a fração do volume de uma célula unitária que corresponde a esferas sólidas, assumindo o modelo da esfera atômica rígida.

Conforme discutido, as estruturas cristalinas hexagonais, juntamente com as estruturas cúbicas, formam os arranjos atômicos dos principais elementos principalmente os elementos metálicos. Desses cristais, mais da metade apresenta estrutura cúbica, um terço

exibe estrutura hexagonal e os cristais restantes estão distribuídos entre os outros tipos estruturais.

Cúbico de Corpo Centrado

No arranjo Cúbico de Corpo Centrado (CCC) existe um átomo em cada vértice de um cubo e um outro átomo no centro do mesmo, como mostra a Figura 14. Esta estrutura pode ser encontrada no cromo, vanádio, zircônio, tungstênio, tântalo, bário, nióbio, lítio, potássio, etc. O fator de empacotamento atômico para esta estrutura é de 68%.



Figura 14: Representação esquemática de uma célula unitária da estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC).

Cúbico de Face Centrado

O arranjo Cúbico de Face Centrada (CFC) caracteriza-se por exibir os mesmos átomos nos vértices, encontrados nos outros dois arranjos cúbicos anteriores, e mais um átomo em cada face do cubo. A estrutura cúbica de face centrada é a estrutura do alumínio, cálcio, chumbo, níquel, cobre, platina, prata, ouro, etc. O fator de empacotamento atômico para esta estrutura é de 74%. A Figura 15 apresenta um diagrama esquemático desta estrutura.

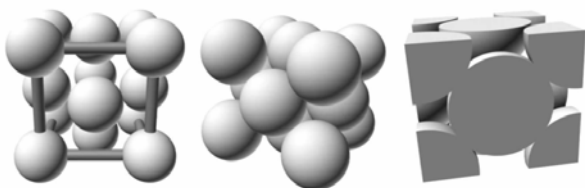


Figura 15: Representação esquemática de uma célula unitária da estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC).

Hexagonal Compacto

A estrutura Hexagonal Compacta (HC) é formada por dois hexágonos sobrepostos e, entre eles, existe um plano intermediário de três átomos. Nos hexágonos existem seis átomos nos vértices e um outro no centro, conforme Figura 16. A estrutura HC pode ser observada no berílio, berquélio, lítio, magnésio, cádmio, cobalto, titânio, etc. O fator de empacotamento atômico para esta estrutura é de 74%.

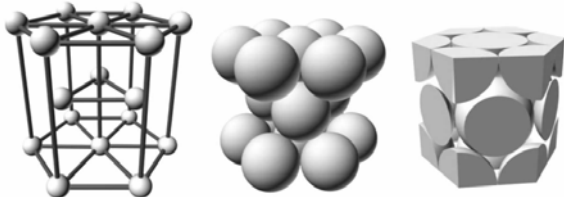


Figura 16: Representação esquemática de uma célula unitária da estrutura Hexagonal Compacta (HC).

Alotropia ou Polimorfismo

Diversos elementos, bem como compostos químicos apresentam mais de uma forma cristalina, dependendo de condições como pressão e temperatura envolvidas. Este fenômeno é denominado de alotropia ou polimorfismo. Metais de grande importância industrial como o ferro, o titânio e o cobalto apresentam transformações alotrópicas em temperaturas elevadas. A tabela abaixo mostra alguns metais que exibem variações alotrópicas e suas temperaturas de transformação. A variação alotrópica encontrada em cristais de ferro pode ser considerada como um clássico exemplo de polimorfismo. Esta variação alotrópica é muito importante em processos metalúrgicos, pois permite a mudança de certas propriedades do aço através de tratamentos térmicos.

Tabela 5: Variações alotrópicas (polimorfismo) em alguns metais.

Metal	Estrutura	
	Temp. Amb.	Outras Temp.
Ca	CFC	CCC ($>447^{\circ}\text{C}$)
Co	HC	CFC ($>427^{\circ}\text{C}$)
Fe	CCC	CFC (912°C - 1394°C)
		CCC ($>1394^{\circ}\text{C}$)
Li	CCC	HC ($<-193^{\circ}\text{C}$)
Na	CCC	HC ($<-233^{\circ}\text{C}$)
Ti	HC	CCC ($>883^{\circ}\text{C}$)

Um outro exemplo clássico de polimorfismo é a variação alotrópica do carbono. Este elemento é encontrado como diamante, que é o material mais duro na natureza e como grafite, um material de baixíssima dureza, que pode ser usado como lubrificante. O diamante é duro porque todas as suas ligações são covalentes. Por outro lado, a grafite tem ligações covalentes apenas em alguns planos. Estes planos são agregados a outros planos através de forças secundárias e assim, é fácil provocar o deslizamento dos mesmos, conforme Figura 17.

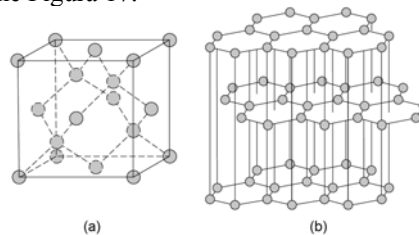


Figura 17: Representação esquemática da alotropia do carbono sendo (a) célula unitária do diamante e (b) a estrutura da grafita.

2.1.3. Imperfeições em Sólidos

Os cristais observados na prática nunca são totalmente perfeitos, exibindo defeitos de diversas naturezas. Tais imperfeições afetam diretamente várias características dos materiais. As imperfeições presentes em estruturas cristalinas podem ser de três tipos básicos: defeitos pontuais, defeitos em linha e defeitos de superfície. Em adição, algumas imperfeições de natureza volumétrica, como precipitados e porosidades também podem ser caracterizados como defeitos, porém não serão aqui tratadas devido ao caráter macroscópico das mesmas.

Defeitos Pontuais

Os defeitos pontuais, também definidos como defeitos de uma dimensão, estão associados a pontos específicos da rede cristalina. Esses defeitos são de diversos tipos e são formados durante o processo de crescimento do cristal ou ainda durante o processamento do material. As imperfeições pontuais são classificadas em: vacâncias ou vazios, átomos intersticiais e átomos substitucionais.

As vacâncias são tidas como mais importantes em relação aos demais defeitos, Figura 18. Esse defeito relaciona-se a vazios em posições da estrutura cristalina causados pela ausência de átomos.

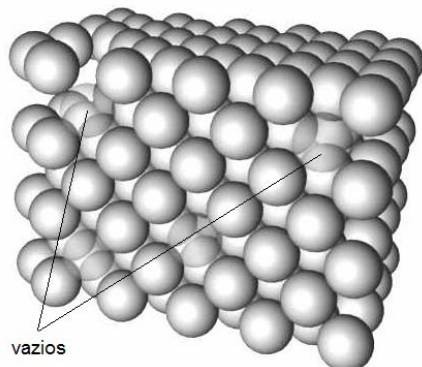


Figura 18: Representação esquemática de vacâncias causadas pela ausência de átomos numa estrutura CFC.

A origem das vacâncias está ligada à formação do sólido durante o crescimento do cristal, ou mesmo durante uma transformação de fase do tipo sólido/sólido, conforme verificaremos posteriormente. Em adição, a quantidade de vacâncias é muito influenciada por movimentos de vibração dos átomos em torno de suas posições, causadas pelo aumento de temperatura. Em baixas temperaturas, a quantidade de vazios na rede cristalina não é elevada. Porém, com o aquecimento do material, essa quantidade cresce consideravelmente. Em metais, a quantidade de vacâncias é muito pequena, atingindo quantidades não superiores a 0,01 % do número total de átomos na rede.

Os átomos intersticiais ficam alojados nos “interstícios” da rede cristalina, conforme Figura 19.

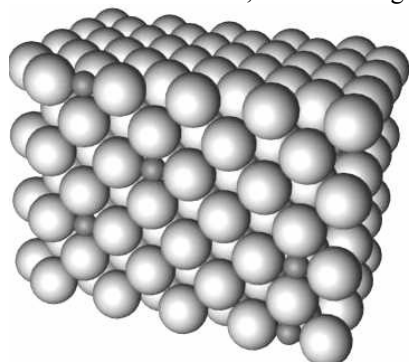


Figura 19: Exemplo de átomos intersticiais.

Já os átomos substitucionais literalmente substituem os átomos na rede cristalina, conforme Figura 20.

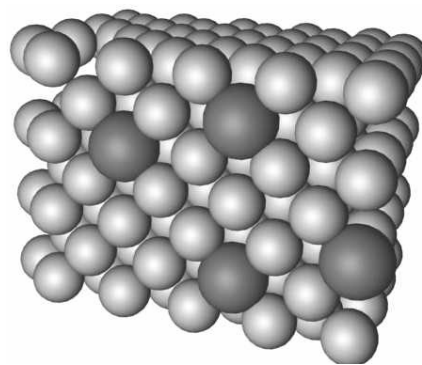


Figura 20: Exemplo de átomos substitucionais.

Defeitos Lineares

Os cristais podem apresentar defeitos alinhados e contínuos em sua estrutura, dando origem às imperfeições em linha, ou imperfeições de uma dimensão. Os defeitos em linha, também chamados de discordâncias são imperfeições que causam a distorção da rede cristalina em torno de uma linha e caracterizam-se por envolver um plano extra de átomos. Estas imperfeições podem ser produzidas durante o crescimento do cristal, em processos onde ocorre a deformação permanente do cristal ou ainda como resultado da interação de vacâncias. Existem dois tipos principais de discordâncias, que são conhecidos como: discordância em cunha e discordância em hélice. Na Figura 21 é apresentado a discordância em cunha.

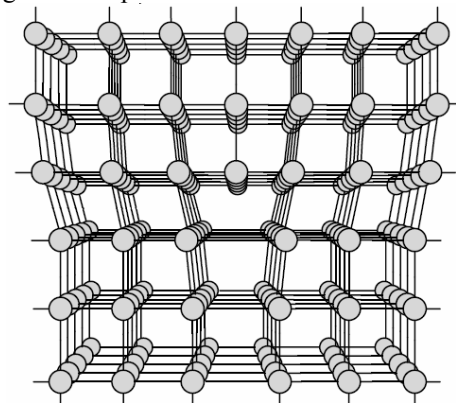


Figura 21: Discordância em cunha.

Na Figura 22 apresenta-se esquematicamente uma discordância em hélice.

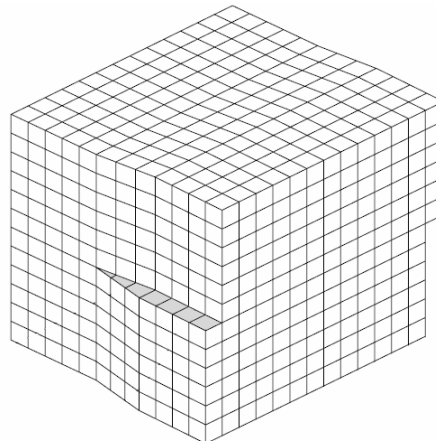


Figura 22: Discordância em Hélice.

Normalmente, uma discordância em cunha está associada a uma discordância em hélice, o que gera uma discordância mista, conforme Figura 23.

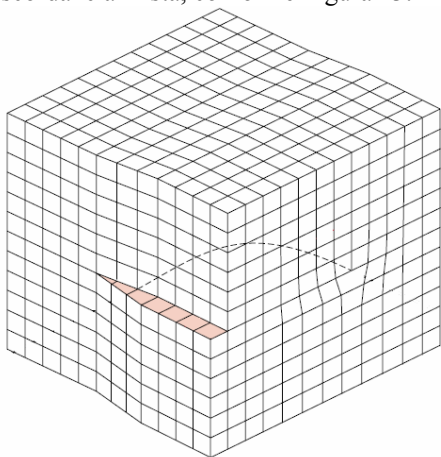


Figura 23: Discordância Mista.

Defeitos de Superfícies

Os cristais também apresentam defeitos em duas dimensões, que se estendem ao longo da estrutura, gerando imperfeições de superfícies. Esse tipo de imperfeição cristalina pode ser de quatro tipos: superfícies livres, contornos de grão e maclas, conforme segue:

Superfícies Livres

Apesar de serem considerados os terminos da estrutura cristalina, as superfícies externas de um cristal são consideradas defeitos cristalinos, já que o número de vizinhos de um átomo superficial não é o mesmo de um átomo no interior do cristal (Figura 24).

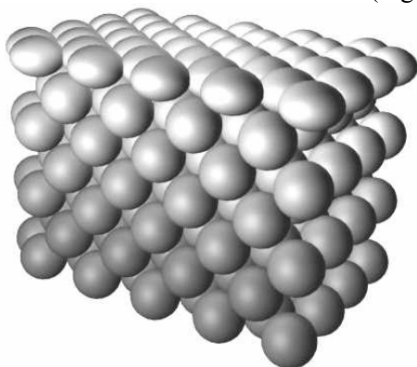


Figura 24: Estrutura cristalina externa.

Os átomos superficiais possuem vizinhos apenas de um lado, tem maior energia e assim, estão ligados aos seus vizinhos mais fragilmente.

Contornos de Grãos

Uma determinada estrutura cristalina normalmente não é homogênea ao longo de todo o material. Como veremos posteriormente, no momento da solidificação, os cristais crescem em vários sentidos diferentes e assim, no momento em que estes cristais se encontram formam um “descasamento” da estrutura formando, nesses pontos, de contato, uma região conhecida como “contorno de grão”. Devidos ao caráter tridimensional da estrutura atômica, o contato dos vários grãos com diferentes orientações gera

superfícies de contornos de grão. A Figura 25 representa esquematicamente os contornos de grãos.

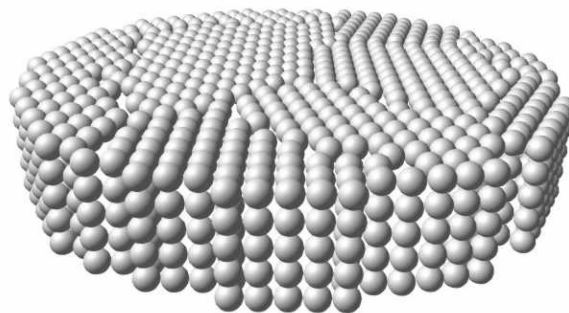


Figura 25: Contornos de Grãos

Maclas

As maclas constituem um outro tipo de defeito de superfície e podem surgir a partir de tensões térmicas ou mecânicas. Tal defeito de superfície ocorre quando parte da rede cristalina é deformada, de modo que a mesma forme uma imagem especular da parte não deformada, como indica a Figura 26. O plano cristalográfico de simetria entre as regiões deformadas e não deformadas é chamado de plano de maclação. A maclação ocorre em direções específicas chamadas de direções de maclação.

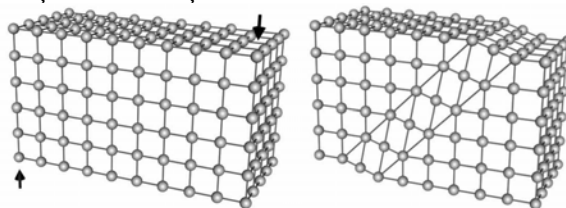


Figura 26: Diagrama esquemático do defeito de maclação.

2.1.4. Difusão Atômica

Muitas das reações e processos que são importantes no tratamento de materiais acontecem devido a transferência de massa ou dentro de um sólido específico, ou de um líquido ou um gás ou dentro de outro sólido. Estas reações são acompanhadas necessariamente pela difusão, que é um fenômeno de transporte de material por movimento atômico. A difusão pode ser definida como um mecanismo pelo qual a matéria é transportada através da matéria. Os átomos estão em constante movimento, seja em gases, líquidos ou sólidos. A difusão em gases é relativamente rápida, em líquidos é relativamente mais lento que nos gases. Já o movimento atômico nos sólidos é bastante restrito devido às fortes ligações entre os átomos e também devido à existência de posições de equilíbrio bem definidas. Entretanto, vibrações atômicas de origem térmica, existentes no sólido, permitem que a difusão aconteça, cada átomo vibra 10^{12} vezes por segundo na sua posição de rede.

Os átomos apenas estão em repouso absoluto quando a temperatura é igual a zero absoluto (-273°C). Acima desta temperatura, os átomos começam a vibrar e saem de suas posições originais. À medida que esta temperatura aumenta, o movimento atômico torna-se mais intenso. Existem dois mecanismos básicos de difusão de átomos em um sólido cristalino. Um deles é

o mecanismo substitucional ou de vazios e o outro é o mecanismo intersticial.

No caso do mecanismo substitucional ou de vazios, os átomos podem mover-se, no interior de um cristal, de uma posição atômica para outra se os mesmos apresentarem energia de vibração suficiente e se existirem posições atômicas vazias ou defeitos cristalinos na estrutura atômica. Esta energia de vibração é resultante da energia térmica dos átomos. Os vazios ou vacâncias em metais e ligas são defeitos de equilíbrio e assim, estão sempre presentes para permitir o movimento atômico pelo mecanismo substitucional. Com o aumento da temperatura em metais, mais vacâncias podem ser observadas e mais energia térmica estará disponível.

2.2. Transformações de Fases

O desenvolvimento de um conjunto de características mecânicas desejáveis para um material resulta, com frequência, de uma transformação de fase, a qual é forjada a partir de um tratamento térmico. Embora vejamos bem posteriormente a questão dos tratamentos térmicos, torna-se interessante analisarmos os princípios básicos das transformações de fases. Conceitualmente dividiremos estes fenômenos em duas partes distintas, as transformações líquido/sólido (solidificação) e posteriormente sólido/sólido. Cabe salientar que esta última será apenas uma pequena introdução pois, analisaremos em profundidade no momento da análise dos tratamentos térmicos. Por fim, introduzimos os conceitos pertinentes aos diagramas de equilíbrio ou diagramas de fases, questão vital para o entendimento das teorias de ciências dos materiais.

2.2.1. Princípios de Solidificação dos Metais

A maioria dos produtos metálicos, exceto aqueles fabricados por processos de eletrodeposição e da metalurgia do pó, passam pela transformação, em algum estágio de sua fabricação, do estado líquido para o estado sólido. A estrutura formada imediatamente após a solidificação determina as propriedades dos produtos finais, não somente no caso dos produtos fundidos, que são utilizados no estado bruto de fusão, mas também quando estes produtos são posteriormente trabalhados para a produção de barras, chapas e fios. Embora se acredite, incorretamente, que os defeitos são eliminados durante a conformação mecânica subsequente, é muito perigoso ignorar a existência de macrosegregação, de poros de contração, de inclusões não metálicas, de trincas e de outros defeitos nos lingotes. Na prática, mesmo quando um defeito é macroscopicamente eliminado pela conformação mecânica, muitos dos defeitos permanecem nos produtos acabados.

Mesmo num material macroscopicamente uniforme, a presença de um defeito local, tal como a segregação, poderia causar corrosão localizada, ruptura e poderia ainda, ser responsável por falhas de serviços causadoras de severos danos.

Geralmente, a microsegregação em lingotes pode ser eliminada por tratamento térmico,

posteriormente analisado. Contudo, a macrosegregação não pode ser eliminada por tratamento térmico e nem por subsequente conformação mecânica, permanecendo nos produtos acabados. Pode acontecer, por exemplo, que um extraordinário material desenvolvido em escala de laboratório, quando processado em escala industrial, apresente uma estrutura não uniforme com a presença de segregação, não resultando em termos de características tão confiável quanto se esperava. Isto não se refere somente aos fundidos, mas também nos casos de soldagem por fusão do metal base, ou do metal de adição, ou ainda, de ambos.

A fim de se adquirir e aperfeiçoar as técnicas que controlam o tamanho e a forma dos grãos e, a partir delas, produzir matéria fundida com estrutura homogeneamente composta por grãos finos e equiaxiais, tem sido, por um longo tempo, um grande sonho dos metalurgistas. A partir deste objetivo, deve-se lançar uma luz sobre o mecanismo de solidificação dos metais.

Logicamente, a dificuldade prática em se analisar a solidificação diretamente na “planta” de fundição, induz o estudo e teorização do fenômeno da solidificação através da análise metalográfica da estrutura final do fundido em confronto com as temperaturas desenvolvidas, e ainda, aliado a distribuição composicional, obtida através da análise térmica e análise química, respectivamente.

Os metais, ao se solidificarem nos moldes, iniciam-se por núcleos que se desenvolvem tanto no seio do líquido quanto nas paredes destes, formando cristais. Cada cristal, na medida que cresce, forma o que se chama, de uma forma geral, envelope dendrítico ou, como mais comumente conhecido grão. Este crescimento dá-se até o momento em que grãos adjacentes se encontram. A velocidade de solidificação, ou seja, a velocidade com que os cristais vão se formando determina o aspecto geral desta estrutura. Eles podem ser completamente amorfos, completamente planos, celulares ou ainda, dendríticos. Na prática metalúrgica, a estrutura dendrítica é a mais usual. Uma análise macroscópica dos grãos, em estruturas solidificadas a partir de moldes metálicos, determina um padrão característico onde o grão é colunar ou equiaxial. Na revelação macroestrutural de lingotes, comumente encontram-se estas diferentes estruturas distribuídas de uma forma bem característica sendo, uma região periférica, em contato direto com o molde, formada de grãos equiaxiais de granulometria reduzida, seguida de uma região intermediária de grãos alongados unidirecionalmente conhecida por grãos colunares, e por fim uma região central de grãos equiaxiais de tamanho maior aos encontrados na periferia. Alguns pesquisadores relatam uma quarta camada superficial dendrítica, formada no topo dos lingotes, ou seja, na interface metal/ar. Tal arranjo pode ser visualizado no desenho esquemático da Figura 27.

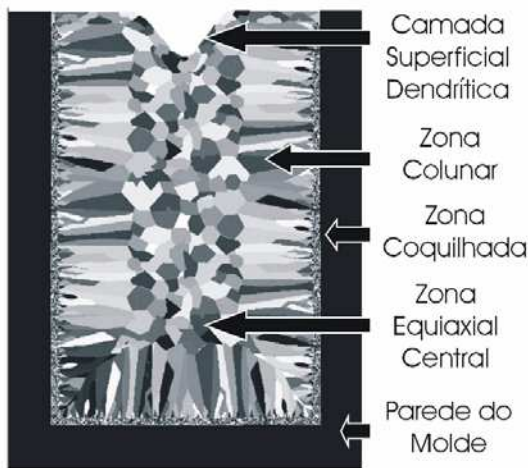


Figura 27: Diferentes regiões macroestruturais comumente obtidas em seções longitudinais de lingotes fundidos

Uma análise mais detalhada sobre esta transformação colunar-equiaxial é demonstrada no desenho esquemático da Figura 28.

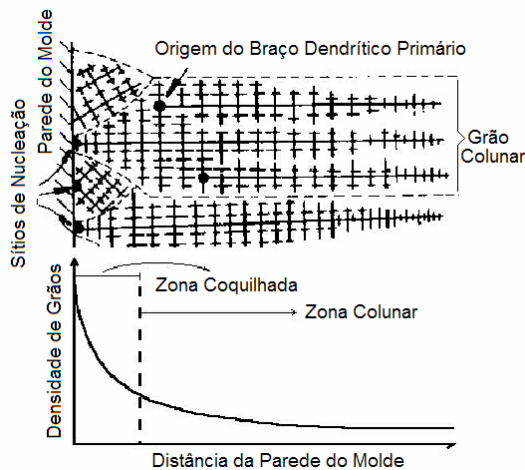


Figura 28: Dendritas favoravelmente orientadas desenvolvendo-se na forma de grãos colunares.

A região de grãos equiaxiais reduzidos, junto à parede do molde é denominada região coquilhada e se caracteriza, além do seu reduzido tamanho, de grande quantidade de grãos nucleados a partir da parede do molde. Tal densidade elevada provem da nucleação de vários núcleos na parede do molde, em grande parte relacionados a rugosidade do molde. No momento em que núcleos da região coquilhada começam a se chocar lateralmente, restringindo seu crescimento lateral, alguns braços dendríticos favoravelmente orientados, começam a crescer acentuadamente em sentido oposto ao fluxo de calor. Na medida que estes braços crescem seu ramo principal no sentido oposto do fluxo de calor, alguns braços dendríticos secundários se formam, crescendo lateralmente no entanto, o comprimento do braço dendrítico primário é muito superior ao secundário e até mesmo, ao terciário, quando presente. A estes grãos formados por estas dendritas alongadas denomina-se região colunar. Num processo de solidificação extremamente rápido, estes grãos podem crescer até se encontraram com grãos colunares provenientes da outra parede do molde, no entanto, na

maioria dos casos, se verifica uma nucleação aleatória no seio do líquido, originando dendritas orientadas randomicamente. Estas dendritas “desorientadas” crescem continuamente em todas as direções e interrompem o crescimento colunar. Esta região de dendritas randomicamente orientadas no seio do líquido se denomina região equiaxial central.

Até o presente momento analisamos apenas as características metalográficas das estruturas de solidificação. Também podemos analisar a solidificação do ponto de vista térmico, ou seja, como a temperatura de resfriamento afeta a solidificação. Neste sentido, precisamos especificar o tipo de material a ser solidificado assim, podemos dividir os materiais metálicos em dois grandes grupos em relação ao seu resfriamento na solidificação, sendo:

Metais Puros e Ligas Eutéticas

Tratando-se de metais puros e ligas eutéticas, a curva toma a forma representada na. Partindo-se do ponto “A”, em que a massa esta completamente líquida, o metal se resfria rapidamente segundo uma lei exponencial. Chegando ao ponto “B”, correspondente à temperatura de solidificação, que para estes casos é igual à temperatura de fusão ($T_s = T_f$), se observa que a temperatura, ao invés de diminuir, permanece constante durante certo tempo. A este intervalo determina-se patamar de solidificação e é diretamente relacionado ao desprendimento do calor latente de solidificação. Quando toda a massa solidificou-se, a temperatura volta a descer, mas lentamente até alcançar a temperatura ambiente. O super-resfriamento ocorre devido a inércia térmica, ou seja, quando se inicia a solidificação em um líquido, o calor cedido faz aumentar a temperatura até alcançar a de solidificação, que permanecerá inalterada durante toda a solidificação.

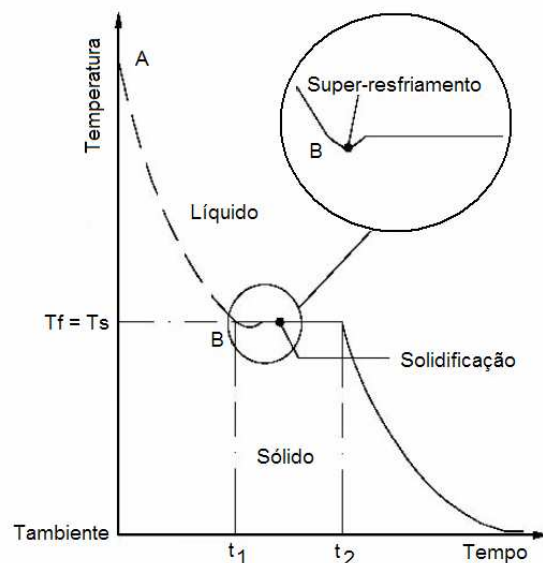


Figura 29: Resfriamento de um metal puro ou eutético, evidenciando o patamar de solidificação característico.

Ligas Metálicas (Exceto Ligas Eutéticas)

Nas ligas metálicas, contrário ao tipo de solidificação verificado para o caso de metal puro e ligas eutéticas, a passagem do estado líquido para o estado sólido não ocorre a uma temperatura constante, mas sim num intervalo de solidificação e desta forma determina pelo menos duas mudanças na inclinação da curva de resfriamento.

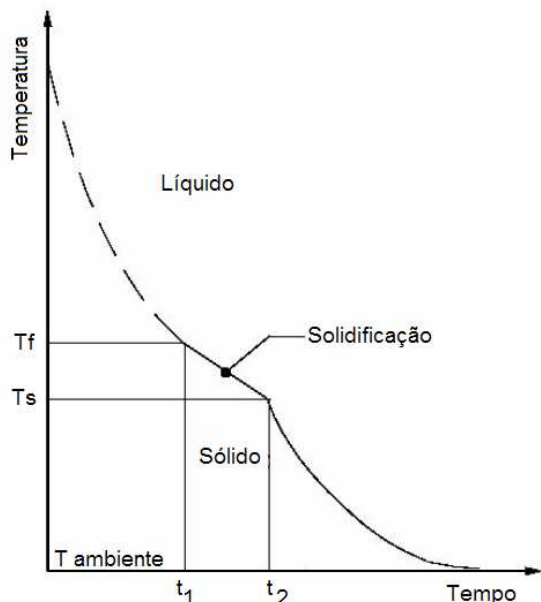


Figura 30: Resfriamento de uma liga metálica com intervalo de solidificação característico.

Grande parte dos defeitos em peças metálicas têm sua origem no momento da solidificação do material. Aprofundaremos mais este assunto no momento de analisarmos os processos de fabricação e na disciplina de FUNDIÇÃO.

2.2.2. Transformações no Estado Sólido

A maioria das transformações no estado sólido não ocorre instantaneamente, pois os obstáculos impedem o curso da reação e a torna dependente do tempo. Por exemplo, uma vez que a maioria das transformações envolve pelo menos a formação de uma nova fase que possui uma composição e/ou estrutura diferente daquela que a originou, são exigidos alguns rearranjos atômicos via difusão para que a transformação se processe. Conforme discutido anteriormente, a difusão é dependente do tempo. Um segundo impedimento à formação de uma nova fase consiste no aumento de energia que esta associada com os contornos entre fases, que são criados entre a fase original e a fase que esta sendo produzida. De um ponto de vista microestrutural, assim como na solidificação, o primeiro processo a acompanhar uma transformação de fases em estado sólido é a nucleação. Os locais de imperfeições microestruturais são *sites*

perfeitos para a formação destes núcleos e, em especial, os contornos de grãos. O segundo estágio é o crescimento, ao longo do qual, os núcleos aumentam de tamanho. Durante este processo, obviamente, uma parte do volume da fase original desaparece. A transformação atinge seu término e permite que o crescimento das partículas da nova fase prossigam até que a proporção em condições de equilíbrio seja atingida. Como seria de esperar, a dependência em relação ao tempo da taxa de transformação (que é conhecida por cinética de transformação) é uma consideração importante para o tratamento térmico dos materiais. As determinações das transformações de fases são feitas através de vários experimentos que focam a fração da reação em função do tempo, mantida a temperatura constante. Auxiliado pelo exame microscópico ou medição de alguma propriedade física característica da nova fase pode-se verificar a porcentagem transformada. Estas relações são visualizadas em diagramas do tipo FRAÇÃO TRANSFORMADA X TEMPO. Como a faixa de tempo é bastante ampla, se converte seu eixo para logaritmo. A Figura 31 apresenta um comportamento cinético típico de transformações no estado sólido. Os estágios de nucleação e crescimento são indicados na Figura 31.

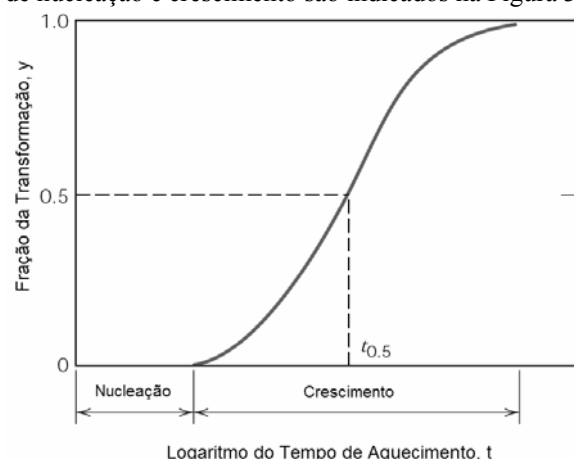


Figura 31: Gráfico da fração da transformação em função do logaritmo do tempo, típico para muitas transformações do estado sólido, onde a temperatura é mantida constante.

A temperatura é uma das variáveis em um processo de tratamento térmico que esta sujeita a controle ela pode ter uma influência profunda sobre a cinética e, portanto, sobre a taxa de uma transformação. Isto esta demonstrado na Figura 32 onde são mostradas curvas em forma de "S" para y (porcentagem transformada = porcentagem recristalizada) em função do x (logaritmo do tempo). A taxa de uma transformação é determinada pelo inverso do tempo necessário para que a transformação prossiga até a metade da sua conclusão, ($t_{0.5}$).

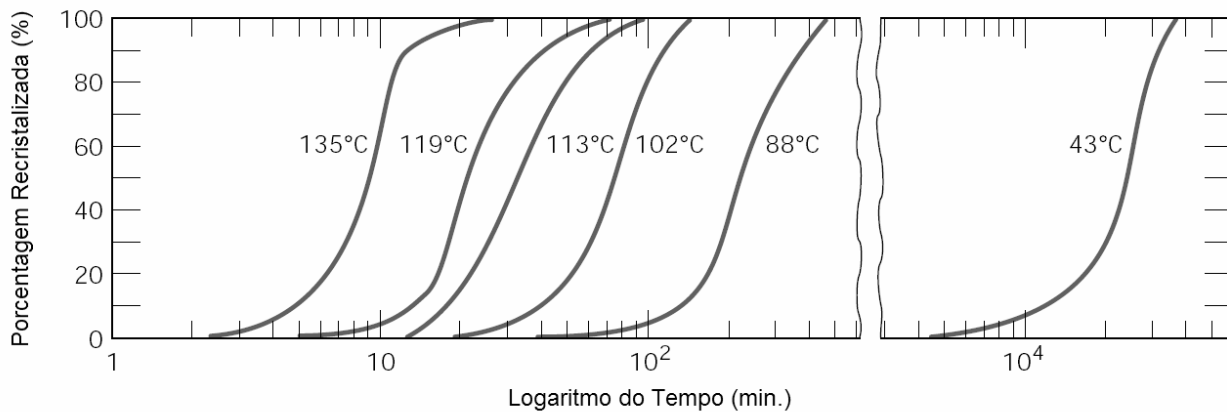


Figura 32: Porcentagem de recristalização em função do tempo e a uma temperatura constante para o cobre puro.

Sempre vale lembrar que estes tipos de processos que exibem estes comportamentos em função da temperatura são denominados termicamente ativados.

Para muitas ligas tecnologicamente importantes, o estado ou a microestrutura preferida é umas microestruturas metaestáveis, intermediárias entre o estado inicial e o de equilíbrio. Ocasionalmente, a estrutura desejada é bem diferente da estrutura de equilíbrio. Assim, é evidente a importância da análise da influência do tempo sobre as transformações de fases. Essa informação cinética é, em muitos casos, de maior valor que o conhecimento do estado final de equilíbrio.

2.2.3. Diagrama de Fases

A compreensão dos diagramas de fases é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura em uma liga esta relacionada às características do seu diagrama de fases. Ademais, os diagramas de fases fornecem informações valiosas sobre os fenômenos da fusão, fundição, cristalização e outros, conforme será discutido posteriormente. Contudo, numa introdução ao estudo dos diagramas de fases, estipulam-se algumas definições e conceitos pertinentes. O termo componente é usado com frequência nesta discussão e indica o metal puro ou composto que compõe uma liga. Também interessante definir solvente e soluto que indicam o elemento ou composto que se encontra em maior quantidade e o elemento ou composto que se encontra em menor concentração, respectivamente. Assim, neste estudo, indicaremos o termo composição como sendo similar à concentração e usualmente quantificado, em estudo de materiais metálicos, pela porcentagem em peso (%p), ou seja, é o peso de um elemento específico em relação ao peso total da liga. Outras formas de se quantificar concentração são encontradas na literatura, no entanto, além da porcentagem em peso definiremos a porcentagem atômica (%a) como sendo o número de moles de um elemento em relação ao número total de moles de todos os elementos da liga. No ANEXO I apresenta-se o desenvolvimento matemático destes tipos diferentes de denominação. Um outro termo bastante usado neste

contexto é sistema, que possui dois significados. Em primeiro lugar, um sistema pode se referir a um corpo específico de material sobre consideração (por exemplo, uma panela de fundição com aço fundido). Ou ele pode estar relacionado a série de possíveis ligas que consistem nos mesmos componentes, porém, independente da composição da liga. Um exemplo ilustrativo seria o Latão. Como veremos mais adiante em detalhes, os latões são ligas metálicas compostas de cobre e zinco. Como o cobre esta presente em maior quantidade é o componente Solvente e o zinco o soluto. Existem diferentes composições químicas para o latão e assim, o sistema Cobre-Zinco agrega, entre outras, as ligas denominadas latão, porém, existem composições intermediárias que pertencem a este sistema, mas não são consideradas como latão.

Da mesma forma que se misturam líquidos para se fazer uma solução (no caso, solução líquida), em materiais sólidos podemos fazer esta mistura. Neste caso recebe o nome de solução sólida. Assim, podemos definir a solução sólida como sendo constituída de pelo menos dois tipos diferentes de átomos (componentes). Os átomos do soluto ocupam posições substitutivas ou intersticiais na estrutura cristalina do solvente e assim, a estrutura cristalina do solvente é mantida. Assim como nos líquidos, por exemplo, quando você mistura açúcar no café, até uma determinada quantidade de açúcar ele é completamente dissolvido no café, no entanto, a partir de certo instante, esta quantidade adicionada começa a se acumular no fundo da xícara. A esta concentração máxima de açúcar que podemos adicionar ao café sem que este se precipite (acumule) no fundo da xícara denominamos limite de solubilidade. Este exemplo serve também para demonstrar que a solubilidade de um soluto no solvente é função da temperatura, pois, embora você tenha colocado açúcar no seu café a ponto de ele não se acumular no fundo do recipiente, na medida que você toma o café e ele vai esfriando (decaimento da temperatura) começam a surgir pequenas quantidades de açúcar no fundo da xícara, ou seja, a solubilidade é dependente da temperatura e é maior quanto maior for a temperatura. Em materiais metálicos sólidos temos o mesmo comportamento, no entanto, a dinâmica não é tão rápida quanto no caso do café. A Figura 33 demonstrar exatamente esta situação.

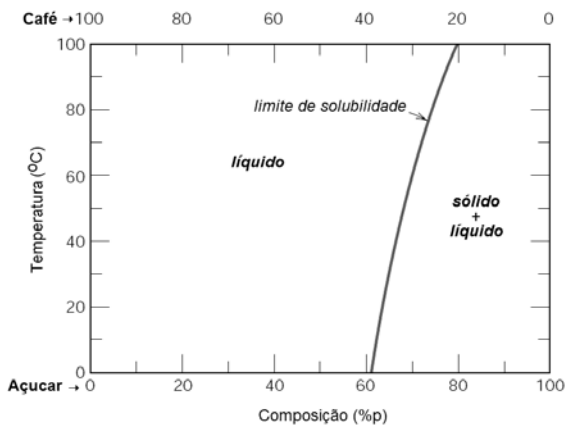


Figura 33: Solubilidade do Açúcar em Café (adaptação)

Também crítico para a compreensão de diagrama de fases é o conceito de fase. Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. Todo material puro é considerado como sendo uma fase; da mesma forma são todas as soluções sólidas, líquidas e gasosas. Por exemplo, o caso do café é uma fase e o açúcar acumulado no fundo do recipiente outra. Cada uma destas fases possui propriedades físicas diferentes. Interessante observar que quando duas fases estão presentes em um sistema, não é necessário que existam diferenças tanto nas propriedades físicas quanto nas propriedades químicas, uma disparidade em um ou no outro conjunto de propriedades já é suficiente. Algumas vezes um sistema de uma única fase é chamado de sistema homogêneo. Sistemas compostos por uma ou mais fases são conhecidos por mistura ou sistema heterogêneo.

O equilíbrio de um sistema é atingido quando as características deste sistema não mudam ao longo do tempo e, inclusive, persiste indefinidamente. Este sistema é identificado com estável. Ocasionalmente, uma alteração em alguma das variáveis do sistema (pressão, temperatura e/ou composição) acarretará

numa alteração das condições de equilíbrio e assim, o sistema tenderá novamente a atingir novamente o equilíbrio. Em muitos sistemas metalúrgicos e de materiais de interesse, o equilíbrio de fases envolve apenas fases sólidas. Neste sentido, o estado do sistema está refletindo nas características da microestrutura, a qual necessariamente não apenas as fases presentes e as suas composições, mas, além disso, as quantidades relativas das fases e os seus arranjos ou distribuições espaciais. Considerações a respeito de diagramas semelhantes à Figura 33 fornecem informações sobre as características de equilíbrio de um sistema específico, o que é importante, porém eles não indicam o intervalo de tempo necessário para que se atinja um novo estado de equilíbrio. Com frequência, este é o caso, especialmente em sistemas sólidos, em que um estado de equilíbrio nunca é completamente atingido pois a taxa segundo a qual se chega ao equilíbrio é extremamente lenta; diz-se então que o sistema encontra-se em um estado de não-equilíbrio ou metaestável. Um estado ou microestrutura metaestável pode persistir indefinidamente, experimentando somente alterações extremamente pequenas e praticamente imperceptíveis com o passar do tempo. Com certeza as estruturas metaestáveis possuem um significado mais prático do que as estruturas em equilíbrio. Dessa forma, não é importante apenas uma compreensão dos estados e estruturas em condições de equilíbrio, mas também da velocidade ou taxa segundo a qual essas condições são estabelecidas. Além disso, os fatores que afetam as taxas devem ser considerados. Posteriormente abordaremos o efeito das taxas de reação e das estruturas que não se encontram em equilíbrio (diagramas de transformações).

Os diagramas de equilíbrio são desenhados com o auxílio de várias curvas de resfriamento, conforme Figura 29 e Figura 30, correspondentes a distintas proporções dos elementos. A Figura 34 ilustra as etapas envolvidas na confecção dos diagramas.

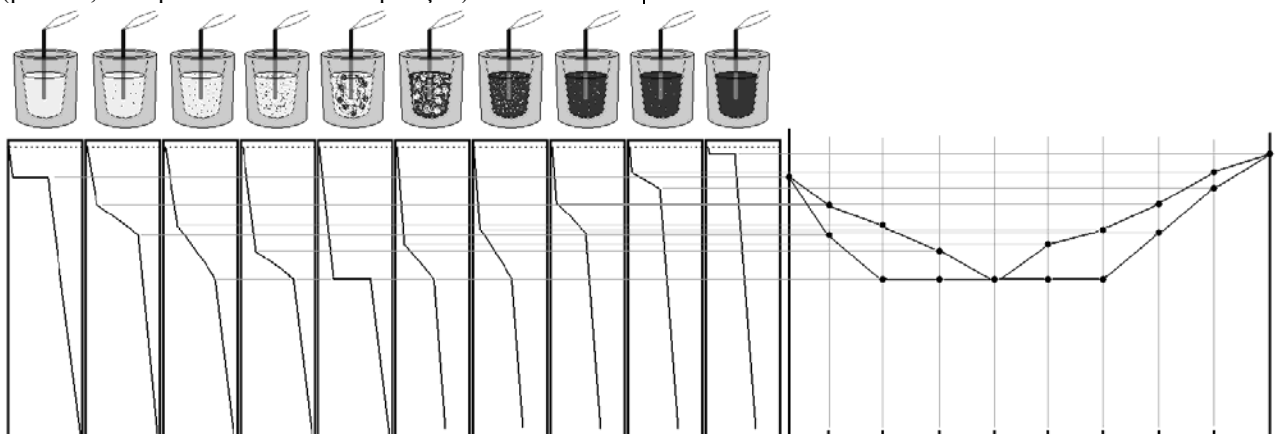


Figura 34: Desenho esquemático da obtenção de diagramas de fases.

A determinação do diagrama é novamente visualizada na Figura 35 porém, em mais detalhes.

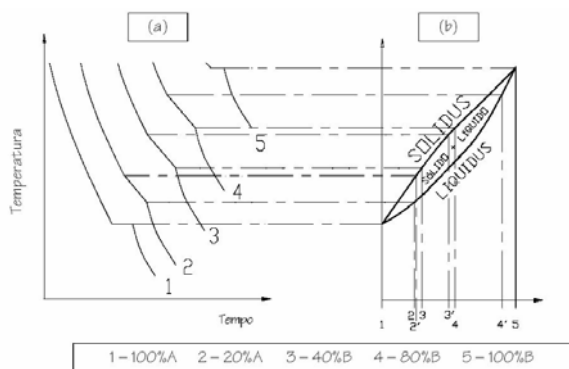


Figura 35: Construção do diagrama de equilíbrio, sendo (a) curva de resfriamento e (b) diagrama de equilíbrio para o caso de ligas metálicas.

Traça-se a curva de resfriamento do ponto “A”, em seguida, adicionam-se diversas proporções do componente “B”, obtendo-se os intervalos de solidificação e uma curva final com o componente “B” puro. Sobre as retas verticais correspondentes as diferentes proporções, traçam-se as temperaturas de início e final de solidificação.

Unindo-se entre si os pontos de princípios de solidificação, obtém-se uma linha acima da qual todas as ligas apresentam-se em estado líquido. Esta linha é chamada de *liquidus*. De forma similar, unindo-se entre si os pontos de final de solidificação, obtém-se uma linha abaixo da qual todas as ligas apresentam-se em estado sólido. Esta linha é chamada de *solidus*. Entre as duas regiões tem-se a região bifásica pastosa *mush zone* de líquido e sólido.

Conforme se pode observar no diagrama, na medida em que a temperatura diminui, a quantidade de líquido diminui até a completa solidificação. Determina-se da quantidade relativa de cada fase é dada pela regra da alavanca.

Os diagramas de equilíbrio têm várias configurações, segundo a ação mútua dos componentes. Em se tratando de ligas binárias, podemos ter:

- Nenhuma solubilidade no estado sólido com formação do eutético;
- Solubilidade completa dos componentes no estado sólido (formação de solução sólida);
- Solubilidade Parcial dos componentes no estado sólido (formação de soluções sólidas e do eutético entre elas);
- Nenhuma solubilidade entre os componentes no estado sólido (formação de composto intermetálico e de eutéticos entre o composto e os metais puros).

Nenhuma solubilidade no estado sólido, Sistema Isomorfo.

Os elementos puros A e B dissolvidos um no outro na fase líquida, se separam completamente durante a solidificação e cristalizam-se formando uma mescla heterogênea de cristais A e B puros, intimamente unidos entre si. A liga de menor ponto de fusão se determina eutética. As ligas à esquerda da eutéticas se determinam hipoeutéticas, apresentando fundo de estrutura eutética e cristais do metal puro A.

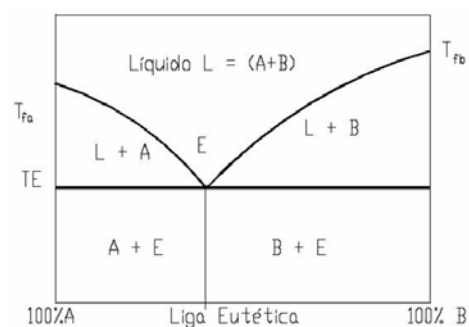


Figura 36: Diagrama de equilíbrio de uma liga binária A-B com formação de eutético;

Já as ligas à direita da eutética são chamadas hipereutéticas apresentando estrutura eutética ao fundo e cristais puros de B. A proporção de eutético igual a 100% na liga eutética diminui linearmente ao nos deslocarmos à esquerda e à direita, anulando-se nas proporções dos metais puros. São exemplos de ligas que possuem eutético:

Ag-Cu, Ag-Pb, Al-Si, As-Pb, Au-Ge, Bi-Cd, Bi-Si, Cd-Pb, Cd-Zn, Pb-Sb, Pb-Sn;

Solubilidade completa dos componentes no estado sólido.

Não há a formação de eutético dada a completa solubilidade de ambos os elementos, inclusive no estado sólido. Como mostra o diagrama, a temperatura de fusão vai diminuindo conforme se aumenta a proporção do elemento mais fusível.

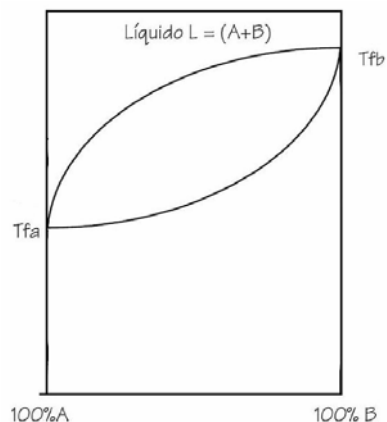


Figura 37: Diagrama de equilíbrio isomorfo.

Na região compreendida entre as linhas solidus e liquidus, existe uma mescla de líquido (A + B) e cristais mistos formados por uma solução sólida de A em B e vice-versa. Uma vez solidificada, a liga é uma união de cristais, cada um deles formado de metal A dissolvido em B, ou de metal B dissolvido em A, conforme sejam suas concentrações. São exemplos de ligas que pertencem ao sistema isomorfo:

Ag-Au, Ag-Pd, Au-Cu, Au-Ni, Au-Pd, Cd-Mg, Co-Ni, Cr-Fe, Cr-Mo, Cu-Ni;

Solubilidade parcial dos componentes no estado sólido.

A Figura 38 representa o caso em que ambos os elementos são parcialmente solúveis entre si no estado

sólido. O metal A dissolve uma pequena porção de B, e vice-versa.

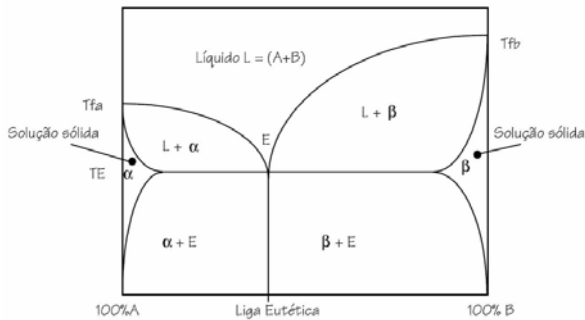


Figura 38: Diagrama de equilíbrio de uma liga binária com solubilidade parcial entre os componentes;

Como consequência, na solidificação se forma:

- uma solução sólida α , de B dissolvido em A;
- uma solução sólida β , de A dissolvido em B;

No ponto E é formada a solução eutética que não é constituída de cristais de A e B puros, mas por uma mistura das soluções sólidas α e β .

Nenhuma solubilidade entre os componentes no estado sólido.

Na Figura 39 temos um composto químico intermetálico C e dois eutéticos, E e F entre o referido composto e os metais A e B, respectivamente.

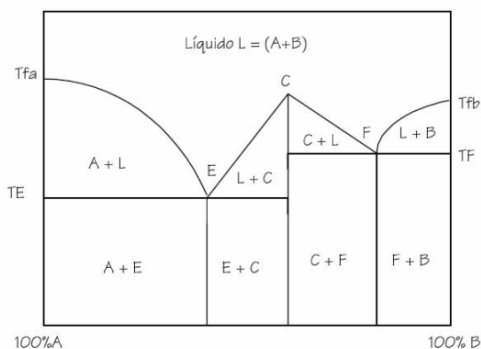


Figura 39: Diagrama de equilíbrio de liga metálica binária sem solubilidade entre os componentes;

Este composto se comporta, frente aos metais A e B como se fosse um corpo simples, podendo ser considerado o diagrama dividido em duas partes (A+C) e (C+B); O diagrama (A+C) possui um eutético E que solidifica a uma temperatura TE, e de forma análoga o diagrama, o diagrama (C+B) apresenta um eutético F de ponto de fusão TF. Como segundo elemento dos eutéticos atua o composto C.

Reações características de ligas binárias.

Quando se realiza a análise do equilíbrio entre dois componentes metálicos, comumente se encontram reações bem características, dentre os diferentes tipos de reações características destaca-se a reação eutética, a peritética, a peritetoide e a eutetoide. A seguir é apresentada esquematicamente cada uma delas.

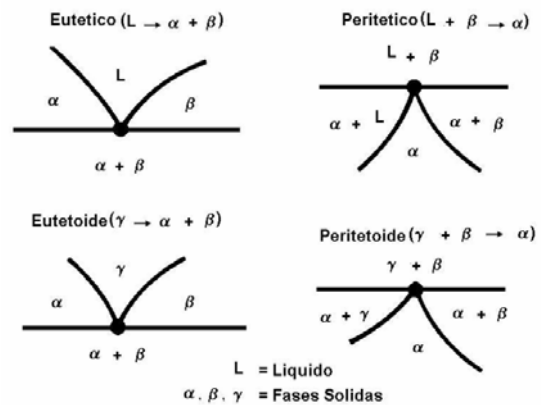


Figura 40: Reações características em ligas metálicas.

2.3. Propriedades Mecânicas dos Materiais Metálicos

Normalmente, quando um material é empregado em construção mecânica, ele é submetido a esforços de forças ou cargas. Neste contexto, torna-se necessário conhecer as características deste material e projetar o componente em função dos esforços que ele deve resistir. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. A carga pode ser de tração, compressiva ou de cisalhamento e sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou cíclica.

Freqüentemente, os materiais são selecionados para aplicações estruturais devido às suas características desejáveis de propriedades mecânicas. No presente capítulo abordaremos algumas propriedades mecânicas, no entanto, a formal apresentação e aplicação de tais propriedades se darão em disciplinas futuras do curso. Sendo assim, objetivamos apenas a apresentação da nomenclatura característica das propriedades mecânicas dos materiais. Seguindo esta ideia apresentam-se também os fenômenos envolvidos no aumento da resistência dos materiais e, posteriormente, são apresentados os princípios das falhas dos materiais, em todas as suas modalidades (fratura, fluência e fadiga).

2.3.1. Conceitos de tensão e deformação

Tensão (σ) é definida como a força por unidade de área e é expressa em libras por polegadas quadrada (psi)¹ ou em quilogramas força por centímetro quadrado (kgf/cm²) ou por milímetro quadrado (kgf/mm²). A tensão é calculada simplesmente dividindo-se a força pela área na qual atua. Como efeito da tensão tem-se a deformação (ϵ). Ela pode ser expressa por duas maneiras: (1) o número de centímetros de deformação por centímetro do comprimento, ou (2) o comprimento deformado como uma porcentagem do comprimento original. A deformação pode ser elástica ou plástica. A deformação elástica é reversível e desaparece quando a

¹ Psi = pounds per square inch

tensão é removida. A tensão elástica é praticamente proporcional à tensão aplicada. O quociente da relação entre tensão e deformação, no campo elástico, se chama módulo de elasticidade e, além de uma relação com o conceito de rigidez, apresentado a seguir, será visto com mais profundidade em resistência dos materiais. Interessante salientar que o módulo de elasticidade é primordialmente determinado pela composição do material e é apenas indiretamente relacionada com as outras propriedades mecânicas a exceção da rigidez do material. Atomicamente a deformação elástica é aquela deformação onde os átomos não desfazem suas ligações originais e mantém suas posições. Já na deformação plástica, em função do deslocamento permanente dos átomos, ocorre uma deformação permanente. No campo plástico o comportamento entre tensão e deformação já não é mais linear. Na Figura 41 temos o desenho esquemático de uma máquina de ensaio de tração universal. Interessante salientar que esta máquina pode ser de natureza mecânica ou hidráulica.

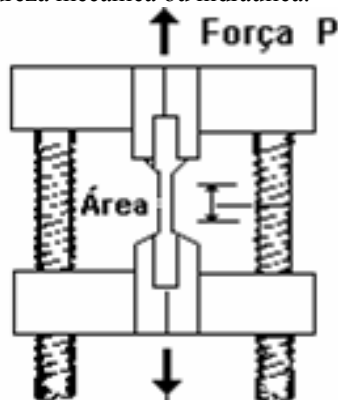


Figura 41: Desenho esquemático de uma máquina de ensaio de tração;

Resumindo estes conceitos apresenta-se na Figura 42 uma curva idealizada de tensão *versus* deformação, onde se visualizam perfeitamente todas as etapas desenvolvidas, quando solicitado até a sua ruptura.

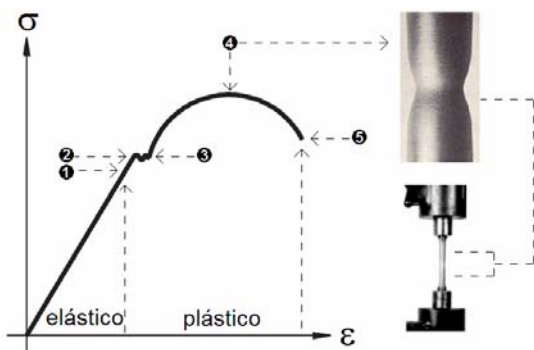


Figura 42: Diagrama Tensão X Deformação e estrição em ensaio de tração para um material dúctil.

Na Figura 42 a numeração indica:

1. Limite Elástico;
2. Limite de Proporcionalidade;
3. Fim do Escoamento;

4. Limite de Resistência e início da Estricção;
5. Limite de Ruptura.

Em tempo, a estricção representa a redução percentual da área da seção transversal do corpo de prova na região aonde vai se localizar a ruptura.

Na prática, considera-se que o limite de proporcionalidade e o limite de elasticidade (limite elástico) são coincidentes.

2.3.2. Resistência Mecânica

Considerada a mais importante das propriedades mecânicas, a resistência mecânica permite que o material seja capaz de resistir à ação de determinados tipos de esforços, como a tração e a compressão. Ela está ligada às forças internas de atração existentes entre as partículas que compõem o material. Quando as ligações covalentes unem um grande número de átomos, como no caso do carbono, a dureza do material é grande. Em projetos mecânicos, ela é chamada de limite de resistência à tração (LRT) e é dimensionada em MPa¹ ou psi, pelo Sistema Internacional e Sistema Inglês, respectivamente. A Figura 43 apresenta comparativamente curvas de tensão *versus* deformação de vários materiais metálicos.

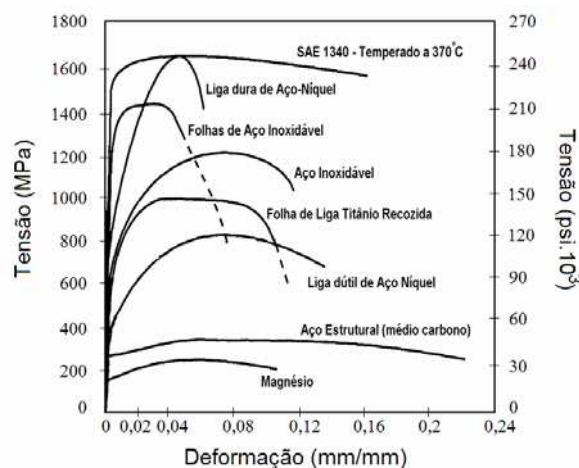


Figura 43: Diagramas Tensão X Deformação de diferentes materiais metálicos.

2.3.3. Ductilidade

A ductilidade é outra propriedade mecânica importante. Ela representa o grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou até mesmo nenhuma deformação plástica quando da sua fratura é chamado frágil. A Figura 44 demonstra esquematicamente os comportamentos tensão-deformação para materiais dúcteis e frágeis.

O conhecimento da ductilidade é importante na medida que, além de indicar ao projetista o grau segundo o qual uma estrutura irá se deformar até a sua ruptura, também especifica o grau de deformação permissível durante operações de fabricação.

¹ Mpa: megapascal (1MPa = 10⁶N/m² = 145 psi)

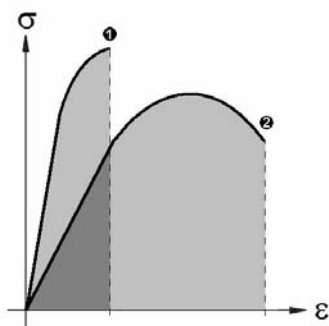


Figura 44: Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis (1) e materiais dúcteis (2) carregados até a ruptura.

2.3.4. Rigidez

A definição de rigidez indica robustez, no entanto, em ciência dos materiais ela está relacionada a uma resistência do material a deformação elástica. Como indicado anteriormente, na deformação elástica, a maioria dos materiais indica um comportamento linear entre tensão e deformação. O coeficiente angular (inclinação) desta relação é o módulo de elasticidade. Desta forma, quanto maior for o módulo de elasticidade de um material, maior será sua rigidez e, por conseguinte, menor sua deformação elástica. Na Tabela 6 são indicados alguns valores de módulo de elasticidade para determinados materiais usuais.

Tabela 6: Módulos de Elasticidade para várias ligas metálicas a temperatura ambiente.

Liga Metálica	Módulo de Elasticidade	
	10^3 MPa	10^6 psi
Alumínio	69	10
Latão	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6,5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15,5
Tungstênio	407	59

Os valores dos módulos de elasticidade para materiais cerâmicos são caracteristicamente maiores do que para os metais; para os polímeros são menores. Essas diferenças são uma consequência direta dos diferentes tipos de ligação atômica nestes três tipos de materiais. Ademais, com o aumento de temperatura, o módulo de elasticidade tende a diminuir.

2.3.5. Dureza

Outra propriedade mecânica que pode ser importante considerar é a dureza, que é uma medida da resistência do material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco). Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência do que qualquer outro ensaio mecânico por diversas razões, destacando-se:

- ensaio simples e barato: normalmente, nenhum corpo de prova especial precisa ser preparado e os equipamentos de ensaio são relativamente baratos;

- ensaio não-destrutivo: o corpo de prova não é fraturado, tampouco é excessivamente deformado, pois uma pequena impressão é a única deformação;

- outras propriedades mecânicas podem, com frequência, ser estimadas a partir de dados obtidos para ensaios de dureza, tais como o limite de resistência à tração.

Na segunda etapa desta disciplina serão apresentados todos os ensaios de dureza usualmente utilizados em materiais de construção mecânica. Neste momento, apresentaremos apenas as considerações gerais sobre os dois mais utilizados em ciências dos materiais, conforme segue.

Dureza Brinell (HB)

Consiste em comprimir uma esfera de aço temperado ou de carboneto de tungstênio, na superfície do material ensaiado, gerando uma calota esférica, conforme mostra a Figura 45.

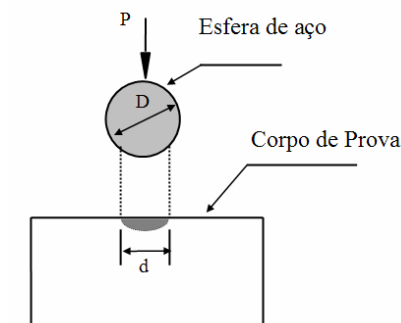


Figura 45: Representação esquemática do ensaio de Dureza Brinell.

A dureza Brinell é o quociente da carga aplicada pela área da calota esférica, sendo dada pela Equação 2:

$$Dureza = \frac{P}{S} \quad [2]$$

onde:

Dureza = expressa em termos de tensão;

P = carga de impressão [N];

S = área da calota esférica impressa [mm²].

A norma brasileira para a realização do ensaio é a NBR 6394 (ABNT) e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E 10-93.

Dureza Rockwell (HR)

Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga, como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da Brinell. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo do penetrador e da pré-carga e carga aplicadas.

A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala da máquina, após a retirada da carga total, mantendo-se, entretanto, a carga inicial. A mostra os dois tipos de ponta de penetração utilizados neste tipo de ensaio, bem como as respectivas cargas.

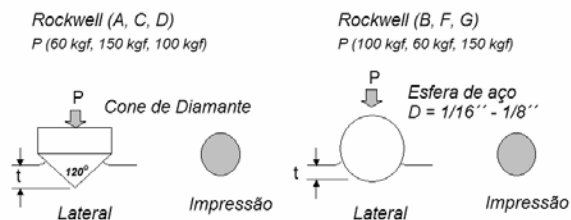


Figura 46: Representação esquemática do ensaio de Dureza Rockwell.

O número de dureza Rockwell é sempre citado seguido do símbolo HR, da escala utilizada e ocasionalmente da carga de ensaio. A nomenclatura da escala é definida por 15 letras do alfabeto e correlacionada com o penetrador e a carga, em acordo a norma ASTM E 18-94. Posteriormente serão fornecidos estes dados específicos.

Dureza Vickers (HV)

É um método semelhante ao ensaio de Dureza Brinell, já que também relaciona carga aplicada com a área superficial da impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com um ângulo de 136° entre faces opostas. Esse ângulo foi escolhido em função de sua proximidade com o ângulo formado no ensaio Brinell entre duas linhas tangentes às bordas da impressão e que partem do fundo desta impressão. Devido à forma do penetrador, esse teste é também conhecido como teste de dureza de pirâmide de diamante. O ensaio é aplicável a todos os materiais metálicos com qualquer dureza, especialmente para materiais muito duros, ou para corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares. A Figura 47 mostra um esquema de aplicação do método Vickers.

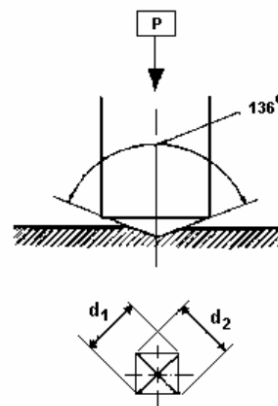


Figura 47: Representação esquemática do ensaio de Dureza Vickers.

A norma brasileira para realização do ensaio é a NBR 6672. A designação da dureza é formada pelo valor da dureza seguido pelo símbolo HV.

2.3.6. Mecanismos de aumento da resistência em metais.

Associando a idéia de deformação plástica à presença de defeitos cristalinos conseguimos analisar fenômenos que ocorrem durante a deformação de um determinado material. Este envolvimento das discordâncias com o mecanismo de deformação é bastante aceitável na medida que durante a deformação plástica, as ligações interatômicas devem ser rompidas e depois formadas novamente. De fato, quando se fala em movimento de discordâncias, o que ocorre é uma sequência de ligações atômicas e assim, deslocamento do defeito planar, conforme demonstra o desenho esquemático da Figura 48 que realiza uma analogia com o movimento de uma lagarta.

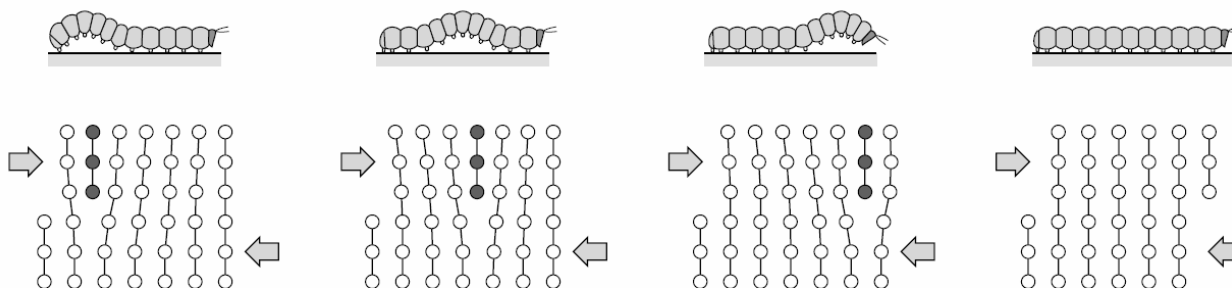


Figura 48: Representação da analogia entre os movimentos de uma lagarta e de uma discordância.

Na medida que as tensões aumentam, e por consequência, a quantidade de discordâncias, estas começam a se deslocar, ou movimentar, conforme visto, em todos os grãos do material. A habilidade de um metal para se deformar plasticamente depende da habilidade das discordâncias para se moverem. Uma vez que a dureza e a resistência estão relacionadas com a facilidade com que a deformação plástica pode ser induzida mediante a redução da mobilidade das discordâncias, a resistência mecânica pode ser melhorada, isto é, maiores forças mecânicas serão necessárias para dar início à deformação plástica. Em contraste, quanto menos restringido estiver o

movimento das discordâncias, maior será a facilidade com a qual um metal poderá se deformar e mais macio e mais fraco ele se tornará. Virtualmente, todas as técnicas de aumento de resistência dependem do seguinte princípio simples: restringir ou impedir o movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência a um material. A seguir verificaremos alguns mecanismos de aumento de resistência do material em função da presença e movimento de discordâncias. Obviamente, eles podem ser utilizados em conjunto, combinando qualquer um dos métodos com os outros.

Aumento de Resistência por Redução do Tamanho de Grão

O desenho esquemático apresentado na Figura 49 representa a dinâmica de movimentação de discordâncias em regiões limites ao seu movimento, no caso, o contorno de grão.

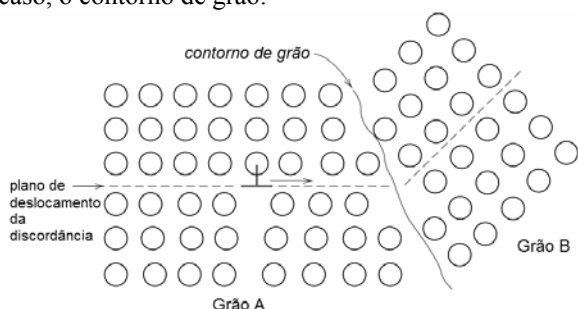


Figura 49: Movimento de uma discordância à medida que ela encontra um contorno de grão.

A Figura 49 ilustra como o contorno atua como uma barreira à continuação do deslocamento. Os planos de escorregamento são descontínuos e mudam de posição ao atravessarem o contorno. A luz disto, conclui-se que os contornos dificultam a movimentação de discordâncias e, por conseguinte, aumentam os limites de resistência do material. Para se ter uma quantidade maior de contornos de grão deve-se evidentemente diminuir o tamanho dos grãos.

Aumento de Resistência por Solução Sólida

Outra técnica utilizada para aumentar a resistência e endurecer metais consiste na formação de ligas com átomos de impurezas que entram quer em solução sólida substitucional, quer em solução sólida intersticial. Os metais com pureza elevada são quase sempre mais macios e mais fracos do que as ligas compostas pelo mesmo metal de base. O aumento da concentração de impurezas resulta num conseqüente aumento no limite de resistência à tração e no limite de escoamento. A maior resistência das ligas, quando comparadas aos metais puros, deve-se a presença do átomo estranho à rede, tanto para o caso substitucional quando intersticial. Este é o caso característico do carbono no ferro puro, como veremos posteriormente.

Encruamento

O encruamento é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando ele é submetido a uma deformação plástica. Algumas vezes este fenômeno é chamado de endurecimento por trabalho. Pelo fato de a temperatura em que a deformação é efetuada ser fria em relação a temperatura absoluta de fusão do metal, também é chamado de trabalho a frio. A maioria dos metais encrua a temperatura ambiente.

Com base na teoria de discordâncias, a evidência é de que o aumento da deformação gera mais discordâncias e este aumento de discordâncias dentro do metal gera uma dificuldade de escorregamento destas, resultando assim no aumento de resistência e dureza.

Comercialmente, o encruamento é utilizado freqüentemente para aprimorar as propriedades mecânicas de metais durante seus procedimentos de fabricação.

2.3.7. Recuperação, Recristalização e Crescimento de Grão.

A deformação plástica de um material em temperaturas consideradas baixas (frias), quando comparadas a sua temperatura de fusão, produz alterações microestruturais e mudanças nas propriedades dos materiais, incluindo: alteração na forma do grão (alongamento e/ou amassamento); endurecimento e aumento da densidade de discordâncias. Estas propriedades e estruturas alteradas podem ser revertidas aos seus estados anteriores mediante tratamento térmico adequado (algumas vezes chamado de tratamento de recozimento). Essa restauração resulta de dois processos diferentes que ocorrem a temperaturas elevadas, quais sejam: recuperação e recristalização; que ainda podem ser seguidos de um crescimento de grão.

Recuperação

A recuperação é um fenômeno que ocorre primordialmente pela ausência da força externa, que estava deformando o material, associada ao aumento da temperatura e conseqüente aumento da difusão. Neste sentido, as discordâncias que estavam “presas” começam seu movimento e se “acomodam”. Metalurgicamente falando, esta etapa não possui importância comercial, no entanto, é caminho obrigatório para a etapa posterior, recristalização. Interessante salientar que apenas as condutividades elétricas e térmicas retornam seus valores anteriores.

Recristalização

Mesmo após o processo de recuperação estar completo, os grãos se apresentam com uma energia da deformação anterior bastante elevada. A recristalização é o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres e que são equiaxiais (dimensões aproximadamente iguais em todas as direções), com baixas densidades de discordâncias, e que são característicos das condições que existem antes do processo de trabalho a frio. Ainda, durante a recristalização, as propriedades mecânicas que foram alteradas durante o trabalho a frio são restauradas os seus valores existentes antes, isto é, o metal se torna mais macio, menos resistente, porém mais dúctil. A recristalização é um processo cuja extensão depende tanto do tempo como da temperatura. A Figura 50 demonstra esta relação e ainda, induz a relação que o grau (ou fração) de deformação aumenta com o tempo.

O comportamento de recristalização de uma liga metálica específica é, algumas vezes, especificado em termos de uma temperatura de recristalização, que é a temperatura na qual a recristalização atinge seu término em exatamente uma hora. Tipicamente, ela se encontra entre um terço e metade da temperatura absoluta de

fusão do metal ou liga e depende de diversos fatores, incluído a quantidade de trabalho a frio que o metal fora submetido anteriormente e à pureza da liga. Aumentando a porcentagem do trabalho a frio, melhora-se a taxa de recristalização, com o resultado de que a temperatura de recristalização é diminuída e se aproxima de um valor constante ou limite. Este é o valor relacionado pela literatura. Por outro lado, existe um valor mínimo de deformação plástica, a partir do qual a recristalização ocorrerá e normalmente se encontra entre 2 e 20% do trabalho a frio. As operações de deformação plástica são, com frequência, realizadas a temperatura acima de temperatura de recristalização, em um processo conhecido por trabalho a quente. Neste caso, o material permanece relativamente macio e dúctil durante o processo de deformação, pois ele não sofre encruamento, portanto, são possíveis grandes deformações. Na Tabela 7 são listadas algumas temperatura de recristalização, e de fusão, para materiais comumente utilizados.

Tabela 7: Temperatura de recristalização e de fusão para vários metais.

Metal	Temperatura de recristalização (°C)	Temperatura de Fusão (°C)
Chumbo	-4	327
Estanho	-4	232
Zinco	10	420
Alumínio	80	660
Cobre	120	1085
Latão (60 Cu-40 Zn)	475	900
Níquel	370	1455
Ferro	450	1538
Tungstênio	1200	3410

Crescimento de Grão

Após a recristalização estar completa, os grãos livres de deformação continuarão a crescer se o material for deixado a temperatura elevada, este fenômeno se chama crescimento de grão.

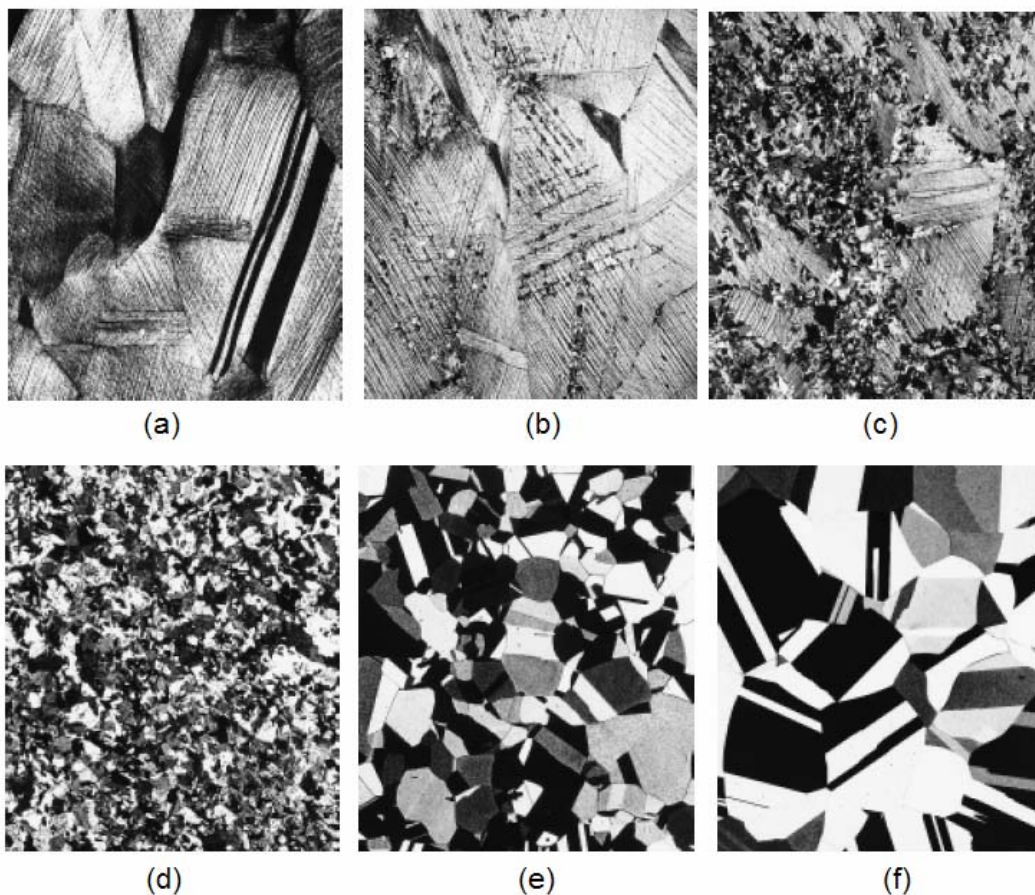


Figura 50: Fotomicrografias mostrando vários da recristalização e crescimento de grãos em latão. (a) Estrutura de grãos submetidos ao trabalho a frio (33% TF). (b) Estágio inicial de recristalização após o aquecimento por 3 segundos a 580°C. os grãos muito pequenos são aqueles que foram recristalizados. (c) Substituição parcial de grãos trabalhados a frio por grãos recristalizados (4 s a 580°C). (d) Recristalização completa (8 s a 580°C). (e) Crescimento de grão após 15 minutos a 580°C. (f) Crescimento de grão após 10 minutos a 700°C. Todas as fotomicrografias estão com ampliação de 75X.

O crescimento de grão não precisa ser precedido de processos de recuperação e recristalização. Ele pode ocorrer em todos os materiais policristalinos, inclusive nos cerâmicos. Obviamente nem todos os grãos podem

aumentar de tamanho, porém os grãos maiores crescem às custas dos grãos menores, que encolhem.

As propriedades mecânicas à temperatura ambiente de um metal com granulação fina são em geral superiores (isto é, apresentam menor resistência e

tenacidade) do que aquelas dos metais com grãos grosseiros.

2.3.8. Falhas

Embora a maior parte dos projetos exija metais que não podem apresentar falhas, é desejável conhecer alguma coisa sobre as falhas dos metais. Um conhecimento geral dos tipos de falhas dos metais permite a criação de melhores projetos, pois se adquire uma visão mais adequada das limitações que são encontradas incluindo Fratura, Fadiga e Fluência. Cada uma delas será estudada separadamente. De antemão, podemos indicar que um material metálico pode falhar em serviço pela ação de um ou mais dos seguintes processos:

- Processos Mecânicos:

- Deformação permanente ou ruptura, por carregamento excessivo;
- Fratura frágil;
- Deformação permanente, ou ruptura, por fluência;
- Fratura por fadiga mecânica;
- Distorção por colapso incremental (fadiga térmica);

- Processos Mecânico-Químicos:

- Fadiga associado à corrosão;
- Fragilização e outros danos causados pelo hidrogênio;
- Fragilização por metal líquido;
- Corrosão sob tensão;
- Corrosão-erosão;

- Processos Químicos e Eletroquímicos:

- Corrosão generalizada;
- Oxidação, carbonetação, sulfetação e outros processos corrosivos em altas temperaturas;
- Corrosão por pites, em frestas, intergranular, seletiva ou outras formas de corrosão localizada.

A idéia de corrosão/oxidação é aproximadamente intuitiva, no entanto, estes fenômenos associados às diferentes tipos de falhas tornam-se bastante complexos. Neste contexto, analisaremos os diferentes tipos de falhas.

Fratura

A fratura simples consiste na separação de um corpo em dois ou mais pedaços em resposta a uma tensão imposta que possua natureza estática ou aproximadamente estática e que ocorra a uma temperatura baixa em relação a temperatura de fusão do metal. Na Figura 44 podemos verificar os diferentes comportamentos tensão-deformação para os dois tipos característicos de fratura. Todo processo de fratura é caracterizado por duas etapas distintas, a formação e a propagação das trincas. A modalidade de fratura é altamente dependente do mecanismo de propagação da trinca. A trinca de uma fratura de material dúctil é caracterizada visualmente pela presença de uma grande deformação no seu entorno, por uma velocidade lenta de propagação frente à carga constante aplicada neste material. Já a trinca de uma fratura frágil, além de ser extremamente rápida e não apresentar deformação no seu entorno, irá se propagar espontaneamente, sem aumento na magnitude da tensão aplicada. Na prática, a fratura dúctil é quase sempre preferível por dois motivos:

-a fratura frágil ocorre repentinamente e catastróficamente, sem qualquer aviso, isto é uma consequência da espontânea e rápida propagação de trinca;

-a fratura dúctil necessita de muito mais energia para ser induzida, pois, materiais dúcteis são mais tenazes.

Na Figura 51 podemos verificar os diferentes tipos de fratura e a característica de cada corpo de prova utilizado.

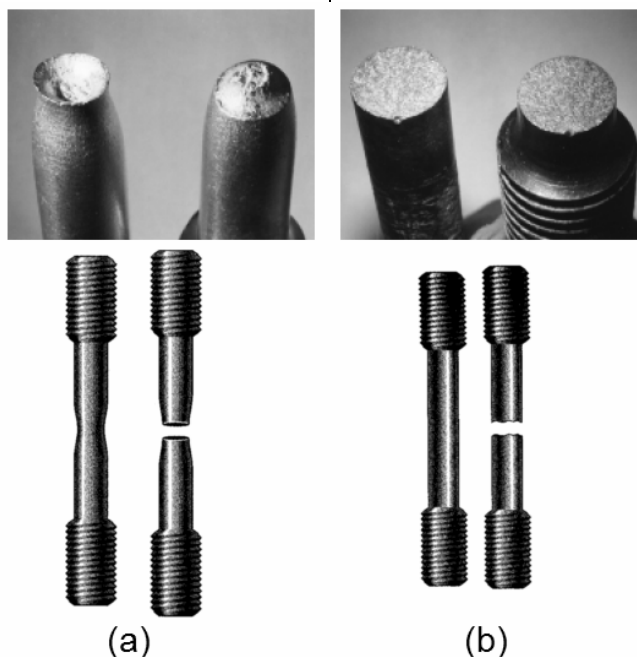


Figura 51: Superfícies características dos diferentes tipos de fratura sendo (a) fratura dúctil e (b) fratura frágil.

Analisando-se apenas a fratura dúctil, observam-se dois tipos distintos de fratura dúctil, em função da característica deste. A Figura 52 indica estes dois tipos de fratura.

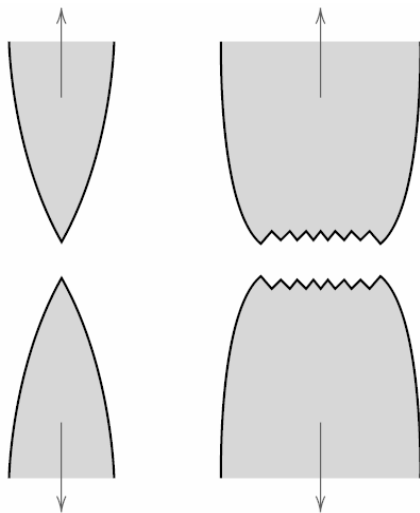


Figura 52: Diferentes tipos de fratura frágil

A fratura dúctil a esquerda na Figura 52, apresenta uma fratura pontual e caracteriza metais sólidos extremamente macios, polímeros e vidros

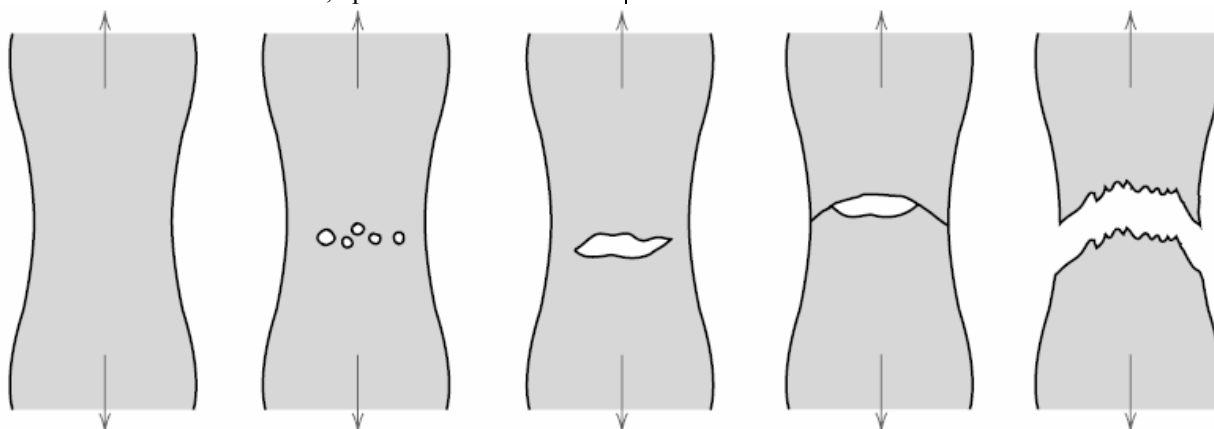


Figura 53: Estágios na nucleação e evolução de trincas em fratura Taça e Cone.

Na Figura 54 apresenta-se o desenho esquemático destes dois tipos de fratura frágil.

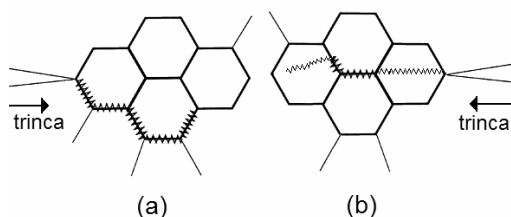


Figura 54: Desenho esquemático da evolução e propagação de trinca em fratura (a) intergranular e (b) transgranular ou Clivagem.

As características de fratura de um material metálico são determinadas através de um ensaio denominado Ensaio por Impacto. Abordaremos especificamente este assunto na parte dois desta disciplina. No entanto, a resistência ao impacto é uma propriedade bastante interessante e é o termo usado para designar a tenacidade, que por sua vez, é a energia

inorgânicos em temperatura elevada. De fato, este rompimento pontual é resultado do “empescoçamento” acentuado do corpo de prova. Já no outro caso, o mais comum em metais dúcteis, a fratura é precedida de uma quantidade moderada de “empescoçamento” que se associa a microcavidades que surgem no interior do material. Este tipo de fratura também é chamado de fratura taça e cone. Na Figura 53 observa-se os diferentes estágios de evolução das trincas até a fratura do material.

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e através de uma rápida propagação da trinca. A superfície de fratura é relativamente plana e, para o caso de materiais amorfos, tais como vidros cerâmicos, brilhante e lisa. A analogia com a fratura de um giz de quadro negro é bastante interessante. Em metais, costuma-se observar dois tipos de fratura frágil.

A fratura transgranular, também conhecida por Clivagem, onde, as trincas passam através dos grãos, ou seja, a propagação da trinca se deu por quebras sucessivas e repetidas de ligações atômicas ao longo de determinado plano. Já a fratura intergranular é ocasionada pelo rompimento do material nos contornos de grãos.

necessária para rompê-lo. A resistência ao impacto depende da velocidade de aplicação da carga e da temperatura. Quando se aplica algum ensaio padronizado para esta determinação, iguala-se a velocidade de aplicação da carga e varia-se a temperatura do material. Quando metais CCC são submetidos a cargas de impacto em temperaturas relativamente baixas, verifica-se uma transição de fratura dúctil para a fratura frágil. A Figura 55 demonstra esta variação para diversos tipos de aços (representados pelas diferentes composições de carbono). Esta transição pode-se tornar muito importante para o projetista de algum tipo de estrutura submetida a tensões de impacto. Quando a temperatura está acima da temperatura de transição, fraturas do tipo frágil não irão ocorrer. A transição dúctil-frágil é uma propriedade dos metais CCC assim, metais como Al, Cu e Au não apresentam variação abrupta da tenacidade em função da temperatura. Como citado,

tornaremos a ver este assunto quando da análise do ensaio por Impacto.

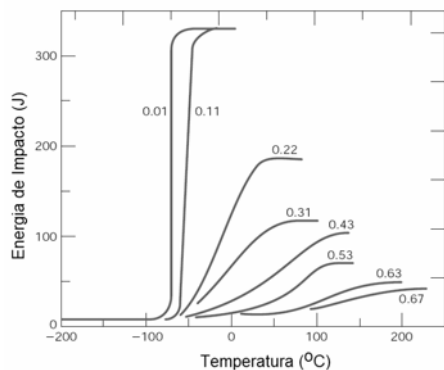


Figura 55: Influência do teor de carbono sobre o comportamento da energia de impacto (relacionada a ductilidade) em função da temperatura para aços com diferentes quantidades de carbono (em peso).

Fadiga (creep)

Denomina-se efeito de fadiga a ruptura de uma peça sob esforços repetidos, a uma tensão inferior à resistência obtida nos ensaios estáticos. Ela é, em geral, determinante no dimensionamento de peças de máquina e vigas sob efeito de cargas móveis. Existem vários exemplos documentados de rupturas de eixos rotativos de turbinas e de outros equipamentos mecânicos que permanecem em operação durante muito tempo.

A explicação comum de que o metal ficou “cansado” e rompeu por fadiga é mais apropriada do que pode parecer a primeira vista, particularmente quando se sabe que as tensões que aparecem nos metais são alternadas. A tensão que um material pode suportar ciclicamente é muito menor que a suportável em condições estáticas. O limite de escoamento, que é uma medida da tensão estática sob a qual o material resiste sem deformação permanente, pode ser usado como um guia apenas para estruturas que operam em condições de carregamento estático. A Figura 56 mostra o número de ciclos em função da tensão máxima admissível. Observa-se o comportamento de diversos materiais frente à solicitação cíclica.

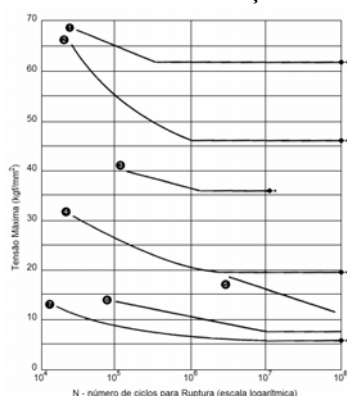


Figura 56: Curvas de Tensão Máxima Versus Número de Ciclos para a Ruptura. Típica para metais sob tensão de flexão reversível. Sendo, (1) aço 0,12C, temperado em óleo e revenido, (2) aço Cromo-Níquel, temperado em óleo e revenido, (3) aço 0,53C, temperado em óleo e revenido, (4) barra de aço estrutural revenido, (5) liga Al-Cu, (6) cobre estirado e recozido e (7) ferro fundido cinzento.

Ainda, analisando a Figura 56, denomina-se limite de resistência a fadiga a parte horizontal da curva e representa a tensão máxima antes da ruptura.

Alguns fatores de influência se destacam, no entanto, analisaremos apenas os dois mais “práticos”.

A Figura 57 ilustra o comportamento do material frente diferentes irregularidades geométricas. Os três conjuntos de dados da Figura 57 são para aços idênticos. Os corpos de prova com entalhe com entalhe de 1/8 de polegada de raio têm um limite de resistência a fadiga de apenas dois terços dos corpos de prova com entalhes de raios maiores.

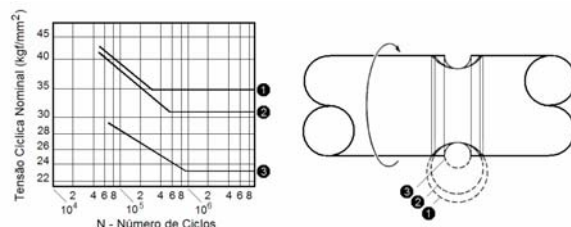


Figura 57: Curvas de Tensão Versus número de ciclos para corpos de prova entalhados. Os raios representam (1) 0,300", (2) 0,250" e (3) 1/8".

Na Figura 58 verificamos um exemplo prático de tal influencia. O uso generoso de filetes reduz a possibilidade de concentrações de tensões e de fadiga nas partes sujeitas a solicitações cíclicas. Surpreendentemente, com um componente com menos material, (c) versus (a), podemos ter menores concentrações de tensões, se forem feitos entalhes convenientes. Desta forma, na Figura 58 a melhora no projeto do componente é alcançada satisfatoriamente em (b) e plenamente em (c).

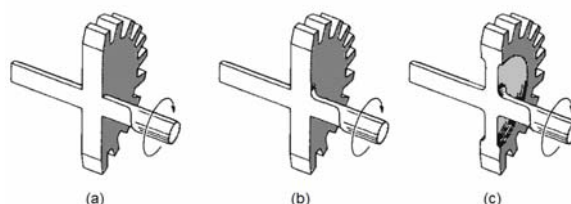


Figura 58: Projeto de filetes. (a) projeto mal feito, (b) projeto melhorado e (c) projeto otimizado.

Igualmente importante é a natureza do acabamento superficial do componente solicitado ciclicamente. As características da superfície são muito importantes já que, usualmente, a mesma esta sujeita a maiores solicitações que qualquer outra parte. A Tabela 8 mostra o efeito do acabamento superficial em um aço 4063, o qual foi temperado até 44 HRc.

Tabela 8: Acabamento superficial versus Limite de Resistência a Fadiga (SAE 4063, temperado e revenido até 44 Rc).

Tipo de Acabamento	Rugosidade Superficial	Limite de resistência a fadiga
	micropolegadas	Kgf/mm ²
Esmerilhamento circunferencial	16-25	63,9
Brunido Mecanicamente	12-20	73,2
Esmerilhamento longitudinal	8-12	78,4
Acabado (polido)	3-6	79,8
Superacabado (polido)	0,5-2	81,7

A redução das irregularidades superficiais nitidamente aumenta a resistência à fadiga, pois entalhes macroscópicos e irregularidades superficiais microscópicas causam concentrações de tensão.

Fluência

Denomina-se fluência a um fenômeno de deformação permanente, lenta e progressiva, que se observa nos metais e ligas metálicas, com o decorrer do tempo, quando submetidos a um esforço de tração em temperatura elevada. A faixa de temperaturas em cujo início o fenômeno da fluência passa a ser significativo, chama-se de faixa de fluência do material metálico em questão. Em outras palavras, quando uma peça metálica é submetida a uma tração em temperatura superior ao início da faixa de fluência, observa-se que as deformações vão sempre aumentando progressivamente com o passar do tempo, ainda que seja esforço constante e qualquer que seja o seu valor. Observa-se, também, que os acréscimos de deformação, acima da deformação inicial (isto é, as deformações por fluência), são sempre permanentes, ainda que a tensão inicial seja inferior ao limite de escoamento do material na temperatura considerada e, portanto, a deformação inicial seja não-permanente.

Note-se que em temperaturas abaixo da faixa de fluência (como, por exemplo, em temperatura ambiente, para a maioria dos materiais metálicos), as deformações são independentes do tempo: tanto as deformações não-permanentes decorrentes de tensões inferiores ao limite de escoamento, como as deformações permanentes, devido a tensões superiores a este limite. A temperatura em que se inicia a faixa de fluência é variável de um material para outro, sendo, em geral, relativamente elevada. São as seguintes algumas dessas temperaturas-limite aproximadas:

Alumínio e ligas	205°C
Titânio e ligas	315°C
Aço-carbono e aços de baixa-liga	370°C

De uma forma aproximada, pode-se dizer que a faixa de fluência começa a uma temperatura de $0,4 T_f$, sendo T_f a temperatura de fusão do material metálico em graus Kelvin. O chumbo é um metal que, devido ao seu baixo ponto de fusão, apresenta fluência mesmo em temperatura ambiente.

Relacionando-se a progressão da deformação por fluência com o tempo decorrido, obtém-se uma curva com o aspecto mostrado na Figura 59. Nesta curva distinguem-se os seguintes trechos:

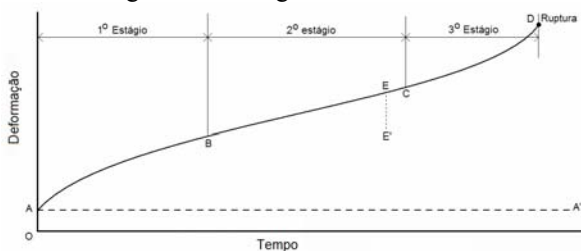


Figura 59: Curva típica de fluência.

OA: esse trecho corresponde a deformação que ocorre imediatamente com a aplicação da carga, independente de haver ou não a fluência. Essa deformação será

elástica ou permanente, conforme a tensão inicial seja ou não inferior ao limite de escoamento. Seria a deformação total obtida em um ensaio de tração a quente, para a mesma carga aplicada.

AB: É o denominado 1º estágio da fluência (a fluência começa no ponto A), em que a progressão de deformação diminui com o tempo.

BC: corresponde ao 2º estágio da fluência, na qual a progressão de deformação é aproximadamente constante ao longo do tempo.

CD: É o 3º estágio da fluência, em que a progressão de deformação é crescente, e que termina pela ruptura do material do ponto D.

Caso a carga seja removida, em qualquer momento, haverá uma contração EE', aproximadamente igual à parte elástica da deformação inicial OA.

A reta tracejada AA' representa a deformação constante que haveria, caso o material estivesse em temperatura abaixo da faixa de fluência. As deformações por fluência, isto é, as distâncias entre a curva de fluência e a reta AA' na Figura 59, são sempre deformações permanentes e irreversíveis, qualquer que seja a deformação inicial correspondente a OA, e qualquer que seja a temperatura, desde que a temperatura esteja dentro da faixa de fluência. Teremos, então, em temperaturas elevadas, deformações permanentes mesmo com tensões muito abaixo do limite de escoamento do material. Para um mesmo material, as deformações por fluência serão tanto maiores e mais rápidas quanto mais altas forem as tensões no material, ou quanto mais elevada for a temperatura. A Figura 60 mostra as curvas de fluência para o aço-carbono a 450°C, correspondentes a quatro níveis diferentes de tensões.

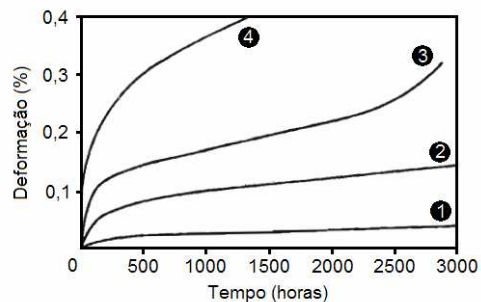


Figura 60: Curvas de fluência do aço carbono a 450°C sendo (1) 9,6 kg/mm², (2) 11,2 kg/mm², (3) 12,8 kg/mm², (4) 14,4 kg/mm².

Na Figura 61 estão mostradas as curvas de fluência para um mesmo material e um mesmo valor da tensão, em três temperaturas diferentes.

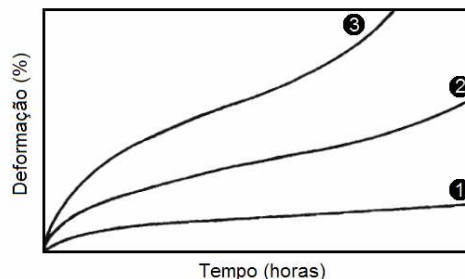


Figura 61: Curvas de fluência a tensão constante, sendo $T_1 < T_2 < T_3$.

Como as deformações por fluência vão sempre aumentando com o tempo, terminarão, necessariamente, pela ruptura do material ao fim de um tempo mais ou menos longo, caso a carga se exerça indefinidamente. O tempo até a ruptura será tanto menor quanto mais alta for a temperatura ou a tensão no material. Nos níveis usuais de tensão e de temperatura, o 2º estágio da fluência é normalmente bastante longo, da ordem de dezenas de anos; pode, entretanto, nem mesmo existir, resumindo-se a um simples ponto de inflexão na curva de fluência, no caso de materiais de alta liga em condições extremamente severas de fluência.

As deformações por fluência têm várias causas: movimentação das discordâncias, difusão atômica, isto é, movimentação de átomos em algumas direções preferenciais, preenchendo lacunas na estrutura cristalina, e escorregamento de grãos uns sobre os outros. Todos estes fenômenos são ativados pela temperatura e pela aplicação de cargas, e são, por natureza, irreversíveis, daí decorrendo as deformações permanentes no material.

2.4. Classificação dos materiais metálicos

Numa forma global, os materiais metálicos podem ser classificados em acordo ao diagrama apresentado na Figura 62.

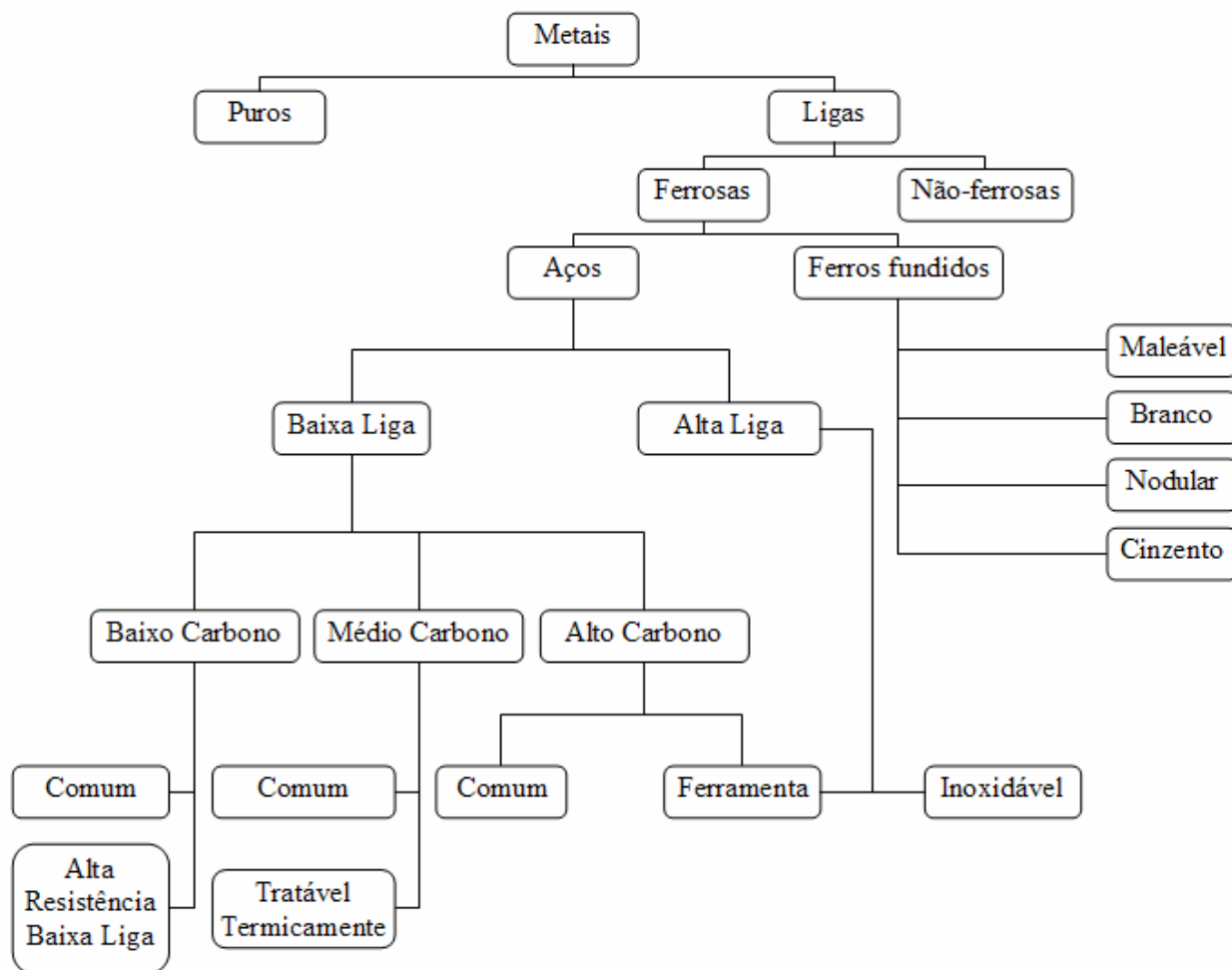


Figura 62: Esquema de classificação para vários materiais metálicos metalurgicamente importantes.

2.5. Processos de obtenção e processamento dos metais

Neste capítulo abordaremos globalmente a obtenção e o processamento dos metais. As reações químicas, o princípio metal-mecânico e os cálculos pertinentes não serão analisados. Especificamente em relação aos materiais não-ferrosos, sua obtenção será

evidenciada em cada subitem do capítulo 2.8. Ligas Não-Ferrosas. Também, a fabricação de metais destinados a fundição não será analisada neste momento.

O fluxograma apresentado na Figura 63 demonstra os diferentes caminhos de fabricação de uma peça metálica.

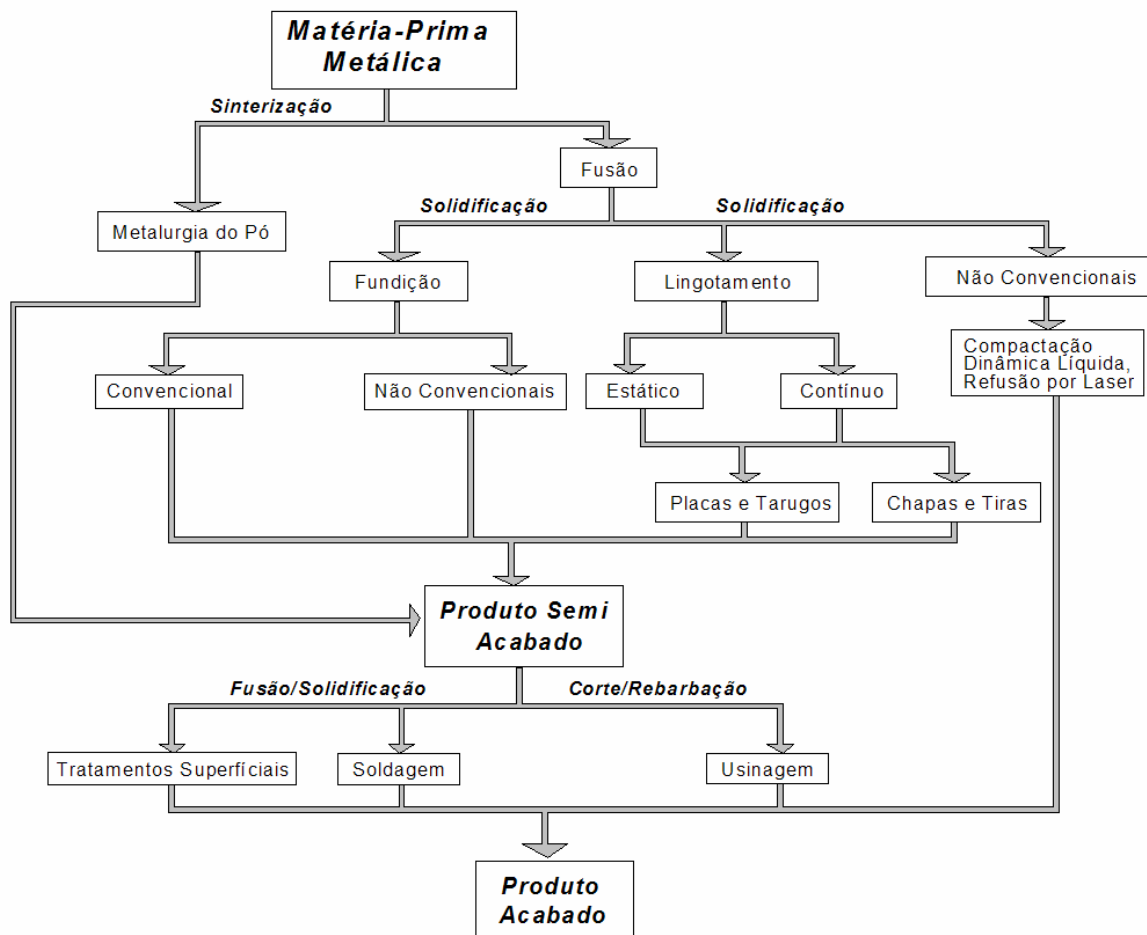


Figura 63: Fluxograma representativo dos caminhos de fabricação de uma peça metálica.

Antes de analisarmos as origens e processamento dos metais ferrosos devemos definir algumas nomenclaturas pertinentes.

- Mineral: Os Minerais são compostos naturais formados através de processos geológicos. O termo "mineral" abrange não apenas a composição química mas também as estruturas minerais do material. Os minerais variam na composição dos elementos e dos sais simples aos silicatos muito complexos (excluindo geralmente a maioria dos compostos orgânicos), com milhares de formas conhecidas. O estudo dos minerais é chamado mineralogia.

- Rocha: É todo o material que compõe a crosta terrestre, exceto água e gelo, podendo ser formada por um único mineral ou por um agrupamento desses.

- Minério: É o mineral ou agregado de minerais no qual um ou mais metais podem ser extraídos economicamente. Ele é composto basicamente de parte útil (metal de valor), Ganga (parte que acompanha a útil, mas sem valor direto.) e parte estéril (rocha onde se localiza o minério).

- Mineração: É extração de minerais existentes nas rochas e/ou no solo. Trata-se de uma atividade de natureza fundamentalmente econômica que também é

referida, num sentido lato, como indústria extrativa mineral ou indústria de produtos minerais.

- Teor de um minério de ferro: Quantidade de metal útil do minério.

Não há um registro preciso de quando o homem começou a produzir ferro pela redução de seus minérios. De fato, diversos povos em diferentes localidades dominavam estas técnicas, sendo que alguns não registravam isso por meio da escrita. As referências escritas mais antigas, sugerem que o ferro foi empregado na Índia e na China por volta de 2000 AC. Entretanto, não foi possível determinar se o ferro foi reduzido pelo homem. A redução deliberada dos óxidos de ferro entre 1.350 AC e 1.100 AC é citada em regiões geograficamente extensas no mundo antigo. Os povos antigos só dispunham de três fontes de ferro: ferro de meteoritos, ferro nativo (telúrico) e os minérios ferrosos reduzidos pelo homem. As duas primeiras fontes são muito raras e indicam que a maioria dos artefatos antigos foi produzida pela extração do ferro a partir dos minérios de ferro.

Hoje em dia, a fabricação de materiais ferrosos (usinas siderúrgicas) obedece ao fluxograma apresentado na Figura 64.

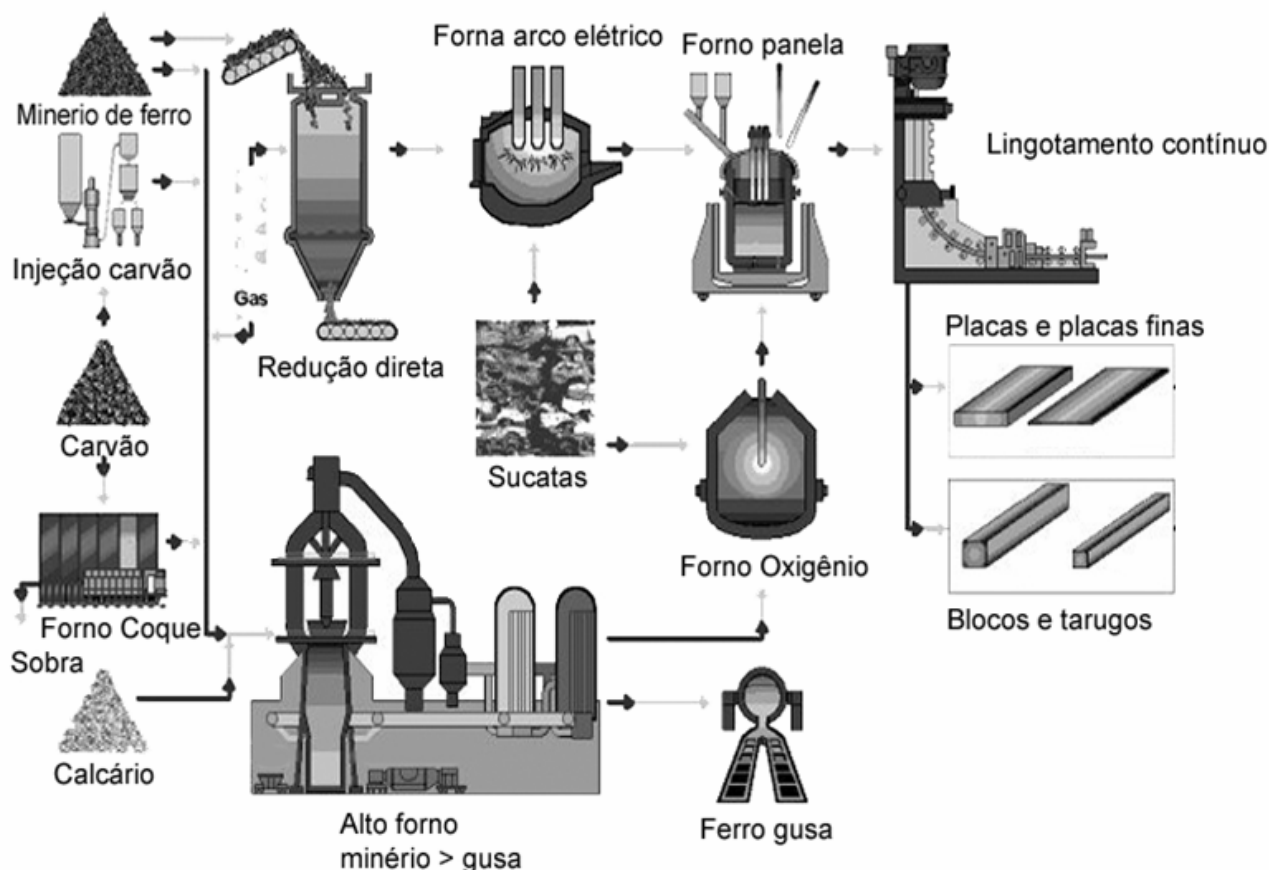


Figura 64: Fluxo produtivo de elementos ferrosos comumente encontrado em usinas siderúrgicas.

Numa forma global, as etapas de um processo siderúrgico podem ser divididas em Redução, Refino e Conformação.

As usinas siderúrgicas são comumente classificadas em função do grau de integração; associadas diretamente as etapas de produção do aço que a empresa emprega, conforme segue:

-Usinas Integradas: Processo de fabricação constituído pelas fases de redução, refino e conformação. Partem do minério de ferro para a produção do aço;

-Usinas Semi-Integradas: Processo de fabricação constituído, normalmente pelas fases de refino e conformação. Partem do gusa, ferro-esponja e da sucata adquirida para a produção do aço (Siderúrgicas gaúchas);

-Usinas Não Integradas: Processo de fabricação constituído de uma só fase do processo produtivo: redução (produtores independentes do gusa) ou conformação (ex.: empresas relaminadoras de aço).

As principais matérias-primas para a indústria siderúrgica são:

- minério de ferro;
- carvão;
- fundente;

O minério de ferro é retirado (Lavrado) do subsolo, porém muitas vezes é encontrado exposto formando verdadeiras montanhas (Lavrado a céu aberto). Na Figura 65 evidencia-se a mina de Carajás, no estado do Pará e considerada a maior e melhor mina

de minério de ferro do mundo. Ela é explorada pela Companhia Vale do Rio Doce.



Figura 65: Mina de minério de ferro de Carajás, PA.

Os principais minérios de ferro são a Hematita (óxido férrico - Fe_2O_3 - 69,9%Fe) e a Magnetita (óxido ferroso-férrico - Fe_3O_4 - 72,4%Fe), no entanto, citam-se ainda a Limonita (óxido hidratado de ferro - $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - 48,3,9%Fe), Siderita e a Pirita. Para retirar as impurezas (Ganga), o minério é lavado, partido em pedaços (trituração) menores e em seguida levado para a usina siderúrgica. Ocasionalmente o minério de ferro é processado (beneficiamento do minério de ferro) a fim de se melhorar suas características e aumentar a sua produtividade. Este beneficiamento pode ser britamento, peneiramento, mistura, moagem,

concentração, classificação e aglomeração. Na análise proposta nesta disciplina, evidenciaremos apenas a aglomeração. Há quatro tipos principais de processos de aglomeração:

- sinterização (produção do sinter);
- pelotização (produção de pelotas);
- briquetagem (produção de briquetes);
- nodulização (produção de nódulos).

A Figura 66 mostra alguns exemplos destes.

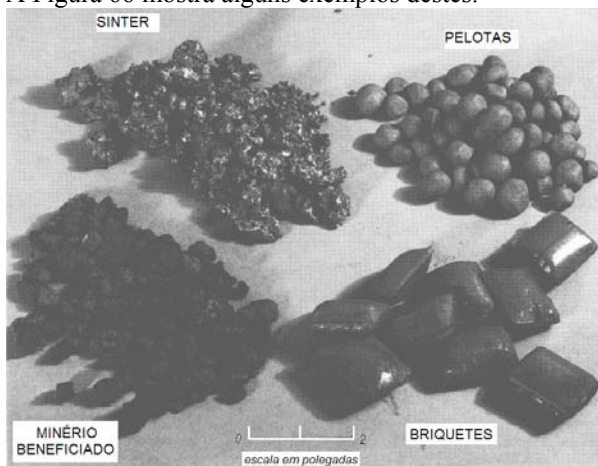


Figura 66: Aspecto típico dos materiais à base de ferro alimentados no alto-forno.

O carvão atua em três sentidos simultaneamente, como combustível, como redutor do minério, que é basicamente constituído de óxidos de ferro, e como fornecedor do carbono, que é o principal elemento de liga dos produtos siderúrgicos.

O combustível utilizado no alto-forno é o carvão – coque ou de madeira - cuja ação se faz sentir em três sentidos:

- fornecedor do calor para a combustão;
- fornecedor do carbono para a redução do óxido de ferro;
- indiretamente, fornecedor do carbono como principal elemento de liga do ferro gusa.

O carvão (coque ou carvão de madeira) é introduzido no alto-forno, em vez do carvão de pedra (carvão mineral ou hulha) ou da lenha, porque estes não possuem resistência suficiente para suportar as cargas dos altos-fornos, aglomerando-se facilmente, se fossem utilizados diretamente e, em consequência, perturbando a marcha normal do forno. Além disso, o coque e o carvão de madeira permitem que temperaturas mais elevadas sejam atingidas, por serem menos inflamáveis do que os produtos naturais dos quais se originam.

Outro motivo também, sobretudo no caso do carvão coque, o processo de coqueificação ou transformação do carvão mineral em coque origina uma série de derivados ou subprodutos, de grande valor tecnológico e comercial, que se perderiam no alto-forno, onde todos os componentes voláteis formados escapariam.

O coque é obtido pelo processo de "coqueificação", que consiste, em princípio, no aquecimento a altas temperaturas, geralmente em câmaras hermeticamente fechadas, portanto com ausência de ar, exceto na saída dos produtos voláteis,

do carvão mineral. O carvão mineral é constituído, sobretudo dos restos de matéria vegetal que se decompõem com o tempo, na presença de umidade, ausência de ar e variações de temperatura e pressão, por ação geológica, transformando-se, através de milênios, progressivamente, em turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, semi-antracito e antracito. O tipo betuminoso é o mais adequado para a produção de coque, pelo processo de coqueificação.

A qualidade do coque depende muito do carvão mineral do qual se origina, principalmente do seu teor de impurezas.

No Brasil, os carvões minerais coqueificáveis encontram-se na região sul e se caracterizam por seu elevado teor de cinzas. Somente o carvão de Santa Catarina é, até o momento, o único utilizado para ser transformado em coque.

O processo de coqueificação pode ser resumido da seguinte maneira:

O carvão mineral é introduzido nas câmaras de coqueificação, que são de grande comprimento, por exemplo: 13 metros e grande altura: 4 metros, mas estreitas: 45 centímetros. Essas câmaras são constituídas de material refratário e aquecidas externamente. Elas são juntadas de modo a formar uma "bateria", a qual constitui o fomo de coqueificação, compreendendo até 100 câmaras. Entre cada câmara, encontra-se sempre uma de aquecimento. Os próprios gases oriundos da combustão servem como combustível. Sob as câmaras de coqueificação, localizam-se "câmaras de regeneração", constituídas de um empilhamento de tijolos refratários, cujo objetivo é armazenar o calor dos gases queimados, de modo a aquecer o ar necessário para a combustão. A Figura 67 apresenta a vista geral de uma bateria de fornos de coqueificação.

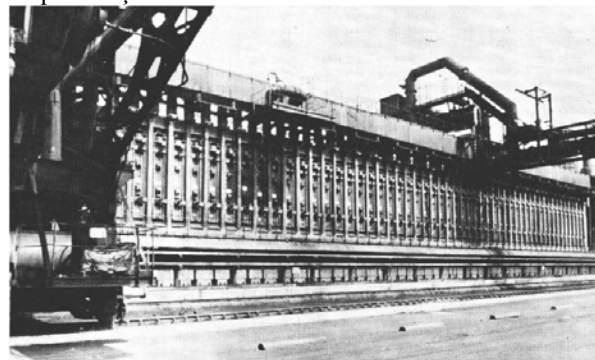


Figura 67: Vista geral de uma bateria de fornos para coqueificação.

O tempo para a coqueificação se completar varia de 17 a 18 horas. No fim desse tempo, o coque é paulatinamente retirado por meio de uma "máquina desenformadora" e cai sobre um "carro de apagamento", que é encaminhado para a "torre de extinção", onde jatos de água apagam o coque incandescente.

Na Figura 68 ilustra-se a seqüência operacional de um forno de coqueificação.

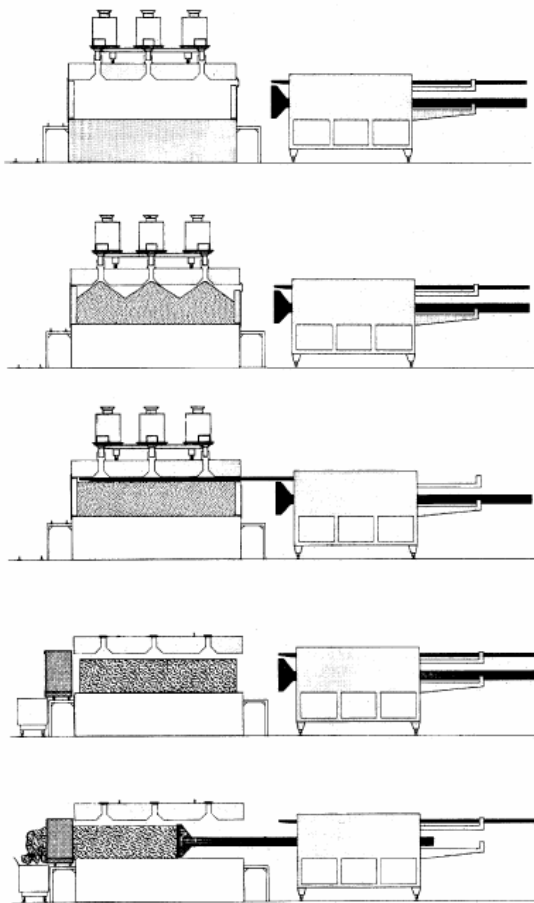


Figura 68: Sequência de operações em um dos fornos de coqueificação.

Na Figura 69 verifica-se o momento da extração do coque.

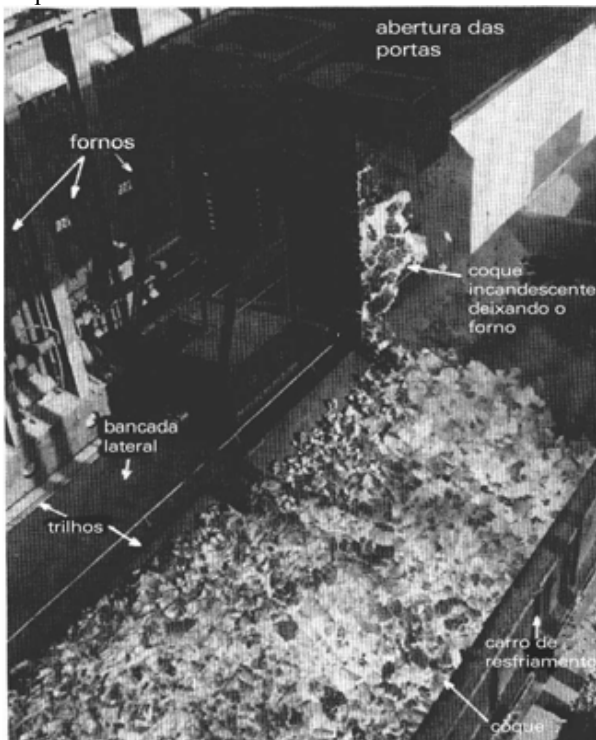


Figura 69: Retirada do coque de um dos fornos de coqueificação.

O carvão vegetal ou "de madeira" é fabricado mediante pirólise da madeira, ou seja, quebra das moléculas complexas que constituem a madeira, em moléculas mais simples, mediante calor. O aquecimento para a carbonização da madeira é feito em fornos de certo modo rudimentares e pouco eficientes, sobretudo no Brasil, pois os subprodutos gasosos e líquidos são perdidos durante o processo. Além do fator ambiental, existe neste tipo de processo, um sério problema de trabalho infantil e escravo, bastante retratado pela imprensa brasileira.

Os fornos mais difundidos no Estado de Minas Gerais, que é a principal sede da siderurgia a carvão vegetal, são do tipo com aquecimento interno e intermitente (por carga). Têm forma cilíndrica e são fabricados de tijolos refratários, sendo fechados no topo por uma abóbada também de tijolos, conforme se verifica na fotografia da Figura 70.



Figura 70: Fornos para carvão vegetal em Jabaíba-MG.

O calor é aplicado à madeira, com ausência de oxigênio, resultando gases (CO_2 , CO , H_2 , etc.), líquidos (alcatrões, ácido acético, álcool metílico) e o resíduo sólido que é o "carvão vegetal". Este tipo de carvão apresenta, em média, 70% de carbono e é um produto de alta qualidade, mesmo quando comparado ao melhor coque. Entretanto, sua resistência mecânica é relativamente baixa, de modo que os altos-fornos a carvão vegetal possuem capacidade bem menor que os baseados no coque. O maior alto-forno a carvão vegetal operando no Brasil e no mundo apresenta uma capacidade diária de 1.200t. Quanto aos altos-fornos a coque, há vários funcionando nos países de maior produção siderúrgica, com capacidade pouco superior a 10.000t/dia.

A função do fundente é combinar-se com as impurezas (ganga) do minério e com as cinzas do carvão, formando as chamadas "escórias".

O principal fundente é o calcário, de fórmula CaCO_3 , o qual, para emprego direto no alto-forno.

No Brasil, jazidas de calcário são encontradas praticamente em todos os estados.

Uma outra matéria prima bastante importante para a indústria siderúrgica é o minério de manganês. Ele é utilizado tanto na carga do alto-forno e, na forma de ferro-liga ou ferro-manganês, como elemento de adição nos aços. Como se verá, o manganês é elemento de liga imprescindível nos aços; é utilizado em princípio como dessulfurante e desoxidante. Dai a

grande importância do minério de manganês. O tipo mais importante é a Pirolusita (MnO_2 - 30~50%Mn). O Brasil possui reservas apreciáveis desse minério, caracterizado ainda pela sua boa qualidade. As principais jazidas localizam-se nos Estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso e Amapá. Não é um minério comum, sobressaindo-se, entre os países detentores, além do Brasil, a União Soviética, a Índia e a África do Sul.

Outras matérias-primas utilizadas na indústria siderúrgica, nos processos de fabricação de aços comuns e especiais, incluem ferro-ligas de silício, cromo, vanádio, molibdênio, níquel, tungstênio, titânio etc., cuja função será devidamente explicada mais adiante.

Finalmente, deve-se ainda mencionar como importante matéria-prima a sucata de aço, ou seja, subprodutos da fabricação de aço e itens ou componentes de aço desgastados, quebrados ou descartados. A utilização desse tipo de matéria-prima é de vital importância, pois não só corresponde ao reaproveitamento de material que, de outro modo, seria inútil, como permite uma apreciável economia de minério de ferro, carvão e calcário, devido a seu emprego nos fornos de aço, em lugar do ferro gusa do alto-forno. Particularmente, o Rio Grande do Sul, através de suas duas grandes siderúrgicas (Gerdau Aços Finos Piratini e Gerdau Riograndense, situadas em Charqueadas e Sapucaia do Sul, respectivamente) produz aço diretamente da sucata.

O alto-forno constitui ainda o principal aparelho utilizado na metalurgia do ferro e se classifica como reator do tipo chaminé no qual a carga sólida é descendente e os gases redutores ascendentes.

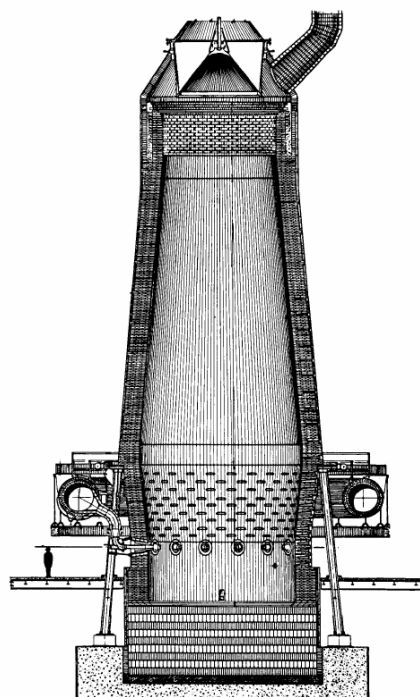


Figura 71: Seção transversal típica de um alto-forno moderno.

É um equipamento contínuo e seu funcionamento é ininterrupto por anos (marcha do alto forno). Ilustrativamente, o alto-forno 1 da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) funcionou, ininterruptamente, de 1946 a 1992. A partir dos primeiros fornos, dos tipos mais rudimentares, em que os gases eram perdidos na atmosfera, constantes aperfeiçoamentos técnicos vêm sendo introduzidos e a capacidade diária paulatinamente elevada, aproximando-se, nos dias atuais, de 10.000 toneladas de ferro gusa em 24 horas. Na Figura 72 demonstra-se um alto-forno e seus equipamentos auxiliares.

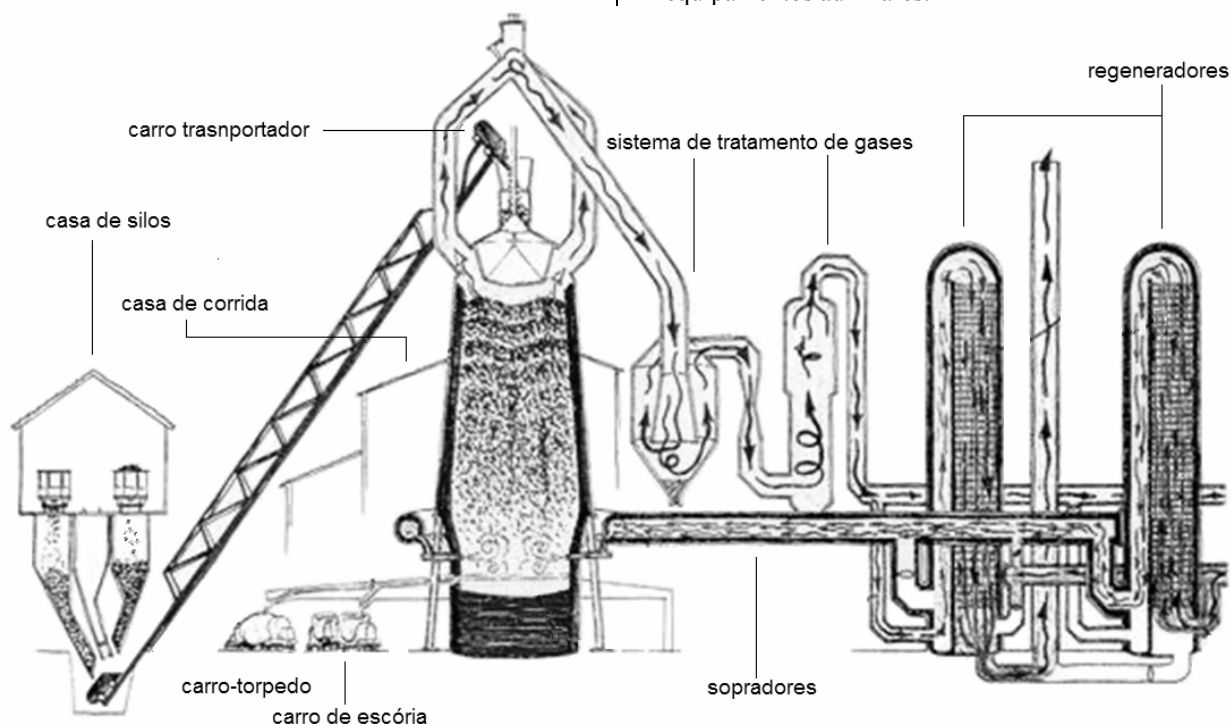


Figura 72: Desenho esquemático de um alto-forno e seus equipamentos auxiliares.

A metalurgia do ferro consiste essencialmente na redução dos óxidos dos minérios de ferro, mediante o emprego de um redutor, que é um material à base de carbono - o carvão - o qual alua igualmente como combustível e, indiretamente, supridor do carbono para as ligas ferro-carbono de alto carbono, que são os principais produtos do alto-forno.

Os materiais contendo ferro (minério de ferro, sinter, pelotas), o coque e os fundentes são continuamente alimentados pelo topo. Ar aquecido entre 900°C e 1350°C, muitas vezes com adições de combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, é insuflado pelas ventaneiras posicionadas na parte inferior do forno. A combustão do coque previamente carregado e/ou do combustível injetado pelas ventaneiras, fornece o calor necessário ao processo e o gás para a redução dos óxidos.

O ferro reduzido absorve carbono, que se fundem e escorrem para o cadinho na parte inferior do forno. O fluxo combina-se com as impurezas do minério e com as cinzas do coque e forma uma escória que sobrenada o metal líquido do cadinho. Em períodos de tempo determinados (corrida do forno), o metal líquido, chamado de ferro-gusa, e a escória do alto-forno são vazados do cadinho pela casa de corrida. A composição química típica do ferro-gusa e da escória são evidenciadas na Tabela 9.

A casa de silos mantém estocadas as matérias primas necessárias à produção de ferro-gusa. Nela estão estocados sinter, minério de ferro bitolado, coque, pelotas, e fluxantes (dolomita, calcário ou CaO e MgO). O volume estocado é função da segurança operacional do alto-forno e do investimento disponível. O tipo de sistema transportador depende da quantidade de matérias primas e, conseqüentemente, da produção de gusa. São empregados três tipos: caçambas, carros ("skips cars") ou correias transportadoras.

Tabela 9: Faixa composicional típica do ferro-gusa e da escória de alto-forno.

Elemento e/ou Componente	Ferro-Gusa [%]	Escória [%]
Si	0,5~3	-
S	0,035~0,05	0,4~1,2
P	0,04~0,4	-
Mn	1~2	-
C	3~4,5	-
Fe	90~95,5	-
SiO ₂	-	23~55
CaO	-	27~55
Al ₂ O ₃	-	5~25
MgO	-	1~12
FeO	-	0,5~2

O cadinho do alto-forno é o reservatório de gusa e escória e possui dimensões aproximadas de 4 metros de altura e 10 metros de diâmetro. O vazamento é feito por meio de orifícios nas paredes do cadinho. O furo para o vazamento de escória e/ou gusa é produzido por um perfurador pneumático associado a um canhão de massa refratária. O diâmetro do furo de vazamento está entre 35 e 90 mm que permite uma vazão entre 2 e 5 toneladas/minuto. A frequência de vazamento é entre 12 a 16 por dia (uma a cada 2 horas). A Figura 73 apresenta a casa de corrida de um alto-forno,

evidenciando a perfurador pneumático e o canhão de massa empregado para o vazamento. Na prática emprega-se a nomenclatura de corrida do gusa e corrida da escória.

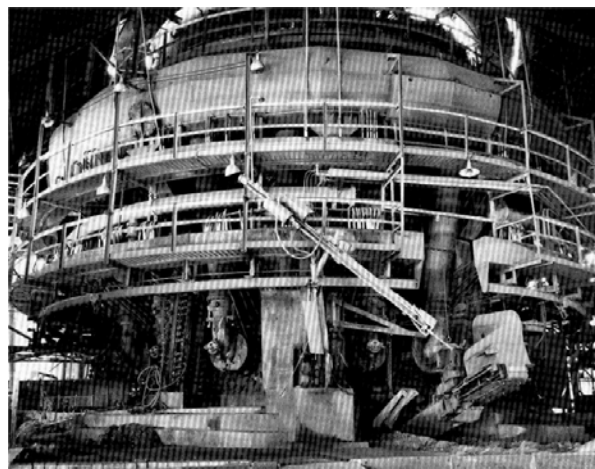


Figura 73: Base do alto-forno (casa de corrida).

O vazamento do gusa ocorre pela calha de gusa e se deposita no carro torpedo. Na Figura 74 observa-se uma calha de vazamento do gusa.



Figura 74: Calha da corrida do gusa.

O gusa líquido vazado na casa de corrida deve ser transportado para a aciaria para a conversão do ferro-gusa em aço. O transporte do gusa líquido é realizado por meio do carro-torpedo. Os carros-torpedo operam sobre trilhos e sobre fundações reforçadas, sua capacidade é, normalmente, entre 200 e 250 toneladas. A Figura 75 demonstra um exemplo de carro-torpedo.



Figura 75: Carro-torpedo utilizado para o transporte do gusa.

A escória é vazada numa calha e se deposita na panela de escória, depositada num carro de escória e posteriormente é descartada. A Figura 76 demonstra o descarte da escória em locais definidos.



Figura 76: Descarte da escória de alto-forno.

Atualmente vários estudos são relacionados a estes depósitos altamente contaminantes do meio ambiente.

Os regeneradores são as instalações responsáveis pelo aquecimento do ar alimentado nas ventaneiras do alto-forno. A temperatura do ar fica entre 900°C e 1350°C. Os regeneradores (“cowpers”)

são fabricados com tijolos cerâmicos e podem possuir câmaras de combustão internas ou externas.

Os sopradores são os equipamentos responsáveis pela alimentação contínua de ar aquecido para as ventaneiras do alto forno. São equipamentos elétricos, cuja alimentação é feita por energia elétrica gerada dentro da siderúrgica via queima do gás de alto-forno e/ou gás de coqueria. Na Figura 73 podemos observar as ventaneiras alimentadas pelos sopradores.

A composição do ferro-gusa apresenta cerca de 4% de carbono e 0,4% de fósforo que impossibilita sua conformação mecânica. Para converter ou transformar o ferro-gusa em aço é necessário a redução dos teores de C, P e Si. Os conversores são carregados com gusa líquido, sucata de aço sólida e uma escória básica. O Conversor LD (também conhecido como forno oxigênio) é o mais utilizado e se baseia com oxigênio puro injetado por meio de lanças ou pelo fundo do conversor ou ainda a combinação de ambos. A injeção promove a oxidação controlada do C e Si, gerando calor para carga. O local físico onde se encontra o conversor LD se chama aciaria LD. A Figura 77 apresenta uma representação esquemática de uma aciaria LD, indicando a localização relativa dos equipamentos.

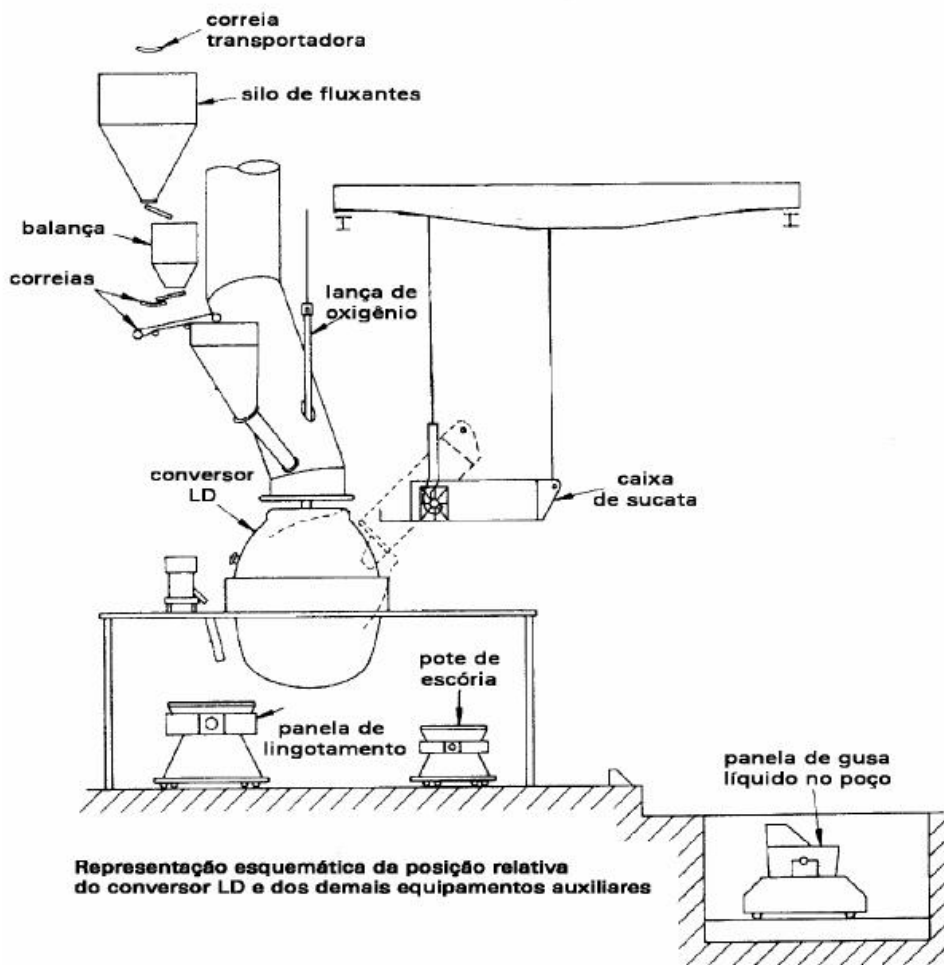
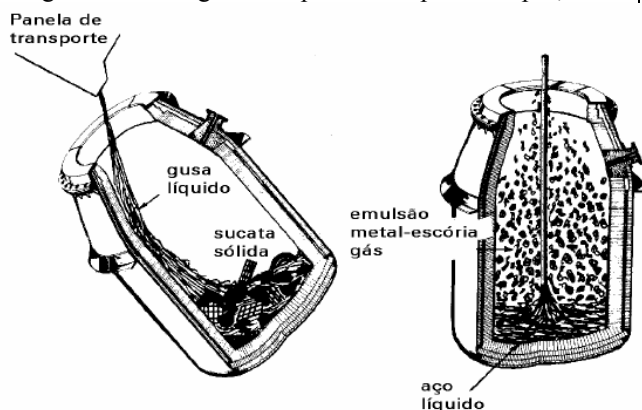


Figura 77: Representação esquemática de uma aciaria LD.

Após o carregamento é realizada a injeção de oxigênio puro em altíssima velocidade (1,7 a 2,5 mach) em pressões entre 960 e 1250 kPa por meio de uma

lança refrigerada. A ação do jato de oxigênio é parte química (reações de oxidação de Si, C, Mn e P) e parte física (formação de uma emulsão gás-escória-metal). A

etapa de sopro no conversor LD tem a duração de aproximadamente 15 minutos e a lança de injeção é refrigerada com água sob pressão. Após o sopro, o



conversor é escorificado e parte-se para o vazamento na panela, conforme Figura 78.

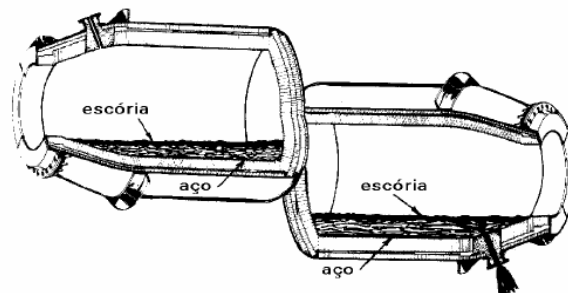


Figura 78: Etapas do carregamento e do sopro do conversor LD.

Após o vazamento, o aço líquido segue para o lingotamento convencional ou contínuo ou para instalações de metalurgia de panela. Em relação à metalurgia da panela, resume-se basicamente em reações químicas controladas no forno panela, afim de alteração final e correção de eventuais alterações químicas desejadas. Também nesta etapa são retirados elementos químicos danosos aos aços. Este é o caso da dessulfuração (retirada do S) e desfosforação (retirada do P). O termo metalurgia de panela é empregado para denominar operações metalúrgicas realizadas em panelas específicas. Estas operações envolvem: Elaboração de aços-liga; Refino sob vácuo e Refino por meio de escória. Na Figura 79 verificamos uma panela de aço líquido sendo transportada para o lingotamento ou para o forno panela, afim de correções específicas.



Figura 79: Aço líquido produzido no conversor sendo transportado para o lingotamento ou para as instalações de metalurgia de panela.

O lingotamento consiste na solidificação do aço produzido no conversor LD e/ou por metalurgia de panela (aços-liga) com o objetivo de produzir lingotes para os processos de conformação mecânica. Existem duas variantes deste processo, convencional e contínuo:

-Lingotamento convencional: processo em que o aço líquido é solidificado em lingoteiras estáticas, conforme Figura 80, para lingoteiras redondas.



Figura 80: Enchimento das lingoteiras circulares.

Após o resfriamento do metal, as lingoteiras são desmoldadas, conforme exemplo da Figura 81.



Figura 81: Desmoldagem de lingoteiras de seção retangular de cantos arredondados.

-Lingotamento contínuo: processo em que o metal líquido é solidificado em lingoteiras refrigeradas de maneira a produzir placas ou tarugos contínuos, conforme desenho esquemático da Figura 82.

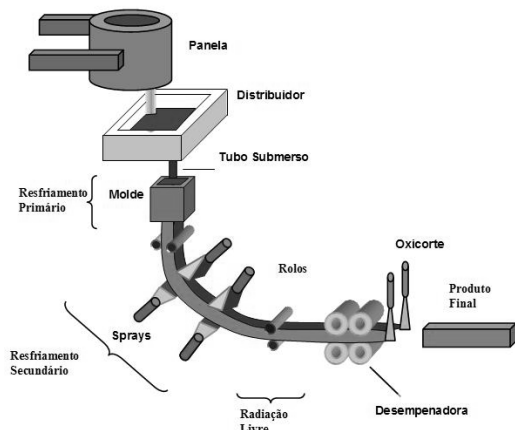


Figura 82: Representação esquemática do lingotamento contínuo de tarugos.

Na Figura 83 apresenta-se uma planta de lingotamento contínuo de placas.

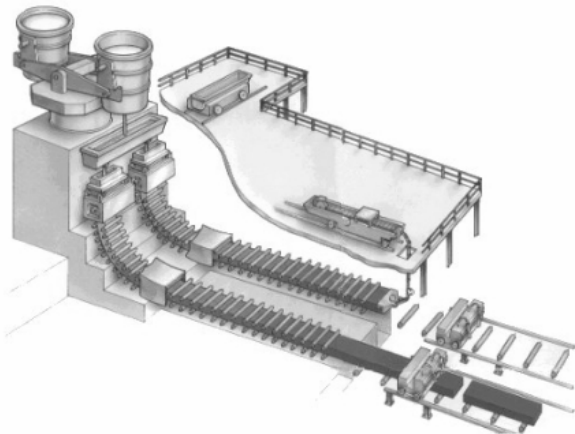


Figura 83: Desenho esquemático de lingotamento contínuo de placas.

A Figura 84 apresenta uma imagem de um lingotamento contínuo de uma siderúrgica, destacando a região de radiação livre.



Figura 84: Lingotamento contínuo em dois veios.

A Figura 85 apresenta os principais tipos de defeitos oriundo do processo de lingotamento.

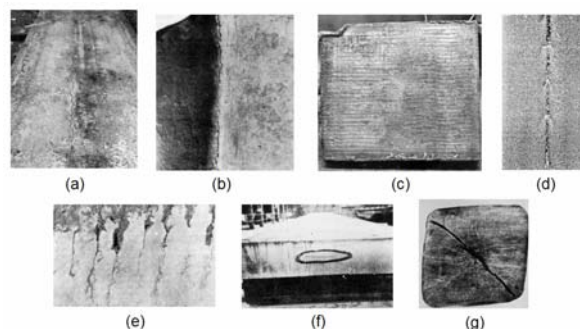


Figura 85: Principais defeitos metalúrgicos provenientes do lingotamento sendo: (a)trinca longitudinal, (b)trinca de canto (c)marcas de oscilação, (d)segregação; (e)trinca transversal, (f)trinca central e (g)romboidade.

As principais categorias de produtos oriundos da siderúrgica podem ser divididas conforme segue:

- Tarugos de secção transversal quadrada ou circular;
- Blocos de secção transversal quadrada, retangular ou cilíndrica;
- Placas grossas e médias, razão entre os lados, maior que 2;
- Placas finas com espessura entre 20 e 70 mm;
- Tiras com espessura entre 5 e 20 mm;
- Tiras finas com espessura menor que 5 mm.

Na Figura 86 observam-se alguns exemplos.

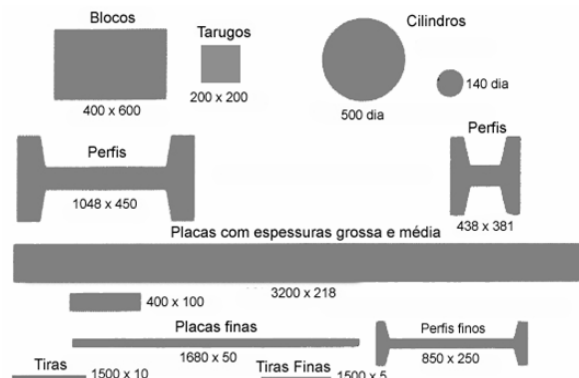

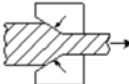


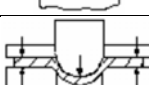

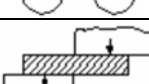


Figura 86: Principais produtos oriundos da siderurgia.

Na sequência da apresentação dos processamentos dos metais dever-se-ia entrar em discussão os processos de conformação, no entanto, estes processos serão exaustivamente vistos na disciplina SISTEMAS E PROCESSOS MECÂNICOS (CONFORMAÇÃO MECÂNICA), do terceiro semestre. Porém, a fim de introduzir o assunto, apresentaremos as nomenclaturas básicas envolvidas nestes processos bem como as principais características de cada processo e o produto ou semi-produto resultante, conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Características dos principais processos de conformação mecânica.

PROCESSO	TRABALHO		ILUSTRAÇÃO	Semi-produtos ou produtos
	A QUENTE	A FRIO		
Laminação	X			Placas, chapas, barras e perfis
		X		Chapas
Trefilação		X		Barras, arames e fios
Extrusão	X			Tubos
		X		Peças pequenas extrudadas
Forjamento	X			Peças forjadas
		X		Pequenas peças forjadas
Estampagem (profunda)	X			Peças grandes estampadas
		X		Peças de chapas estampadas
Calandragem		X		Tubos com costura
Corte	X	X		Peças cortadas de chapas ou perfis pequenos diversos

Ainda, podem-se determinar os processos de conformação, de uma forma mais completa, em função da natureza do processo envolvido (mecânico ou metalúrgico) e da variação determinante da aplicação, conforme a Tabela 11 apresenta.

Tabela 11: Classificação dos processos de fabricação dos metais.

PROCESSO	APLICAÇÃO	CONFORMAÇÃO POR...	PROCESSO
Processos Mecânicos	Aplicação de Tensões	Deformação Plástica	Forjamento
			Extrusão
			Trefilação
			Laminação
			Torneamento
		Usinagem de Corte	Fresagem
			Retificação
			Plainamento
			Soldagem
Processos Metalúrgicos	Aplicação de Temperaturas	Solidificação	Lingotamento
			Fundição
			Reofundição
		Metalurgia do Pó	Sinterização

Um outro exemplo ilustrativo é visualizado na Figura 87, onde a parte superior da figura representa produtos provenientes de laminação a quente e, na parte inferior, produtos provenientes da laminação a frio.

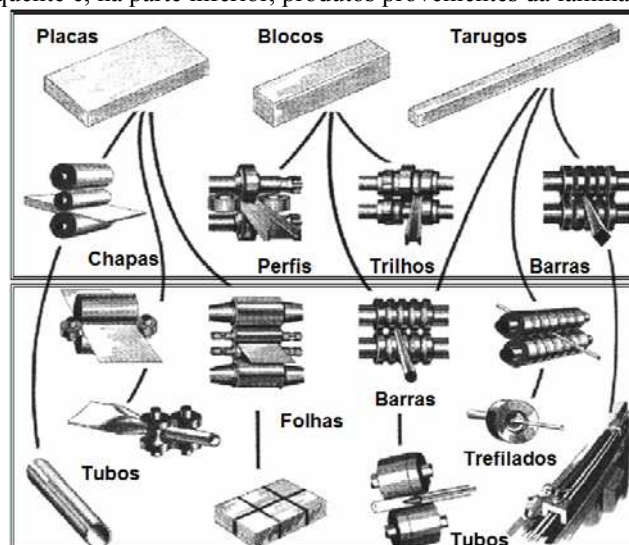


Figura 87: Exemplos de produtos provenientes da laminação a quente (posterior) e a frio (inferior).

No Anexo III são apresentadas as cadeia produtivas da usina USIMINAS, de Minas Gerais, e das unidades da GERDAU.

Neste subcapítulo serão analisadas as diferentes fases que podem ocorrer nos aços no estado sólido em função do teor de carbono. Inicialmente serão apresentadas as fases estáveis, resultantes de transformações ocorrendo em equilíbrio termodinâmico (aquecimento ou resfriamento muito lentos) e, posteriormente, as fases metaestáveis

O diagrama de equilíbrio Fé-C é visualizado na Figura 88 e indica que, na temperatura ambiente, os constituintes do sistema Fé-C seriam α (ferrita) e grafita. Salienta-se que este diagrama não segue uma distribuição linear na composição química, pois, caso contrário, o diagrama estaria muito reduzido na esquerda.

Este diagrama é particularmente interessante no momento que analisar os ferros fundidos.

O diagrama ferro-carbono (Fe-C), na sua forma mais comumente utilizada, é apresentado na Figura 99.

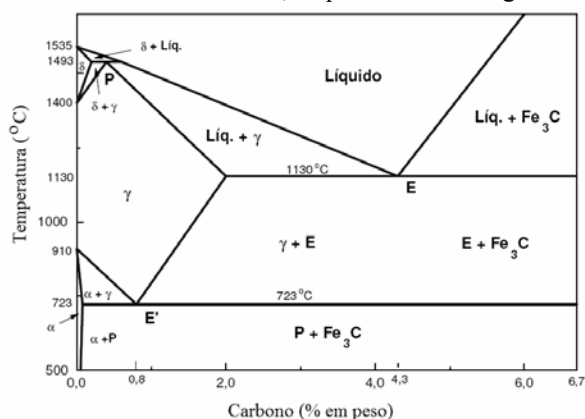


Figura 89: Diagrama Fe-Fe₃C

Como pode ser observado o diagrama é parcial englobando apenas as transformações que ocorrem para uma faixa de teor de carbono de zero a 6,7% em peso, que corresponde a 100% de uma fase denominada cementita (Fe₃C). Pode-se então considerar que o diagrama é melhor caracterizado como Fe-Fe₃C do que como Fe-C. As diferentes fases e transformações invariantes que podem ser observadas no diagrama serão definidas a seguir.

Em primeiro lugar serão definidas as fases que surgem como consequência das transformações alotrópicas do ferro que são a ferrita (α), a austenita (γ) e a fase δ.

-A ferrita (α) é uma solução sólida de carbono no ferro com estrutura CCC, sendo estável abaixo de 910°C. A solubilidade máxima do carbono no ferro com estrutura CCC é 0,025% a 723°C, sendo bem menor à temperatura ambiente ($2,7 \times 10^{-7}$ %). A ferrita é uma fase dúctil apresentando dureza e resistência mecânica baixas.

-A austenita (γ) é uma solução sólida de carbono no ferro com estrutura CFC, que se origina da transformação alotrópica da estrutura CCC em CFC durante o aquecimento, sendo, portanto, estável a temperaturas mais altas. A faixa de temperaturas em que a austenita é estável depende do teor de carbono no aço. Nos aços carbono para um teor de carbono correspondente a 0,8% a austenita é estável acima de 723°C, para teores menores ou maiores essa temperatura é maior. A solubilidade do carbono é maior na austenita podendo chegar a 2,06% a 1130°C. Em função desse limite de solubilidade é que são definidos os aços como ligas de ferro contendo até 2,06% de carbono. As ligas que contêm uma porcentagem de carbono entre 2,06 e 6,7% são denominadas ferros fundidos. A austenita também é dúctil e apresenta dureza e resistência mecânica baixas.

-A fase δ, que não tem nome específico, é resultado da transformação alotrópica da estrutura CFC em CCC durante o aquecimento, sendo portanto estável a temperaturas acima de 1400°C. O limite máximo de solubilidade do carbono na fase δ é 0,10% a 1493°C. A fase δ apresenta parâmetro de rede diferente da ferrita pois a temperatura afeta as ligações de forma a alterar as suas distâncias interatômicas.

Resta ainda definir a cementita, que é uma fase que não depende das formas alotrópicas do ferro.

-A cementita (Fe₃C) ou carboneto de ferro é uma fase que se apresenta na forma de um reticulado cristalino baseado em uma célula unitária ortorrômbica (forma de um paralelepípedo com os três lados diferentes) contendo 12 átomos de ferro e 3 de carbono, que corresponde a 6,7% de carbono em peso. A cementita é uma fase frágil apresentando dureza e resistência mecânica altas. Na verdade a cementita é uma fase metaestável e deveria decompor-se em ferrita e grafita, que seriam as fases termodinamicamente mais estáveis, conforme diagrama da Figura 88, mas como ela forma-se mais rapidamente que a grafita e a velocidade de decomposição em condições normais é desprezível podemos considerá-la estável para efeitos práticos.

Nota-se no diagrama da Figura 89 três transformações de fase invariantes nos pontos E, E' e P. Essas transformações são importantes na formação da microestrutura das ligas ferro-carbono e serão descritas a seguir.

-No ponto E, que corresponde a um teor de carbono equivalente a 4,3% e a uma temperatura de 1130°C, ocorre uma transformação eutética em que uma fase líquida transforma-se em duas fases sólidas. No caso a liga ferro-carbono no estado líquido transforma-se em uma mistura de austenita e cementita, ou seja:



A transformação eutética, por ocorrer para ligas com teores de carbono mais altos, é importante no estudo dos ferros fundidos. Como a transformação eutética indica a composição com menor ponto de fusão, as ligas ferro-carbono com teores de carbono em torno de 4,3% são convenientes para processos de fundição.

A estrutura eutética do sistema ferro-carbono recebe o nome de Ledeburita.

-No ponto E', que corresponde a um teor de carbono equivalente a 0,8% e a uma temperatura de 723°C, ocorre uma transformação eutetoide em que uma fase sólida transforma-se em uma mistura de duas outras fases sólidas. No caso a austenita transforma-se em uma mistura de ferrita e cementita, ou seja:



A mistura de ferrita e cementita resultante da transformação da austenita com composição eutetoide apresenta-se de uma forma bem definida caracterizada por lamelas intercaladas das mesmas na proporção de 88% de ferrita e 12% de cementita. Esta estrutura característica é denominada perlita e é mostrada na Figura 90.

É importante observar que a perlita não é uma fase, mas uma mistura de duas fases distintas.

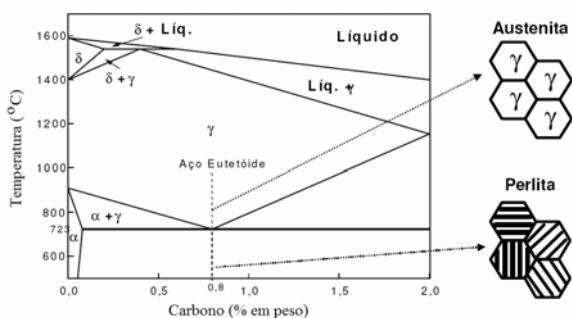


Figura 90: Variação da microestrutura durante a transformação de fase no estado sólido de um aço eutetóide.

A perlita, em função das suas características, apresenta propriedades intermediárias entre a ferrita, que é dúctil e apresenta baixa resistência mecânica e a cementita que é frágil e apresenta uma alta resistência mecânica. Assim é uma estrutura interessante do ponto de vista de aplicação prática já que apresenta uma boa resistência mecânica mantendo uma certa ductilidade. A transformação eutetóide ocorre em todos os aços carbono com composição acima de 0,025 quando resfriados em equilíbrio a partir de uma determinada temperatura em que a estrutura seja austenítica, sendo extremamente importante no estudo das transformações de fase no estado sólido dos aços.

-Finalmente no ponto P, que corresponde a um teor de carbono equivalente a 16% e a uma temperatura de 1492°C, ocorre uma transformação peritética em que uma mistura de uma fase sólida e uma fase líquida transformam-se em uma outra fase sólida. No caso uma mistura de fase δ e fase líquida transformam-se em austenita, ou seja:



A transformação peritética é importante no estudo da solidificação de aços carbono com teores não muito altos de carbono, não sendo particularmente importante no estudo das transformações de fase no estado sólido.

Dada a importância da transformação eutetóide na formação da microestrutura dos aços estes são normalmente classificados, em função da sua composição, em eutetóides, hipoeutetóides e hipereutetóides. O aço eutetóide é aquele que tem a composição eutetóide, ou seja, 0,8% de carbono e os hipoeutetóides e hipereutetóides são aqueles que apresentam respectivamente teores de carbono abaixo e acima da composição eutetóide.

Se o resfriamento do aço, a partir de uma temperatura em que toda a estrutura esteja na forma de grãos de austenita, for lento o suficiente para que os movimentos atômicos por difusão permitam que a variação da composição das fases durante as transformações siga o diagrama de fases, as transformações estarão ocorrendo em equilíbrio termodinâmico. Nesse caso a estrutura final que o aço apresentará ao atingir a temperatura ambiente dependerá somente da sua composição. A seguir serão descritas as transformações de fases em equilíbrio que ocorrem nos aços carbono em função do seu teor de carbono.

-Aço eutetóide: se o aço apresenta 0,8% de carbono ele sofrerá apenas uma transformação de fase durante o resfriamento quando a austenita se transforma em perlita à temperatura constante de 723°C. Assim na temperatura ambiente o aço eutetóide apresentará uma estrutura formada por grãos de perlita. Na Figura 90 é apresentada, de forma esquemática, essa transformação e na Figura 91 uma micrografia de um aço eutetóide.

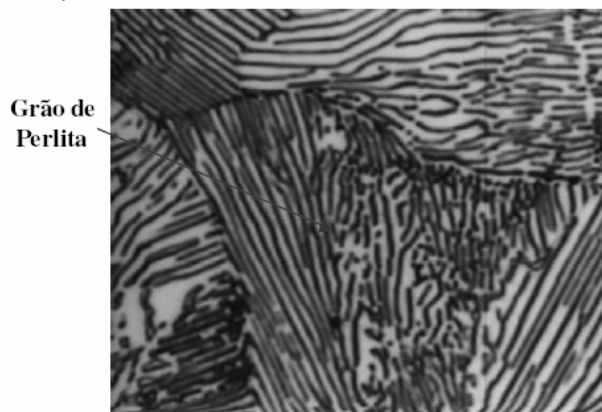


Figura 91: Micrografia de um aço eutetóide (0,8 %C) evidenciando grãos de perlita (Nítrico – 1.000x).

-Aço hipoeutetóide: se o aço contém menos que 0,8% de carbono na sua composição a transformação da austenita ocorrerá em duas etapas, que podem ser visualizadas na Figura 92.

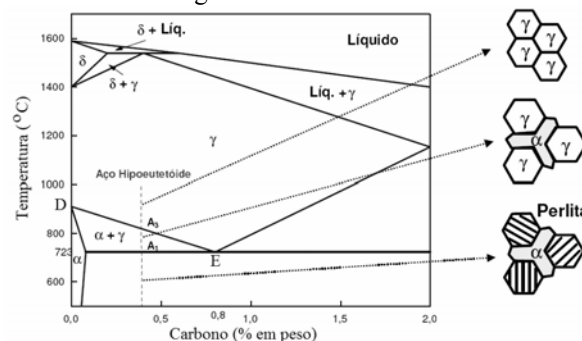


Figura 92: Variação da microestrutura durante as transformações de fase no estado sólido de um aço hipoeutetóide

Inicialmente, ao ser atingida a temperatura A_3 inicia-se a transformação da austenita em ferrita. Como os contornos de grão da austenita são regiões de maior energia contribuindo para a energia de ativação necessária à nucleação da nova fase, a ferrita forma-se nesses locais. A temperatura de início de transformação depende da composição do aço, ou seja, quanto maior o teor de carbono menor essa temperatura (ver diagrama). A transformação de austenita em ferrita continua até ser atingida a temperatura A_1 , que nos aços carbono corresponde a 723°C e independe do teor de carbono. Nessa temperatura a austenita restante cuja composição, durante o resfriamento seguiu a linha DE, apresentará a composição eutetóide (0,8% C) e portanto sofrerá a reação eutetóide transformando-se em perlita. A ferrita que se formou nos contornos de grão antes da reação eutetóide permanece inalterada e é considerada uma fase pró-eutetóide sendo denominada ferrita primária. Continuando o resfriamento observa-

se uma variação nas fases presentes, conforme indicado pela regra da alavanca, mas a estrutura na temperatura ambiente será formada por grãos de perlita envolvidos por grãos de ferrita primária. Na Figura 92 são apresentadas, de forma esquemática as transformações que ocorrem durante o resfriamento e na Figura 93 uma micrografia de um aço hipoeutetóide.

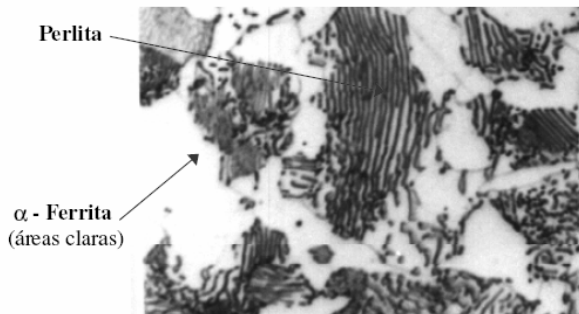


Figura 93: Micrografia de um aço hipoeutetóide (0,45 % C) evidenciando grãos de perlita e de ferrita (nítrico-700x).

-Aços hipereutetóides: se o aço contém mais do que 0,8% de carbono as transformações ocorrem de forma semelhante às dos aços hipoeutetóides, ou seja inicialmente, entre as temperaturas A_3 e A_1 forma-se a fase pró-eutetóide, que nesse caso é a cementita primária, também nos contornos de grão da austenita e quando se atinge A_1 a austenita restante, com composição eutetóide transforma-se em perlita. Nesse caso a temperatura de início de transformação (A_3) aumenta com o teor de carbono mas a temperatura de fim de transformação (A_1) continua sendo 723°C. A estrutura do aço hipereutetóide na temperatura ambiente é formada de grãos de perlita envolvidos por grãos de cementita primária. Na Figura 94 são apresentadas, de forma esquemática as transformações que ocorrem durante o resfriamento.

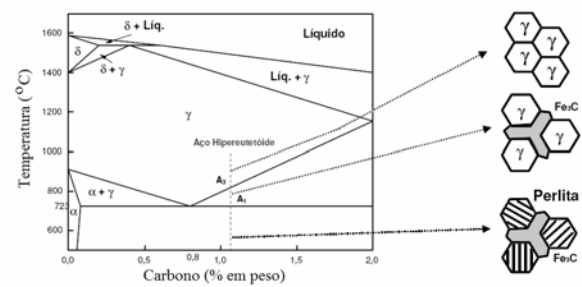


Figura 94: Variação da microestrutura durante as transformações de fase no estado sólido de um aço hipereutetóide.

Na Figura 95 uma micrografia de um aço hipereutetóide.

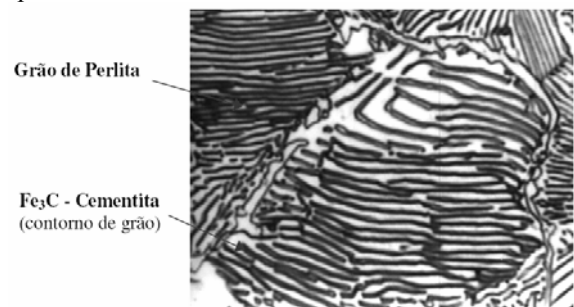


Figura 95: Micrografia de um aço hipereutetóide (0,95 % C) evidenciando grãos de perlita e cementita nos contornos de grãos. (nítrico-800x).

Durante o aquecimento dos aços a partir da temperatura ambiente as transformações ocorrem em sentido inverso, podendo-se transformar novamente todas as fases em austenita. É importante salientar que as temperaturas de transformação apresentadas valem apenas para os aços carbono.

Na Figura 96 observamos o diagrama Fe-Fe₃C com todas as nomenclaturas a ele pertinentes.

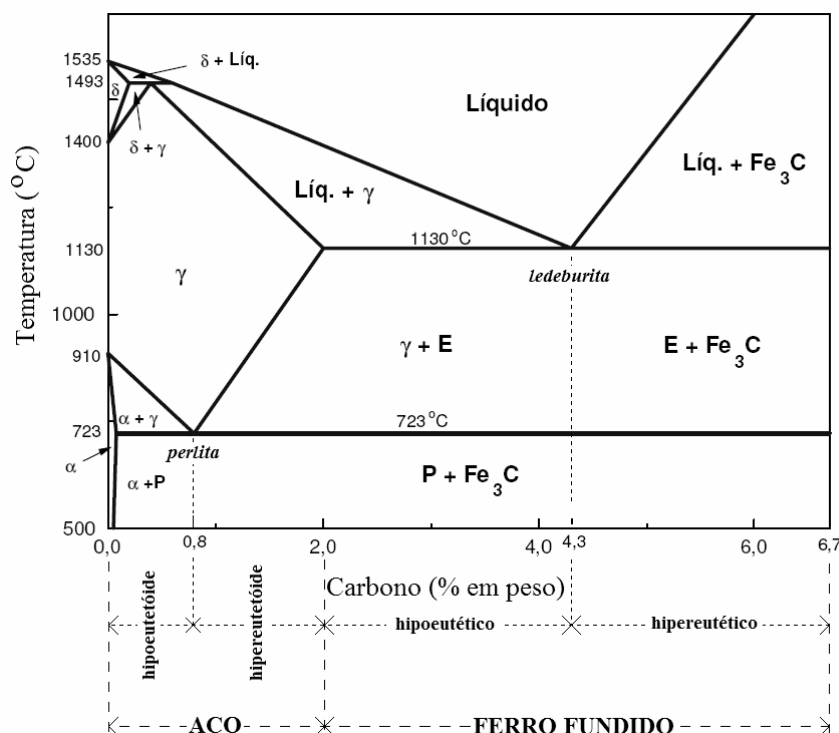


Figura 96: Nomenclaturas do diagrama Fe-Fe₃C. .

2.6.2. Elementos de liga

Quando são adicionados elementos de liga aos aços essas temperaturas variam e as informações sobre as transformações de fase não podem mais ser obtidas no diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

No entanto, consideraremos inicialmente o carbono como elemento de liga e associando as condições observadas anteriormente, para os aços, têm-se as seguintes estruturas, à temperatura ambiente:

-ferro comercialmente puro: “ferrita”, mole, dúctil e pouco resistente;

-aços hipoeutetóides: “ferrita mais perlita”, cuja resistência e dureza vão aumentando e cuja ductilidade vai diminuindo, à medida que se caminha em direção ao teor 0,77% de carbono;

-aços hipereutetóides: “perlita mais cementita”, a quantidade desta, disposta nos contornos de grãos, aumenta à medida que se caminha para teores mais elevados de carbono; essa estrutura é dura, resistente e pouco dúctil, características que se acentuam à medida que aumenta o teor de carbono.

Todas estes comportamentos podem ser resumidos no diagrama apresentado na Figura 97.

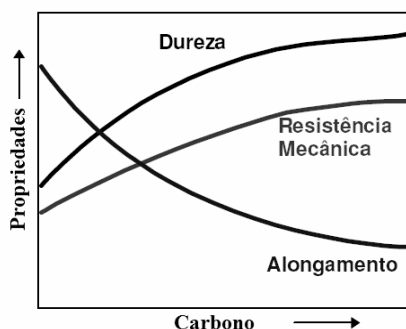


Figura 97: Variação das propriedades mecânicas do aço em função do teor de carbono.

Outros elementos de liga usuais – Mn e Si – e os que são propositamente adicionados para alterar as propriedades dos aços – Ni, Cr, Mo, W, Ti etc., – atuam diferentemente nas duas formas alotrópicas que caracterizam o ferro e, por essa razão, na posição das linhas de transformação, ou seja, na zona crítica e na zona austenítica.

Como se viu, o carbono cria uma faixa de temperaturas onde as duas formas alotrópicas alfa e gama podem existir. Da mesma maneira, atuam certos elementos de liga.

Os efeitos em particular de alguns elementos sobre o campo austenítico são os seguintes:

-Mn, Ni e Co alargam a faixa de temperaturas para austenita estável;

-Si, Cr, Mo, Ti, entre outros, estreitam a faixa de temperaturas de austenita estável.

Os elementos de liga influem igualmente sobre a temperatura e a composição do eutetóide, o que, evidentemente, significa deslocar as linhas de transformação.

A maioria dos elementos de liga – Ti, W, Mo, Si, Ni, Mn, Cr, uns mais do que os outros – tende a deslocar o eutetóide para a esquerda, ou seja, diminui o seu teor de carbono.

Quanto à temperatura do eutetóide, com exceção do Mn e do Ni, que diminuem essa temperatura, os outros elementos mais comuns – Cr, W, Si, Mo e Ti – tendem a aumentá-la.

Na faixa de composições correspondentes aos ferros fundidos, o efeito mais importante é o do silício. A tendência grafitizante desse elemento altera totalmente as propriedades desses materiais. Particularmente, neste caso, aprofundaremos mais este assunto no momento da disciplina de FUNDIÇÃO, a ser verificada no terceiro semestre.

Outros elementos podem atuar em sentido contrário, em particular o manganês, que é um dos mais importantes estabilizadores da cementita, ou seja, dificulta ou impede a sua decomposição.

Em resumo, as propriedades das ligas ferro-carbono são influenciadas pelas suas estruturas. Estas dependem das reações que ocorrem no diagrama de equilíbrio, onde os elementos de Liga atuam diretamente nas linhas de transformação, na faixa austenítica e na temperatura e composição do eutetóide, no caso dos aços, e na capacidade grafitizante ou estabilizadora da cementita.

Um pequeno resumo destas propriedades pode ser verificado na Figura 98, onde se apresenta a influência de alguns elementos de liga sobre o teor de carbono do eutetóide.

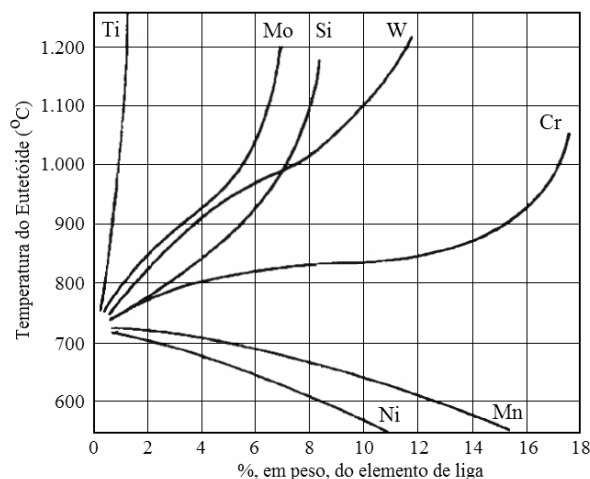


Figura 98: Influência dos elementos de liga sobre o teor de carbono do eutetóide.

Também se evidencia a influência destes elementos de liga sobre a temperatura do eutetóide, conforme Figura 99.

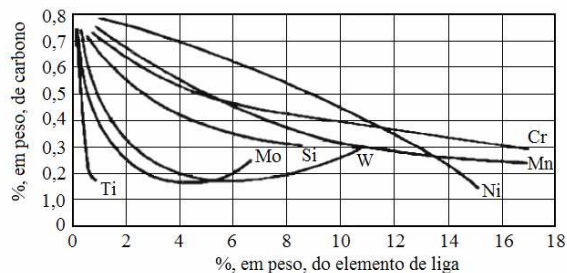



Figura 99: Influência dos elementos de liga sobre a temperatura do eutetóide

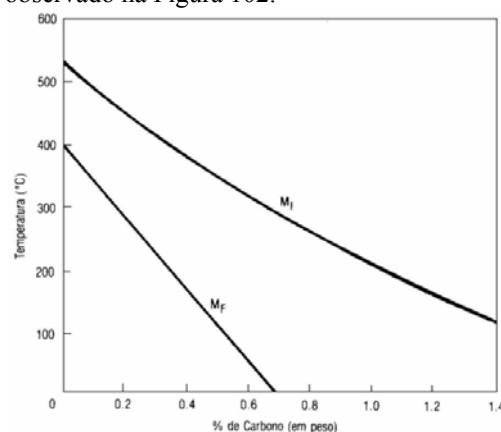
2.6.3. Fases Metaestáveis

Quando se aumenta a taxa de resfriamento de um aço, outras estruturas poderão se formar. A Bainita é uma destas estruturas que se forma tanto por difusão quanto por cisalhamento. Ela é classificada como bainita superior ou inferior, dependendo da temperatura na qual ela se forma. A bainita superior é formada por finas ($0,5\mu\text{m}$ de largura) ripas de ferrita com cementita precipitada no contorno das ripas. Em aços com baixo carbono a cementita ocorre na forma isolada ou em fileiras descontínuas ao longo do contorno das ripas, e em aços com alto carbono essas fileiras podem torna-se contínuas. A bainita inferior é formada em regiões próximas da martensita, apresentando-se na forma lenticular ou de agulhas de ferrita, de forma semelhante a martensita. Essas agulhas nucleiam no contorno e no interior do grão austenítico, com agulhas secundárias formadas a partir



Em aços carbono é difícil separar as regiões da bainita e da perlita, porém nos aços ligados essas regiões são bem distintas.

Quando se realiza um resfriamento extremamente rápido em um aço, a partir da austenita, por exemplo, resfriando uma amostra austenitizada em água, consegue-se uma estrutura metaestável, extremamente dura e de baixa tenacidade, denominada de Martensita. Essa transformação da austenita em martensita ocorre apenas por cisalhamento, pois não há tempo para que ocorra a difusão de átomos. Pode-se acelerar a formação da martensita se, juntamente com a têmpera, for realizada uma deformação plástica. Como veremos posteriormente, em função da taxa de resfriamento, existem temperaturas características do início e final de transformação da temperatura, T_{m_i} e T_{m_f} , respectivamente. Após o início da transformação (T_{m_i}), na medida em que a temperatura vai sendo abaixada, novas colônias de austenita vão sendo transformadas em martensita até que se atinja a temperatura T_{m_f} , quando então a transformação é completada. Com o aumento do teor de carbono no aço, as temperaturas de início e de fim da transformação martensítica são diminuídas, como pode ser observado na Figura 102.



43

Assim, os aços com teor de carbono acima de 0,7%, quando resfriado bruscamente até a temperatura ambiente, não serão totalmente martensíticos, tendo sempre uma quantidade variável de austenita residual ou retida (não transformada). Em aços ligados, ou com altos teores de carbono o volume de austenita residual é muito grande na temperatura ambiente, sendo necessário um tratamento em temperaturas abaixo de zero graus para que toda a austenita retida seja transformada em martensita. Estes tratamentos subzero são normalmente feitos com gás carbônico sólido (-75°C) ou com nitrogênio líquido (-196°).

A martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado (TCC) que é uma forma distorcida do ferro cúbico centrado (CCC). Ela se apresenta na forma de ripas em aços de baixo carbono e na forma de agulhas em aços com alto teor de carbono, como é mostrado na Figura 103.

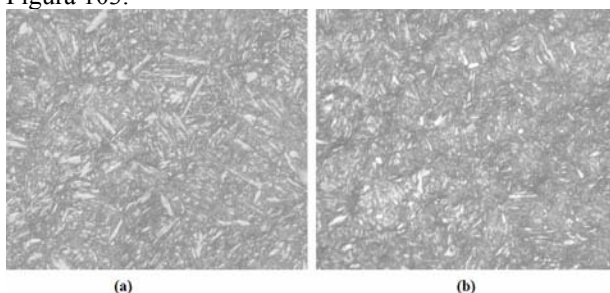


Figura 103: Microestruturas martensíticas em aços (a) SAE 1045 e (b) SAE 4340.

2.7. Diagramas de Transformações

As transformações de fase analisadas no diagrama de fase Fe-C referem-se a resfriamentos em equilíbrio termodinâmico, ou seja, lentos o suficiente para que a velocidade não interfira na fase formada. Na prática, no entanto, as transformações em geral não ocorrem em condições de equilíbrio e não podem ser analisadas através do diagrama de fases. Para a análise das transformações em condições de não equilíbrio foram desenvolvidos novos diagramas que levam em conta a variável tempo.

Cada tipo de aço, dependendo da sua composição química (teor de carbono e presença de elementos de liga), apresenta uma curva TTT (Tempo, Temperatura, Transformação) característica, isso exige uma taxa mínima de resfriamento (velocidade crítica) necessária para que ocorra a transformação da martensita. As curvas TTT se dividem em dois tipos: ITT e CCT.

As transformações de fase fora do equilíbrio podem ocorrer a temperatura constante (transformação isotérmica) no caso, por exemplo, do aço ser mantido em um forno com temperatura controlada até que a transformação se complete, ou com a temperatura caindo continuamente (resfriamento contínuo) no caso, por exemplo, de ser resfriado ao ar. Para uma mesma composição de aço existem duas curvas TTT diferentes, uma para o caso da transformação isotérmica e outra para o caso da transformação com resfriamento contínuo.

No presente capítulo serão apresentados apenas os diagramas característicos de cada tipo de curva. Este assunto será bastante aprofundado na disciplina de TRATAMENTOS TÉRMICOS, do terceiro semestre.

2.7.1. Isotérmicas

Conhecida por ITT (*Isothermal Time Transformation*). Usualmente se emprega a nomenclatura TTT para este tipo de curva. Ela também é comumente conhecida como curva “em S” ou “em C”.

Na Figura 104 é apresentada, de forma esquemática, a curva TTT para transformações isotérmicas de um aço eutetóide (0,8% C). Na ordenada tem-se a temperatura e na abcissa o tempo (em escala logarítmica). Nas transformações em equilíbrio o aço eutetóide não apresenta fases primárias (ferrita ou cementita isoladas) e toda a austenita transforma-se em perlita (estrutura formada de lamelas intercaladas de perlita e cementita) quando a temperatura atinge 723 °C. Nas transformações fora do equilíbrio, dependendo da temperatura, a austenita pode transformar-se em perlita mais refinada ou mais grosseira, dependendo da espessura das lamelas de ferrita e cementita, em geral denominadas perlita fina e perlita grossa, em bainita superior ou bainita inferior, também denominada bainita acicular, dependendo do grau de refinamento da estrutura imposto pela temperatura de transformação e em martensita que se forma a baixas temperaturas.

Na Figura 104 as linhas I e F indicam o início e o fim da transformação da austenita em perlita ou bainita e as linhas M_s e M_f indicam o início e o fim da transformação da austenita em martensita. Nos diagramas reais em geral não é apresentada a linha M_f , por ser difícil a sua determinação experimental, sendo a mesma substituída por uma próxima, como, por exemplo, M_{90} , que indica que 90% da austenita transformou-se em martensita. Do diagrama pode-se notar que nas transformações fora do equilíbrio acima de 723 °C e à esquerda de I e acima de M_s , em qualquer temperatura, ainda tem-se a estrutura austenítica, ao contrário do diagrama de equilíbrio onde só é possível encontrar austenita acima de 723 °C. A austenita então só inicia a transformação em outra fase quando o tempo de permanência em uma determinada temperatura for suficiente para “cruzar” a linha I ou quando durante o resfriamento rápido “cruza” a linha M_s . Por outro lado, a transformação da austenita termina quando o tempo for suficiente para cruzar a linha F ou quando durante o resfriamento cruza a linha M_f . Uma vez “cruzadas” as linhas F ou M_f toda a austenita foi transformada e a estrutura do aço está definida. Para alterar a estrutura formada é necessário aquecer novamente o aço acima de 723°C para que a estrutura transforme-se novamente em austenita e o processo de transformação possa ser reiniciado.

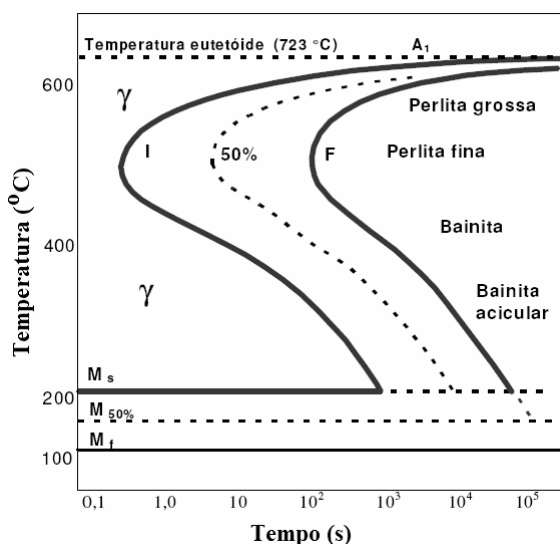


Figura 104: Representação esquemática de uma curva TTT para análise de transformações isotérmicas de um aço eutetóide (0,8% C).

Como pode ser observado, as curvas I e F apresentam a forma de um "C" com um "cotovelo" entre 500 e 600 °C. Se a transformação ocorrer a uma temperatura acima desse cotovelo a austenita transforma-se em perlita fina ou perlita grossa dependendo da temperatura ser mais alta ou mais baixa (ver Figura 104). Se a transformação ocorrer abaixo do cotovelo a austenita transforma-se em bainita superior ou bainita inferior dependendo da temperatura ser mais alta ou mais baixa (ver Figura 104). Entre I e F tem-se, dependendo da temperatura, uma mistura de perlita ou bainita já formadas e austenita não transformada. Na parte superior da figura é mostrada uma curva que apresenta a porcentagem de austenita transformada em função do tempo para uma determinada temperatura (para cada temperatura de transformação pode ser traçada uma curva semelhante). Entre M_s e M_f tem-se uma mistura de martensita já formada e austenita não transformada. Como será melhor explicado mais a frente a transformação da austenita em martensita não depende do tempo, só depende da temperatura, assim se o aço for mantido, antes da transformação da austenita ter completado, a uma temperatura entre M_s e M_f a quantidade de martensita formada e da austenita não transformada permanecem inalteradas até que a temperatura volte a cair. Se durante o resfriamento o tempo for suficiente para "cruzar" a linha I, mas não F, antes de atingir a temperatura M_s uma certa quantidade de perlita, e eventualmente de bainita, forma-se antes do início da formação da martensita. Como só a austenita transforma-se em martensita, a perlita e a bainita não, a estrutura final pode ser formada de perlita, bainita e martensita. Só é formada uma estrutura totalmente martensítica se o resfriamento a partir da temperatura de austenitização (acima de 723°C) for rápido o suficiente para que a curva de resfriamento não cruze a linha I. Como no aço eutetóide, o cotovelo da curva TTT corresponde a um tempo menor que um segundo pode-se concluir que em um aço eutetóide, mesmo para peças com pequenas

dimensões é difícil obter-se uma estrutura totalmente martensítica.

A perlita fina, por apresentar uma estrutura mais refinada, apresenta maior dureza e resistência mecânica que a perlita grossa. A bainita por apresentar a cementita bastante refinada em uma matriz de ferrita deformada é mais resistente que a perlita. E a martensita, por ser uma fase deformada devido a alta quantidade de carbono retida, é mais resistente que a bainita e a perlita. Assim pode-se dizer que quanto mais baixa for a temperatura de transformação da austenita maior a resistência mecânica e a dureza do aço e, portanto, menor a sua ductilidade (capacidade de deformação).

Na Figura 105 é mostrada, de forma esquemática uma curva TTT de um aço hipoeutetóide (% C < 0,8).

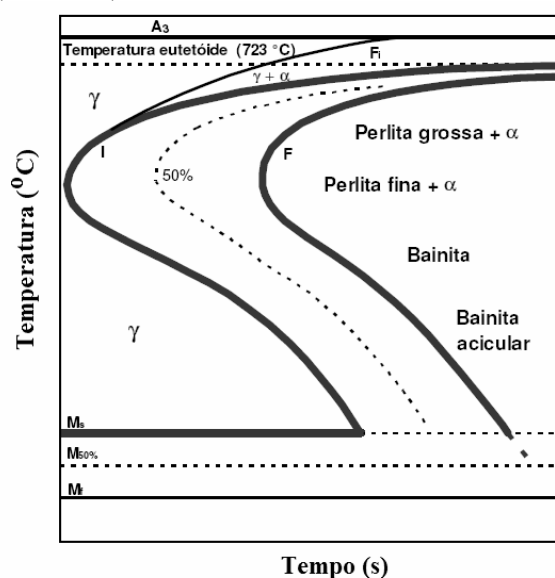


Figura 105: Representação esquemática de uma curva TTT para análise de transformações isotérmicas de um aço hipoeutetóide (0,4% C).

Neste caso, as curvas TTT deslocam-se para a esquerda, o que significa que as transformações são mais rápidas, dificultando a obtenção de estruturas martensíticas e bainíticas. Isso ocorre devido aos menores teores de carbono exigindo menos movimentos de difusão. As temperaturas de início e fim da transformação martensítica deslocam-se para cima. Como nesses aços há a possibilidade do aparecimento de ferrita primária nas curvas aparece a linha A₃ que indica o início da transformação da austenita em fase primária no diagrama de equilíbrio. No entanto para a transformação fora do equilíbrio a transformação inicia-se na linha adicional F₁ da curva TTT (ver Figura 105). A quantidade de ferrita primária vai depender da velocidade de resfriamento, ou seja, quanto mais rápido o resfriamento menor a quantidade de fase primária.

Na Figura 106 é mostrada a curva TTT de um aço hipereutetóide.

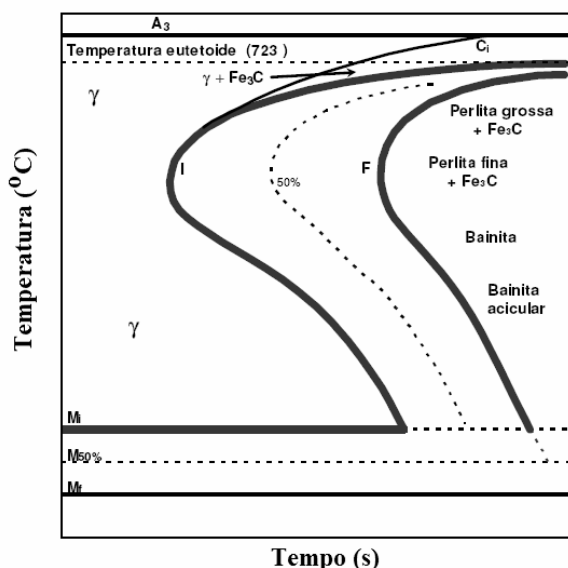


Figura 106: Representação esquemática de uma curva TTT para análise de transformações isotérmicas de um aço hipereutetóide (0,95 % C).

Nesse caso as curvas deslocam-se para a direita retardando as transformações (maior quantidade de carbono para se mover por difusão durante as transformações) e, portanto, facilitando a obtenção de estruturas martensíticas e bainíticas. As temperaturas de início e fim da transformação martensítica deslocam-se para baixo. Como nesse caso pode ocorrer a formação de cementita como fase primária, no diagrama aparece também a linha A₃ e uma curva C₁ que indica o início da transformação da austenita em cementita fora do equilíbrio.

2.7.2. Resfriamento contínuo

As transformações com resfriamento contínuo são aquelas que ocorrem com a temperatura do aço caindo continuamente como, por exemplo, quando se tira a peça do forno a alta temperatura e deixa-se resfriar ao ar livre. Nesse caso as curvas de transformação deslocam-se para a direita em relação às curvas relativas às transformações isotérmicas. Portanto para cada composição de aço existem duas curvas de transformação, uma relativa às transformações isotérmicas e outra relativa às transformações com resfriamento contínuo. As curvas relativas ao resfriamento contínuo são em geral denominadas CCT (*Continuous Cooling Transformation*). Na Figura 107 é apresentada para o caso do aço eutetóide, a curva relativa à transformação com resfriamento contínuo (linha cheia) juntamente com a curva relativa à transformação isotérmica (linha tracejada).

No caso dos aços hipo e hipereutetóide aparecem também as linhas F_i e C_i relativas à formação das fases primárias (ferrita e cementita). A quantidade de fases primárias depende da velocidade de resfriamento. Quanto mais rápido o resfriamento menor a quantidade da fase primária, já que há menor

tempo para sua formação antes de iniciar a transformação de austenita em perlita.

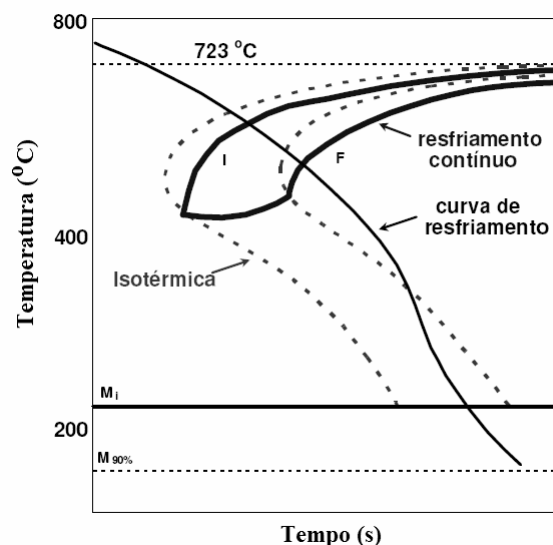


Figura 107: Representação esquemática de uma curva de resfriamento contínuo -CCT para análise de transformações de um aço eutetóide (0,8 % C).

Na Figura 108 são apresentados, também para o caso do aço eutetóide, alguns exemplos de curvas de resfriamento.

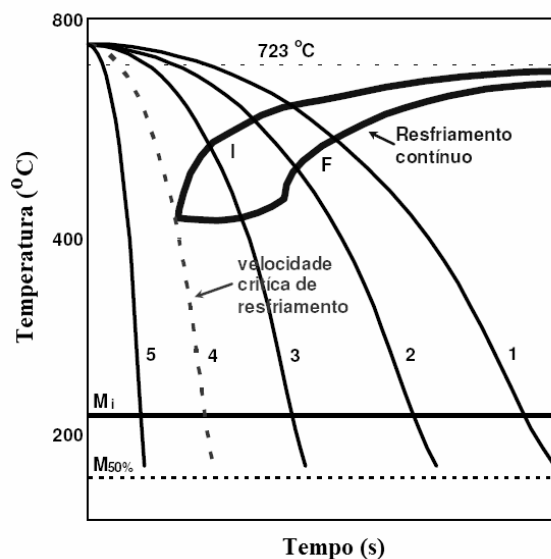


Figura 108: Exemplos de curvas de resfriamento com diferentes velocidades (aço eutetóide).

As velocidade aumentam de 1 para 5. As estruturas correspondentes a cada uma das velocidades de resfriamento são as seguintes:

- curva 1: perlita grossa
- curva 2: perlita fina
- curva 3: perlita + bainita + martensita
- curva 4: martensita
- curva 5: martensita

A curva quatro corresponde à velocidade crítica que é a menor velocidade para a qual se obtém 100% de martensita. A curva 1 pode corresponder, por exemplo, a um resfriamento no próprio forno, desligando-se o mesmo e mantendo a peça no seu interior (resfriamento

muito lento), a curva 2 a um resfriamento ao ar, a 3 a um resfriamento em óleo, a 4 em água e a 5 em água em agitação.

Pode-se observar que é impossível cortar as curvas de início e fim da transformação de austenita em bainita com resfriamento contínuo, não sendo possível a obtenção de estrutura totalmente bainítica com resfriamento contínuo, assim a parte inferior da curva para transformações com resfriamento contínuo não é, em geral, traçada para o caso dos aços carbonos.

Para peças com dimensões relativamente grandes a superfície certamente resfriará mais rapidamente que o centro e, portanto as curvas de resfriamento são diferentes, conforme pode ser observado no exemplo da Figura 109, provocando a formação de diferentes estruturas na superfície e no centro. No caso da figura a superfície apresentará uma estrutura martensítica e o centro uma estrutura perlítica.

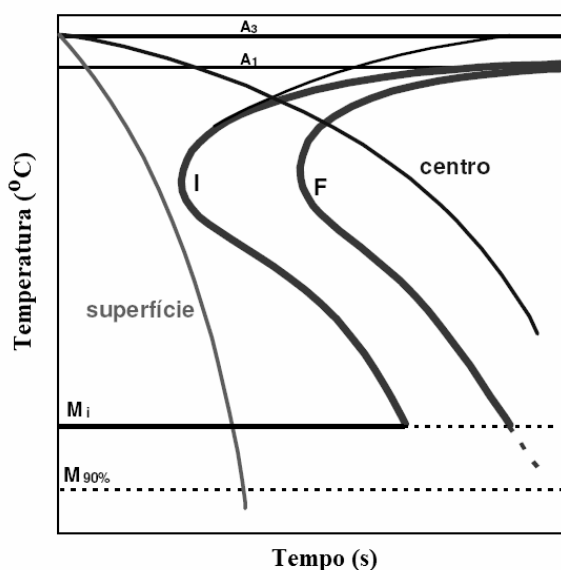


Figura 109: Representação das velocidades de resfriamento no centro e na superfície de uma peça de aço eutetóide.

Na disciplina de TRATAMENTO TÉRMICO retomaremos estas situações com o emprego de diagramas característicos de vários aços.

2.8. Ligas Ferrosas

As ligas ferrosas - aquelas onde o ferro é o constituinte principal - são produzidas em maior quantidade do que qualquer outro tipo de metal. Essas ligas são especialmente importantes como materiais de construção em engenharia. Seu amplo uso é o resultado de três fatores:

- compostos que contêm ferro existem em quantidades abundantes no interior da crosta terrestre;
- o ferro metálico e as ligas de aço podem ser produzidos usando técnicas de extração, beneficiamento, formação de ligas e fabricação relativamente econômicas;

- as ligas ferrosas são extremamente versáteis, no sentido em que elas podem ser adaptadas para possuir uma ampla variedade de propriedades mecânicas e físicas. A desvantagem principal de muitas ligas ferrosas é a suscetibilidade à corrosão. Esse capítulo discute composições, microestruturas e propriedades de um número de diferentes classes de aços e ferros fundidos.

2.8.1. Aços

Aços são ligas ferro com até 2% de carbono. Podendo conter outros elementos de liga tais como Cr, Mn, Si, Mo, V, Nb, W, Ti, Ni e outros elementos (denominados de residuais, provenientes do processo de fabricação, tais como o P, S, Si).

Os aços são um tipo de material metálico que são utilizados na confecção de peças (engrenagens, eixos, parafusos, porcas, rolamentos, etc.), ferramentas (pás, martelos, serras, matrizes, punções, etc.) ou estruturas (pontes, edifícios, tanques).

A grande gama de aplicações dos aços se deve ao baixo custo de obtenção associado a grande versatilidade de propriedades que se pode obter a partir de pequenas mudanças na composição química, tratamentos térmicos e/ou no processamento e principalmente da elevada ductilidade aliada a grande tenacidade e elevada dureza.

Logicamente, para classificar alguma coisa é preciso ter um critério. Podemos classificar um objeto de acordo com o critério cor (verde, azul e amarelo) ou peso (leve ou pesado).

A classificação dos aços não obedece a um único critério, existindo classificações quanto a composição química, processamento, microestrutura, propriedades ou mesmo aplicações a que se destinam.

Basta uma rápida verificação dos índices de diversos publicações dedicadas ao assunto e logo se constatará que os aços estão classificados sob vários critérios quando o desejável seria que se utilizasse de um único parâmetro de classificação.

Assim, como exemplos de diferentes tipos de aços freqüentemente encontrados na literatura temos: aços ao carbono, aços para ferramentas, aços fundidos, aços inoxidáveis, etc. Note-se que os critérios de classificação utilizados foram, respectivamente, a composição (ao carbono), a aplicação (para ferramentas), o processamento (fundidos) ou a propriedade (inoxidável).

Existe uma relação entre tais critérios já que o processamento e a composição determinam a microestrutura do material obtido. Por sua vez, a microestrutura (junto com a geometria e algumas variáveis do ambiente) determinam as propriedades que por sua vez determinam o campo de aplicação do material. A Figura 110 ilustra a interação destes critérios e o texto a seguir discute os tipos de aços existentes em cada critério mencionado.

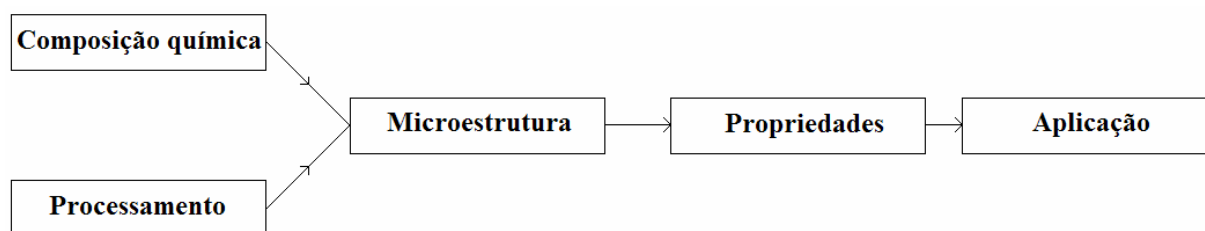


Figura 110: Interação entre os critérios de classificação do aço.

Uma primeira classificação bastante usual na indústria esta relacionada ao teor de carbono, conforme segue:

Aço extra-doce:	< 0,15%C
Aço meio-doce:	0,15%C até 0,30%C
Aço meioduro:	0,30%C até 0,60%C
Aço duro:	0,60%C até 0,70%C
Aço extra-duro:	0,70%C até 2,00%C

Classificação por Designação Normativa

É interessante salientar que as diversas instituições normativas, tanto nacionais quanto internacionais, estabeleceram critérios de designação para os diversos tipos de aço utilizados na indústria. Dentre as mais importantes, encontram-se as designações ABNT e AISI e SAE (Associação Brasileira de Normas Técnicas, *American Iron and*

Steel Institute, Society of Automotive Engineers, respectivamente).

Essa designação normativa estabelece uma chave alfanumérica para a identificação dos aços, que segue o seguinte critério:

yyAxxB

yy → tipo de aço (ao carbono, ao manganês, ao cromo)

A → acréscimo de elementos de liga especiais (acrescentar quando aplicável)

Aços ao boro: xyBxx

Aços ao chumbo: xxLxx

Aços ao vanádio - xxVxx

xx percentual de carbono contido no aço (x100)

B requisitos adicionais de qualidade (temperabilidade) (acrescentar quando aplicável).

Na Tabela 12 apresentam-se alguns exemplos da denominação comum dos aços.

Tabela 12: Lista parcial da denominação normativa ABNT, AISI/SAE

Código	Tipo de Aço	Composição Específica
10xx	Aço carbono	
11xx	ressulfurado	
12xx	ressulfurado e refosforizado	
13xx	Aço manganês	Mn 1,75%
15xx		Mn 0,15 a 0,8%
23xx	Aço níquel	Ni 3,50%
25xx		Ni 5,00%
31xx	Aço níquel cromo	Ni 1,25%; Cr 0,65 e 0,80%
32%		Ni 1,75%; Cr 1,07%
33xx		Ni 3,50%; Cr 1,50% e 1,57%
34xx		Ni 3,00%; Cr 0,77%
40xx	Aço molibdênio	Mo 0,20 e 0,25%
44xx		Mo 0,40 e 0,52%
41xx	Aço cromo molibdênio	Cr 0,50, 0,80 e 0,95%; Mo 0,12, 0,20, 0,25 e 0,30%
43xx	Aço níquel cromo molibdênio	Ni 1,82%; Cr 0,50 e 0,80%; Mo 0,25%
47xx		Ni 1,05%; Cr 0,45%; Mo 0,20 e 0,35%
81xx		Ni 0,30%; Cr 0,40%; Mo 0,12%
86m		Ni 0,55%; Cr 0,50%; Mo 0,20%
87xx		Ni 0,55%; Cr 0,50%; Mo 0,25%
88xx		Ni 0,55%; Cr 0,50%; Mo 0,35%
93xx		Ni 3,25%; Cr 1,20%; Mo 0,12%
94xx		Ni 0,45%; Cr 0,40%; Mo 0,12%
97xx		Ni 0,55%; Cr 0,20%; Mo 0,20%
98xx		Ni 1,00%; Cr 0,80%; Mo 0,25%
46xx	Aço níquel molibdênio	Ni 0,85% e 1,82%; Mo 0,20 e 0,25%
48xx		Ni 3,50%; Mo 0,25%
50xx	Aços cromo	Cr 0,27, 0,40, 0,50 e 0,65%
51xx		Cr 0,80, 0,87, 0,92, 0,95, 1,00 e 1,05%
52xx		Cr 1,45%; C 1,00% min
61xx	Aço cromo vanádio	Cr 0,60, 0,80 e 0,95%; V 0,10 e 0,15%
72xx	Aço cromo tungstênio	W 1,75; Cr 0,75%
92xx	Aço silício manganês	Si 1,40 e 2,00%; Mn 0,65, 0,82 e 0,85%; Cr 0 e 0,65%

Outra denominação normativa de importância ao mercado brasileiro é a alemã, regulamentada pelas normas DIN.

Nessa denominação, temos:

1) Aços comuns para construção mecânica

É indicado a tensão de ruptura a tração, em $[kgf/mm^2]$, precedido de St (=Stahl, aço)

Exemplo: St 37, St42, St58

2) Aços carbono de qualidade

São indicados com a letra C, seguido do teor de carbono multiplicado por 100.

Exemplo: C20, C45

3) Aços liga

a) Aços de baixa liga

É constituído de dois algarismos que indicam o teor de carbono multiplicado por 100, seguido pelos símbolos químicos dos elementos de liga que caracterizam o aço, acrescido por números que exprimem os teores desses elementos de liga multiplicados por um fator K, que é dependente do elemento de liga em questão.

Exemplos:

20 Cr Mo 9 15 - aço ao cromo e molibdênio, com:

0,20% C

1,25% Cr

1,5% Mo

22 Cr Mo 54 - aço ao cromo e molibdênio com:

0,22% C

1,25% Cr

0,4% Mo

25 S 20 - aço resulfurado com:

0,25% C

0,20% S

b) Aços de alta liga

São aços cuja quantidade percentual de elementos de liga presentes é maior do que 5%. A designação para esses tipos de aço é formada pela letra "X" seguida pela quantidade de carbono multiplicado por 10, seguida dos símbolos dos elementos químicos existentes, seguido de números que representam a quantidade percentual desses elementos de liga.

Exemplo:

X 10 Cr Ni Ti 18 9 2

Aço ao cromo, níquel e titânio com: 0,10% C, 18%Ni e 2%Ti

Classificação Quanto ao Processamento

Por processamento entende-se o tipo de operação que se executa sobre o aço visando mudar a forma e/ou a estrutura.

Os processamentos que visam impor uma forma são a conformação mecânica (a frio ou a quente, tal como a laminação, extrusão, trefilação), a fundição e a consolidação por sinterização (metalurgia do pó). Assim, existem aços trabalhados (a quente ou a frio), fundidos ou sinterizados.

Os processamentos que visam alterar a estrutura são os tratamentos térmicos, tais como recozimento, normalização, recristalização, coalescimento e a têmpera (e revenimento), conforme verificaremos em TRATAMENTOS TÉRMICOS, no terceiro semestre. O processamento altera a microestrutura do aço e, portanto, afeta as propriedades. Porém, a Tabela 13 analisa uma relação entre o processamento, microestrutura e propriedade dos aços.

Tabela 13: Relação entre processamento, microestrutura e propriedade dos aços.

PROCESSAMENTO	MICROESTRUTURA	PROPRIEDADES
Trabalhado a frio	Encruada (alta densidade de discordâncias) Grãos alongados (orientados)	Elevada resistência Baixa ductilidade Grande anisotropia
Trabalhado o quente	Grãos refinados e equiaxiais Ausência de tensões residuais	Moderada resistência Elevada ductilidade Moderada anisotropia
Fundido	Estrutura dendrítica Grãos colunares e equiaxiais Baixa densidade de discordâncias Presença de segregação Presença de tensões residuais Presença de porosidade (em muitos casos)	Moderada ductilidade Baixa resistência Moderada anisotropia
Sinterizado	Heterogeneidade química; Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Presença de poros Recristalizada (baixa densidade de discordâncias)	Baixa ductilidade Moderada anisotropia Baixa resistência

Classificação Quanto a Microestrutura

A classificação de acordo com a microestrutura é típica da área metalúrgica, existindo os seguintes grupos:

1) Aços Encruados

Estes aços geralmente são de microestrutura predominantemente ferrítica, com um pouco de perlita,

sendo resultantes de processos de deformação a frio. Normalmente são aços de baixo teor de carbono (inferior a 0,4% C) e com baixa quantidade de elementos de liga.

2) Aços Ferríticos-Perlíticos

Obviamente os aços ferríticos-perlíticos possuem teor de carbono abaixo de 0,8% (hipoeutetóides), e são resultantes de processos em que

houve resfriamento lento tais como material trabalhado a quente, recozido ou normalizado.

3) Aços Martensíticos

Os aços constituídos de martensita revenida geralmente são aplicados em situações em que se exige resistência elevada ao longo de toda a seção transversal, tais como eixos e punções. Os aços martensíticos com carbonetos primários são aplicados em situações que exigem resistência ao desgaste elevada, tais como em ferramentas de corte ou de trabalho a quente. A martensita propicia a elevada resistência e os carbonetos primários propiciam durezas elevadas.

4) Aços Bainíticos

Sob determinadas combinações de resistência e dureza a estrutura bainítica propicia maior tenacidade que a martensítica, tornando tais aços preferíveis em situações que se necessita resistência associada a tenacidade.

5) Aços Austeníticos

Uma vez que a austenita não é um constituinte estável em temperatura ambiente, sua estabilização depende da presença de elementos de liga, tais como o cromo e o manganês. A austenita, por ser não magnética, encontra aplicação em situações em que se deseja minimizar efeitos de campos magnéticos induzidos, tais como em suportes de bússolas.

Além disso, a austenita, quando estabilizada pelo manganês, pode se transformar em martensita mediante impacto, possuindo elevada resistência ao impacto e a abrasão, sendo utilizada para revestimentos de moinhos e outros componentes de equipamentos de moagem (britadores ou martelos).

Há ainda o caso de aços austeníticos inoxidáveis, porém neste caso a resistência a oxidação é predominantemente devida aos elevados teores de cromo e níquel presentes em tais aços.

5) Aços Dúplex ou Bifásicos

Por aços dúplex costuma-se denominar duas categorias distintas de estruturas.

Na primeira, do tipo austenítico-ferrítica (delta), encontram-se certos aços inoxidáveis, cuja resistência mecânica e a corrosão é superior aquela obtida nos inox austeníticos.

A segunda categoria consiste de microestrutura ferrítica-martensítica, resultante de têmpera a partir de temperatura de dentro da zona crítica (entre as linhas A1 e A3 do diagrama Fe-C). Os aços de baixo carbono com esta estrutura apresentam combinação de resistência e ductilidade mais elevadas que os equivalentes ferríticos-perlíticos.

Classificação Quanto a Composição Química

1) Aços Carbono

A maior quantidade de aço consumida pertence a categoria dos aços carbono. Isto se deve ao baixo custo, em relação aos aços ligados e a ampla gama de propriedades que pode ser obtida mediante variação do teor de carbono e do estado de fornecimento (encruado, temperado, etc.). No ANEXO IV são apresentadas

algumas composições típicas de aços carbono e no ANEXO V são apresentadas as composições químicas de vários aços. No ANEXO VI, são apresentadas algumas aplicações típicas dos aços segundo normas da empresa Aços Villares, inclusive com a nomenclatura própria.

Pode-se estabelecer a seguinte subdivisão dos aços carbono para fins de aplicação.

a) Baixo carbono (abaixo de 0,3%C): São aplicados em situações que exigem ductilidade elevada, por exemplo, chapas para estampagem, tubos, fios para arames lisos e farpados, ou telas. Neste caso o estado de fornecimento pode ser laminado a quente, recozido ou normalizado. Podem ser aplicados em situações que envolvem exigências quanto a soldabilidade, pois o baixo carbono é necessário para evitar formação de martensita que ocorre no resfriamento subsequente a soldagem. Os aços de baixo carbono, quando combinados com elementos de liga e cementados, são aplicados quando se necessita combinar resistência ao desgaste (dureza superficial) com tenacidade (no núcleo), tais como eixos, engrenagens, pinos, ferramentas de impacto. Ex.: 8620, 4320.

b) Aços de médio carbono (entre 0,3 e 0,5%C): Aços de médio carbono são aplicados em produtos forjados pois possuem ductilidade a quente (para forjamento) associado a média resistência a frio no estado forjado (ferrítico-perlítico). Quando combinados com elementos de liga, são utilizados em situações que exijam alta resistência (obtida mediante têmpera e revenido) mantendo ainda alguma ductilidade. A temperabilidade é obtida mediante emprego de elementos de liga. Ex.: eixos e engrenagens de caminhão. 4340, 8640.

c) Aços de alto teor de C (acima de 0,5%C): São utilizados em casos que se exige elevados limites de escoamento, tais como molas e vergalhões de concreto. O alto limite de escoamento é obtido mediante encruamento ou, na presença de elementos de liga, mediante têmpera e revenido. Ainda, quando combinados com elementos de liga, também são utilizados para fins de obtenção de dureza elevada, através de carbonetos primários (VC, Mo₂C, WC) como no caso de aços ferramentas.

2) Aços Ligados

O uso de elementos de liga geralmente é feito com as seguintes finalidades:

- Aumentar a profundidade de têmpera (temperabilidade);

- Aumentar a resistência ao revenido (isto é, evitar o amolecimento entre 300 e 550oC);

- Introduzir propriedades especiais tais como: resistência a corrosão em aços inoxidáveis, resistência ao desgaste em aços *Hadfield*, resistência a quente em aços ferramenta (rápidos).

Pode-se dividir em três categorias:

a) Aços de baixa liga: São aços cuja dos elementos de liga é inferior a 5% e têm a finalidade de aumentar a temperabilidade e a resistência ao revenido. Os elementos típicos são: Cr, Mo, Ni, Mn e Si. São aplicados para os seguintes fins:

- Aumentar muito a temperabilidade: Aplicado em peças grandes que devem ter alta resistência no núcleo.

- Facilitar a transição (atenuar a queda de dureza) entre o núcleo e a superfície de aço cementados, visando evitar destacamento.

- Elevar a dureza de camadas nitretadas pela formação de nitretos de alumínio ou cromo.

Os aços de baixa liga são os mais consumidos dentre os aços ligados.

b) Aços de média liga (Σ E.L. entre 5 e 10%):

Os aços de média liga são os que têm a somatória dos elementos de liga entre 5% e 10%. São aplicados em situações que envolvem elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas (500°C) tais como aços para trabalho a quente (matrizes). Ex.: Aços tipo H (0,3%C; 5%Cr; 1,5%Mo; 1 %Si).

Há ainda casos onde se exigem resistência ao impacto associado com elevada dureza, tais como aços ferramentas para trabalho a frio temperáveis ao ar. Tais aços possuem elevada temperabilidade sendo aplicáveis as matrizes de recorte, estampagem e lâminas de tesouras. Os mesmos apresentam baixas distorções após a têmpera (devido ao resfriamento ao ar) sendo recomendados para manutenção de precisão dimensional. Ex.: Aço ferramenta A2 (1%C; 0,6%Mn; 0,25%Si; 5%Cr; 0,25%V e 1 %Mo).

c) Aços de alta liga (Σ E.L. > 10%): A quantidade dos elementos de liga nesses aços é maior do que 10%. São aços que podem ser aplicados em diversas finalidades, tais como:

- Elevada resistência a oxidação (aços inoxidáveis, %Cr>12%);

- Elevada resistência mecânica e ao desgaste (aços D6: 2%; 0,3%Mn; 0,85%Si; 12%Cr; 0,75%W) sendo aplicáveis em matrizes para forjamento e estampagem;

- Capacidade de corte, como nos aços rápidos, utilizados como ferramentas de corte por manterem dureza a quente (aços M1: 0,85C; 0,3Mn; 0,3Si; 4Cr; 1,5W; 1V; 8,5Mo);

- Capacidade de endurecer sob impacto (aços *Hadfield*: 1C; 12,7Mn; 0,5Si) utilizados para moinhos e martelos para britagem de rochas. Estes aços são austeníticos e se transformam em martensíticos sob impacto com as rochas durante o serviço.

d) Aços de Alta Resistência e Baixa Liga

(ARBL ou HSLA – *high strain low alloy*): São aços cujas normas AISI-SAE não classifica como aços ligados (tais como 4340, 8620, 4320), apesar de conterem elementos de liga adicionados para fins de obtenção de resistência mecânica e a corrosão

atmosférica superiores aos aços de baixo carbono. Os aços ARBL apresentam resistência entre 300 e 700MPa, tendo sido desenvolvidos para elevar a relação entre resistência e peso, visando aplicação em estruturas móveis. A soma de elementos de liga geralmente não ultrapassa a 2% e o teor de carbono situa-se abaixo de 0,3%.

Classificação Quanto as Propriedades

De todos os critérios em que se costumam classificar os aços, este é o menos sistemático, podendo-se destacar os seguintes casos mencionados na literatura:

- Aços de alta resistência e baixa liga;

- Aços de alta resistência;

- Aços inoxidáveis;

- Aços indeformáveis (baixa distorção dimensional resultante da têmpera e revenimento);

- Aços para fins elétricos e magnéticos (note-se que esta terminologia refere-se tanto a propriedade quanto a finalidade do aço).

1) Aços Inoxidáveis

Os aços-inoxidáveis são aqueles que contém um mínimo de 10,5% de Cromo como principal elemento de liga. São aços onde não ocorre oxidação em ambientes normais. Alguns aços inoxidáveis possuem mais de 30% de Cromo ou menos de 50% de Ferro. Suas características de resistência são obtidas graças a formação de um óxido protetor que impede o contato do metal base com a atmosfera agressiva. Alguns outros elementos como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio e selênio podem ser adicionados para a obtenção de características mecânicas particulares.

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias, de acordo com a microestrutura, estrutura cristalina das fases presentes ou tratamento térmico utilizado. As cinco famílias são: martensíticos, ferríticos, austeníticos, dúplex (austenítico e ferrítico) e endurecíveis por precipitação.

Um método usual para a classificação do aço inoxidável é realizado com o auxílio do diagrama de SCHAEFFLER, demonstrado na Figura 111. Ele consiste no cálculo do “Cromo Equivalente” e do “Níquel Equivalente”, dados de acordo com as seguintes equações, respectivamente:

$$Cr_{equiv.} = Cr + Mo + 1,5.\%Si + 0,5.\%Nb \quad [6]$$

e

$$Ni_{equiv.} = Ni + 30.\%C + 0,5.\%Mn \quad [7]$$

Então, a partir destes valores, insere-se os dados no diagrama e se verifica a estrutura esperada.

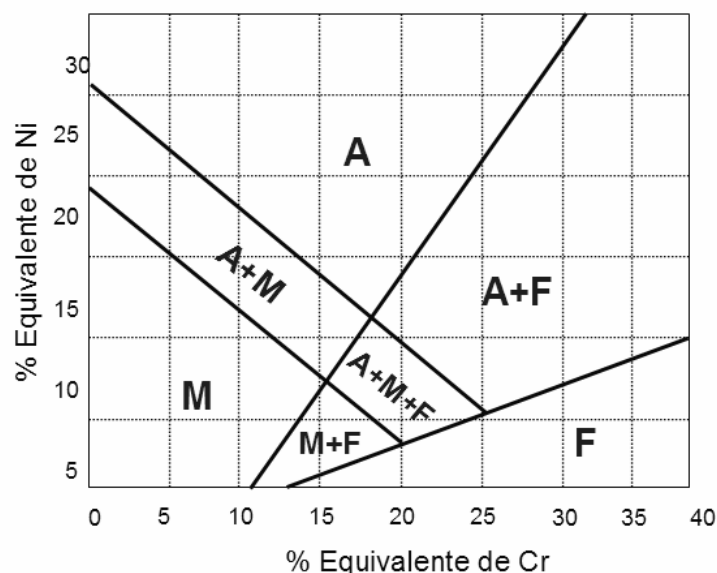


Figura 111: Diagrama de SCHAEFFLER.

Os aços inoxidáveis são normalmente designados pelos sistemas de numeração da AISI, UNS (*Unified Numbering System*) ou por designação própria do proprietário da liga. Entre estes, o sistema da AISI é o mais utilizado. Nele, a maioria dos graus de aços inoxidáveis possuem uma classificação com três dígitos. Os aços austeníticos fazem parte das séries 200 e 300, enquanto que a série 400 designa tanto aços ferríticos quanto martensíticos. A série UNS, por sua vez, possui um maior número de ligas que a AISI, pois incorpora todos os aços inoxidáveis de desenvolvimento mais recente. Nesta série, os aços inoxidáveis são representados pela letra S, seguida de cinco números. Os três primeiros representando a numeração AISI (se tiverem). Os dois últimos algarismos serão 00 se o aço for um aço comum da designação AISI. Se forem diferentes, significa que o aço tem alguma característica especial reconhecida pela UNS.

No ANEXO VII, apresentam-se algumas composições químicas características destes aços. No ANEXO VIII, demonstra-se uma tabela de aços inoxidáveis utilizados pelo grupo Villares Metals. O ANEXO IX mostra a equivalência entre alguns aços inoxidáveis, dentre os utilizados no mercado brasileiro. Note-se que a tabela em questão é somente parcial e informativa, devendo ser utilizada com cautela, analisando-se os diversos aspectos apresentados pelo projeto do componente a ser fabricado com o material selecionado, levando-se em conta todas as variáveis conhecidas.

Um pequeno resumo das qualidades, características e aplicações dos aços inoxidáveis é apresentado, conforme segue:

a) Martensíticos: Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas Fe-Cr-C que possuem uma estrutura cristalina martensítica na condição endurecida. São ferromagnéticos, endurecíveis por tratamento térmico e resistentes a corrosão somente em meios de média agressividade. O conteúdo de cromo é,

geralmente, situado entre 10,5 e 18% e o conteúdo de carbono não pode ser superior a 1,2%. Os conteúdos de carbono e cromo são balanceados para garantir uma estrutura martensítica. Alguns elementos como nióbio, silício, tungstênio e vanádio são, as vezes, adicionados para modificar o comportamento do aço durante o revenimento. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência a corrosão. Da mesma maneira, enxofre e selênio podem ser adicionados para melhorar usinabilidade.

Estes aços são especificados quando a aplicação requer elevadas resistência a tração, a fluência e a fadiga, combinadas com requisitos moderados de resistência a corrosão e utilizações em até 650°C. Entre as suas aplicações estão turbinas a vapor, motores a jato e turbinas a gás. Alguns destes aços encontram aplicações, também, como tubulações de vapor, aquecedores de geradores a vapor e tubulações superaquecidas utilizadas em refinarias de combustíveis fósseis, cutelaria, peças de válvulas, engrenagens, eixos, cilindros laminadores, instrumentos cirúrgicos e odontológicos, molas, cames e esferas de rolamentos.

b) Ferríticos: São ligas de Fe-Cr, de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Seu conteúdo de cromo se situa na faixa de 11 a 30%. Alguns graus podem conter molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio para a obtenção de certas características. Também podem ser adicionados enxofre e selênio para melhoria da usinabilidade. São ferromagnéticos, podem possuir boas ductilidade e conformabilidade, mas suas características de resistência em altas temperaturas são ruins se comparadas às dos austeníticos. Sua tenacidade também pode ser limitada a baixas temperaturas e em seções pesadas. Não são endurecíveis por tratamento térmico e dificilmente por trabalho a frio.

Suas várias classes encontram aplicações em sistemas de exaustão de automóveis, como recipientes

de alimentos, em trocadores de calor e em tubulações contendo soluções com cloretos e água do mar.

c) Austeníticos: Constituem a maior família de aços inoxidáveis, tanto em número de diferentes tipos quanto em utilização. A exemplo dos ferríticos, não são endurecíveis por tratamento térmico. São não magnéticos na condição recozida e são endurecíveis apenas por trabalho a frio. Normalmente, possuem excelentes propriedades criogênicas e resistência mecânica e a corrosão em altas temperaturas. O conteúdo de cromo varia entre 16 e 26%, o de níquel é menor ou igual a 35% e o de manganês é menor ou igual a 15%. Podem ser adicionados, também, molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio, para a obtenção de melhores características de resistência a oxidação.

Podem, em função dos elementos de liga presentes na sua composição, resistir a corrosão atmosférica, em várias soluções aquosas, na presença de alimentos, em ácidos oxidantes (como o nítrico), fosfóricos e acéticos, em soluções diluídas contendo cloretos e em ácidos sulfurosos.

d) Dúplex: São ligas bifásicas baseadas no sistema Fe-Cr-Ni. Estes aços possuem, aproximadamente, a mesma proporção das fases ferrita e austenita e são caracterizados pelo seu baixo teor de carbono ($<0,03\%$) por adições de molibdênio, nitrogênio, tungstênio e cobre. Os teores típicos de cromo e níquel variam entre 20 e 30% e 5 e 8%, respectivamente. A vantagem dos aços dúplex sobre os austeníticos da série 300 e sobre os ferríticos, são a resistência mecânica (aproximadamente o dobro), maiores tenacidade e ductilidade (em relação aos ferríticos) e uma maior resistência a corrosão por cloretos.

Graças a sua elevada resistência mecânica, os aços inoxidáveis dúplex podem ser utilizados em menores espessuras. Sua desvantagem é que não pode ser utilizado em temperaturas acima de 300°C , sob pena de perder algumas de suas características mecânicas, sobretudo a tenacidade. É bastante utilizado nas indústrias de gás, petróleo, petroquímica, polpa e papel, principalmente na presença de meios contendo aquosos contendo cloretos.

e) Endurecíveis por precipitação: São ligas cromo-níquel que podem ser endurecidas por tratamento de envelhecimento. Podem ser austeníticos, semi-austeníticos ou martensíticos, sendo que a classificação é feita de acordo com a sua microestrutura na condição recozida. Para viabilizar a reação de envelhecimento, muitas vezes se utiliza o trabalho a frio, e a adição de elementos de liga como alumínio, titânio, nióbio e cobre.

Possuem boa resistência mecânica, tenacidade e ductilidade. Sua resistência a corrosão é de moderada a boa. Suas características lhe garantem aplicação nas indústrias aeroespacial e de alta tecnologia.

Classificação Quanto as Aplicações

Esta classificação é a mais freqüente na literatura técnica, possivelmente devido à associação imediata entre o tipo de aço e a aplicação pretendida para o mesmo, podendo-se destacar os seguintes exemplos:

- Aços estruturais;
- Aços para molas;
- Aços para beneficiamento;
- Aços para cementação ou nitretação;
- Aços ferramentas.

1) Aços Estruturais

Os requisitos fundamentais esperados nos aços destinados a construção de estruturas metálicas (pontes, torres de linhas de transmissão, edifícios) são:

- resistência mecânica;
- soldabilidade;
- disponibilidade no mercado;
- preço baixo.

Os aços ao carbono comuns atendem a esses requisitos principais, sendo que os mais utilizados são os que se encontram na faixa de $0,15\%\text{C}$ até $0,35\%\text{C}$. São exemplos mais comuns os aços AISI 1015 e 1020 e os DIN C15 e C20.

2)Aços para Molas

São aços carbono comuns, em alguns casos com adições de elementos de liga, principalmente o manganês, apresentando como características básicas um alto limite de elasticidade e resistência a fadiga. São exemplos de aços para molas os AISI 1070, 1080, 1090; da norma DIN podemos citar: 50Mn 7,50Cr V4.

3)Aços para Beneficiamento

Por beneficiamento entendemos o tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento. Os aços utilizados para essa finalidade possuem $\text{C} > 0,25\%$, com ou sem a adição de elementos de liga. Os requisitos para a seleção desse tipo de aço são:

- propriedades mecânicas da peça e do material;
- características geométricas da peça;
- solicitações estáticas e dinâmicas sobre a peça;
- temperabilidade.

Podem-se citar como exemplos de aços para beneficiamento: AISI 4130, 4140, 4330, 4340, 5130, 5140, 8640, 8660. Aços para beneficiamento segundo as normas DIN são 25 Cr Mo 4, 42 Cr Mo 4, 50 Cr Mo 4, 60 Ni Cr Mo 2, 50 Cr V 4.

4)Aços para Cementação ou Nitretação

São aços que caracteristicamente possuem um baixo teor de carbono ($\text{C} < 0,25\%$), com ou sem a presença de elementos de liga. São empregados em elementos de máquinas que devem ter grande resistência ao desgaste (grande dureza superficial) e ótima ductilidade no seu núcleo, tendo, portanto ótima capacidade de absorção de impactos. Os aços costumeiramente utilizados para cementação ou nitretação estrutural do aço são: AISI 1010, 1016, 3120, 5120, 4320, 8620. Da norma DIN cita-se C10, C20, 15 Cr Ni 6, 18 Cr Ni 8.

5) Aços para Ferramentas

Os aços ferramentas são particularmente importantes pois são empregados na fabricação de peças e utensílios que serão utilizados na fabricação de outras peças e utensílios. Exemplos de peças feitas de aços ferramentas são: fieiras, matrizes para injeção de plásticos, bits de usinagem, martelos pneumáticos.

Os primeiros aços ferramentas (e ainda utilizados atualmente) foram os aços comuns ao carbono, sem elementos de liga, sendo que a partir de 1868 muitos aços complexos, altamente ligados, foram desenvolvidos visando atender as crescentes exigências de severidade em serviço, estabilidade dimensional e facilidade de fabricação (usinabilidade e isenção de trincas durante o tratamento térmico).

Normalmente as ferramentas e matrizes são fabricadas por usinagem (estando o material com baixa dureza, por exemplo, no estado recozido ou coalescido) e, após atingida a forma desejada para o produto, o mesmo sofre tratamento térmico para que se desenvolvam as propriedades necessárias para a aplicação específica a que se destinam. Assim, os aços ferramentas devem atender a requisitos de fabricação (usinagem e tratamento térmico) e a requisitos relativos a aplicação, sendo freqüente haver conflitos entre ambos.

Os aços ferramentas não apresentam uma metodologia racional de classificação, uma vez que alguns são identificados pelo meio de tempera empregada em seu tratamento, outros pelas propriedades e outros ainda pelo tipo de elemento de liga presente. No entanto, as diversas aplicações dos aços ferramentas podem ser classificadas de acordo com o tipo de solicitação envolvida no produto. Assim, pode-se subdividir, para fins didáticos, as aplicações dos aços ferramentas nos seguintes grupos:

a) Trabalho a frio: Considera-se como trabalho a frio as aplicações que ocorrem na temperatura ambiente ou abaixo de 200°C, tais como: matrizes para estampagem, dobramento, compactação de pós, facas industriais, tesouras, ferramentas de corte e usinagem de papel e madeira, pinos guias, punções, calibres, padrões, instrumentos de medição, etc. Neste campo, as solicitações podem envolver de um lado resistência ao desgaste (por exemplo, em tesouras) e de outro tenacidade (por exemplo, em martelos).

b) Trabalho a Quente: São aplicações que ocorrem acima de 200°C e, portanto, são mais severas que o item anterior, englobando os seguintes casos: matrizes para forjamento a quente, moldes para fundição sob pressão, extrusão, facas para tesouras de corte a quente, fieiras, etc. Algumas ferramentas para trabalho a quente trabalham em contato com material aquecido a 1100°C ou mais, provocando o aquecimento da ferramenta a níveis superiores a 550°C.

c) Ferramentas de usinagem: São aplicações ainda mais severas que o item anterior, pois trata-se da usinagem de metais, devendo apresentar maior dureza, resistência ao revenimento e ao desgaste em temperaturas elevadas, devendo trabalhar de modo contínuo em temperaturas entre 550 e 600°C. Exemplos típicos são: brocas, alargadores, machos, cossinetes, fresas, bits, ferramentas de corte, desbaste e acabamento para tomos e ferramentas para plainas.

A classificação abaixo é aquela adotada pelas AISI, e SAE. Há ainda outros tipos de aços ferramentas, designados pelas letras L e F de uso menos freqüente. Na Tabela 14 demonstra-se a nomenclatura específica para os diferentes tipos de aços ferramentas.

Tabela 14: Tipos de aços ferramentas.

TIPO	DESIGNAÇÃO	APLICAÇÕES
W	Temperáveis em água (<i>Water</i>)	Trabalho a frio
S	Resistentes ao choque (<i>Shock</i>)	Trabalho a frio ou a quente
O	Aço ferramenta para trabalho a frio - temperável em óleo (<i>Oil</i>)	Trabalho a frio
A	Aço ferramenta para trabalho a frio - temperável ao ar (<i>Air</i>)	Trabalho a frio
D	Aços ferramentas para trabalho a frio - matrizes (<i>Die</i>)	Trabalho a frio e a quente
H	Aços ferramentas para trabalho a quente - (<i>Hot</i>)	Trabalho a quente
T	Aços rápidos ao tungstênio (<i>Tungsten</i>)	Usinagem
M	Aços rápidos ao molibdênio (<i>Molybdenum</i>)	Usinagem
P	Aços para moldes (<i>Plastics</i>)	Molde para injeção de plásticos

No ANEXO X são listadas as composições químicas dos diversos tipos de aços ferramentas bem como as designações utilizadas pelo grupo Villares Metals. Interessante salientar que estão listados apenas os elementos adicionados intencionalmente, podendo haver a presença de impurezas (Si, Mn) em baixos teores, não apresentados na tabela. Observa-se também que, além do carbono, os elementos mais freqüentemente empregados são o Cr, V, Mo, W (formadores de carbonetos) e, com menor freqüência, o Mn, Si Ni e Co. Nem todos os elementos mencionados estão presentes simultaneamente num dado aço ferramenta.

Os aços ferramentas serão profundamente analisados na disciplina de SISTEMAS E PROCESSOS MECÂNICOS (PROCESSOS DE USINAGEM), a ser ministrada no segundo semestre.

Influência dos Elementos de Ligas nos Aços

A adição de elementos de liga justifica-se, pois muitas vezes pequenos acréscimos de determinados componentes causam significativa melhora nas propriedades dos aços. As características que levam ao emprego de tais elementos são:

-Fósforo: em teores elevados, prejudica os aços tornando-os frágeis e quebradiços.

-Enxofre: também é prejudicial pois além de frágeis torna os aços ásperos e granulosos devido aos gases que produz na matriz metálica. Em alguns casos, é conveniente a adição de enxofre em proporções de até 0,30%, o que torna o aço fácil de usinar pois os cavacos destacam-se em pequenos pedaços, permitindo altas velocidades de corte.

-Carbono: é o mais importante devido a necessidade de haver carboneto na estrutura para conferir a dureza e a resistência necessárias a aplicação. Geralmente o teor de carbono é elevado, situando-se entre 0,8 e 2%. Quando tenacidade é um fator importante para a aplicação (tais como martelos e talhadeiras devido aos esforços de impacto), empregam-se teores de carbono mais baixos (entre 0,5 e 0,7%C), tal como nos aços resistentes ao choque (tipo S).

-Silício: tem função desoxidante na fabricação do aço. Normalmente situa-se entre 0,10 e 0,30%, pois teores mais elevados tendem a favorecer a grafitação. Em alguns poucos casos (aços resistentes ao choque) emprega-se silício elevado (1 % ou 2%) para fins de aumento de temperabilidade e aumento da resistência ao revenido sem que haja abaixamento da linha M_s (favoreceria a austenita retida). Para estas combinações de médio carbono (0,5 a 0,7%) e alto silício (1 a 2%), a tendência a grafitação é reduzida devido ao baixo carbono e eventual presença de elementos formadores de carbonetos (Mo, Cr, V).

-Manganês: atua também como desoxidante além de dessulfurante. É empregado em teores inferiores a 0,5%. O manganês tem forte efeito na temperabilidade, porém a partir de teores mais elevados (1,5%). O mesmo forma carbonetos menos estáveis que o ferro, não contribuindo para a resistência ao revenido.

-Cromo: é o elemento adicionado com a função principal de elevar a temperabilidade, pois é o que apresenta melhor relação custo/benefício. Além disso o cromo forma carbonetos endurecedores que são facilmente solúveis no tratamento de austenitização que precede a têmpera. O efeito de aumento de temperabilidade pelo cromo geralmente é máximo para teores de 4%Cr, sendo este o valor tipicamente empregado em aços ferramentas para trabalho a quente e em aços rápidos. No caso de aços para trabalho a frio, o teor de cromo pode atingir 12% quando se deseja dureza elevada. Neste caso o teor de cromo é mais elevado para fins de gerar maior quantidade de carbonetos de cromo na matriz (o teor de carbono situa-se, então, em cerca de 2%C). O cromo tem ainda o efeito (em teores acima de 4%) de elevar a resistência a quente por aumentar a resistência a oxidação e contribuir para a formação do pico de dureza secundária.

-Vanádio: atua como forte desoxidante (geralmente empregado em teores até 0,5%). O vanádio tem forte efeito sobre a temperabilidade quando dissolvido na austenita. Entretanto a sua função principal é a de atuar como estabilizador de grão, pois o seu respectivo carboneto é de difícil solubilização na austenita no tratamento de têmpera, evitando que haja

o crescimento da mesma. Em aços rápidos (devido ao emprego de corte a quente), o teor de vanádio situa-se entre 1 e 2%.

-Tungstênio: também atua como formador de carbonetos, favorecendo a obtenção do pico de dureza secundária no tratamento de revenimento. Em teores inferiores a 1,5% (mesmo com alto carbono) o tungstênio tem pequeno efeito no aumento de dureza. Em teores próximos a 4% há aumento significativo da resistência ao desgaste, a ponto de dificultar operações de retificação após a têmpera. Em teores de 12 a 20%, o tungstênio eleva significativamente a dureza a quente (até 600°C) e, por isso, é empregado frequentemente em aços rápidos (grupo W e/ou grupo T).

-Molibdênio: tem efeitos similares ao tungstênio, tendo sido usado para substituí-lo. O custo do molibdênio é maior, porém a quantidade empregada é menor (normalmente o teor de molibdênio substitui duas vezes a quantidade de tungstênio. Por exemplo, 18% de W equivalem a 6%Mo mais 5%W). A maioria dos aços rápidos emprega Molibdênio e Tungstênio.

-Cobalto: tem a função principal de aumentar a dureza a quente dos aços rápidos, apesar de não ser endurecedor. O cobalto aumenta a temperatura *solidus*, permitindo que se empregue temperaturas mais elevadas de austenitização na têmpera. Isto permite maior dissolução de carbonetos (dos outros elementos, tais como carbonetos de vanádio, molibdênio e tungstênio, já que o cobalto por si só não é formador de carbonetos). O efeito final do cobalto é o de aumentar a dureza no estado temperado (por elevar a dissolução de outros elementos). Aços rápidos com 5 ou 10% são usados para obter maior velocidade em corte contínuo (em corte intermitente há problema de quebra de ferramenta devido elevada dureza e baixa tenacidade).

-Alumínio: tem efeito semelhante ao silício, devido a sua grande afinidade com o oxigênio. Também é considerado desoxidante. Muitas vezes é utilizado nos aços a serem nitretados, pois o alumínio tem também grande afinidade com o nitrogênio.

-Boro: em quantidades que variam de 0,001 % até 0,003%, o boro melhora a temperabilidade e a resistência à fadiga.

-Chumbo: em pequenas quantidades (0,2% até 0,25%), este elemento melhora a usinabilidade do aço, sem qualquer prejuízo as propriedades mecânicas.

2.8.2. Ferros Fundidos

Ferros fundidos são ligas contendo, aproximadamente, entre 2 e 6,69% de carbono e outros elementos tais como silício, manganês, fósforo e enxofre em maiores teores do que nos aços. Geralmente o carbono varia, industrialmente, na composição de 2,5% a 4,3% (geralmente entre 2,6% e 3,7% para os ferros fundidos brancos ou cinzentos) e o silício de 0,5% a 3,5%. Na Figura 112 demonstra-se um diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C onde destaca-se a faixa de composição usual dos ferros fundidos e remonta-se a nomenclatura usual em relação ao pontos invariantes do diagrama.

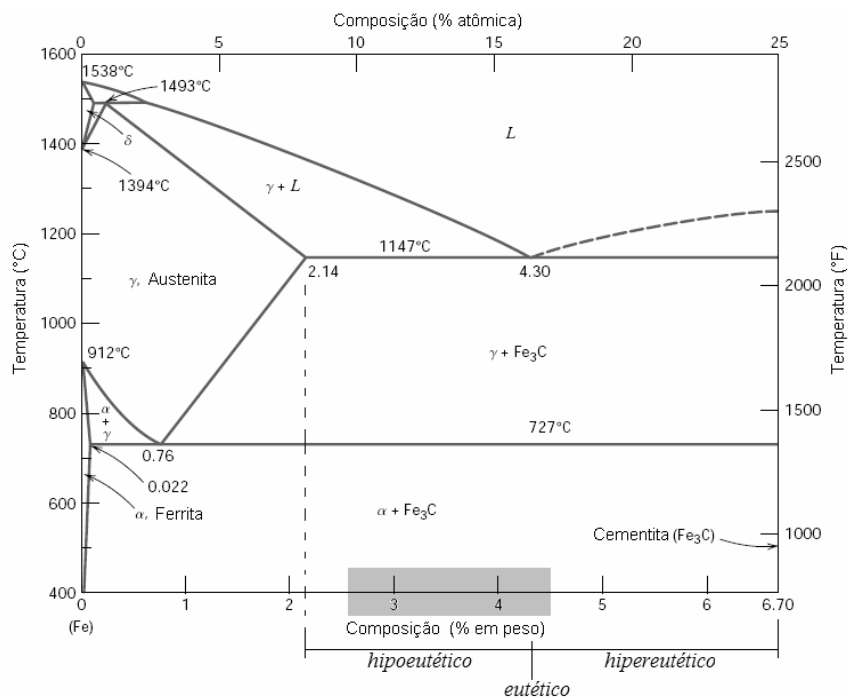


Figura 112: Diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C com destaque as composições químicas usuais dos ferros fundidos.

O carbono pode apresentar-se nos ferros fundidos sob duas formas:

- Carbono combinado (Cementita)
- Carbono grafitico (Grafita)

A Figura 113 evidencia uma imagem sobre a forma real de uma grafita. Logicamente, no momento do corte da estrutura para análise metalográfica, o resultado são apenas veios de grafita, conforme segue:

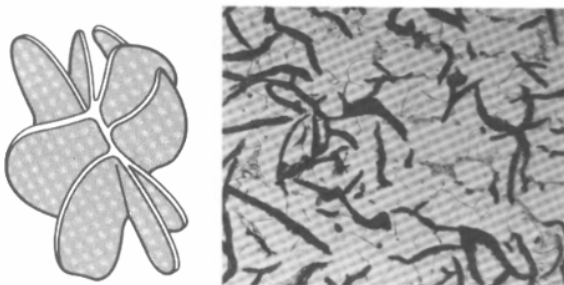


Figura 113: desenho esquemático da forma da grafita e imagem metalográfica de grafitas.

Interessante retomar a Figura 96, onde observa-se que o eutético tem um nome próprio, Ledeburita. Esta estrutura, a ledeburita, é importante na formação de ferros fundidos brancos e se apresenta na forma de glóbulos de perlita e fundo de cementita. Ocasionalmente, em ferros fundidos poderemos ter a presença de vários componentes microestruturais, sendo:

- Ferrita;
- Cementita;
- Perlita;
- Ledeburita;
- Steadita;
- Grafita.

A steadita é um eutético do diagrama Fe-P-C que pode se apresentar na estrutura (normalmente com

P>0,15%) e seu ponto de fusão é extremamente elevado (953°C).

Tipos de Ferros Fundidos

1) Ferro Fundido Branco

O nome é devido à fratura esbranquiçada que ele apresenta pelo fato do carbono estar todo combinado. O teor de silício geralmente é inferior a 1,25%. Neste caso não existe a grafita. Devido a cementita os ferros fundidos brancos apresentam as seguintes propriedades: alta dureza e resistência mecânica, alta resistência ao desgaste, difícil (se não impossível) de ser trabalhado e frágil (quebradiço). Os ferros fundidos Brancos são estudados nos diagramas de Equilíbrio Ferro-Carbono, isto é Fe-Fe₃C.

2) Ferro Fundido Cinzento

O nome é devido à fratura ser de coloração escura, devido à grafita. Uma parcela relativamente grande de carbono está no estado livre (sob a forma de grafita) e a outra combinada (cementita - Fe₃C). O silício apresenta-se em teores mais altos do que no ferro fundido Branco, geralmente entre 1,25 e 3%.

A resistência à compressão é bastante acentuada, chegando a ser de 3 a 4,5 vezes maior que a resistência à tração. A resistência à fadiga é cerca de 0,4 a 0,5 do limite de resistência à tração. A capacidade de amortecimento é uma das mais destacadas propriedades dos ferros fundidos cinzentos. Define-se capacidade de amortecimento como a habilidade de um material absorver vibrações, resultantes de tensões cíclicas, por fricção interna, transformando a energia mecânica em calor. O ferro fundido cinzento tem maior capacidade de amortecimento do que o aço devido aos veios de grafita que não tendo resistência mecânica

nenhuma funciona como vazios, o que permite a deformação plástica do material localizado ao redor dos veios. Por este motivo são muito utilizados como base de máquinas, corpo de prensa, peças de motor de explosão e combustão interna, martelos de forja, etc. Os ferros fundidos cinzentos apresentam boa resistência ao desgaste, à corrosão, boa resistência mecânica (normalmente inferior aos aços carbono), pode ser trabalhado (aplainado, torneado, perfurado, rosqueado, com ferramentas comuns). Os ferros fundidos cinzentos ferríticos são os de melhor usinabilidade, embora de baixa resistência.

3) Ferro Fundido Nodular

Caracterizado por apresentar a grafita sob a forma esferoidal, o que confere ao material boa ductilidade, donde a denominação freqüente para esse material de Ferro Fundido Dúctil. A obtenção da grafita esferoidal deve-se principalmente devido a introdução de magnésio.

A grafita na forma esférica tem menor superfície para um determinado volume, logo a área ocupada pelo metal será muito maior do que no ferro fundido cinzento. Essa melhora caracteriza o ferro fundido nodular por apresentar ductilidade (alongamento pode atingir até 18 %), tenacidade e boa resistência mecânica. O carbono nos ferros fundidos nodulares está geralmente em teores mais elevados do que nos ferro fundidos cinzentos. Recomenda-se para os ferros fundidos nodulares enxofre (S) menor do que 0,01% e fósforo menor do que 0,08%. Os principais elementos que degeneram a grafita esferoidal com tendência a voltar para a forma lamelar são: Chumbo, Bismuto, Antimônio e o Titânio. Já os principais elementos que favorecem a esferoidização da grafita são: Magnésio Metálico, Cu-Mg, Ni-Mg, Fe-Si-Mg, Cério (primeiramente como dessulfurante até o enxofre abaixar para 0,015%), Cálcio e Bário.

4) Ferro Fundido Maleável

Quando o carbono encontra-se sob forma de grafita, em forma de nódulos, mas obtidos através de tratamentos térmicos especiais a partir do ferro fundido Branco.

5) Ferro Fundido Mesclado

É caracterizado por apresentar um fundo de tonalidade clara (ferro branco) salpicado de numerosas áreas escuras (ferro cinzento).

6) Ferro Fundido Coquilhado

Num molde metálico (coquilha) o ferro fundido esfria rapidamente junto ao molde (ferro fundido branco) e no centro o esfriamento é mais lento (ferro fundido cinzento). Na zona de transição tem-se uma região de ferro fundido mesclado.

Grafita

Reações muito complexas estão envolvidas na formação da grafita. Quando ela não se forma diretamente do líquido ela resulta da decomposição da

cementita em ferrita e grafita. A grafita nos ferros fundidos encontra-se sob a forma de lamelas (veios) ou esferas (nódulos). A densidade da grafita é 2,25 g/cm³ e a sua resistência a tração é praticamente zero.

São dois os fatores mais importantes que decidem se o ferro fundido ao se solidificar se tornará Branco ou Cinzento (Nodular):

- Velocidade de resfriamento;
- Composição química.

Em relação à velocidade de resfriamento, a grafita se forma através de nucleação e crescimento e isto requer certo tempo para ocorrer. Um resfriamento rápido pode anular uma grafitização que ocorre normalmente em resfriamentos lentos. O molde metálico (coquilha) imprime uma alta velocidade de resfriamento ao contrário do molde de areia. Os ferros fundidos coquilhados geralmente apresentam-se branco na periferia e cinzento no seu interior. A espessura da faixa coquilhada depende da composição química, da temperatura de vazamento, da capacidade de resfriamento do molde e da espessura da peça.

Associada a composição química, os elementos atuam de diferentes formas na formação, conforme segue:

-Carbono: nos produtos industriais está compreendido geralmente entre 2,5 e 3,8% (ferros fundidos cinzento). Com baixos teores há tendência para se formar o tipo branco e a medida que aumenta o tipo cinzento.

-Silício: Depois do carbono é o elemento mais importante nos ferros fundidos. É um forte grafitizante, isto é, favorece a decomposição da Cementita (Fe₃C) em ferrita e grafita. Quanto maior o seu teor, mais carbono livre apresenta o ferro fundido. O teor de silício no ferro fundido varia amplamente entre 0,5% e 3,5%.

-Manganês: É utilizado para neutralizar o efeito nefasto do enxofre. Aparece em teores que variam de 0,4 a 1,4% (recomenda-se 0,6 a 0,8%).

-Fósforo: Seu teor pode variar até 0,7% (recomenda-se teor menor que 0,30%). Baixo teor atua como grafitizante e em teores elevados como estabilizador. Combinado com o ferro e o carbono forma a steadita (aparência branca e perfurada) que se funde a 953°C.

-Enxofre: Pode atingir até alguns décimos por cento (recomenda-se menor que 0,1%). Apresenta-se combinado em forma de sulfeto de manganês (blocos poligonais de cor cinza metálico) e de ferro.

A grafita é classificada em seis formas, designadas por algarismos romanos, conforme apresenta a Figura 114.

Nos ferros fundidos comuns a grafita apresenta-se normalmente na forma lamelar ou em rosetas.

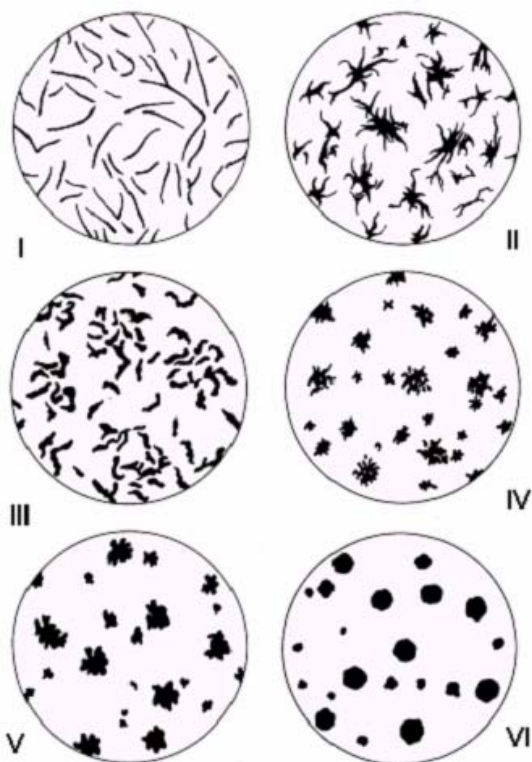


Figura 114: Formas características da grafita sendo, (I) Lamelar, (II) Rosetas, (III) Vermicular, (IV) Semi-Compakta, (V) Compacta, (VI) Esferoidal.

A ASTM e a AFS (*American Foundrymen Society*) classificam a grafita segundo cinco tipos, a saber, conforme a Figura 115:

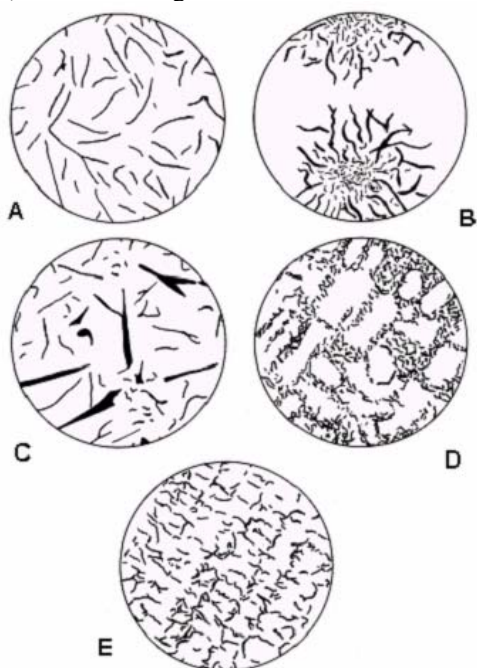


Figura 115: Disposição da grafita, sendo (A) Irregular desorientada, (B) Em roseta, (C) Desigual irregular, (D) Interdendrítica desorientada e (E) Interdendrítica Orientada

A grafita também é classificada em função do seu tamanho, sendo determinado diretamente pela análise em microscópio e comparação direta com um padrão em função de um aumento característico do microscópio (100x). A Figura 116 demonstra estas relações de tamanho.

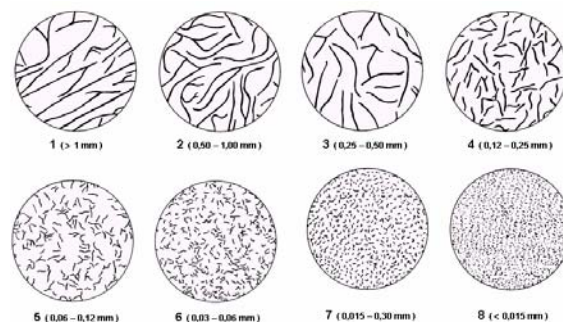


Figura 116: Tamanho dos veios de grafita, segundo ASTM, para um aumento de 100x.

Inoculação

Quanto maiores os veios de grafita e mais agrupados, menor a resistência. Um outro fator que influi no tamanho, forma e distribuição dos veios é a inoculação. Essa operação consiste em adicionar antes do vazamento elementos que servem como núcleos de cristalização (solidificação), dando maior uniformidade a estrutura e na maioria dos casos evitam o coquilhamento. Os principais inoculantes são:

- Grafitizantes: grafita, silício metálico, ferro silício;
- Grafitizantes Especiais: Ca-Si, Ca-Si-Ti, Ca-Si-Mn;
- Estabilizadores: Cr-Si, Cr-Si-Mn, Cr-Si-Mn-Zr, etc.

O silício, introduzido antes do vazamento, sob a forma de ferro-silício ou silício-cálcio tem efeito mais potente na formação da estrutura cinzenta do que acrescentado nas cargas do forno.

Classificação dos Ferros Fundidos

Os sistemas de classificação dos ferros fundidos baseiam-se nas propriedades mecânicas. A composição química fica a cargo da fundição.

A Tabela 15 demonstra a classificação ABNT para ferros fundidos cinzentos.

Tabela 15: Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ABNT.

Classe	Limite de Resist. Min. (Mpa)	Dureza Máxima
FC100	100	201
FC150	150	212
FC200	200	223
FC250	250	241
FC300	300	262
FC350	350	277
FC400	400	-

A Tabela 16 demonstra a classificação ASTM para os ferros fundidos. Ainda de acordo com seus limites de resistência, no entanto, apontam algumas composições químicas características.

Tabela 16: Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ASTM.

Classe	Limite Resistência (psi)	Limite Resistência (MPa)	C (%wt)	Si (%wt)
20	20.000	140	3,1 – 3,8	2,2 – 2,6
25	25.000			
30	30.000			
35	35.000			
40	40.000			
45	45.000			
50	50.000			
60	60.000	420	2,5 – 3,0	1,2 – 2,2

A Tabela 17 insere a classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com as normas da DIN. Interessante salientar que ela já dá uma indicação da estrutura prevista para cada caso e do módulo de elasticidade.

Tabela 17: Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a DIN.

Classe	GG10	GG15	GG20	GG25	GG30	GG35	GG40
Limite de Resistência*	10	15	20	25	30	35	40
Módulo de Elasticid. **	7,5-8	9 - 10,5	11 - 12,5				
Micro.	F	F+P	F+P	F+P	F+P	F+P	P

* kgf/mm² ** 10³kgf/mm²

Na Tabela 18 verificamos a classificação segundo a SAE.

Tabela 18: Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a SAE.

CLASSE	Limite de Resistência, psi	Dureza, HB	Microestrutura
G 1800	18000	187	Ferr + Per.
G 2500	25000	170-229	Per + Ferr.
G 3000	30000	187-241	Per.
G 3500	35000	207-255	Per.
G 4000	40000	217-269	Per.

Nas tabelas a seguir serão apresentadas as classificações dos ferros fundidos nodulares segundo ABNT, ASTM, DIN e SAE.

Tabela 19: Classificação dos ferros fundidos nodulares segundo ABNT.

Classe	Limite de resistência, MPa	Limite de Escoamento, MPa	Alongamento Total, %
FE380 17*	380	240	17
FE420 12*	420	280	12
FE500 07**	500	350	7
FE600 02***	600	400	2
FE700 02***	700	450	2

* Estrutura Ferrítica, ** Estrutura Ferrítica-Perlítica, ***Estrutura Perlítica

Tabela 20: Classificação dos ferros fundidos nodulares de acordo com a ASTM.

Classe	Limite de resistência, MPa	Limite de Escoamento, MPa	Alongamento Total, em SD ₅ , %
60 40 18	420	280	18
60 45 15	420	315	15
60 45 10	420	315	10
80 60 03	560	420	3
100 70 03	700	490	3
120 90 02	840	630	2

Tabela 21: Classificação dos ferros fundidos nodulares de acordo com a DIN.

Classe	GGG45	GGG38	GGG42	GGG50	GGG60	GGG70
Limite de Resistência	45	38	42	50	60	70
Along.(%)	5	17	12	7	2	2

Tabela 22: Classificação dos ferros fundidos nodulares SAE.

Classe	D4018	D4512	D5506	D7003
Limite de resistência, 1000 psi (min)	40	45	55	70

Os detalhes sobre a produção do ferro fundido serão vistos na disciplina de FUNDIÇÃO, no terceiro semestre.

2.8. Ligas Não-Ferrosas

As ligas ferrosas, apesar de serem consumidas em quantidades extraordinariamente possuem algumas limitações bem definidas, a saber: (a) densidade relativamente alta; (b) condutividade elétrica comparativamente baixa; e (c) suscetibilidade inerente à corrosão em alguns ambientes usuais. Desta forma, torna-se viável ou mesmo necessário utilizar outras ligas que possuam combinações de propriedades mais apropriadas. Neste contexto, as ligas não ferrosas se apresentam como solução a muitos problemas que as ligas ferrosas apresentam.

2.9.1. Alumínio

O Alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Sua aplicação como metal estrutural só é menor que a dos aços. O alumínio possui uma densidade de 2,7 g/cm³, aproximadamente 1/3 da do aço, o que somado à sua elevada resistência mecânica o torna bastante útil na construção de estruturas móveis, como veículos e aeronaves.

As duas principais propriedades do alumínio, que o tornam muito utilizado na construção mecânica, são a baixa densidade que conduz a uma relação peso da estrutura/resistência do material favorável e, a elevada resistência à corrosão aos ambientes de atmosfera, aos meios líquidos aquosos e a alguns produtos químicos inorgânicos e orgânicos - não exigindo tratamento superficial de proteção. A resistência mecânica do alumínio não é elevada contudo a adição de elementos de liga, como o cobre e o zinco, associada à aplicação de tratamento térmico,

permite obter um material de utilização importante nas estruturas resistentes. A resistência à corrosão do alumínio advém da formação de uma película de óxido na superfície do material de natureza quimicamente estável; essa película protetora de pequena espessura (50 a 100 Å) é de elevada dureza, e, além disso, é transparente e aderente à superfície do metal. Outras características que ampliam consideravelmente o campo de aplicação do alumínio são: comportamento não ferro - magnético, anti-faísca e não tóxico além da aparência brilhante; e, ainda, elevada condutibilidade elétrica (cerca de 65% do cobre eletrolítico) e térmica, e capacidade de reflexão de energia radiante (luz visível, calor radiante, ondas eletromagnéticas).

A produção do Alumínio é dividida em duas partes: primária e secundária. O alumínio primário é produzido, basicamente, pelo processo Hall-Héroult, no qual a alumina (óxido de alumínio) obtida pelo refino da bauxita é dissolvida num banho de criólitos e sais fluoretos, que tem a função de controlar a temperatura, densidade e resistividade do banho e a solubilidade da alumina.

O metal separado no processo é removido por sistemas de vácuo ou sifão para dentro de cadinhos, que são então transferidos para unidades de fundição, onde são refundidos ou transformados em lingotes. O alumínio produzido por este método contém uma quantidade relativamente elevada de impurezas, e para a obtenção de ligas com purezas mais elevadas outros métodos de refino são utilizados, podendo resultar em índices de 99,999% de pureza.

O alumínio secundário é produzido a partir da reciclagem de sucata e constitui uma importante fonte de produção do metal. Esta atividade vem sendo cada vez mais valorizada ultimamente, pois representa uma importante economia de energia elétrica, item especialmente importante na produção do metal.

Os materiais trabalhados podem ser encontrados na forma de laminados planos (chapas, folhas), extrudadas (barras, arames, perfis, tubos) e forjados.

As ligas para fundição na forma de lingotes se destinam principalmente aos processos de fundição em areia, fundição em molde permanente por gravidade ou sob pressão.

Os materiais trabalhados são indicados com quatro dígitos: o 1º classifica a liga pela série segundo o principal elemento adicionado; o 2º, se diferente de zero, indica modificação na liga básica; e os 3º e 4º para o alumínio indicam o teor mínimo desse metal, e para as ligas identificam ligas de composição específica;

Os materiais para fundição são designados com três dígitos mais um ponto seguido de um dígito: o 1º dígito indica a liga pela série segundo o elemento principal adicionado; o 2º e o 3º dígitos caracterizam as ligas de composição específica; e o 4º, que segue o ponto, indica - se for zero - a peça fundida e - se for um - o material na forma de lingote; a colocação posterior de uma letra maiúscula (A,B,...) assinala a modificação da liga básica.

Na Tabela 23 apresenta-se o sistema de designação do alumínio e suas ligas.

Tabela 23: Sistema de designação do alumínio e ligas de alumínio.

ALUMÍNIO E SUAS LIGAS TRABALHADAS	
Designação da série	Indicação da composição
1XXX	99,00% mín. de alumínio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada
ALUMÍNIO E SUAS LIGAS FUNDIDAS	
Designação da série	Indicação da composição
1XX.X	99,00% mín. de alumínio
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício e cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Complementando o sistema de designação, segundo a com posição, existe o sistema de designação da condição de têmpera isto é, do grau de endurecimento do material obtido por tratamento mecânico e térmico; o sistema de designação é alfa numérico e segue a designação anterior (por exemplo: 2024 T4). As letras usadas são F, O, H, W e T, e significam as seguintes condições:

-F - Como fabricado: aplica-se aos produtos dúcteis que não tiveram controles especiais dos tratamentos (térmicos ou mecânicos); as propriedades mecânicas não são indicadas para os produtos dúcteis mas aparecem nos produtos fundidos.

O - Recozido: utilizada para os produtos dúcteis recristalizados e na condição de menor dureza, e para os produtos fundidos com maior ductilidade e estabilidade dimensional.

H - Encruada: aplicada aos produtos dúcteis endurecidos por tratamento mecânico de conformação plástica e com provável tratamento térmico posterior de controle do grau de endurecimento; essa letra é seguida de um ou dois dígitos para indicar a condição específica: o 1º designa o tratamento básico, o 2º a têmpera que está associado a um limite de resistência dependente de cada liga, e o 3º variantes específicos, conforme Tabela 24.

-W - Solubilizada: corresponde a um tratamento térmico de condição instável que é seguida de

envelhecimento espontâneo à temperatura ambiente; o tratamento consiste num aquecimento à temperatura de solubilização (cerca de 550°C dependendo da liga) dos elementos de liga no elemento básico (alumínio) seguido de resfriamento brusco para manter, à temperatura ambiente, a solução sólida supersaturada; essa condição é indicada quando é especificado o tempo de envelhecimento.

T - Termicamente Tratada: aplicada aos produtos para obter uma situação estável da microestrutura (além da condição O ou F) e pode ser ou não seguida de tratamento mecânico; a letra T recebe um ou mais dígitos: o 1º indica a sequência de tratamento térmico, o 2º a modificação ou tratamento básico, e o 3º a condição de alívio de tensões (Tabela 24).

Tabela 24: Sistema de designação de têmperas para o alumínio e suas ligas – subdivisão para as têmperas He T.

Subdivisão para a têmpera H	
H1	Encruado somente
H2	Encruado e parcialmente recozido
H3	Encruado e estabilizado
HX2	1/4 duro HX4 – 1/2 duro HX8 – duro HX9 extraduro
Subdivisão para a têmpera	
T1	Trabalho a quente mais envelhecimento natural
T2	Trabalho a quente mais encruamento mais envelhecimento natural
T3	Solubilização mais encruamento mais envelhecimento natural
T4	Solubilização mais envelhecimento natural
T5	Trabalho a quente mais envelhecimento artificial
T6	Solubilização mais envelhecimento artificial
T7	Solubilização mais estabilização (superenvelhecimento)
T8	Solubilização mais encruamento mais envelhecimento artificial
T9	Solubilização mais envelhecimento artificial mais encruamento
T10	Trabalho a quente mais encruamento mais envelhecimento artificial

As propriedades mecânicas das ligas dúcteis dependem da composição e da têmpera. O alumínio da série 1XXX apresenta a menor resistência e a maior ductilidade, no estado recozido, comparado às demais ligas; uma elevação moderada da resistência pode ser obtida com a deformação plástica. As ligas da série 3XXX têm uma resistência mecânica maior do que o alumínio (série 1XXX) mantendo elevada a ductilidade; esses fatos tornam as ligas particularmente adequadas aos processos de fabricação por conformação plástica a frio, como na estampagem de chapas. As ligas com silício, da série 4XXX, não apresentam comportamento frágil pela presença desse elemento adicionado principalmente para abaixar o ponto de fusão e elevar a fluidez, características adequadas à utilização como metal de adição na

soldagem; além disso apresentam elevada resistência ao desgaste (associada ao baixo índice de expansão térmica). A série 5XXX contém magnésio e esse elemento eleva a resistência mecânica mais acentuadamente que o manganês. As ligas das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX são aquelas onde os níveis de resistência são maiores e são obtidos por tratamentos térmicos (solubilização e envelhecimento); a série de menor resistência é a 6XXX contudo, a presença do magnésio confere elevada resistência à corrosão; a série 7XXX, com pequenos teores de magnésio, atinge níveis de resistência mais elevados; a série 2XXX, de uso comum, apresenta elevado nível de resistência, na condição tratada termicamente, associa do a manutenção de ductilidade moderada. A maioria das ligas de alumínio podem operar em faixas de temperatura de -240 a 200°C, entretanto os valores das propriedades mecânicas se alteram surgindo o fenômeno de fluência para temperaturas mais elevadas (cerca de 150°C); para as temperaturas baixas a resistência e a ductilidade aumentam, mantendo-se a tenacidade em níveis elevados (as ligas de alumínio não apresentam o fenômeno de transição dúctil-frágil). A resistência à fadiga aumenta com o limite de resistência à tração, e as condições de endurecimento por tratamento térmico são as que maiores níveis apresentam para essa característica.

As propriedades mecânicas das peças fundidas em alumínio e suas ligas dependem do tipo de liga, da forma e dimensões da peça e do processo e técnica de fundição. A interação entre fatores correspondentes a composição da liga, condições de solidificação, presença de descontinuidades e tratamento mecânico posterior determinam o comportamento mecânico ligas com mais do que 5% de silício recebem um “tratamento de modificação” durante a fundição para provocar o refino e a dispersão do eutético Al-Si formado; esse procedimento eleva a resistência e a ductilidade do material.

Algumas aplicações podem ser citadas, em função da liga:

- Liga 1xxx: Indústrias química e elétrica;
- Liga 2xxx: Aeronaves (graças a sua elevada resistência mecânica);
- Liga 3xxx: Aplicações arquitetônicas e produtos de uso geral;
- Liga 4xxx: Varetas ou eletrodos de solda e chapas para brasagem;
- Liga 5xxx: Produtos expostos à atmosfera marinha como cascos de barcos;
- Liga 6xxx: Produtos extrudados de uso arquitetônico;
- Liga 7xxx: Componentes estruturais de aeronaves e outras aplicações que necessitam de elevados requisitos de resistência. Esta liga é a que possui a maior resistência mecânica entre as ligas de alumínio.

2.9.2. Cobre

O Cobre e suas ligas são o terceiro metal mais utilizado no mundo, perdendo apenas para os aços e para o alumínio e suas ligas.

Suas principais características são as elevadas condutividades elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga. Sua densidade é de 8,94 g/cm³, um pouco acima da do aço, e sua temperatura de fusão é de 1083 °C.

Desde a antiguidade, o cobre e suas ligas têm sido utilizados em uma variedade de aplicações, devido a uma combinação desejável de propriedades físicas. Quando encontrado no estado puro, o cobre é muito mole e dúctil, o que dificulta a sua usinagem; possui, também, uma capacidade quase ilimitada de ser submetido à deformação plástica a frio. Ainda, o cobre é altamente resistente à corrosão em vários ambientes, tais como a atmosfera ambiente, a água do mar e alguns produtos químicos industriais. As propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do cobre podem ser melhoradas quando se adicionam impurezas, formando, assim, as ligas de cobre. Como a maioria das ligas de cobre não pode ser endurecida ou ter suas propriedades mecânicas e de corrosão melhoradas por procedimentos de tratamento térmico, utiliza-se a deformação plástica a frio e/ou a formação de ligas por solução sólida.

O cobre e suas ligas podem ser classificados em três categorias básicas: cobres, cobres ligados e ligas de cobre.

A categoria “cobres” inclui os principais tipos de cobre empregados em eletrotécnica e eletrônica. Os cobres ligados (ligas com baixos teores de elementos de liga) têm adição de elementos de liga para conferir ao cobre uma característica adicional à de elevada condutibilidade térmica ou elétrica, a saber: maior resistência ao amolecimento térmico ou usinabilidade elevada. As ligas de cobre classificam-se de acordo com o tipo de elemento básico adicionado recebendo, em alguns casos, denominações específicas, como por exemplo, latão (liga de cobre-zinco), bronze (liga de cobre-estanho), cupro-níqueis (ligas de cobre-níquel), bronze de alumínio (ligas de cobre-alumínio), bronze de silício (ligas de cobre-silício), etc. A Tabela 25 mostra o sistema de classificação pela composição do cobre e das ligas de cobre trabalhadas.

Os materiais à base de cobre podem ainda ser apresentados na forma trabalhada (dúctil) ou fundida (para fundição). O emprego na forma trabalhada é bem mais diversificado, embora muitas ligas, como, por exemplo, o latão e o bronze, sejam utilizadas na forma fundida, com variações de composição química.

As designações do cobre e suas ligas seguem a numeração americana UNS (*Unified Numbering System* – ASTM/SAE) de acordo com a seguinte distribuição, para ligas dúcteis: cobres (incluindo o cobre ligado com prata) de 10100 a 13000, cobres ligados de 14000 a 16000, e ligas de cobre de 17000 a 70000. Para ligas fundidas, a numeração fica na faixa de 80000 a 90000, conforme apresenta a Tabela 25.

Tabela 25: Sistema de classificação pela composição do cobre e das ligas de cobre trabalhadas.

Sistemas	Subsistemas	Alguns metais ou ligas típicas (designação Usual UNS)
Cobre	Cobre eletrolítico tenaz	C 11000
	Cobre desoxidado com fósforo	C 10300, C 10800
	Cobre isento de oxigênio	C 10100, C 10200
Cobre ligado	Liga Cu – Ag	C 11300, C 11400
	Liga Cu – Cr	C 18200, C 18400
	Liga Cu – Te	C 14500
	Liga Cu – Cd	C 14300, C 14130, C16200
	Liga Cu – Zr	C 15000
Ligas de cobre	Ligas Cu – Zn (latões)	C 21000, C 22000, C 24000
	Ligas Cu – Sn (bronzes)	C 26000, C 26800, C 28000
	Ligas Cu – Ni (cupro-níqueis)	C 70600, C 71000, C 71500
	Ligas Cu – Ni – Zn (alpacos)	C 74500, C 75200
	Ligas Cu – Al	C 60600, C 61000
	Ligas Cu – Si	C 65100, C 65500
	Ligas Cu – Be	C 17000, C 17200, C 17500

Os principais tipos de **cobre** são:

a) Cobre eletrolítico: tenaz: é o cobre fundido a partir do cobre eletrolítico, com um teor mínimo de cobre de 88,90%, incluindo a prata com 0,1%, um residual de oxigênio de 0,02% e 0,07% e as demais impurezas em cerca de 0,01%;

b) Cobre desoxidado com fósforo: pode ser separado em dois tipos – com baixo e alto teores de fósforo – e contém de 99,80% a 99,90% de cobre (e prata) e teores residuais de fósforo de 0,004% a 0,040%. Para os com baixo teor de fósforo, os teores residuais de fósforo variam entre 0,004 a 0,012%, enquanto que para os com alto teor de fósforo, tais valores encontram-se entre 0,015 a 0,040%;

c) Cobre isento de oxidação: é o cobre eletrolítico de alta condutibilidade, no mínimo 100% IACS, processado posteriormente de tal maneira que não contenha nem óxido cuproso e nem resíduos de desoxidantes (por exemplo, o fósforo) e com um teor mínimo de cobre (e prata) de 99,95% a 99,99%.

Para muitas aplicações, um fator importante de controle é a condutibilidade elétrica, expressa em % IACS, que significa *International Annealed Copper Standard* (Padrão Internacional de Cobre Recozido) e o

valor 100% IACS corresponde a uma resistência de 17,24 nΩ.m a 20°C.

Os **cobres ligados** possuem, em geral, elevada condutibilidade elétrica associada a uma outra característica particular. Os tipos mais comuns de ligas dúcteis são:

a) ligas cobre-prata: contêm de 0,027 a 0,095% de prata, que é adicionada intencionalmente ou proveniente do metal primário – têm a estrutura monofásica, pois a prata solubiliza-se totalmente no cobre, em tais percentuais. A resistência mecânica à fluência é elevada pela presença da prata em temperaturas relativamente elevadas, conservando a condutibilidade elétrica do cobre (100% IACS); apresenta maior resistência ao amolecimento por aquecimento na condição encruada, até temperaturas e tempos equivalentes àqueles adotados nos processos de soldagem branca (com metal de enchimento à base de ligas de chumbo – estanho);

b) ligas cobre-cádmio: com teores de cádmio entre 0,05 e 0,3% - que se solubiliza totalmente no cobre – possuem resistência mecânica (à fadiga e ao desgaste em particular) mais elevada do que o cobre, mas têm a sua condutibilidade elétrica reduzida em 85-96% IACS, dependendo do teor de cádmio adicionado; para ligas mais resistentes, o teor de cádmio pode atingir 1%;

c) ligas cobre-cromo: contendo de 0,6 a 1,2% de cromo, possuem condutibilidade elétrica variando de 40 a 80% IACS em função do tipo de tratamento aplicado; o tratamento térmico de solubilização e precipitação pode conduzir as ligas a condições ótimas de elevada resistência mecânica, condutibilidade elétrica e resistência ao amolecimento pelo aquecimento (em torno de 400°C). A liga cobre – cromo pode apresentar-se também na condição de cobre ligado para fundição, onde é uma liga típica com 0,4 a 1,5% de cromo e outros elementos residuais;

d) ligas cobre-telúrio: contêm 0,40 – 0,60% de telúrio e apresentam uma microestrutura com dispersão de partículas finas de compostos intermetálicos de telúrio – cobre na matriz do cobre; essa condição de estrutura eleva substancialmente a usinabilidade (85% da usinabilidade do latão de fácil usinagem) sem muito prejuízo para a condutibilidade elétrica (93% IACS). O enxofre ou o selênio atuam de forma semelhante ao telúrio, para constituir ligas de elevadas condutibilidade e usinabilidade.

As ligas de **cobre trabalhadas** e para **fundição** são agrupadas nas seguintes categorias:

a) ligas cobre-zinco (latões): Os latões, com ou sem adição de outros elementos secundários, são distribuídos em três grupos: latões binários (sem outros elementos a não ser como impurezas), latões com chumbo e latões especiais (com outros elementos, podendo ou não conter chumbo). Os mais utilizados são os da forma dúctil do que aqueles para fundição e abrangem um número diferente de ligas com teores de zinco variando de 5 a 50%, além de outros elementos de liga. Até 37% de zinco, em temperatura ambiente,

os latões são monofásicos (latões alfa), a partir de 37% a até 45%, surge a fase beta que é também uma solução sólida de zinco em cobre (como a fase alfa) constituindo os latões bifásicos; com 45 a 50% de zinco, estes voltam a ser monofásicos, com apenas a fase beta presente. As propriedades mecânicas de resistência à corrosão e de fabricação dependem do teor de zinco. De modo geral e pode-se verificar que, por exemplo, para latões dúcteis no estado recozido, a resistência à tração aumenta ligeiramente e a ductilidade consideravelmente até o teor de 30% de zinco, e para teores maiores, na condição de latão bifásico, a resistência é maior e a ductilidade cai devido à presença da fase beta. A resistência à corrosão, em determinados meios agressivos, é sensivelmente reduzida com o aumento do teor de zinco (devido ao fenômeno de corrosão preferencial denominado dezincificação). A conformabilidade plástica é elevada para as ligas monofásicas (particularmente com 30% de zinco) no trabalho a frio e para as ligas bifásicas (com 40% de zinco, em particular) no trabalho a quente.

b) Ligas cobre-estanho (bronze): Os bronzes, com ou sem adição de outros elementos secundários, podem ser agrupados em três grupos: bronzes fosforosos binários (com pequeno teor residual de fósforo, adicionado para atuar como desoxidante, e outros elementos residuais considerados impurezas), bronzes com chumbo (com ou sem fósforo residual) e bronzes especiais (com ou sem chumbo, mas contendo outros elementos de liga). Os mais comumente utilizados possuem de 2 a 10% de estanho para as ligas dúcteis e de 5 a 11% para as ligas para fundição. Até o teor de 8%, as ligas dúcteis podem ser trabalhadas a frio para atingir dureza e maior limite de escoamento. O aumento do teor de estanho (até 15%) é acompanhado da elevação da resistência mecânica, mas a ductilidade cai sensivelmente a partir de 5% desse elemento. As propriedades mecânicas são melhoradas com a adição de 0,4% de fósforo, que atua como oxidante no processo de separação da liga. As ligas com 8 a 16% de estanho (dependendo das condições de resfriamento) são monofásicas, sendo a fase alfa (que é uma solução sólida de estanho em cobre) a que está presente. A partir destes teores, surge uma fase precipitada constituída de um composto intermetálico de cobre e estanho (fase delta) de dureza elevada. A associação da matriz dúctil, relativamente resistente (fase alfa) e com partículas dispersas de elevada dureza (fase delta), confere à liga características de material antifricção, tornando-a adequada para a fabricação de mancais de deslizamento. O chumbo é adicionado a muitas ligas para melhorar as características antifricção, de usinabilidade e de estanqueidade (para peças fundidas). O zinco também pode estar presente para elevar a resistência mecânica e atuar como desoxidante (no processo de fundição). Muitas das aplicações dos bronzes ocorrem devido à sua elevada resistência à corrosão em diversos meios agressivos e à sua facilidade de ser fundido (fundibilidade); os bronzes, ao contrário dos latões, são mais utilizados para a fabricação de peças para fundição e uma liga muito

utilizada é o bronze (às vezes denominado latão) com 5% de estanho, 5% de zinco e 5% de chumbo.

c)Ligas cobre-níquel e Ligas cobre-níquel-zinco (alpacas): As ligas cobre-níquel constituem uma família de ligas contendo também ferro e manganês. Formam uma série contínua de soluções sólidas, permanecendo monofásicas para qualquer composição. A presença de pequenos teores de ferro e manganês eleva a resistência à corrosão – erosão pela ação de fluxo de água; nas ligas para a fundição pode-se encontrar também a presença do silício e do berílio para elevar a resistência à corrosão e a resistência mecânica. Essas ligas na forma dúctil apresentam elevada conformabilidade plástica a quente e a frio.

As ligas cobre-níquel-zinco podem conter manganês e chumbo, além dos elementos principais. Contêm de 10 a 30% de níquel (geralmente 18%) e 45 a 70% de cobre e o restante de zinco. Em geral, essas ligas são constituídas de soluções sólidas homogêneas e apresentam, na condição dúctil, elevada conformabilidade plástica a quente e a frio. A resistência à corrosão é elevada e a presença de chumbo torna a superfície da peça feita com essa liga suscetível à gravação para fins decorativos. A fundibilidade da liga é também relativamente elevada.

d)Ligas cobre-alumínio: As ligas cobre-alumínio podem conter ou não manganês, ferro e níquel. Com até 5% de alumínio apresentam estrutura monofásica e caracterizam-se pela elevada resistência mecânica à corrosão e elevada conformabilidade plástica a frio; com teores maiores de alumínio (entre 8 e 9%, geralmente) a estrutura é bifásica e as ligas caracterizam-se pela elevada resistência à oxidação e conformabilidade plástica a quente. A presença de ferro garante uma resistência mecânica maior e a do manganês, uma soldabilidade maior; o níquel pode estar presente também para elevar a resistência mecânica e à corrosão.

e)Ligas cobre-berílio: As ligas cobre-berílio contêm pequenos teores de níquel, cobalto ou ferro. Em geral, o berílio apresenta-se em teores de 1,5 a 3%. Na condição solubilizada e endurecida por precipitação, essas ligas apresentam elevada resistência mecânica e elevado limite de escoamento e de resistência à fadiga em particular.

f)Ligas cobre-silício: As ligas cobre-silício podem conter manganês, zinco e ferro. Possuem particularmente elevada resistência à corrosão por ácidos e elevada soldabilidade, devido à adição do silício ao cobre. As ligas dúcteis possuem no máximo 3% de silício e, às vezes, cerca de 1% de manganês; as ligas para fundição podem conter 4 a 5% de silício e, ainda, pequenos teores de zinco, ferro e manganês.

2.9.3. Magnésio

As ligas de magnésio possuem boas características de resistência mecânica, módulo de elasticidade e baixa densidade (1,7 g/cm³), além de uma baixa relação resistência/densidade. Estas propriedades dão ao magnésio uma vasta utilização em aplicações estruturais. O magnésio possui, também, boas condutibilidades elétrica e térmica, e absorção às

vibrações elásticas. Seu ponto de fusão é baixo, em torno de 650°C. Tem boa usinabilidade e pode ser forjado, extrudado, laminado e fundido. Sua estrutura cristalina é hexagonal compacta. O magnésio possui boa resistência à corrosão em atmosferas pouco agressivas, mas é susceptível à corrosão em meios marinhos.

As ligas de magnésio são classificadas pela ASTM seguindo uma designação própria, dividida em três partes. A primeira parte, composta de duas letras, indica os dois principais elementos de liga, conforme a seguinte nomenclatura:

- A: Alumínio;
- B: Bismuto;
- C: Cobre;
- D: Cádmio;
- E: Terras Raras;
- F: Ferro;
- G: Magnésio;
- H: Tório;
- K: Zircônio;
- L: Lítio;
- M: Manganês;
- N: Níquel;
- O: Chumbo;
- P: Chumbo;
- Q: Prata;
- R: Cromo;
- S: Silício;
- T: Estanho;
- W: Ítrio;
- Y: Antimônio;
- Z: Zinco;

A segunda parte, com dois números, indica o percentual desses dois elementos. Se existirem duas ligas com características iguais, a terceira parte designa uma letra sequencial por ordem de patente.

- A: primeira liga registrada na ASTM;
- B: segunda liga registrada na ASTM;
- C: terceira liga registrada na ASTM;
- D: liga de alta pureza;
- E: liga de alta resistência à corrosão;
- X1: liga não registrada na ASTM;

A quarta e última parte, indica o tratamento térmico ou mecânico empregado.

F: não tratado

- O: recozido;
- H10 e H11: levemente encruado;
- H23, H24 e H26: encruado e parcialmente recozido;
- T4: tratamento térmico de solubilização;
- T5: envelhecido artificialmente;
- T6: tratamento térmico de solubilização e envelhecido artificialmente;
- T8: tratamento térmico de solubilização, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente;

Exemplo:

Liga AZ91A-T6

AZ: significa que o alumínio e o zinco são os dois principais elementos de liga; 91: indica os percentuais de alumínio (9%) e zinco (1%) presentes na liga; A: indica que esta liga foi a primeira a ser

registrada na ASTM com estas quantidades de alumínio e zinco; T6: indica que a liga sofreu tratamento térmico de solubilização e foi envelhecida artificialmente.

Já o sistema de numeração unificado (UNS) reserva as designações de M10001 até M19999 para as ligas de magnésio.

As ligas de magnésio são largamente utilizadas na indústria aeronáutica em componentes de motores, na fuselagem e em trens de aterrissagem, por exemplo. Encontra aplicação, também, na indústria automobilística (caixas de engrenagem, rodas, colunas de direção), indústria bélica (mísseis) e em alguns componentes eletro-eletrônicos.

2.9.4. Titânio

Material de engenharia de aplicação relativamente recente, o Titânio possui uma densidade razoavelmente baixa (4,5 g/cm³), um elevado ponto de fusão (1.668°C) e um bom módulo de elasticidade (107 GPa). Suas ligas são bastante resistentes, chegando a atingir valores de limite de resistência à tração de 1.400Mpa em temperatura ambiente, além de possuírem boa ductilidade e boas usinabilidade e forjabilidade. Sua maior limitação é uma elevada reatividade química com outros elementos em elevadas temperaturas, o que levou ao desenvolvimento de uma série de ligas especiais que elevam o custo do material. A principal característica do Titânio, entretanto, é a sua elevada resistência à corrosão em temperatura ambiente, o que o torna praticamente imune ao ar, à atmosfera marinha e a uma grande variedade de atmosferas industriais. Além disso, o Titânio é biocompatível, o que o torna uma alternativa altamente utilizada na área biomédica.

O Titânio possui as seguintes classificações no sistema da ASTM:

-Não-ligados (Titânio em diferentes níveis de pureza);

-Ligadas:

Ligas α ;

Ligas β ;

Ligas α - β .

Ou seja, a sua divisão é feita de acordo com a sua estrutura cristalina e com as fases presentes. A designação é feita com alusão direta às quantidades de elementos de liga presentes. Como exemplo, podemos citar a liga Ti-0.3Mo-0.8Ni, uma liga a com as quantidades de Molibdênio e Níquel indicadas diretamente na designação da liga.

O Titânio possui uma série de aplicações em tecnologia de ponta. Suas características de resistência à corrosão, resistência mecânica e densidade são determinantes na escolha das suas ligas. Entre as suas muitas aplicações podem ser citadas: em componentes de turbinas a gás; vasos de pressão aeroespaciais; como material estrutural nas indústrias aeronáutica, automobilística e marinha; *containers* de lixo nuclear; estruturas de suporte para sistemas óticos sujeitos a grandes variações de temperatura; implantes e próteses; bens de consumo (pulseiras de relógios, tacos de golfe, etc.), entre outras.

2.9.5. Níquel

O níquel se apresenta como um metal branco prateado, similar em muitos aspectos ao metal ferro, porém com uma boa resistência à oxidação e à corrosão.

É utilizado principalmente na melhoria de resistência mecânica a altas temperaturas, resistência à corrosão e outras propriedades, para uma ampla faixa de ligas ferrosas e não-ferrosas. Outras propriedades que se destacam são: as condutividades térmica e elétrica, como também uma excelente propriedade magnética. Propriedades que fazem do níquel e suas ligas, metais bastante valiosos.

Atualmente, o níquel é empregado conforme a seguinte distribuição:

Aços Inoxidáveis:	65%
Ligas não-ferrosas:	12%
Ligas de aço:	5%
Fundição:	5%
Laminação:	7%
Outros:	6%

Pode-se citar algumas vantagens e características dos elementos ligados ao níquel e/ou aplicações específicas.

-Aços: As aplicações dos aços que contêm determinadas quantidades de níquel são bastante difundidas na engenharia em geral, onde as vantagens da alta resistência e da boa ductilidade e tenacidade são exigidas.

-Aços-liga: O níquel é utilizado com frequência, sozinho ou com outros elementos de liga, tais como, cromo ou molibdênio, para permitir o desenvolvimento de uma alta dureza, resistência e ductilidade. É bastante empregado na indústria automotiva, construção civil e outras indústrias, onde se exigem alta resistência, tenacidade e resistência ao desgaste e à corrosão. Porém, uma característica marcante da adição de níquel é a diminuição da temperatura de transição dúctil-frágil para os aços, geralmente empregados em equipamentos submetidos a serviços de baixas temperaturas.

-Aços inoxidáveis austeníticos: Possuem uma ampla aplicação de uso do níquel, que está presente em cerca de dois terços dos aços inoxidáveis produzidos, onde se inclui o inox mais comum, AISI 304 18Cr-8Ni. Possui melhor ductilidade, boa soldabilidade, como também resistência mecânica e proteção à corrosão e à oxidação a altas temperaturas; além disso, possui ainda tenacidade a baixas temperaturas.

-Recobrimento: O recobrimento conta com mais ou menos 9% do consumo do níquel puro, com a finalidade de melhorar a proteção contra a corrosão e dar um acabamento decorativo (associado com cromo) a substratos, incluindo aços, alumínio e plásticos. Outras aplicações funcionais em relação à camada de níquel às superfícies podem ser o aumento da resistência ao desgaste ou também alterar as propriedades magnéticas do substrato. O recobrimento de níquel possui um balanço consumido por fundições e uma infinidade de outras aplicações incluindo químicas, catalíticas, baterias, varetas de soldagem, cunhagem de moedas, pigmentos, e tintas de impressão.

As ligas são melhores reconhecidas pelos seus nomes comerciais, tais como Monel, Hastelloy, Inconel, Incoloy, etc. Em relação ao sistema de classificação, o níquel se divide em quatro famílias:

-Níquel comercialmente puro: Os principais exemplos são o Níquel 200 e o Níquel 201 que contêm cerca de 99,5% de Ni. Ambos são particularmente resistentes à atmosferas cáusticas, de halogênios em altas temperaturas; meios onde contenha sais; e meios oxidantes. O Duraníquel 301, uma liga endurecida por precipitação, possui cerca de 94% de Ni e apresenta excelentes propriedades elásticas a aproximadamente 300°C. Durante seu tratamento térmico, partículas de Ni₃AlTi precipitam-se através da matriz. A precipitação aumenta a resistência mecânica da liga. Em termos de resistência à corrosão, apresenta as mesmas propriedades do Níquel 200 e do Níquel 201.

-Ligas binárias (Ni-Cu e Ni-Mo): A mais comum é a liga Ni-Cu, também conhecida como Monel. A liga Monel também apresenta pequenas quantidades de Al, Fe e Ti. As ligas Ni-Cu diferem do Níquel 200 e do Níquel 201 pelo fato de suas resistência mecânica e dureza aumentarem devido ao endurecimento por envelhecimento, embora possuam aspectos comuns em termos de resistência à corrosão, aos níqueis comercialmente puro, sua resistência aos ácidos sulfúrico e fluorídrico e à salmoura é melhor, como também devemos ressaltar sua resistência ao trincamento atribuído à corrosão sob tensão em meios clorosos. Outras ligas binárias comercialmente importantes são as de composição Ni-Mo. Destaca-se entre elas a liga Hastelloy B-2 que oferece uma excelente resistência a ácidos clorídricos e também a qualquer meio redutor. Também possuem alta resistência mecânica em atmosferas de gases inertes em temperaturas elevadas.

-Ligas ternárias (Ni-Cr-Fe e Ni-Cr-Mo): Do quadro de ligas ternárias, destacam-se as composições Ni-Cr-Fe e Ni-Cr-Mo. Os principais componentes do sistema Ni-Cr-Fe são conhecidos comercialmente como Inconel 600, e Incoloy 800. O Inconel 600 tem boa resistência tanto em meios oxidantes, quanto em meios redutores e podem ser trabalhados a altas temperaturas. O Incoloy 800 possui boa resistência à oxidação e à carbonetação a temperaturas elevadas. As ligas Ni-Cr-Mo são altamente resistentes à corrosão alveolar. Elas retêm grande resistência mecânica e à oxidação a elevadas temperaturas. Têm grande aplicação na indústria, principalmente em equipamentos submetidos a meios aquosos. Neste grupo, as principais ligas são o Hastelloy C-276, Hastelloy C-22 e o Inconel 625.

-Ligas complexas (Ni-Cr-Fe-Mo-Cu): Ligas complexas: O sistema Ni-Cr-Fe-Mo-Cu é a composição básica desta categoria. Elas oferecem boa resistência à corrosão alveolar (*pitting*), à corrosão intergranular, à corrosão sob tensão em meios clorosos e à corrosão uniforme em uma larga escala de meios oxidantes e redutores. Estas ligas são geralmente usadas em aplicações envolvendo ácidos sulfúrico ou fosfórico. Os principais componentes são: Hastelloy G-3, os Inconel 617, 625, e 718; e o Incoloy 825.

-Superligas: Ligas de níquel de grande importância, especialmente desenvolvidas para serviços sob condições de alta resistência mecânica a altas temperaturas. A principal exigência mecânica para tal serviço é a alta resistência à fluência. As superligas de níquel normalmente contêm elementos como cromo, cobalto, ferro, molibdênio, tungstênio e nióbio. O efeito destes elementos solutos é o fortalecimento da matriz que depende da diferença de tamanho do níquel e do soluto com a finalidade de conter o movimento das discordâncias. Dentre as superligas destacam-se Waspaloy, Udimet 700, Astroloy, Rene 95 e a classe Nimonic. Uma grande aplicação para as superligas está relacionada à produção de componentes de turbinas a gás e na indústria aeronáutica.

2.9.6. Zinco

Uma das características mais importantes do zinco é a sua resistência à corrosão em qualquer ambiente atmosférico (devido à proteção de um óxido protetor à temperatura ambiente), que permite que este seja utilizado na proteção contra corrosão, através da aplicação por diferentes processos de revestimento de peças e estruturas de aço, além de ferros fundidos e ligas de alumínio. Por exemplo, para proteção contra corrosão do aço com o uso de zinco, pode ser através dos seguintes processos: Aplicação de recobrimentos metálicos ou de substâncias orgânicas e inorgânicas; Emprego de inibidores de corrosão nos meios ambientes; Utilização de ligas metálicas mais resistentes à corrosão; Adoção de proteção catódica.

O zinco não é utilizado para fins estruturais devido à sua baixa resistência mecânica. Entretanto, algumas ligas de zinco podem ter resistência mecânica suficientemente elevada, para algumas aplicações específicas. A ductilidade do zinco, acima de 100°C, é bastante elevada, permitindo, assim, que a conformação plástica seja relativamente fácil na obtenção de formas laminadas ou extrudadas. Pode ser encontrado na forma de placas, lingotes, chapas, grãos e pós. O ponto de fusão do zinco é baixo e, associado a outras características, permite a sua utilização em processos de fundição sob pressão em matrizes metálicas; assim, o zinco é utilizado na forma de uma liga com alumínio e outros elementos.

O zinco e suas ligas podem ser classificados em duas categorias:

-Zinco e ligas de zinco trabalhadas

-Ligas de zinco para fundição.

A Tabela 26 mostra os nomes e a designação do zinco e suas ligas, de acordo com as categorias.

Para as diversas aplicações – ligas para laminação e para fundição, elemento de liga dos latões e material de revestimento protetor contra corrosão – deve-se utilizar os diferentes tipos de zinco como matéria-prima, em função do seu grau de pureza.

Tabela 26: Classificação e designação para o zinco e suas ligas.

Designação	Composição
Zinco e ligas de zinco trabalhadas	
Zinco laminado comercial	Zn – 0,08 Pb
Zinco laminado comercial	Zn – 0,06 Pb – 0,06 Cd
Zinco laminado comercial	Zn – 0,3 Pb – 0,06 Cd
Zinco laminado endurecido com cobre	Zn – 1 Cu
Liga de zinco laminada	Zn – 1 Cu – 0,010 Mg
Liga de zinco – cobre – titânio	Zn – 0,8 Cu – 0,15 Ti
Liga de zinco superplástica	--
Ligas de zinco para fundição por pressão em matrizes	
Zamac 3	Liga de zinco Zn – 4 Al – 0,04 Mg
Zamac 5	Liga de zinco Zn – 4 Al – 1 Cu – 0,04Mg
Ligas de zinco para fundição por gravidade	
Liga de zinco	Zn – 4,75 Al – 0,25 Cu
Liga de zinco	Zn – 5,5 Al
Liga de zinco	Zn – 11 Al
Ilzro 16	Zn – 1,2 Cu

O zinco também pode ser classificado em duas famílias: zinco primário e zinco secundário. O zinco primário representa 80% da produção atual, e o seu principal processo de produção é o eletrolítico, que consiste na dissolução do óxido ustulado em ácido sulfúrico, seguido de um processo de eletrólise, na qual o eletrólito, rico em zinco, entra em células eletrolíticas com ânodos de ligas de chumbo e cátodos de alumínio. O zinco se deposita neste último, sendo periodicamente retirado para posterior fusão e transformação em placas. O zinco secundário, por sua vez, é reciclado e representa 20% do total atualmente produzido.

O zinco é dividido em cinco grandes áreas de aplicação:

- Revestimentos e ânodos para proteção anti-corrosão de ferros e aços;
- Ligas fundidas à base de Zinco;
- Elemento de liga para ligas de cobre, alumínio, magnésio e outros;
- Ligas trabalhadas de zinco;
- Produtos químicos.

O zamac 3 é recomendado para as peças que devem apresentar mais estabilidade dimensional; além disso essa liga apresenta maior resistência à corrosão. O zamac 5, por sua vez, apresenta maior dureza e resistência mecânica, e conseqüentemente maior resistência ao desgaste e à fluência; a usinabilidade dessa liga é também maior do que a primeira.

A película formada pela oxidação superficial nessas ligas tem características porosas, o que contribui para reter lubrificantes e elevar a resistência do desgaste em peças móveis.

As principais áreas de aplicação, com ou sem revestimento superficial dependendo do emprego

específico, são: componentes de automóveis (carcaças de instrumentos, do alternador e de bombas; maçanetas, buchas e engrenagens de instrumentos, tampas do tanque, etc.), componentes de aparelhos eletrodomésticos (carcaças de motores, engrenagens, dobradiças, etc.), componentes de máquinas de escritório e de computação, brinquedos e ferragens de construção civil diversas.

2.9.7. Chumbo

O chumbo não é encontrado livre na natureza, mas a Galena (sulfeto de chumbo) era utilizada como pintura para os olhos no Egito antigo. A produção de chumbo metálico da Galena é relativamente fácil e pode ter sido feita pela sua redução em fogueiras. Primeiramente o chumbo não foi amplamente utilizado devido à sua ductilidade e seus primeiros usos se deram por volta de 3.500AC. O chumbo utilizado como condutor e *containers* foi muito importante e ainda podem ser encontrados canos com a insígnia de imperadores romanos. A habilidade do chumbo de fluir e ser coletado no fundo das fogueiras é um conceito importante na metalurgia.

O chumbo é um dos mais utilizados metais na indústria, apenas sendo ultrapassado por outros metais como o ferro, o cobre, o zinco e o alumínio. A principal aplicação do chumbo e do seu óxido (PbO) é no fabrico de baterias elétricas para veículos automóveis. As ligas de chumbo são muito diversas e amplamente utilizadas na indústria. A adição de uma pequena percentagem de arsênico, ou antimônio, ao chumbo, aumenta a sua dureza e resistência mecânica, protegendo-o do desgaste. As ligas de cálcio-chumbo e de estanho-chumbo são utilizadas no revestimento de certos cabos elétricos. A solda é uma liga de chumbo com estanho, em proporções variáveis de acordo com o ponto de fusão requerido. A adição de bismuto, cádmio ou mercúrio, também pode alterar o ponto de fusão da solda.

2.9.8. Metais refratários

Os metais que possuem temperaturas de fusão extremamente elevadas são classificados com metais refratários. Neste grupo estão incluídos o nióbio (Nb), o molibdênio (Mo), o tungstênio (W) e o tântalo (Ta). As temperaturas de fusão variam entre 2468°C (4474°F) para o nióbio e 3410°C (6170°F), a mais alta temperatura de fusão dentre todos os metais, para o tungstênio. As ligações interatômicas nesses metais são extremamente fortes, o que é responsável pelas temperaturas de fusão e, além disso, pelos elevados módulos de elasticidade e altas resistências e durezas, tanto à temperatura ambiente quanto a temperaturas elevadas. As aplicações desses metais são variadas. Por exemplo, o tântalo e o molibdênio são ligados com o aço inoxidável para melhorar a sua resistência à corrosão. As ligas de molibdênio são utilizadas para matrizes de extrusão e peças estruturais em veículos espaciais, os filamentos de lâmpadas incandescentes, tubos de raios X e eletrodos de solda empregam ligas de tungstênio. O tântalo é imune ao ataque químico em virtualmente todos os ambientes a temperaturas abaixo

de 150°C. sendo usado com frequência em aplicações que exigem esse tipo de material resistente à corrosão.

2.9.9. Superligas

As superligas possuem combinações superlativas de propriedades. A maioria é utilizada em componentes das turbinas de aeronaves, que devem ser capazes de suportar a exposição a ambientes oxidantes extremos e elevadas temperaturas por períodos de tempo razoáveis. A integridade mecânica sob essas condições é crítica; nesse sentido, a densidade é uma consideração de importância, pois as tensões centrífugas sobre os membros rotativos são diminuídas quando a densidade é reduzida. Esses materiais são classificados de acordo com o metal predominante na liga, que pode ser o cobalto, o níquel ou o ferro. Outros elementos de liga são os metais refratários (Nb, Mo, W, Ta), o cromo e o titânio. Adicionalmente às aplicações em turbinas, essas ligas são usadas em reatores nucleares e equipamentos petroquímicos.

2.9.10. Metais Nobres

Os metais nobres ou preciosos são um grupo de oito elementos que possuem algumas características físicas em comum. Eles são caros (preciosos) e possuem propriedades superiores ou notáveis (nobres), isto é, de maneira característica, eles são moles, dúcteis e resistentes ao calor. Os metais nobres são prata, ouro, platina, paládio, ródio, rutênio, irídio e ósmio; os três primeiros são mais comuns e largamente usados em joalheria. A prata e o ouro podem ter sua resistência aumentada através da formação de ligas por solução sólida com o cobre; a prata de lei é uma liga prata-cobre que contém aproximadamente 7,5%p Cu. As ligas tanto de prata como de ouro são empregadas como materiais de restauração dentária; ainda, alguns contatos elétricos de circuitos integrados são feitos de ouro. A platina é utilizada em equipamentos usados em laboratórios químicos, como catalisador (especialmente na fabricação de gasolina), e em termopares utilizados para medir temperaturas elevadas.

2.9.11. Outros

Estanho

Possui ponto de fusão de 232 °C, peso específico de 7,3 g/cm³, forma cristalina tetragonal e coloração branca prateada. É um material mole, dúctil e maleável, que possui baixa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão, sendo empregado na forma de chapas, folhas e fios estanhados e como elemento básico de certas ligas, como algumas para mancais e soldas, ou como elemento secundário de ligas importantes, como o bronze. Sua principal aplicação é na estanhagem, por imersão a quente ou eletrodeposição, de chapas ou folhas de aço, originando as chamadas folhas de flandres. Também é bastante utilizado em dispositivos de segurança contra o fogo, em alarmes, metais de soldagem e vedação.

O estanho é dividido, de acordo com a sua aplicação em soldagem, nos seguintes tipos:

-Comercialmente puro: plantas de destilação, no transporte de água de alta pureza, e outras aplicações

que requerem a utilização de materiais quimicamente inerte.

-Solda de estanho antimonial: soldagem de equipamentos elétricos, juntas de tubulações de cobre, e bobinas de resfriamento de equipamentos refrigeradores.

-Solda-prata: Composta basicamente de 95% de Sn e 5% de Ag. Utilizada na soldagem de componentes de aplicação elétrica e de alta temperatura.

-Solda-prata eutética: propriedades e aplicações semelhantes à solda prata comum. A única diferença é que possui uma quantidade maior de estanho.

-Solda-branca: existem dois tipos. Um com 70% de Sn, utilizado na junção e no revestimento de metais, e outro com 60% de Sn, utilizado na soldagem de equipamentos eletro-eletrônicos, especialmente na soldagem de circuitos impressos.

-Solda eutética: soldagem de produtos eletrônicos.

Além da aplicação em solda, o estanho é muito utilizado em revestimentos, puro, em produtos químicos, como principal elemento de liga e como elemento de liga secundário.

3. Materiais Poliméricos

Os polímeros (plásticos) podem ser definidos como "um grupo arbitrário" de materiais artificiais, geralmente de origem orgânica sintética, que em algum estágio de sua fabricação adquiriram a condição plástica durante a qual foram moldados, com aplicação de pressão e calor.

De acordo com o Instituto Britânico de Padrões, os plásticos são definidos como amplo grupo de materiais sólidos, compostos eminentemente orgânicos, usualmente tendo por base resinas sintéticas ou polímeros naturais modificados e que possuem, em geral, apreciável resistência mecânica. Em determinado estágio de sua fabricação, a maioria dos plásticos pode ser fundida, moldada ou polimerizada na forma final. Alguns plásticos são semelhantes à borracha, enquanto algumas formas de borracha quimicamente modificadas são consideradas plásticos.

O carbono é o elemento fundamental de todos os plásticos. Em geral, tem-se combinação de um átomo de carbono com quatro átomos de outro elemento. Para compreender melhor a natureza dos materiais plásticos, inclusive da definição do Instituto Britânico de Padrões, é necessário estabelecer e definir alguns conceitos fundamentais:

-**Monômero**: É a menor unidade molecular que constitui partícula elementar da matéria;

-**Polímero**: É a combinação de monômeros, por um processo chamado "polimerização", formando uma cadeia.

Exemplo de um monômero é o gás etileno C₂H₄ e exemplos de polímeros são o polietileno e o polipropileno.

O processo de polimerização que produz os polímeros a partir dos monômeros consiste na aplicação de calor, pressão, utilização de processos químicos e aditivos, de modo a resultar estruturas em forma de cadeia, como as da Figura 117.

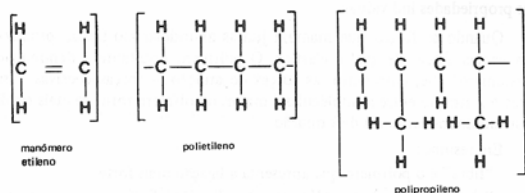


Figura 117: Exemplos de Monômero (gás etileno) e Polímeros (polietileno e polipropileno).

Os polímeros são, no comércio, frequentemente chamados de "resinas". Entre os monômeros podem ser citados o fenol, o formaldeído, a uréia, o acetato de vinil, o etileno, etc.

A combinação de dois grupos de monômeros diferentes, por polimerização, produz um "copolímero", que é diferente do "polímero".

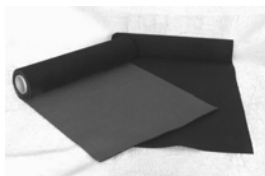
Como resultado da polimerização, quando vários monômeros são juntados, originam-se grandes moléculas. Chama-se "polímero linear" aquele que apresenta largura de apenas uma unidade; por outro lado, seu comprimento é, frequentemente, de vários milhares de unidades, como numa cadeia.

Num plástico formado a partir de polímeros lineares, a aderência das cadeias entre si é devida à atração intermolecular, a qual ocorre quando cada cadeia toca ou se cruza com outra. As forças moleculares que mantêm os elos dos polímeros lineares individuais, são forças primárias, ao passo que as que mantêm cadeias de polímeros juntas, quando elas se tocam ou se cruzam, são chamadas secundárias. Estas forças secundárias - forças coesivas - conferem aos plásticos suas propriedades individuais.

Quando as forças que mantêm juntas as cadeias são fracas, produz-se uma cadeia fraca, flexível e elástica. O polímero resultante é denominado **elastômero**. Se, entretanto, as forças de atração - forças coesivas - são fortes e a atração entre as moléculas é maior, o polímero torna-se mais rígido, resiste ao dobramento e à deformação.



(a) Silicones em geral



(b) Neoprene

Figura 118: Exemplos de elastômeros

As dimensões de um polímero variam de um plástico a outro. O seu "peso molecular" pode dar uma indicação geral de suas dimensões; esse peso molecular e o peso total de todos os elementos que formam as imensas e longas moléculas. Outra indicação do tamanho de um polímero é o "grau de polimerização GP", que corresponde ao número que indica quantas ligações ou unidades repetidas há numa cadeia molecular.

Como a resistência ao escoamento aumenta à medida que o comprimento da cadeia molecular aumenta, um polímero com um GP maior resistirá mais à tendência de tornar-se plástico, pela aplicação de calor, do que

um polímero que apresenta ligações mais curtas ou menor quantidade de unidades repetidas.

Além do peso molecular e do grau de polimerização, outro fator que determina o comportamento de um polímero é a chamada "cristalinidade". Esta característica corresponde a uma medida da regularidade e perfeição da estrutura molecular e determina, parcialmente, a natureza e o comportamento do plástico. A esse respeito, quanto mais próximas e paralelas às cadeias, mais resistente o material.

3.1. Grupos de plásticos:

Há dois grupos gerais de plásticos: termofixos (ou termoestáveis) e termoplásticos.

Os plásticos termofixos ou termoestáveis possuem polímeros em rede; são polímeros com cadeias laterais. Os polímeros em transversais são formados entre os cordões lineares. Essas ligações transversais, à medida que se formam, causam diminuição da mobilidade dos cordões, provocando solidificação.

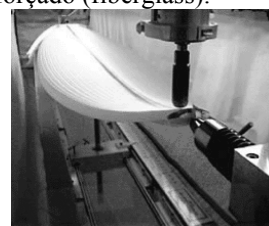
Para a moldagem, esses plásticos exigem geralmente calor e pressão. O aquecimento do polímero, que pode se converter em rede, ocasiona uma reação mais rápida das cadeias laterais e acelera a conversão do líquido em sólido (donde o nome termoestável).

Explicando de outro modo: na primeira aplicação de calor, os materiais termoestáveis tornam-se moles e plásticos, mas prosseguindo no processo de aplicação do calor, operação conhecida com o nome de cura, eles se transformam quimicamente e endurecem. Atingido o grau de dureza, assim permanecem e mesmo reaquecidos não se tornam moles. Sob intenso calor, é óbvio, haverá combustão do material. Entre os materiais termofixos, os mais comuns são os provenientes do fenol e formaldeído e da uréia e formaldeído;

Exemplos de termofixos: Baquelite, usada em tomadas e no embutimento de amostras metalográficas; poliéster, usado em carrocerias, caixas d'água, piscinas, etc., na forma de plástico reforçado (fiberglass).



(a) baquelite



(b) Fibra de vidro

Figura 119: Exemplo de utilização de baquelite: alojamentos para lâmpadas.

Os materiais termoplásticos são os que correspondem a um polímero linear que, ao ser aquecido sob pressão, a sua consistência altera-se de sólida a mole e viscosa. Neste processo não ocorrem reações químicas e os artigos obtidos podem ser reamolecidos. Em outras palavras, os termoplásticos podem amolecer seguidamente sob a ação do calor e endurecer novamente quando resfriados.

Entre os mais importantes termoplásticos, poliestireno, cloroeto de polivinila (ou PVC), polietileno e nylon.

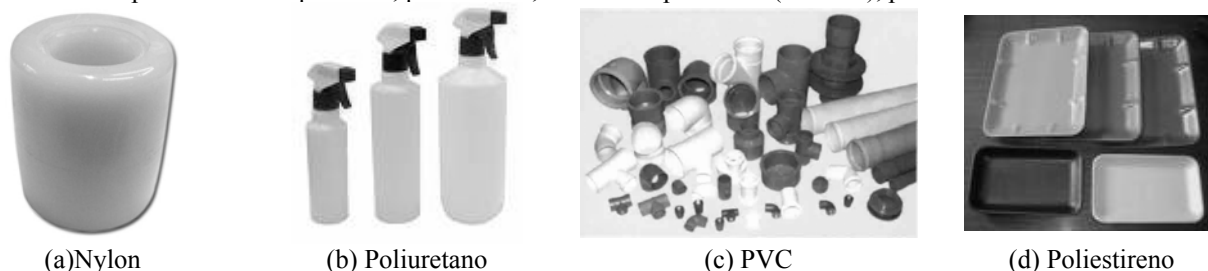


Figura 120: Exemplos.

3.2. Propriedades dos polímeros

As propriedades que caracterizam os polímeros são mecânicas, químicas, térmicas, óticas e elétricas. De um modo geral, essas propriedades devem ser associadas, isto é, não é suficiente um plástico ser transparente ou apresentar boas características de isolante ou resistir bem à corrente elétrica sob determinada voltagem, se sua resistência não for suficiente para suportar os esforços mecânicos ou as modificações estruturais que possam ocorrer pela aplicação, por exemplo, de correntes elétricas além das previstas.

Do mesmo modo, a ação de agentes químicos deve ser considerada, pois moléculas estranhas podem romper as ligações químicas ou as cadeias longas dos polímeros, reduzindo a resistência mecânica do material. Alguns detergentes, por exemplo, podem conter moléculas que enfraquecem, com o tempo, certos tipos de polímeros.

Em resumo, as características que devem ser levados em conta nos plásticos são:

- Óticas, como cor e transparência;
- Térmicas ou resistência ao calor;
- Elétricas ou resistência dielétrica;
- Mecânicas ou resistência mecânica;

Químicas ou resistência à ação de moléculas estranhas.

Como se viu, os materiais plásticos estão compreendidos em dois grandes grupos: os termoplásticos e os termoestáveis ou termofixos. Serão, a seguir, considerados os principais tipos de materiais de cada um desses grupos:

3.2.1 Termoplásticos:

São os mais empregados. Entre os principais tipos, podem ser enumerados os seguintes:

Olefínicos

Entre eles, situam-se o **polietileno** e o **polipropileno**, obtidos a partir dos polímeros olefínicos etileno e propileno. São os materiais plásticos mais utilizados no momento. Os "polietilenos" são de baixo custo, possuem boa tenacidade, resistência dielétrica excelente e boa resistência química. Há muitos tipos de polietilenos, dependendo da densidade, a qual varia de 0,910 a 0,959 g/cm³. Os de densidade mais elevada possuem mais resistência mecânica, São mais rígidos, mas relativamente muito frágeis, enquanto os de menor densidade são mais flexíveis.

Seu emprego varia, de acordo com a densidade, desde caixas, garrafas, vasilhas, gaxetas, isolamentos de fios, brinquedos, cabos de escovas até certos componentes mecânicos, como mancais, engrenagens etc.



(a) baixa densidade (espuma)



(b) alta densidade

Figura 121: Exemplos de Polietilenos.

Os "polipropilenos" são semelhantes aos polietilenos de alta densidade, portanto com propriedades mecânicas na faixa superior daqueles. A resistência à tração se situa na faixa de 3,3 a 3,85 kgf/mm² e a máxima temperatura de serviço é da ordem de 121°C. São fáceis de moldar, possuem muita boa resistência elétrica e absorção de água desprezível. São leves, rígidos e razoavelmente resistentes a muitos agentes químicos. Empregam-se em aparelhos eletrodomésticos, indústria automobilística (partes internas, painéis etc.), isoladores, bagagens etc.



Figura 122: Polipropilenos.

Na família dos plásticos olefínicos deve-se incluir também os "copolímeros olefínicos" que compreendem os tipos "polialômeros", "inômeros" e "copolímeros etilênicos".

Os "polialômeros" são altamente cristalinos e podem ser produzidos de modo a apresentar de média a elevada resistência ao choque, com razoável resistência à tração. São utilizados em caixas de máquinas de escrever, recipientes de alimentos e aplicações semelhantes.

Os "ionômeros" são plásticos não rígidos, de baixa densidade, transparência e tenacidade. Possuem alta resistência à abrasão. Não podem ser empregados a temperaturas acima de 70°C. Utilizam-se em recipientes para moldagem por injeção, artigos de uso doméstico, cabos de ferramentas, isolamento elétrico, tubulações, caixas de embalagem etc.

Finalmente, os "copolímeros etilénicos" compreendem vários tipos comerciais, entre os quais os mais comuns são o acetato-vinil-etileno (EVA) e o acrilato-etil-etileno (EEA).

O primeiro (EVA) é mais ou menos idêntico aos elastômeros em flexibilidade. Porém possuem baixa resistência ao calor e a solventes. Entre suas aplicações incluem-se buchas, gaxetas, vedações, etc.

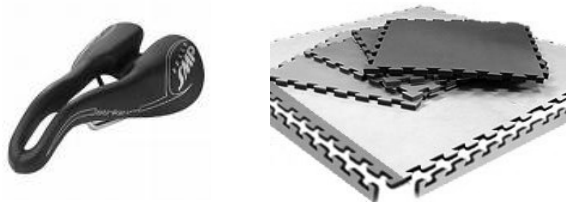


Figura 123: Exemplos de EVA

O EEA é semelhante ao primeiro sob o ponto de vista de densidade, resistência ao calor e a solventes. Porém, é superior em relação à resistência à fissuração sob tensão pelo meio ambiente e possui mais resistência à radiação ultravioleta. É flexível e tenaz, como o EVA.

Empregos típicos: borrachas e canos para água flexíveis, empacotamento de filmes, bandejas de lavadoras de pratos etc.

Poliestirenos

Após os polietilenos, são os materiais plásticos mais utilizados. São baseados no monômero estireno; de baixo custo e facilmente moldáveis, extrudáveis ou lamináveis.

Sua resistência mecânica é satisfatória, mas sua fluência não. Como não tem resistência ao calor, seu emprego está restrito a aplicações à temperatura ambiente. Também sua resistência ao empenamento pelo calor é baixa.

Vinílicos

Neste grupo incluem-se o cloreto de polivinila (PVC) e o cloreto de vinilideno. Os polímeros de origem são instáveis e degradam-se rapidamente pela ação da luz e do calor, formando produtos escuros de baixa qualidade.

Possuem excelente resistência química e por isso são empregados sobretudo em ambientes químicos e em aplicações sujeitas ao intemperismo. Caracterizam-se ainda por boa resistividade elétrica e resistência à abrasão elevada.

O PVC rígido - constituído de homopolímeros vínicos não-plastificados - é empregado na forma de chapas em recipientes químicos, dutos, cobertas e peças arquitetônicas. Também, na forma de tubos, em equipamento das indústrias de óleo, química e processamento de alimentos.

O PVC flexível - composto de homopolímeros ou copolímeros com adição de plastificantes - é usado em películas e folhas para embalagens, estofamentos etc.



(a) PVC rígido



(b) PVC flexível

Figura 124: Exemplos

Acrílicos

De um modo geral, a base dessa família de materiais plásticos é constituída de polímeros de metacrilato de metil, eventualmente modificado com outros monômeros. Sua resistência ao choque é boa e sua resistência às intempéries e claridade ótica são excelentes.

A temperatura de empenamento gira em torno de 90°C. Pelas características de resistência às intempéries, podem ser utilizados em aplicações externas. Sua resistência à tração varia de 3,5 a 7,7 kgf/mm², valor elevado, considerando-se que se trata de materiais plásticos. São conformados na forma de chapas, tubos e blocos. Empregam-se em maçanetas, cabos, lentes para sinalização, peças transparentes para aviões, rádios, televisores, componentes estruturais e decorativos de veículos, de máquinas calculadoras etc.

Nailon (poliamidas)

Nailon é o nome genérico para poliamidas sintéticas, e talvez o material plástico mais conhecido. Os nylons possuem excelentes propriedades mecânicas, como resistência à tração, à fadiga e ao choque, devido a sua estrutura com grau de cristalinidade relativamente elevado. Apresentam igualmente elevada resistência à abrasão e resistência à maioria dos agentes químicos e solventes, exceto ácidos fortes e alguns solventes. Contudo, apresentam uma taxa de absorção da umidade relativamente elevada, o que causa alteração dimensional, que pode superar 2% num ambiente com 100% de umidade. São conformados por moldagem e extrusão. Tem-se sinterizado peças pequenas e médias, a partir de pó de náilon, com adições de óleo, grafita ou dissulfeto de molibdenio para conferir propriedades de mancais.

De início, os nylons eram utilizados como produto têxtil. Contudo, as principais aplicações como material plástico correspondem a componentes mecânicos, de instrumentos, carcaças de máquinas, engrenagens, além das aplicações mencionadas como mancais.

ABS ou acrilonitrila-butadieno-estireno

Estes plásticos são opacos, com razoáveis propriedades mecânicas, como elevada resistência ao choque, rigidez e dureza numa ampla faixa de temperaturas - menos 40°C a mais 100°C.

são facilmente conformados, por injeção, extrusão e moldagem. Podem ser estampados ou conformados a frio, a partir de chapas extrudadas, se tiverem sido tratados com resinas especiais.

Entre as aplicações mais usuais, incluem-se tubulações e acessórios, capacetes, bagagens, carcaças de utensílios diversos, dutos para fumaças,

componentes de escritório e de veículos, substituindo peças metálicas.

3.2.2 Fluoroplásticos:

São materiais importantes em aplicações de engenharia, devido a suas excelentes qualidades. São, contudo, de custo elevado. São constituídos de polímeros em que alguns ou todos os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de flúor. Possuem cristalinidade e peso molecular relativamente elevados.

Suas principais características são: cor branca natural, a melhor resistência química e o melhor desempenho a altas temperaturas (temperatura de serviço até cerca de 260°C) entre os plásticos, alta resistência dielétrica e excelentes propriedades de fricção. Embora a resistência ao choque seja satisfatória, sua resistência à fadiga e à fluência são apenas razoáveis. Contudo, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com substâncias de enchimento e de reforço.

Há três tipos principais de fluoroplásticos: "fluorocarbônicos", "clorotrifluoroetilenos" e "fluorohidrocarbonos".

Entre os primeiros, o mais usado é o "tetrafluoroetileno" (PTFE ou TFE), pois é o que apresenta a melhor temperatura de serviço (260°C) e a melhor resistência química. É conhecido também como "**Teflon**": não é fácil de fabricar, de modo que o método usual de obtenção de peças de Teflon é mediante a compactação do material em pó, seguida de sinterização.

o "clorotrifluoroetileno" (CTFE ou CFE) e mais resistente e mais rígido que os fluorocarbônicos e possui melhor resistência a fluência.



Figura 125: Teflon

Os "fluorohidrocarbonos" são semelhantes aos anteriores, porém apresentam menor resistência ao calor e melhores resistências à tração e à compressão. Todos eles, exceto o tetrafluoroetileno, podem ser conformados por moldagem, extrusão e outros métodos convencionais.

Entre as aplicações desses materiais, contam-se as seguintes: buchas autolubrificantes, componentes mecânicos, peças e tubos resistentes ao ataque químico, componentes eletrônicos para serviços a alta temperatura, vedações, revestimentos de tanques etc.

3.2.3 Plásticos termoestáveis (ou termofixos):

Nestes plásticos, as cadeias dos polímeros são unidas entre si por fortes ligações covalentes, ao contrário dos termoplásticos, o que lhes confere características diferentes, como maior dureza e relativa fragilidade. Apresenta também maior estabilidade térmica e maior resistência à fluência.

Por outro lado, podem ser utilizados na forma moldada, para o que é necessário introduzir-se substâncias de enchimento e de reforço. Exigem igualmente ciclos de moldagem mais longos.

Uma vez moldadas as peças ou conformadas pelo calor e polimerizadas, permanecem estáveis e tomam-se infusíveis, ou seja, não amolecem pelo aquecimento e não são solúveis quimicamente.

A matéria-prima desses plásticos é composta de resinas e de substâncias de enchimento e de reforço.

A resina consiste em um polímero, agentes de cura, endurecedores, inibidores e plastificantes. As substâncias de enchimento consistem em um ou mais dos seguintes componentes:

- 1) partículas minerais ou orgânicas,
- 2) fibras,
- 3) substâncias têxteis ou papel orgânico ou inorgânico retalhado.

Após misturados os componentes, na forma geralmente de grânulos ou pelotas, o processamento consiste em:

- 1º) Pré-conformação, pela compressão à temperatura ambiente, numa forma que corresponde à da cavidade do molde;
- 2º) Preaquecimento, em que a peça pré-conformada é aquecida de modo a permitir que o material flua no interior do molde;
- 3º) Moldagem, em que ocorre a conformação e a polimerização ou cura sob pressão e calor.

Os principais tipos de plásticos termoestáveis são os seguintes:

Fenólicos

Conhecidos também como "fenol-formaldeídos", possuem excelente resistência ao calor e estabilidade dimensional e são de custo relativamente baixo para moldar e conformar.

Existem muitos plásticos fenólicos, desde os de mais baixo custo, constituídos de componentes de baixo custo com substâncias de enchimento tais como farinha ou felpa de madeira, para emprego sem grande responsabilidade, até os tipos de custo mais elevado, com maior resistência ao choque, para emprego em componentes estruturais ou elétricos. Desse modo, o campo de aplicações dos fenólicos é muito amplo: agitadores de máquinas de lavar, rodas, blocos de fusíveis, componentes de ignição e de aparelhos elétricos, carcaças de rádios e televisores, carcaças de motores etc.

Poliésteres

É um material rapidamente "curado" pelo calor. A denominação "poliester" é empregada para descrever uma categoria de plásticos obtidos por meio de uma reação de condensação entre polialcool e um ácido policarboxílico. Um dos tipos, em forma de fibra sintética, é conhecido pelo nome de "Terylene".

Como a maioria dos plásticos termoestáveis, sua resistência à ação de solventes, à ação do tempo, à ação do calor e de esforços mecânicos é excelente.

Entre as aplicações mais importantes dos poliésteres, podem ser mencionadas as seguintes: reforçados com

vidro, em automóveis esportivos e em barcos; em tanques de armazenamento de óleo, água e certos produtos químicos; em tubos reforçados; em móveis, malas e objetos decorativos; assentos, cabos de objetos de cutelaria; em chassis de máquinas domésticas; caixas de máquinas de escrever ou aparelhos de escritório; em armários de escritório; na forma de fibras, em correias transportadoras, correias em V, mangueira, pneus e tecidos revestidos para roupa de proteção; em encerados; em filmes para isolamento elétrico; em componentes elétricos e mecânicos, como engrenagens, buchas, mancais, conectores, caixas de chaves elétricas etc.

Epóxis

São mais conhecidos como adesivos, de custo elevado e, portanto, aconselháveis em aplicações onde se desejam qualidades superiores, como elétricas e mecânicas, baixa absorção de umidade, além de facilidade de processamento. A máxima temperatura de serviço é cerca de 270°C.

Se reforçados com fibras de vidro, atingem a máxima resistência possível em materiais plásticos de 110 a 175 kgf/mrn².

Aplicações usuais incluem: componentes estruturais de aviões, moldes elétricos, componentes eletrônicos etc.

Silicones

Esses materiais não são hidrocarbonetos, porque os polímeros são constituídos de monômeros em que átomos de oxigênio estão ligados a átomos de silício. Sua estrutura é semelhante à do quartzo, de modo que as peças moldadas caracterizam-se por estabilidade térmica excepcional: a máxima temperatura para serviço contínuo é de aproximadamente 260°C para os tipos comuns e de 370° a 480°C para tipos especiais.

Outros característicos são: resistência dielétrica elevada, absorção de umidade baixa, resistência ao ataque por ácidos e produtos de petróleo, boa e razoável resistência à tração e ao choque. Essas duas últimas propriedades podem ser muito melhoradas pela adição de substâncias de enchimento e de reforço.

Como são de custo elevado, suas aplicações são feitas para condições críticas de serviço, tais como: componentes de aviões para alta temperatura de serviço, na indústria aeroespacial e na indústria eletrônica.

3.3. Processos de fabricação de peças em material plástico

A matéria-prima para a fabricação de plásticos corresponde a polímeros, na forma líquida, pulverizada ou pelletizada.

Um dos processos mais utilizados na fabricação de peças é o da moldagem por injeção, em que um embolo ou pistão, movimentando-se rapidamente para a frente e para trás, empurra o plástico aquecido e amolecido através de um espaço entre as paredes do cilindro e um "torpedo" aquecido, localizado no centro do cilindro. Sob pressão, o polímero torna-se suficientemente fluido para escorrer no interior do molde. A

temperatura da câmara de injeção pode atingir 250°C e a pressão 2.100 kgf/cm².



Figura 126: Máquina Injetora de Plásticos.

Em tempo relativamente curto, a peça moldada solidifica e esfria o suficiente para ser retirada.

Esse processo possibilita a produção de uma peça cada 10 a 30 segundos, embora peças maiores possam exigir tempo mais longo.

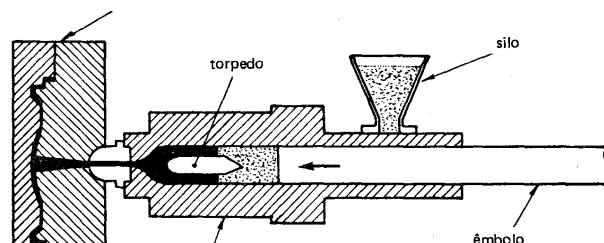


Figura 127: Representação do processo de injeção.

Outro processo, um dos mais antigos e utilizados, é o de compressão. Neste processo, um volume predeterminado de pó do plástico é colocado na cavidade do molde, constituído de duas metades - macho e fêmea, ambas aquecíveis e resfriáveis. Fechado o molde, aplica-se a pressão através da parte "macho"; a pressão pode variar entre 100 e 500 kgf/cm². A operação é conduzida em prensas especiais. A aplicação simultânea de calor e pressão amolece o pó que flui dentro da cavidade fêmea do molde, conformando-o de acordo com a forma desta. Um exemplo de molde de compressão empregado no processo está representado na Figura 128.

Um terceiro processo corresponde ao de extrusão, de certo modo semelhante ao de injeção. Um silo contém o material em grânulos ou pó. A câmara de moldagem é aquecida e o polímero amolecido pelo calor começa a escoar, mediante o emprego de um parafuso rotativo contínuo, sendo assim dirigido ao molde de extrusão.

Deste, ele sai ainda no estado pastoso, como uma pasta de dentes, e como o bocal da matriz de extrusão tem a mesma forma do produto desejado, a produção é contínua e as peças são cortadas no comprimento desejado. O processo permite produzir peças de grande comprimento.

Outros processos incluem: moldagem rotativa, que permite produzir peças grandes e de forma complexa; moldagem por insuflação, para produzir peças ocas, como garrafas e recipientes; processos de revestimento de metal por plástico; processos de calandragem, semelhante laminação, para produzir plásticos em chapas e folhas; processos de fusão, em que o material liquefeito é colocado no interior do

molde onde solidifica; processos de conformação a partir de chapas de resina, amolecidas por aquecimento e forçadas de encontro a um molde fixo: a folha adquire a forma dos contornos do molde. Por esse processo, obtêm-se revestimentos para refrigeradores, armários e grandes seções de peças produzidas por estampagem profunda.

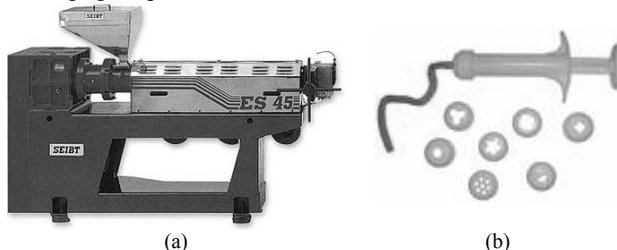


Figura 128: (a) Extrusora e (b) Exemplificação da operação: "seringa".

4. Materiais Cerâmicos

Os cerâmicos constituem um grupo muito extenso de materiais para fins de construção. De um modo geral, os principais característicos dos materiais cerâmicos são os seguintes:

- são de natureza cristalina; contudo, como o número de elétrons livres é pequeno, sua condutibilidade elétrica é nula ou muito pequena;
- seu ponto de fusão é elevado, o que os torna refratários, ou seja, apresentam estabilidade a temperaturas elevadas;
- possuem grande resistência ao ataque químico;
- são muito duros, os mais duros entre os materiais industriais;

Os componentes dos materiais cerâmicos são elementos metálicos, como alumínio, silício, magnésio, berílio, titânio e boro e não-metálicos como oxigênio, carbono e nitrogênio.

Por outro lado, os cerâmicos podem ser constituídos de uma única fase; exemplos: alumina (Al_2O_3) e magnésia (MgO) ou são de fase múltipla, em que há mais de um componente. Alguns outros componentes cerâmicos são boretos, nitretos, carbonetos e silicetos.

As técnicas de produção de materiais cerâmicos assemelham-se muito à técnica da metalurgia do pó.

As principais etapas de fabricação são as seguintes:

-a) preparação dos ingredientes para conformação. Esses ingredientes estão geralmente na forma de partículas ou pó. A mistura é feita seca ou úmida;

-b) conformação, a qual pode ser feita no estado líquido, semilíquido ou úmido ou sólido, nas condições fria ou quente. No caso líquido, prepara-se uma espécie de lama que é vasada em moldes porosos (de gesso geralmente), os quais absorvem o líquido, deixando uma camada de material sólido na superfície do molde. Como ocorre contração, mais lama é adicionada, até obter-se a forma desejada. Por esse método, pode-se produzir peças circulares, mediante a rotação dos moldes, como na fundição por centrifugação. Nos casos semilíquido ou sólido, utiliza-se conformação por pressão. A conformação sólida (com teor de umidade até 5%) é empregada para a fabricação de isoladores elétricos, certos tipos de refratários e peças

cerâmicas para a indústria eletrônica. A pressão utilizada é elevada e os moldes são metálicos. Na conformação semilíquida ou úmida, com teores de água que podem chegar a 20%, as pressões são mais baixas e os moldes de menor custo. Emprega-se ainda o processo de compressão isostática, para a produção de óxidos cerâmicos de alta qualidade, em peças como isoladores de velas de ignição. Outro processo, relativamente recente, é a compressão a quente, que permite obter peças de alta densidade e de melhores propriedades mecânicas. A conformação pode ser ainda feita por extrusão, processo que possibilita a fabricação de produtos cerâmicos de argila, como tijolos e telhas.

-c) secagem e cozimento, para remoção de água e obtenção da resistência final necessária.



Figura 129: Secagem

A secagem deve ser muito cuidadosa, porque excessiva secagem pode resultar em rápida contração que leva ao empenamento e mesmo fissuração.

As peças de cerâmica de baixo custo e menor responsabilidade são geralmente deixadas secar em ambiente normal, protegido contra as intempéries.

Esse problema de secagem não existe no caso de peças de qualidade, pois as mesmas são geralmente produzidas a partir de pós secos.

O cozimento ou sinterização é levado a efeito a temperaturas que variam de acordo com a composição do material e das propriedades finais desejadas.

A temperatura máxima do processo é chamada "temperatura de amadurecimento".

A secagem deve ser muito cuidadosa, porque excessiva secagem pode resultar em rápida contração que leva ao empenamento e mesmo fissuração.

As peças de cerâmica de baixo custo e menor responsabilidade são geralmente deixadas secar em ambiente normal, protegido contra as intempéries.

Esse problema de secagem não existe no caso de peças de qualidade, pois as mesmas são geralmente produzidas a partir de pós secos.

O cozimento ou sinterização é levado a efeito a temperaturas que variam de acordo com a composição do material e das propriedades finais desejadas.

A temperatura máxima do processo é chamada "temperatura de amadurecimento".

4.1. Propriedades dos Materiais Cerâmicos

Como já foi mencionado, são frágeis e sua resistência à tração é baixa, raramente ultrapassando 17 kgf/mm². Sua resistência à compressão é, contudo, muito mais elevada, cinco a dez vezes maior que a resistência à tração.

Devido a sua fragilidade, não apresentam ductilidade e, por isso mesmo, sua resistência ao choque é baixa.

São extremamente rígidos. Seu módulo de elasticidade pode atingir valores da ordem de 45.500 kgf/mm², em comparação com cerca de 20.000 kgf/mm² para o aço.

Como são muito duros, são muito úteis para peças resistentes ao desgaste, para abrasivos e ferramentas de corte.

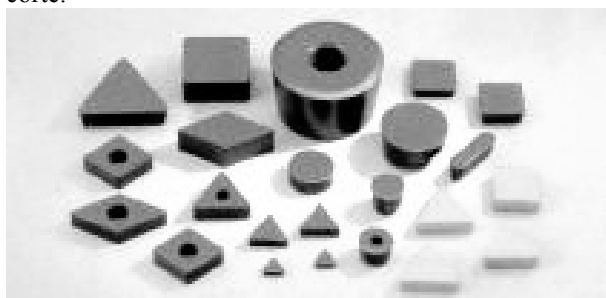


Figura 130: Ferramentas de corte cerâmicas.

Seu ponto de fusão é muito elevado: a alumina, por exemplo, funde a temperaturas acima de 1.900°C.

A condutibilidade térmica varia muito entre os vários grupos, dependendo da composição, estrutura cristalina e textura. As estruturas cristalinas simples apresentam geralmente maior condutibilidade térmica.

A dilatação térmica varia igualmente conforme os tipos, mas é baixa quando comparada com metais e materiais plásticos.

Todos os materiais cerâmicos possuem excelente resistência à ação de agentes químicos. Assim são relativamente inertes a todas as substâncias químicas, exceto ácido hidrofúorídrico e algumas soluções cáusticas quentes. Não são afetados por solventes orgânicos.

Não são condutores de eletricidade.

A densidade é comparável a dos grupos de metais leves, variando de 2 a 3 g/cm³.

4.2. Tipos de Materiais Cerâmicos

O número de materiais cerâmicos utilizados na indústria é muito grande, sobretudo como refratários e em aplicações de resistência ao desgaste, aplicações nas indústrias química e elétrica.

Recentemente, vários tipos mais sofisticados foram desenvolvidos para empregos em condições de temperaturas muito elevadas, como em turbinas a gás, motores a jato, reatores nucleares e aplicações semelhantes.

A maior diferença entre os tipos comuns de materiais cerâmicos e os tipos mais sofisticados consiste no fato que estes últimos não possuem uma matriz vídrea. Neles, durante o processo de sinterização, as partículas finas de material cerâmico são ligadas por reações

superficiais sólidas, que originam uma ligação cristalina entre as partículas individuais.

A seguir serão, resumidamente, enumerados, os principais tipos de materiais cerâmicos:

-Faiança e porcelana: São obtidas a partir de misturas de argila, quartzo, feldspato, caolin e outros materiais. São produtos altamente vitrificados; a porcelana apresentando maior vitrificação que a faiança e é de cor branca. São empregadas nas indústrias química e elétrica. Neste último caso, compreendem os tipos de baixa voltagem e de alta voltagem, estes últimos para voltagens acima de 500 volts e que resistem a condições climáticas muito severas. Devido a sua resistência química, são muito empregadas nas indústrias químicas e de processamento, em tanques, condensadores, tubulações, bobinas de resfriamento, filtros, misturadores, bombas, câmaras de reatores etc.

-Refratários comuns: São obtidos a partir de argilas e os tipos mais comuns são alumina-sílica (óxido de alumínio e dióxido de silício). As composições variam desde quase sílica pura até quase alumina pura. Podem conter algumas impurezas como óxidos de ferro e magnésio e pequenas quantidades de óxidos metálicos alcalinos.

Outros refratários comerciais são: sílica, forsterita, magnesita, dolomita, carboneto de silício e zircônio.

-Óxidos: São do tipo simples, ou seja, que contêm apenas um único elemento metálico ou do tipo misto ou complexo, que contém dois ou mais elementos metálicos.

As Tabelas seguintes indicam as propriedades desses materiais. Os valores apresentados são apenas típicos, pois cada um dos materiais pode ser obtido em condições diferentes de composição, porosidade e microestrutura.

O mais importante desta classe é o óxido de alumínio - alumina. Custo relativamente baixo e propriedades mecânicas idênticas ou melhores do que as da maioria dos outros óxidos.

Possui ainda excelente resistividade elétrica e dielétrica e é resistente à ação de muitas substâncias químicas, do ar, vapor de água e atmosferas sulfurosas.



Figura 131: Isoladores.

É empregado como isoladores elétricos, em aplicações químicas e aeroespaciais e em componentes resistentes à abrasão como guias de máquinas têxteis, varetas de êmbolos de bombas, revestimentos de calhas, furos de descargas, matrizes e mancais.

O óxido de zircônio - zirconia - apresenta-se em vários tipos: óxido puro monoclinico, forma estabilizada

cúbica e outros. A zircônia estabilizada possui alta temperatura de fusão (cerca de 2.760°C), baixa condutibilidade térmica e resiste bem à ação de atmosferas oxidantes e redutoras e de muitos agentes químicos. Algumas formas de zircônia estabilizada são

utilizadas em recipientes e equipamentos em contato com metais líquidos. A zircônia monoclinica, do tipo nuclear, é empregada em elementos combustíveis nucleares, componentes de reatores e aplicações similares.

Tabela 27: Propriedades típicas de alguns óxidos cerâmicos

Propriedade	Alumina	Berila	Magnesia	Zircônia	Tória
Ponto de fusão °C	2037,7	2549	2799	2615	3315
Módulo de elasticidade sob tração [kgf/mm ²]	45.500	24.500	28.000	21.000	14.000
Resistência a tração [kgf/mm ²]	26,6	9,8	14	14,7	5,25
Resistência a compressão [kgf/mm ²]	224	210	84	210	140
Microdureza Knoop	3.000	1.300	700	1.100	700
Máxima temperatura de serviço (em atmosfera oxidante) [°C]	1949	2399	2399	2499	2699

Vidro: O vidro origina-se da fusão da sílica - SiO₂ - cristalina. Essa fusão forma um líquido viscoso cuja ligação não apresenta as características muito regulares dos sólidos cristalinos. Em resumo, ao contrário de outros materiais cerâmicos, o vidro é uma substância não-cristalina. Para sua fabricação, parte-se de uma mistura de sílica e outros óxidos, a qual é fundida e resfriada de modo a resultar uma condição rígida. De qualquer modo, a estrutura do vidro é tridimensional e os átomos ocupam posições definidas. A produção de produtos de vidro compreende quatro etapas:

- 1. Fusão e refino;
- 2. Conformação;
- 3. Tratamento térmico;
- 4. Acabamento.

Além dos materiais básicos, emprega-se também sucata de vidro ou material rejeitado. Os fornos de fusão são de natureza contínua e a temperatura de fusão situa-se em torno de 1.500°C. O vidro fundido é retirado continuamente do forno e levado a área de trabalho, onde é conformado a temperaturas em torno de 1.000°C.



Figura 132: Conformação do vidro por sopragem.

Os métodos de conformação incluem:

-Sopragem ou insuflação, para a fabricação de peças ocas, como garrafas. Ar é utilizado como elemento de insuflação;

-Compressão, que é o método de mais baixo custo. Utiliza-se uma prensa rotativa, dotada de moldes onde o vidro pastoso é colocado e submetido a pressão para obter-se a forma desejada. Por esse processo,

fabricam-se produtos de mesa e fogão, isoladores, lentes e refletores;

-Estiramento, para a fabricação de peças tubulares ou barras de vidro. No primeiro caso, força-se o vidro líquido a passar em torno de um mandril cônico de metal ou material cerâmico e sopra-se ar através do centro do mandril. Por estiramento ou laminação, produz-se chapas de vidro;

-Fundição, restrita a formas simples e de grandes dimensões. É o método mais difícil de conformação do vidro.

O tratamento térmico consiste em duas operações: recozimento e têmpera.

O **recozimento** tem por objetivo eliminar as tensões que se desenvolvem no resfriamento do vidro, após a conformação, até a temperatura ambiente e consiste em aquecer-se o vidro até a faixa de temperaturas de recozimento, manutenção nessa temperatura durante um determinado período de tempo e resfriamento lento até a temperatura ambiente.

A **têmpera**, no caso dos produtos de vidro, consiste no seu aquecimento a uma temperatura em torno do ponto de amolecimento, seguido de resfriamento rápido com jatos de ar ou mergulhando as peças em óleo.

Resulta um material com uma camada superficial rígida sob compressão e uma interior sob tração, com o que, quando em serviço, as tensões de compressão das camadas externas resistem as tensões de tração, resultando uma resistência geral maior.

Os vidros temperados são de três a cinco vezes mais resistentes que o vidro recozido, sem perder sua claridade inicial, nem sua dureza, nem o coeficiente de dilatação.

Finalmente, o acabamento consiste em operações de polimento, por exemplo, com ácido hidrófluídrico; em coloração, pelo cobre ou compostos de prata; em metalização, para decoração ou conferir condutibilidade elétrica; acabamento mecânico, como esmerilhamento para eliminar cantos vivos etc.

Os principais tipos de vidros são os seguintes:

-Vidros da família soda-cal, que são os mais antigos, de menor custo, de mais fácil conformação e mais utilizados. São empregados em janelas comuns, garrafas, copos etc. Sua resistência à corrosão é razoável e podem ser utilizados até temperaturas de

cerca de 460°C (no estado recozido) e 250°C (no estado temperado);

-Vidros ao chumbo, com teores de chumbo de baixos a altos, de alta resistividade elétrica e custo relativamente baixo. Utilizados em diversos componentes óticos, em tubulações de sinalização de neônio e em hastes de lâmpadas elétricas etc.;

-Vidros ao silicato de boro, de excelente durabilidade química, resistência ao calor e ao choque térmico e de baixo coeficiente de dilatação térmica. Um dos tipos mais comuns é conhecido com o nome de Pirex, que possui o coeficiente de dilatação mais baixo. Há o tipo para vedação, empregado em vedações de vidro-metal; um dos produtos mais conhecidos

denomina-se Kovar. Há, ainda, os tipos óticos, caracterizados por elevado coeficiente de transmissão da luz e boa resistência à corrosão. Seu emprego abrange diversos campos: vedações, visores, medidores, tubulações, espelhos de telescópios, tubos eletrônicos, vidros de laboratório, vidros de fornos, etc.;

Outros tipos de vidros incluem vidros boratados (não silicatados), vidros coloridos, vidros de segurança (compostos de duas ou mais camadas de vidro com uma ou mais camadas de plástico transparente, geralmente vinil), vidros fotossensíveis, vidros revestidos etc.

Bibliografia

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H., **Engineering Materials- An Introduction to Their Properties and Applications**, Pergamon Press, Oxford, 1981.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H., **Engineering Materials 2- An Introduction to Microstructures, Processing and Design**, Pergamon Press, Oxford, 1988.

BRESCIANI FILHO, E., **Seleção de metais não ferrosos**, 2ª edição, editora da Unicamp, 1997.

CALLISTER, JR., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2002.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 5ª ed., SP., 1982.

Metals Handbook, Vol. 1 - **Properties and Selection: Irons and Steels**, ASM, M. Part, 9th ed., 1978.

Metals Handbook, Vol. 3 – **Properties and Selection: Stainless Steels**, ASM , M. Park, 9a Ed., 1980.

PADILHA, A.F., GUEDES, L., **Aço Inoxidáveis Austeníticos**, Ed. Usp, S.P., 1994.

ANEXO I

Tomando-se como padrão uma mistura de dois elementos (1 e 2) e o elemento 1 como sendo o solvente, ou seja, presente em maior quantidade.

• **Determinação da porcentagem em peso:**

Para o elemento 1:

$$C_1^{\text{peso}} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100 \quad [01]$$

Para o elemento 2:

$$C_2^{\text{peso}} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \times 100 \quad [02]$$

• **Determinação da porcentagem atômica:**

Para o elemento 1:

$$C_1^{\text{atômico}} = \frac{n_1^{\text{moles}}}{n_1^{\text{moles}} + n_2^{\text{moles}}} \times 100 \quad [03]$$

Para o elemento 2:

$$C_2^{\text{atômico}} = \frac{n_2^{\text{moles}}}{n_1^{\text{moles}} + n_2^{\text{moles}}} \times 100 \quad [04]$$

O número de moles para os elementos pode ser determinado conforme segue:

Para o elemento 1:

$$n_1^{\text{moles}} = \frac{m_1}{A_1} \quad [05]$$

Para o elemento 2:

$$n_2^{\text{moles}} = \frac{m_2}{A_2} \quad [06]$$

• **Conversões entre Composições:**

Para o elemento 1:

$$C_1^{\text{peso}} = \frac{C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1}{(C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1) + (C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2)} \times 100 \quad [07]$$

e

$$C_1^{\text{atômico}} = \frac{C_1^{\text{peso}} \cdot A_2}{(C_1^{\text{peso}} \cdot A_2) + (C_2^{\text{peso}} \cdot A_1)} \times 1000 \quad [08]$$

Para o elemento 2:

$$C_2^{\text{peso}} = \frac{C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2}{(C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1) + (C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2)} \times 100 \quad [09]$$

e

$$C_2^{\text{atômico}} = \frac{C_2^{\text{peso}} \cdot A_1}{(C_1^{\text{peso}} \cdot A_2) + (C_2^{\text{peso}} \cdot A_1)} \times 100 \quad [10]$$

Uma vez que estamos considerando apenas 2 elementos, os cálculos envolvendo as equações anteriores podem ser simplificados quando se observa que:

$$C_1^{\text{peso}} + C_2^{\text{peso}} = 100 \quad [11]$$

e

$$C_1^{\text{atômico}} + C_2^{\text{atômico}} = 100 \quad [12]$$

Além disso, alguma vezes se torna necessário converter a concentração de porcentagem em peso para a massa

de um componente por unidade de volume do material, assim:

Para o elemento 1:

$$C_1^{\text{peso/volume}} = \frac{C_1^{\text{peso}}}{\frac{C_1^{\text{peso}}}{\rho_1} + \frac{C_2^{\text{peso}}}{\rho_2}} \times 1000 \quad [13]$$

e

$$C_2^{\text{peso/volume}} = \frac{C_2^{\text{peso}}}{\frac{C_1^{\text{peso}}}{\rho_1} + \frac{C_2^{\text{peso}}}{\rho_2}} \times 1000 \quad [14]$$

Nestas considerações utiliza-se densidade em g/cm³, e o resultado das composições é em kg/m³.

Ocasionalmente desejamos calcular a densidade e o peso atômico de uma liga binária sendo dada a composição em termos da porcentagem em peso ou da porcentagem atômica, assim:

Para a densidade da liga:

$$\rho_{\text{liga}} = \frac{100}{\frac{C_1^{\text{peso}}}{\rho_1} + \frac{C_2^{\text{peso}}}{\rho_2}} \quad [15]$$

e

$$\rho_{\text{liga}} = \frac{(C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1) + (C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2)}{\frac{C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1}{\rho_1} + \frac{C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2}} \quad [16]$$

Para o peso atômico da liga:

$$A_{\text{liga}} = \frac{100}{\frac{C_1^{\text{peso}}}{A_1} + \frac{C_2^{\text{peso}}}{A_2}} \quad [17]$$

e

$$A_{\text{liga}} = \frac{(C_1^{\text{atômico}} \cdot A_1) + (C_2^{\text{atômico}} \cdot A_2)}{100} \quad [18]$$

Interessante observar que as equações 13 até 18 não são propriamente exatas. Para o desenvolvimento destas supõe-se que o volume total da liga seja exatamente igual a soma dos volumes individuais de cada componente. Normalmente, este não é o caso para a maioria das ligas no entanto, esta é uma hipótese razoavelmente válida e não leva a erros significativos quando aplicada a soluções diluídas e ao longo de faixas de composição onde existem soluções sólidas.

SÍMBOLO	NOMENCLATURA	UNIDADE
C^{peso}	Concentração	% em peso
$C^{\text{atômico}}$	Concentração	% atômica
m	Peso ou massa do elemento	gramas
n^{moles}	Número de moles	Mol
A	Peso atômico do elemento	u.m.a.
$C^{\text{peso/volume}}$	Concentração em peso por unidade de volume do material	kg/m ³
ρ	densidade	g/cm ³

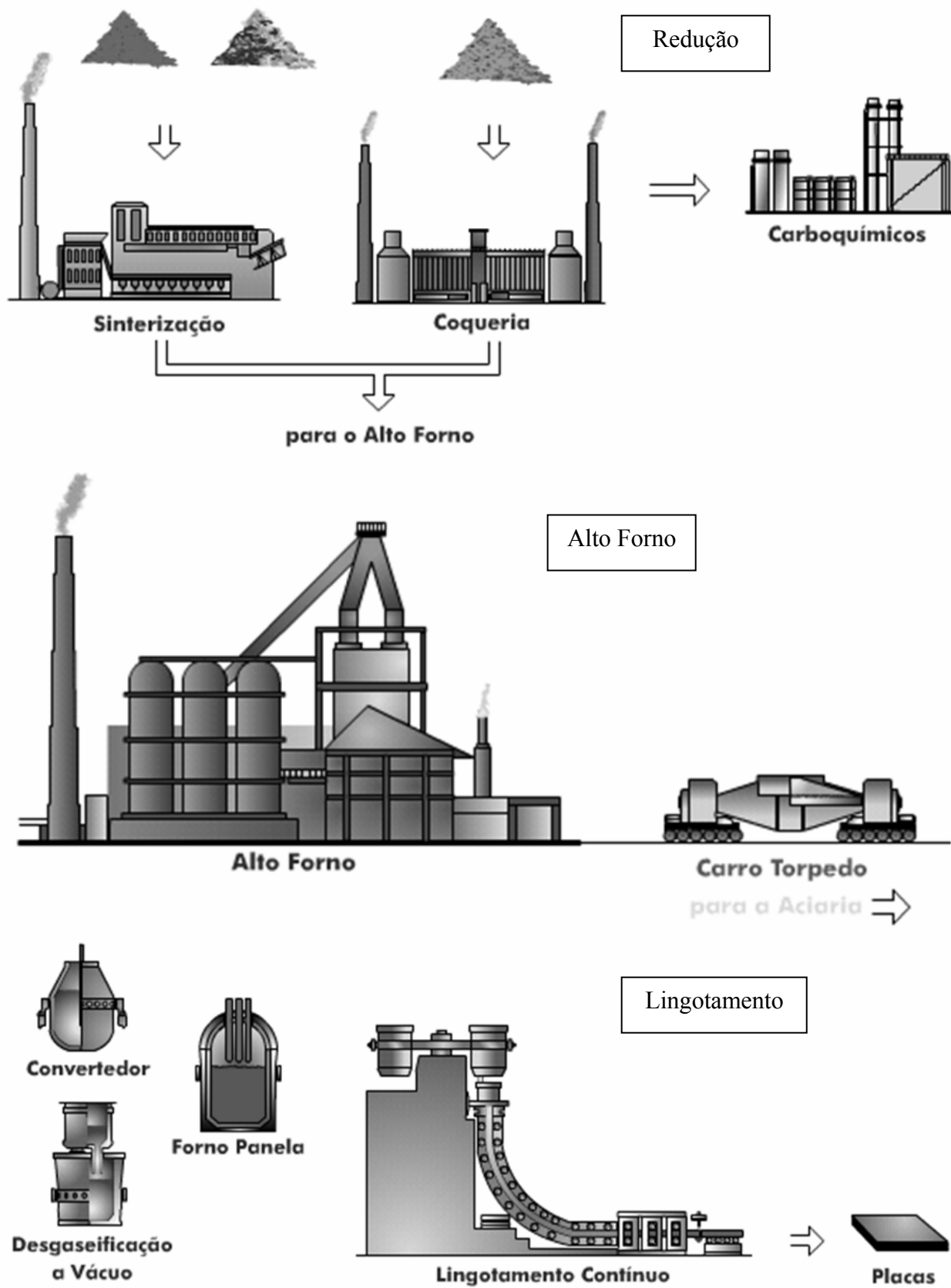
ANEXO II
Elementos Químicos e suas propriedades

Elemento	Símbolo	Inglês	Número Atômico	Peso atômico (u.m.a.)	Densidade do Sólido* (g/cm ³)	Estrutura Cristalina*	Raio Atômico (nm)	Valência Mais Comum	Ponto de Fusão (°C)
Alumínio	Al	<i>Aluminum</i>	13			CFC			
Argônio	Ar	<i>Argon</i>	18			-		Inerte	
Bário	Ba	<i>Barium</i>	56			CCC			
Berílio	Be	<i>Beryllium</i>	4			HC			
Boro	B	<i>Boron</i>	5			Romboédrica			
Bromo	Br	<i>Bromine</i>	35			-			
Cádmio	Cd	<i>Cadmium</i>	48			HC			
Cálcio	Ca	<i>Calcium</i>	20			CFC			
Carbono	C	<i>Carbon</i>	6			Hexagonal			
Césio	Cs	<i>Cesium</i>	55			CCC			
Chumbo	Pb	<i>Lead</i>	82			CFC			
Cloro	Cl	<i>Chlorine</i>	17			-			
Cobalto	Co	<i>Cobalt</i>	27			HC			
Cobre	Cu	<i>Cooper</i>	29			CFC			
Cromo	Cr	<i>Chromium</i>	24			CCC			
Enxofre	S	<i>Sulfur</i>	16			Ortorrômbica			
Estanho	Sn	<i>Tin</i>	50			Tetragonal			
Ferro	Fe	<i>Iron</i>	26			CCC			
Flúor	F	<i>Fluorine</i>	9			-			
Fósforo	P	<i>Phosphorus</i>	15			Ortorrômbica			
Gálio	Ga	<i>Gallium</i>	31			Ortorrômbica			
Germânio	Ge	<i>Germanium</i>	32			Cúbica Dir.			
Hélio	He	<i>Helium</i>	2			-		Inerte	-272***
Hidrogênio	H	<i>Hydrogen</i>	1			-			
Iodo	I	<i>Iodine</i>	53			Ortorrômbica			
Lítio	Li	<i>Lithium</i>	3			CCC			
Magnésio	Mg	<i>Magnesium</i>	12			HC			
Manganês	Mn	<i>Manganese</i>	25			Cúbica			
Mercúrio	Hg	<i>Mercury</i>	80			-			
Molibdênio	Mo	<i>Molybdenum</i>	42			CCC			
Neônio	Ne	<i>Neon</i>	10			-		Inerte	
Nióbio	Nb	<i>Niobium</i>	41			CCC			
Níquel	Ni	<i>Nickel</i>	28			CFC			
Nitrogênio	N	<i>Nitrogen</i>	7			-			
Ouro	Au	<i>Gold</i>	79			CFC			
Oxigênio	O	<i>Oxygen</i>	8			-			
Platina	Pt	<i>Platinum</i>	78			CFC			
Potássio	K	<i>Potassium</i>	19			CCC			
Prata	Ag	<i>Silver</i>	47			CFC			
Silício	Si	<i>Silicon</i>	14			Cúbica Dia.			
Sódio	Na	<i>Sodium</i>	11			CCC			
Titânio	Ti	<i>Titanium</i>	22			HC			
Tungstênio	W	<i>Tungsten</i>	74			CCC			
Vanádio	V	<i>Vanadium</i>	23			CCC			
Zinco	Zn	<i>Zinc</i>	30			HC			
Zircônio	Zr	<i>Zirconium</i>	40			HC			

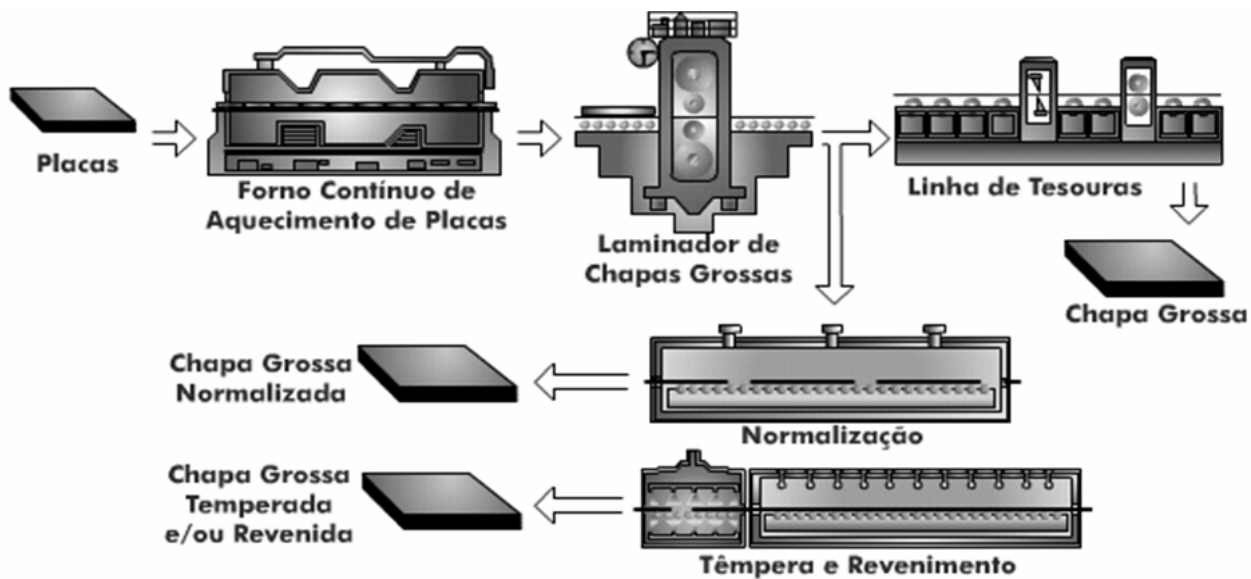
- * Em temperatura ambiente (20°C);
 ** Sublimação (Transição da fase sólida para a fase vapor);
 *** pressão de 26 atm.

USIMINAS

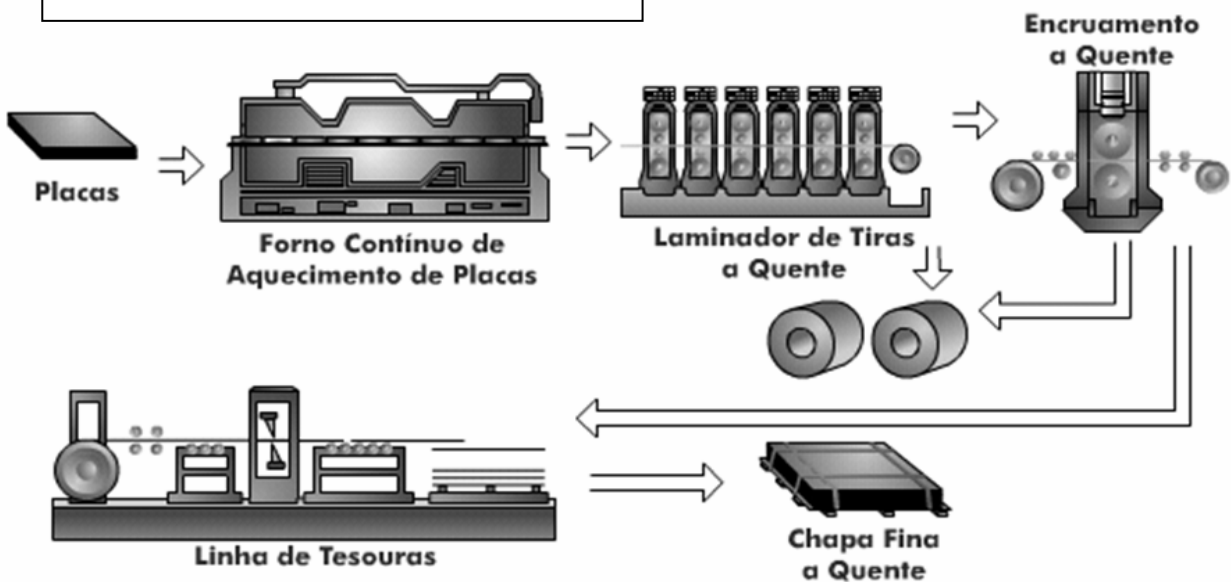
ANEXO III Siderúrgicas



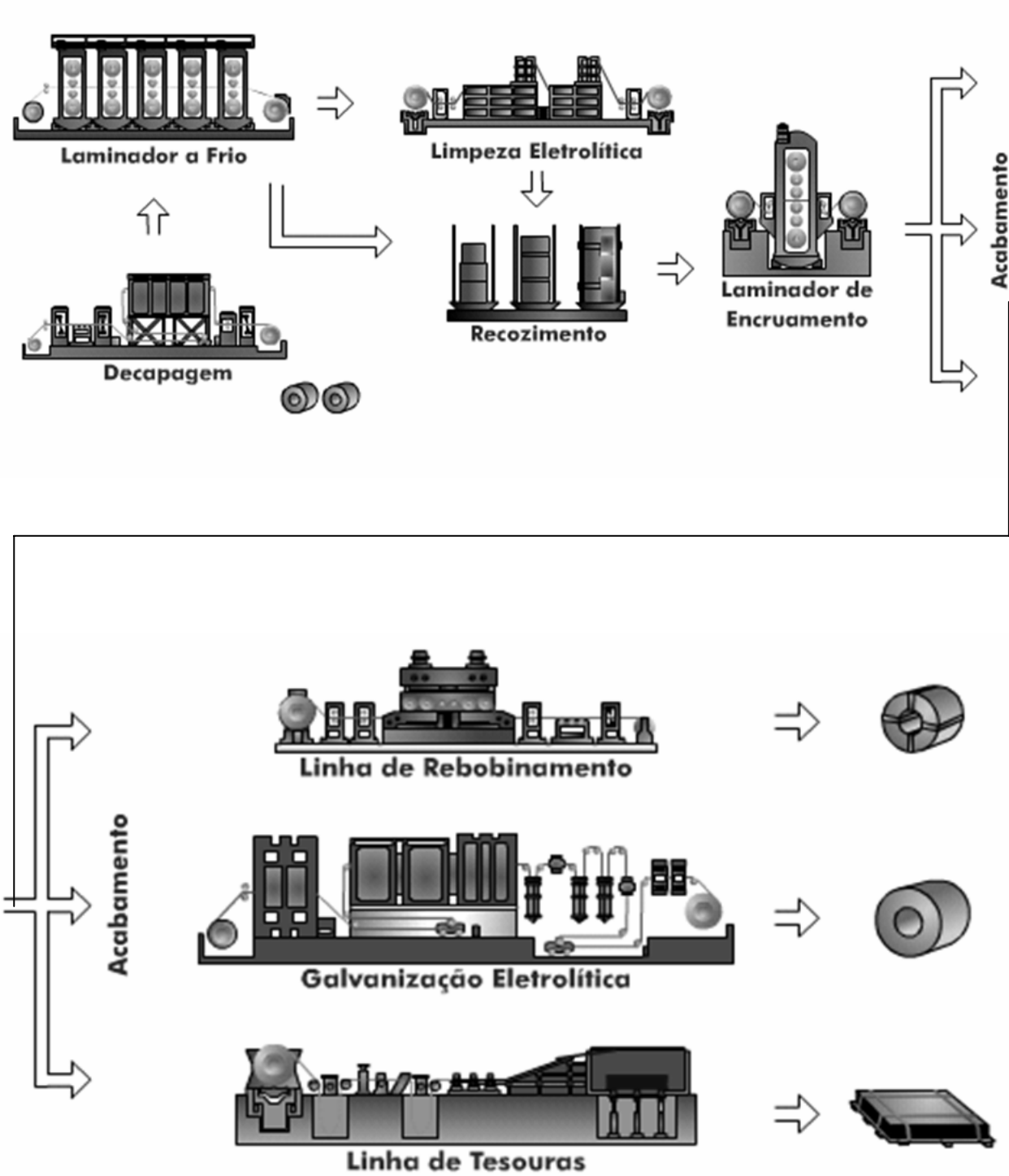
Laminação a Quente – Chapas Grossas



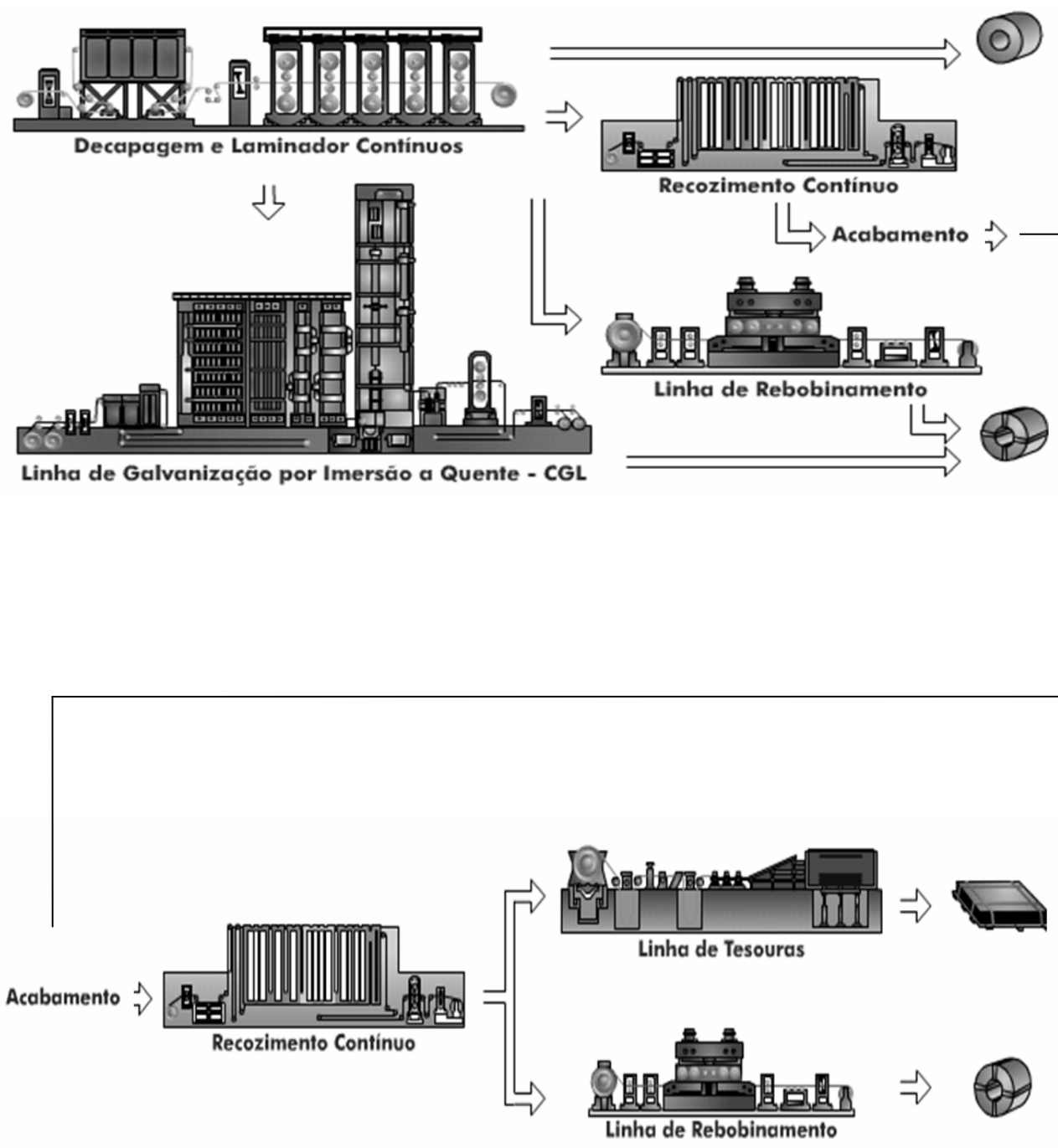
Laminação a Quente – Chapas Finas

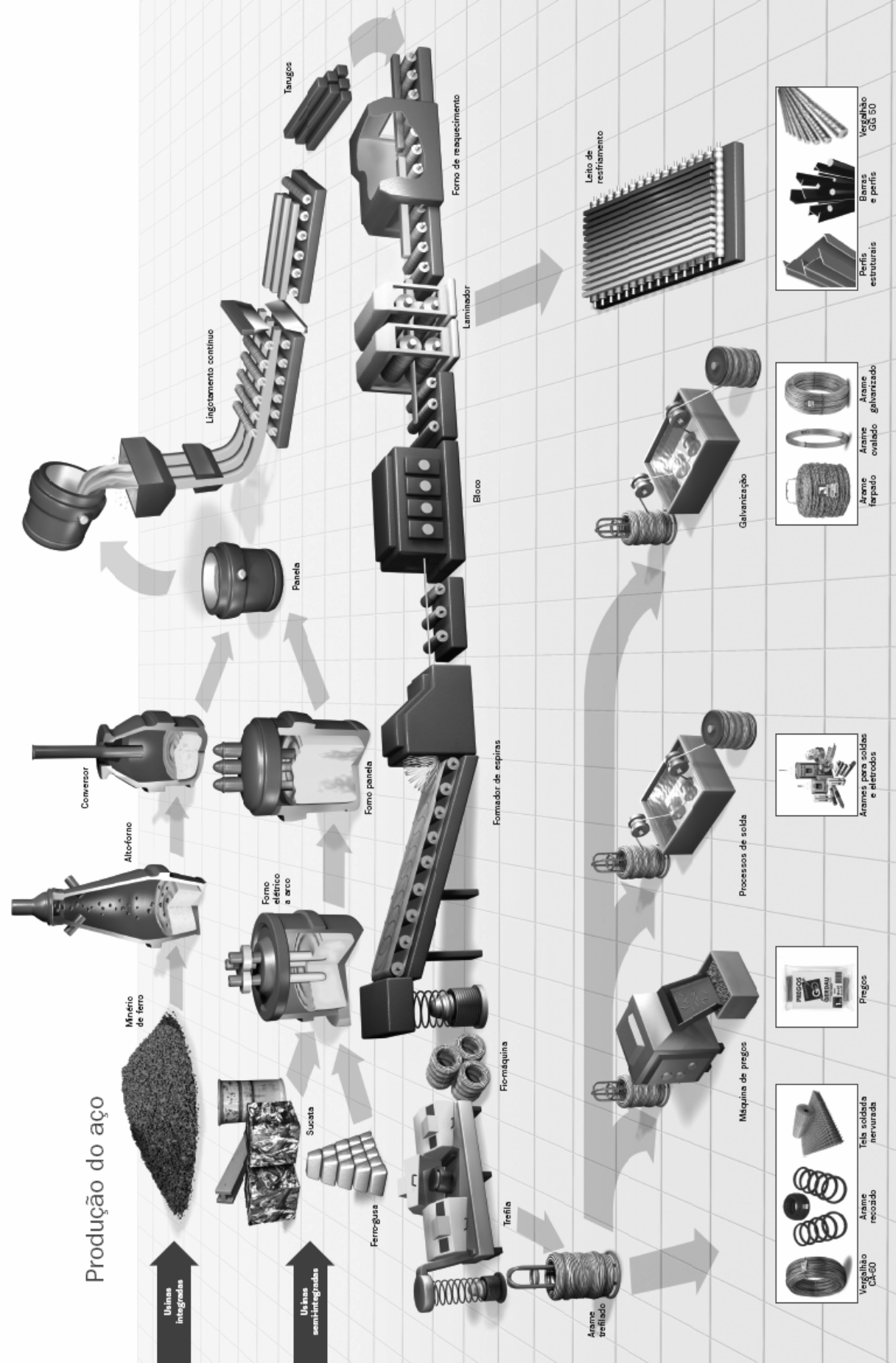


Laminação a Frio 1



Laminação a Frio 2





ANEXO IV
Composição química de Aço Carbono

	C	Mn	P Máx.	S Máx
1005	0,06 Máx.	0,35 Máx.	0,030	0,050
1006	0,08 Máx.	0,25 - 0,40	0,030	0,050
1008	0,10 Máx.	0,30 - 0,50	0,030	0,050
1010	0,08 - 0,13	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1012	0,10 - 0,15	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1015	0,13 - 0,18	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1016	0,13 - 0,18	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1017	0,15 - 0,20	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1018	0,15 - 0,20	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1022	0,18 - 0,23	0,70 - 1,00	0,030	0,050
1023	0,20 - 0,25	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1025	0,22 - 0,28	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1026	0,22 - 0,28	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1029	0,25 - 0,31	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1030	0,28 - 0,34	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1035	0,32 - 0,38	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1038	0,35 - 0,42	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1039	0,39 - 0,44	0,70 - 1,00	0,030	0,050
1040	0,37 - 0,44	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1042	0,40 - 0,47	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1043	0,40 - 0,47	0,70 - 1,00	0,030	0,050
1044	0,43 - 0,50	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1045	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1046	0,43 - 0,50	0,70 - 1,00	0,030	0,050
1049	0,46 - 0,53	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1050	0,48 - 0,55	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1053	0,48 - 0,55	0,70 - 1,00	0,030	0,050
1055	0,50 - 0,60	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1060	0,55 - 0,65	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1065	0,60 - 0,70	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1070	0,65 - 0,75	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1078	0,72 - 0,85	0,30 - 0,60	0,030	0,050
1080	0,75 - 0,88	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1086	0,80 - 0,93	0,30 - 0,50	0,030	0,050
1090	0,85 - 0,98	0,60 - 0,90	0,030	0,050
1095	0,90 - 1,03	0,30 - 0,50	0,030	0,050

Boro: 0,0005 - 0,003%; Cobre: 0,20%

ANEXO V

Composição química de vários tipos de Aços

	C	Mn	P Máx	S Máx	Si	Ni	Cr	Mo	V	B
1117	0,14 - 0,20	1,00 - 1,30	0,030	0,08 - 0,13						
1118	0,14 - 0,20	1,30 - 1,60	0,030	0,08 - 0,13						
1137	0,32 - 0,39	1,35 - 1,65	0,030	0,08 - 0,13						
1140	0,37 - 0,44	0,70 - 1,00	0,030	0,08 - 0,13						
1141	0,37 - 0,45	1,35 - 1,65	0,030	0,08 - 0,13						
1144	0,40 - 0,48	1,35 - 1,65	0,030	0,24 - 0,33						
1146	0,42 - 0,49	0,70 - 1,00	0,030	0,08 - 0,13						
1212	0,13	0,70 - 1,00	0,07 - 0,12	0,16 - 0,23						
1213	0,13	0,70 - 1,00	0,07 - 0,12	0,24 - 0,33						
12L14	0,15	0,85 - 1,15	0,04 - 0,09	0,26 - 0,35						
1215	0,09	0,75 - 1,05	0,04 - 0,09	0,26 - 0,35						
1335	0,33 - 0,38	1,60 - 1,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35					
1340	0,38 - 0,43	1,60 - 1,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35					
1522	0,18 - 0,24	1,10 - 1,40	0,030	0,050						0,0005 - 0,0030
1524	0,19 - 0,25	1,35 - 1,65	0,030	0,050						0,0005 - 0,0030
1526	0,22 - 0,29	1,10 - 1,40	0,030	0,050						0,0005 - 0,0030
1527	0,22 - 0,29	1,20 - 1,50	0,030	0,050						0,0005 - 0,0030
1541	0,36 - 0,44	1,35 - 1,65	0,030	0,050						0,0005 - 0,0030
1548	0,44 - 0,52	1,10 - 1,40	0,030	0,050	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		0,0005 - 0,0030
1552	0,47 - 0,55	1,20 - 1,50	0,030	0,050	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		0,0005 - 0,0030
1566	0,60 - 0,71	0,85 - 1,15	0,030	0,050	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		0,0005 - 0,0030
4047	0,45 - 0,50	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		
4118	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,40 - 0,60	0,08 - 0,15		
4120	0,18 - 0,23	0,90 - 1,20	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,40 - 0,80	0,13 - 0,20		
4130	0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4137	0,35 - 0,40	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4140	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4142	0,40 - 0,45	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4145	0,43 - 0,48	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4150	0,48 - 0,53	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4320	0,17 - 0,22	0,45 - 0,65	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,40 - 0,60	0,20 - 0,30		
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30		
4620	0,17 - 0,22	0,45 - 0,65	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00		0,20 - 0,30		
4820	0,18 - 0,23	0,50 - 0,70	0,030	0,040	0,15 - 0,35	3,25 - 3,75		0,20 - 0,30		
50B46	0,44 - 0,49	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,20 - 0,35				
5120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			0,0005 - 0,0030
5130	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10			
5132	0,30 - 0,35	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,75 - 1,00			
5140	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
5150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
5160	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
51B60	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
52100	0,98 - 1,10	0,25 - 0,45	0,025	0,025	0,15 - 0,35		1,30 - 1,60			0,0005 - 0,0030
6150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10		min 0,15	
8615	0,16 - 0,18	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8617	0,15 - 0,20	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8620	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8622	0,20 - 0,25	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8630	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8640	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8645	0,43 - 0,48	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8720	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,20 - 0,30		
8822	0,20 - 0,25	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,30 - 0,40		
9254	0,51 - 0,59	0,60 - 0,80	0,030	0,040	1,20 - 1,60		0,60 - 0,80			
9260	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,035	0,040	1,80 - 2,20					
1335	0,33 - 0,38	1,60 - 1,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35					
1340	0,38 - 0,43	1,60 - 1,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35					
4023	0,20 - 0,25	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		
4027	0,25 - 0,30	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		
4037	0,35 - 0,40	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		
4047	0,45 - 0,50	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35			0,20 - 0,30		
4118	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,40 - 0,60	0,08 - 0,15		
4120	0,18 - 0,23	0,90 - 1,20	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,40 - 0,80	0,13 - 0,20		
4130	0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4137	0,35 - 0,40	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4140	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4142	0,40 - 0,45	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4145	0,43 - 0,48	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4150	0,48 - 0,53	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	0,15 - 0,25		
4320	0,17 - 0,22	0,45 - 0,65	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,40 - 0,60	0,20 - 0,30		
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30		
4620	0,17 - 0,22	0,45 - 0,65	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00		0,20 - 0,30		
4820	0,18 - 0,23	0,50 - 0,70	0,030	0,040	0,15 - 0,35	3,25 - 3,75		0,20 - 0,30		
50B46	0,44 - 0,49	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,20 - 0,35				
5120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			0,0005 - 0,0030
5130	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10			
5132	0,30 - 0,35	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,75 - 1,00			
5140	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			

	C	Mn	P Máx	S Máx	Si	Ni	Cr	Mo	V	B
5150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
5160	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
51B60	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90			
52100	0,98 - 1,10	0,25 - 0,45	0,025	0,025	0,15 - 0,35		1,30 - 1,60			0,0005 – 0,0030
6150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10		0,15 min.	
8615	0,16 - 0,18	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8617	0,15 - 0,20	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8620	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8622	0,20 - 0,25	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8630	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8640	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8645	0,43 - 0,48	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25		
8720	0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,20 - 0,30		
8822	0,20 - 0,25	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,30 - 0,40		
9254	0,51 - 0,59	0,60 - 0,80	0,030	0,040	1,20 - 1,60		0,60 - 0,80			
9260	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,035	0,040	1,80 - 2,20					

ANEXO VI
Aplicações características de alguns aços, segundo grupo Villares Metals.

Villares	ABNT/SAE/AISI	APLICAÇÕES
4340T	ABNT4340 SAE4340 AISI4340	Virabrequins, Bielas, Engrenagens, Eixos sujeitos a grandes esforços, Peças com boas características mecânicas.
V 52100	ABNT 52100 SAE52100	Machos, Ferramentas para trabalho a frio, Brocas, Alargadores, Ferramentas para repuxo em tornos, Ferramentas para madeira, Componentes de rolamentos, Rolos desempenadores de barras, Roletes, Facas para Aplicações Diversas
V8550	DIN 1.8550 ; W. Nr.1.8550	Virabrequins, Engrenagens, Eixos, Eixos e camisas de cilindros, Eixos de bombas, ,Pinos, Rotores e Excêntricos.
VB20	SAE 8620 ;	Engrenagens, Réguas, Barramentos, Gavetas
VB30	ABNT8630 SAE8630 AISI8630	Bielas, Peças p/ equip. de prod. e perfuração de petróleo, Parafusos, Peças estruturais de avião
VB40	SAE8640 AISI8640	Ferramentas, Virabrequins, Bielas, Juntas ; Engrenagens ; Eixos ;Parafusos ; Pinhões ; Chavetas ; Eixos-Árvore ; Peças p/ equipamento de perfuração
VL40	ABNT4140 SAE 4140	Virabrequins ; Bielas ; Braços ; Juntas ; Engrenagens ; Eixos ; Peças p/ equip. de prod. e perfuração de petróleo
VM40	SAE4340 AISI4340	Engrenagens ; Eixos ;Componentes p/ indústria aeronáutica
VT45	SAE1045 AISI1045	Eixos ; Bases para matrizes ; Peças para indústria automobilística,Ferramentas manuais

ANEXO VII
Composição química de vários tipos de aços inoxidáveis.

MARTENSÍTIOS ABNT/AISI/SAE J405 (TEMPERÁVEIS)
FERRÍTICOS ABNT/AISI/SAE J405 (NÃO TEMPERÁVEIS)
AUSTENÍTICOS ABNT/AISI/SAE J405 (NÃO TEMPERÁVEIS)

AISI	C Máx.	Mn Máx.	Si Máx.	P Máx.	S Máx.	Cr	Ni	Outros Elementos	SAE
403	0,15	1,00	0,50	0,040	0,030	11,50 - 13,00	0,60 máx..		S40300
410	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 - 13,50	0,75 máx.		S41000
414	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 - 13,50	1,25 - 2,50		S41400
416	0,15	1,25	1,00	0,060	0,15 mín.	12,00 - 14,00		Mo 0,60 máx.	S41600
416Se	0,15	1,25	1,00	0,060	0,060	12,00 - 14,00		Se 0,15 mín.	S41623
420	0,15 mín.	1,00	1,00	0,040	0,030	12,00 - 14,00			S42000
420F	0,15 mín.	1,25	1,25	0,060	0,15 mín.	12,00 - 14,00		Mo 0,60 máx.	S42020
420FSe	0,30 - 0,40	1,25	1,00	0,060	0,060	12,00 - 14,00		Se 0,15 mín.	S42023
431	0,20	1,00	1,00	0,040	0,030	15,00 - 17,00	1,25 - 2,50		S43100
440A	0,60 - 0,75	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Mo 0,75 máx.	S44002
440B	0,75 - 0,95	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Mo 0,75 máx.	S44003
440C	0,95 - 1,20	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Mo 0,75 máx.	S44004
440F	0,95 - 1,20	1,25	1,00	0,040	0,10 - 0,35	16,00 - 18,00	0,08	Mo 0,75 máx.	S44020
440FSe	0,95 - 1,20	1,25	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Se 0,15 mín.	S44023
501	0,10 mín.	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00 - 6,00		Mo 0,40 - 0,65	S50100
502	0,10	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00 - 6,00		Mo 0,40 - 0,65	S50200
405	0,08	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 - 14,50	0,60	Al 0,10 - 0,30	S40500
409	0,08	1,00	1,00	0,045	0,030	10,50 - 11,75	0,50	Ti 6xC mín; 0,75 máx.	S40900
429	0,12	1,00	1,00	0,040	0,030	14,00 - 16,00			S42900
430	0,12	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00	0,75		S43000
430F	0,12	1,25	1,00	0,060	0,15 mín.	16,00 - 18,00		Mo 0,60 máx.	S43020
430FSe	0,12	1,25	1,00	0,060	0,060	16,00 - 18,00		Se 0,15 mín.	S43023
434	0,12	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Mo 0,75 - 1,25	S43400
436	0,12	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 - 18,00		Mo 0,75 - 1,25; Cb+Ta 5xC -0,70	S43600
442	0,20	1,00	1,00	0,040	0,030	18,00 - 23,00			S44200
446	0,20	1,50	1,00	0,040	0,030	23,00 - 27,00	0,25		S44600
201	0,15	5,5 - 7,5	1,00	0,060	0,030	16,00 - 18,00	3,50 - 5,50	N 0,25 máx.	S20100
202	0,15	7,5 - 10,0	1,00	0,060	0,030	17,00 - 19,00	4,00 - 6,00	N 0,25 máx.	S20200
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 - 18,00	6,00 - 8,00	N 0,10 máx.	S30100
302	0,15	2,00	0,75	0,045	0,030	17,00 - 19,00	8,00 - 10,00	N 0,10 máx.	S30200
303	0,15	2,00	1,00	0,200	0,15 mín.	17,00 - 19,00	8,00 - 10,00	Mo0,60 máx.	S30300
304	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00 - 20,00	8,00 - 10,50	N 0,10 máx.	S30400
304L	0,03	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00 - 20,00	8,00 - 12,00	N 0,10 máx.	S30403
305	0,12	2,00	0,75	0,045	0,030	17,00 - 19,00	10,50 - 13,00		S30500
308	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 - 21,00	10,00 - 12,00		S30800
309	0,20	2,00	1,00	0,045	0,030	22,00 - 24,00	12,00 - 15,00		S30900
309S	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	22,00 - 24,00	12,00 - 15,00		S30908
310	0,25	2,00	1,50	0,045	0,030	24,00 - 26,00	19,00 - 22,00		S31000
310S	0,08	2,00	1,50	0,045	0,030	24,00 - 26,00	19,00 - 22,00		S31008
314	0,25	2,00	1,50 - 3,00	0,045	0,030	23,00 - 26,00	19,00 - 22,00		S31400
316	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	Mo 2,00 - 3,00	S31600
316L	0,03	2,00	0,75	0,045	0,030	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	Mo 2,00 - 3,00	S31603
317	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00 - 20,00	11,00 - 15,00	Mo 3,00 - 4,00	S31700
347	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	17,00 - 19,00	9,00 - 13,00	Cb 10xC - 1,00	S34700
348	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	17,00 - 19,00	9,00 - 13,00	Cb+Ta10xC -1,00;Ta 0,10 máx.Co 0,20	S34800

ANEXO VIII

Aplicações características de alguns aços inoxidáveis, segundo grupo Villares Metals.

Villares	ABNT:SAE:AISI	APLICAÇÕES
V 304-UF	ABNT 304 – SAE 304 –AISI 304	Aplicações criogênicas em geral, Permutadores de calor, Válvulas e peças de tubulações. Aços p/ Equipamentos Industriais.
V 304L-UF	ABNT 304L - SAE 304L AISI 304L	Aplicações criogênicas em geral Permutadores de calor, Válvulas e peças de tubulações. Aços p/ Equipamentos Industriais.
V 310	ABNT 310 - SAE 310 AISI 310	Peças de fornos. Caixas para cementação, Caixas para recozimento Peças de turbinas a gás; Permutadores de calor; Aquecedores de ar ; Transportadores internos de fornos ;Eletrodos e varetas de solda, Aços p/ Equipamentos Industriais
V 316-UF	ABNT 316 – SAE 316 AISI 316.	Peças e equip. da construção naval; Aplicações criogênicas em geral ; Aços p/ Equipamentos Industriais
V 316L-UF	ABNT 316L – SAE 316L AISI 316L	Peças e equipamentos. da construção naval ; Aplicações criogênicas em geral ; Aços p/ Equipamentos Industriais

ANEXO IX
Equivalência entre aços inoxidáveis.

EUA	Alemanha		França	Japão	Itália	Reino Unido	Europa	Espanha
AISI	DIN 17006	W.N. 17007	AFNOR	JIS	UNI	BSI	EURO-NORM	UNE
201	—	—	—	SUS201	—	—	—	—
301	X12 CrNi 17 7	1.4310	Z12CN 17-07	SUS301	X12 CrNi 1707	301S21	X12 CrNi 17 7	X12 CrNi 17-07
302	X5 CrNi 18 7	1.4319	Z10CN 18-09	SUS302	X10 CrNi 1809	302S25	X10 CrNi 18 9	X10 CrNi 18-09
303	X10 CrNiS 18 9	1.4305	Z10CNF18.09	SUS303	X10 CrNiS 1809	303S21	X10 CrNiS 18 9	X10 CrNiS 18-09
303Se	—	—	Z10CNF18.09	SUS303Se	X10 CrNiS 1809	303S41	—	X10 CrNiS 18-09
304	X5 CrNi 18 10 X5 CrNi 18 12	1.4301 1.4303	Z 6 CN 18-09	SUS304	X5 CrNi 1810	304S15 304S16	X6 CrNi 18 10	X6 CrNi 19-10
304 N	—	—	—	SUS304N1	X5 CrNiN 1810	—	—	—
304 H	—	—	—	SUSF304H	X8 CrNi 1910	—	—	X6 CrNi 19-10
304 L	X2 CrNi 18 11	1.4306	Z 2 CN 18-10	SUS304L	X2 CrNi 1911	304S11	X3 CrNi 18 10	X2 CrNi 19-10
	X2 CrNiN 18 10	1.4311	Z2CN18.10Az	SUS304LN	X2 CrNiN 1811	—	—	—
305	—	—	Z 8 CN 18-12	SUS305	X8 CrNi 1812	305S19	X8 CrNi 18 12	X8 CrNi 18-12
305	—	—	Z6CNU 18-10	SUSXM7	—	—	X6 CrNiCu 18 10 4 Kd	—
309	X15 CrNiS 20 12	1.4828	Z15 CN 24-13	SUH 309	X16 CrNi 2314	309S24	X15 CrNi 23 13	—
309 S	—	—	—	SUS309S	X6 CrNi 2314	—	X6 CrNi 22 13	—
310	X12 CrNi 25 21	1.4845	—	SUH 310	X22 CrNi 2520	310S24	—	—
310 S	X12 CrNi 25 20	1.4842	Z12 CN 25-20	SUS310S	X5 CrNi 2520	—	X6 CrNi 25 20	—
314	X15 CrNiSi 25 20	1.4841	Z12CNS25-20	—	X16 CrNiSi 2520	—	X15 CrNiSi 25 20	—
316	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	Z6CND 17-11	SUS316	X5 CrNiMo 1712	316S31	X6 CrNiMo 17 12 2	X6 CrNiMo 17-12-03
316	X5CrNiMo 17 13 3	1.4436	Z6CND 17-12	SUS316	X5 CrNiMo 1713	316S33	X6 CrNiMo 17 13 3	X6 CrNiMo 17-12-03
316 F	X12CrNiMoS 18 11	1.4427	—	—	—	—	—	—
316 N	—	—	—	SUS316N	—	—	—	—
316 H	—	—	—	SUSF316H	X8 CrNiMo 1712	—	—	X5 CrNiMo 17-12
316 H	—	—	—	—	X8 CrNiMo 1713	—	—	X6 CrNiMo 17-12-03
316 L	X2 CrNiMo 17 13 2	1.4404	Z2CND 17-12	SUS316L	X2 CrNiMo 1712	316S11	X3 CrNiMo 17 12 2	X2 CrNiMo 17-12-03
316 L	X2CrNiMoN 1712 2	1.4406	Z2CND 17-12-Az	SUS316LN	X2 CrNiMoN 1712	—	—	—
316 L	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	Z2CND 17-13	—	X2 CrNiMo 1713	316S13	X3 CrNiMo 17 13 3	X2 CrNiMo 17-12-03
316 L	X2CrNiMoN17 13 3	1.4429	Z2CND17-13-Az	—	X2 CrNiMoN 1713	—	—	—
316 L	X6CrNiMoTi17 12 2	1.4571	Z6CNDT17-12	—	X6 CrNiMoTi 1712	320S31	X6 CrNiMoTi 17 12 2	X6CrNiMoTi 1712-03
316 L	X10CrNiMoTi 18 12	1.4573	—	—	X6 CrNiMoTi 1713	320S33	X6 CrNiMoTi 17 13 3	X6CrNiMoTi 1712-03
316 L	X6CrNiMoNb17122	1.4580	Z6CNDNb1712	—	X6 CrNiMoNb 1712	—	X6 CrNiMoNb 17 12 2	—
316 L	X10CrNiMoNb1812	1.4583	—	—	X6 CrNiMoNb 1713	—	X6 CrNiMoNb 17 13 3	—
317	—	—	—	SUS317	X5 CrNiMo 1815	317S16	—	—
317 L	X2 CrNiMo 18 16 4	1.4438	Z2CND 19-15	SUS317L	X2 CrNiMo 1815	317S12	X3 CrNiMo 18 16 4	—
317 L	X2 CrNiMo 18 16 4	1.4438	Z2CND 19-15	SUS317L	X2 CrNiMo 1816	317S12	X3 CrNiMo 18 16 4	—
330	X12 NiCrSi 36 16	1.4864	Z12NCS 35-16	SUH 330	—	—	—	—
321	X6 CrNiTi 18 10 X12 CrNiTi 18 9	1.4541 1.4878	Z6CNT 18-10	SUS321	X6 CrNiTi 1811	321S31	X6 CrNiTi 18 10	X6 CrNiTi 18-11
321 H	—	—	—	SUS321H	X8 CrNiTi 1811	321S20	—	X7 CrNiTi 18-11
329	X8 CrNiMo 27 5	1.4460	—	SUS329J1	—	—	—	—
347	X6 CrNiNb 18 10	1.4550	Z6CNNb18-10	SUS347	X6 CrNiNb 1811	347S31	X6 CrNiNb 18 10	X6 CrNiNb 18-11
347 H	—	—	—	SUSF347H	X8 CrNiNb 1811	—	—	X7 CrNiNb 18-11
904L	—	1.4939	Z12CNDV 12-02	—	—	—	—	—
904L	X20 CrNiSi 25 4	1.4821	—	—	—	—	—	—
UNS 31803	X2 CrNiMoN 22 5	1.4462	—	—	—	—	—	—
UNS 32760	X3 CrNiMoN 25 7	1.4501	Z3CND 25-06Az	—	—	—	—	—
403	X 6 Cr 13 X 10 Cr 13 X 15 Cr 13	1.4000 1.4006 1.4024	Z12 C 13	SUS403	X12 Cr 13	403S17	X10 Cr 13 X12 Cr 13	X6 Cr 13
405	X 6 CrAl 13	1.4002	Z 6 CA 13	SUS405	X6 CrAl 13	405S17	X6 CrAl 13	X6 CrAl 13
405	X 10 CrAl 7	1.4713	Z 8 CA 7	—	—	—	X10 CrAl 7	—
405	X 10 CrAl 13	1.4724	—	—	X10 CrAl 12	—	—	—
405	X 10 CrAl 18	1.4742	—	—	—	—	X10 CrSiAl 18	—
409	X 6 CrTi 12	1.4512	Z 6 CT 12	SUH 409	X6 CrTi 12	409S19	X5 CrTi 12	—
409	—	—	—	—	X2 CrTi 12	—	—	—
410	X 6 Cr 13 X 10 Cr 13 X 15 Cr 13	1.4000 1.4006 1.4024	Z 10 C 13 Z 12 C 13	SUS410	X12 Cr 13	410S21	X12 Cr 13	X12 Cr 13
410 S	X 6 Cr 13	1.4000	Z 6 C 13	SUS410S	X6 Cr 13	403S17	X6 Cr 13	—

ANEXO X

Composição química dos principais aços ferramentas e designações do grupo Villares Metals.

TIPO	AISI/SAE	VILLARES	C(%)	Mn(%)	Si(%)	Cr(%)	V(%)	W(%)	Mo(%)	Outros(%)
W	W1 VW-1	VAP VET-3	0,6-1,4 1,2 0,95 0,70	0,4	0,25	0,20	0,10	1,00		
S	S1	VW-3	0,5 0,45		1,00	1,5 1,4	0,2	2,00	0,2	
	S2		0,5		1,00				0,5	
	S5		0,55	0,8	2,00				0,4	
	S7		0,50			3,25			1,4	
O	O1	VND	0,90 0,95	1,00 1,25		0,50	0,12	0,5		
A	A2		1,00			5,00			1,00	
D	D2	VD-2	1,50 1,50		0,30	12,00	0,9		1,00 0,95	
	D3	VC-130	2,25 2,50			12,00 11,50	0,2			
	D6	VC-131	2,10 2,10			12,00 11,50	0,2	0,80 0,70		
H	H10	VCM	0,40 0,32			3,25 2,90	0,40 0,50		2,50 2,80	
	H11	VPC	0,35 0,38		1,00	5,00	0,40		1,50 1,35	
	H12	VPCW	0,35		1,00	5,00	0,40 0,25	1,25 1,35	1,25 1,50	
	H13	VH13	0,35 0,40		1,00	5,00	1,00		1,50	
	H21	VW-9	0,35 0,30			3,25 2,65	0,35	9,50 8,50		
T	T1	VWT-1	0,70 0,75			4,00 4,25	1,00 1,10	18,00		
M	M2	VWM-2	0,85 0,90			4,00 4,25	2,00 1,90	6,25 6,20	5,00	
	M7	VWM-7	1,00			4,00 3,80	2,00	1,75 1,80	8,75 8,70	
	M35	VK-5E	0,80 0,92			4,00 4,15	2,00 1,85	6,00 6,30	5,00	5,00% Co 4,80% Co
	M41	VKM-41	1,10			4,25 4,15	2,00	6,75 6,80	3,75	5,00% Co 5,25% Co
	M42	VKM-42	1,10			3,75	1,15	1,50	9,50	8,00% Co
P	P4	VEP	0,07 máx. 0,04 máx.			5,00 3,80			0,40	
	P20	VP-20	0,30 0,36	0,60		0,75 1,80			0,25 0,20	1% Ni

