



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa
Catarina**

Unidade de Araranguá

Curso Técnico em Eletroeletrônica

Módulo II:

Tecnologia dos Materiais I

Prof. Suzy Pascoali

Agradeço ao professor Fernando José Fernandes e Marcelo Martins por elaborar a apostila. Aos sites da internet que disponibilizam conteúdo didático.

Julho

2008



Item **BASES TECNOLÓGICAS**

- 1 Introdução a tecnologia dos materiais
- 1.1 Materiais de construção mecânica
- 1.2 Atrações interatômicas
- 1.3 Arranjos atômicos
- 1.4 Propriedades dos materiais

- 2 Processos de obtenção das ligas metálicas ferrosas
- 2.1 Aços e Ferros Fundidos

- 3 Ligas metálicas ferrosas
- 3.1 Definições
- 3.2 Classificações

- 4 Diagramas de Equilíbrio
- 4.1 Introdução
- 4.2 Diagrama de Equilíbrio Ferro Carbono

- 5 Curvas TTT
- 5.1 Curvas TTT – ligas metálicas ferrosas

- 6 Ensaios mecânicos
- 6.1 Introdução
- 6.2 Dureza
- 6.3 Tração

- 7 Tratamentos Térmicos
- 7.1 Introdução
- 7.2 Recozimentos
- 7.3 Normalização
- 7.4 Têmpera
- 7.5 Revenido



1. Introdução a tecnologia dos materiais

O homem sempre utilizou-se de materiais para satisfazer suas necessidades. Nos tempos mais remotos os materiais serviam para obtenção de utensílios de caça, de uso doméstico e para o vestuário. Depois de extraídos da natureza os materiais eram utilizados quase que diretamente em suas aplicações, com pouco ou quase nenhum processamento. Com o passar dos tempos o homem foi dominando o conhecimento a respeito dos materiais e seu processamento. Pode-se visualizar na tabela 1, a cronologia da utilização dos materiais no decorrer do tempo.

Tabela 1 - Evolução do uso de materiais pelo homem.

Evolução histórica		Ano	Material
Pré-história	Idade da Pedra	25.000 AC até 6.500 AC	Madeira Pedra lascada Pedra polida
Proto-história	Idade dos Metais	6.500 AC até 1.500 AC	Cobre Estanho Bronze Ferro Cerâmica
História	Idade Antiga ou Antiguidade	4.000 AC até 500 AC	Vidro
	Idade Média ou Medieval	500 até 1.500	Ligas metálicas
	Idade Moderna	1.500 até 1.800	Concreto
	Idade Contemporânea	1.800 até os dias atuais	Polímeros

Atualmente existe uma grande variedade de materiais. Sendo que os profissionais da área tecnológica, no nosso caso da área de mecânica, devem conhecer as propriedades, características e comportamento dos materiais que lhe são disponíveis para aplicação em componentes mecânicos.

Como exemplo da utilização de materiais na construção mecânica, temos o automóvel. Na fabricação de um carro, os materiais dos quais obtém-se os componentes, tem que apresentar desempenho suficiente para sua aplicação. Alguns dos materiais que compõe o automóvel são: aços, vidros, plásticos, alumínio, materiais compósitos, borracha e outros. Porém só os aços apresentam mais de 1200 tipos, então como escolhê-los?

Os parâmetros utilizados, para escolha de um material adequado para um determinado componente, centram-se nas propriedades como: resistência mecânica, a condutibilidade térmica/elétrica, a densidade e outras. Também se deve observar o comportamento do material durante o processamento e o uso, onde a plasticidade, usinabilidade, durabilidade química são essenciais, assim como custo e disponibilidade. Por exemplo, o aço utilizado para as rodas dentadas (engrenagens) da caixa de câmbio, deve ser facilmente usinado durante o processamento, mas quando em uso devem ser suficientemente resistentes as solicitações externas. Os pára-lamas devem ser feitos com



um aço que tenha boa plasticidade, mas que deverá resistir a solicitações devido ao uso.

É impossível, conhecer detalhadamente os milhares de materiais disponíveis, mas os princípios gerais que norteiam as propriedades de todos os materiais, devem fazer parte das bases tecnológicas de um auxiliar de fabricação mecânico.

Nesse eixo temático serão abordados primeiramente os materiais comuns na construção mecânica, as ligações químicas e os arranjos atômicos desses materiais, e suas propriedades. Posteriormente, veremos os processos de obtenção das principais ligas metálicas ferrosas, bem como suas definições e classificações, sendo que os materiais utilizados no instrumento gerador (extrusora de massa) serão tratados nesse tópico. Prosseguindo no eixo temático, será abordado sobre duas ferramentas importantes para o entendimento da obtenção das microestruturas e consequentemente das propriedades das ligas metálicas ferrosas que são os diagramas de equilíbrio, e as curvas de transformação-tempo-temperatura. A próxima etapa consistirá no estudo de técnicas (ensaios) para quantificar e qualificar as propriedades mecânicas das ligas metálicas ferrosas. O tópico seguinte compreenderá as formas de alterarmos as propriedades das ligas metálicas ferrosas, através de tratamentos térmicos. Finalizando com as técnicas de preparação e análise das microestruturas das ligas metálicas ferrosas.

1.1 Materiais de Construção Mecânica

Os materiais de construção mecânica, por classificação, são divididos em quatro grandes grupos de desenvolvimento tecnológico. O primeiro em escala de uso e mais antigo é o grupo de materiais metálicos. Em seguida temos os materiais poliméricos e, de desenvolvimento mais recente os materiais de cerâmica avançada e também os materiais compósitos. A disponibilidade comercial dos mesmos é crescente e competem entre si por propriedades de uso em situações específicas de engenharia. Procurou-se abordar, nesse texto, aspectos gerais destes materiais, de maneira que sua seleção tenha critérios baseados nas propriedades requeridas na manufatura de componentes para as mais diversas aplicações.

1.1.1 Materiais Metálicos

Os materiais metálicos são substâncias inorgânicas formadas a partir da composição de um ou mais elementos da família dos metais, podendo apresentar também elementos não metálicos. Assim, metais como o ferro, cobre, alumínio, níquel e titânio constituem exemplos de materiais metálicos e tem posição definida na tabela periódica. Como exemplo de materiais não metálicos e que podem fazer parte da composição dos metais temos o carbono, o nitrogênio e o oxigênio. Na classificação do tipo de arranjo atômico presente nos mesmos, recebem designação de materiais de estrutura cristalina por apresentarem organização espacial ordenada e suas ligações químicas são consideradas de longo alcance. Por apresentarem elétrons livres nas últimas camadas de valência, tem importância fundamental quando as propriedades específicas de aplicação dos mesmos são condução térmica e elétrica. Desta maneira pode-se associar seu emprego na manufatura de diversos componentes de uso doméstico como, por exemplo, panelas, chapas de fogão a lenha, resistências elétricas e condutores elétricos (fios e cabos de energia). De uma forma geral, também apresentam alto ponto de fusão, o que favorece o seu uso em altas temperaturas. Quando se trata de utilização de metais com baixo ponto de fusão para aplicações específicas (brasagem) pode-se contar também com ligas de estanho. Ligas metálicas consistem numa



combinação de dois ou mais metais ou de um metal (ou metais) com um não-metal (ou não metais). O resultado da elaboração de ligas com composição adequada, possibilita o surgimento de ponto de fusão mais baixo do que o dos metais que a compõem. Um exemplo pode ser observado na figura 1, em que para quaisquer composições, o ponto de fusão da liga é inferior ao dos metais puros componentes da liga, alcançando-se um mínimo para a composição de 39,97% de cádmio – ponto eutéxico ($145,5^{\circ}\text{C}$).

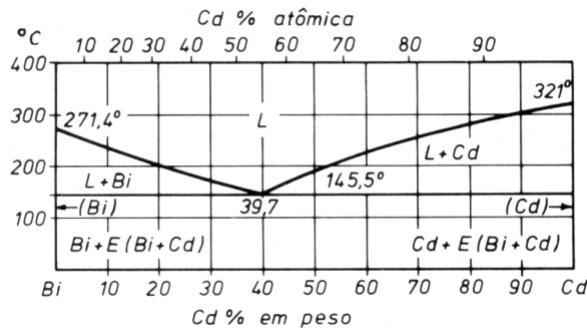


Fig. 1 – Diagrama de fases Bismuto-Cádmio

Pode-se estudar os materiais metálicos dividindo-os em duas classes: ferrosos e não ferrosos. Tal classificação pode ser entendida se for levado em conta que o elemento químico que contribui em maior peso atômico para a composição da liga designa sua origem. Assim uma liga que possui peso atômico predominante de ferro é classificada como ferrosa caso contrário, como não ferrosa. Na figura 2 observa-se o diagrama binário Fe-C, caracterizando uma liga ferrosa.

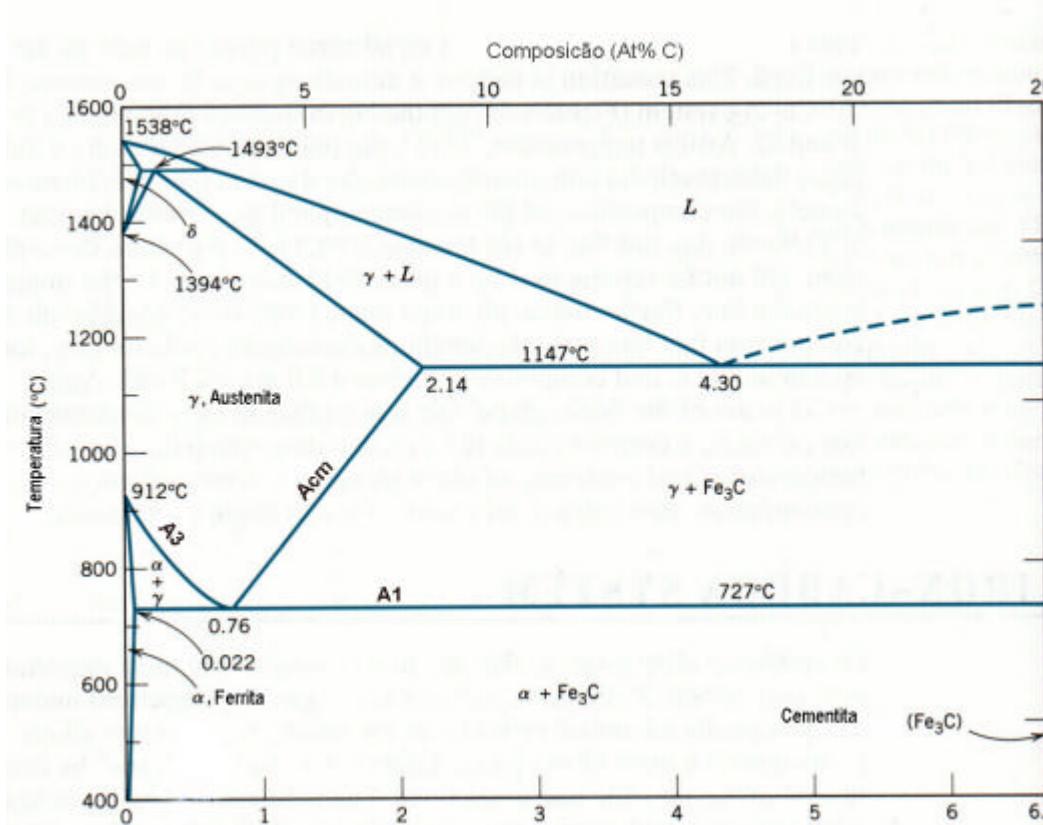


Fig. 2 – Diagrama de Equilíbrio Fe-C



1.1.2 Materiais Poliméricos

A origem da composição dos materiais poliméricos é orgânica, ou seja, constituídos de longas cadeias carbônicas, compondo moléculas. Em alguns casos de polímeros pode-se observar a presença de pequenos cristais (cristalitos), mas a predominância de arranjo atômico é a estrutura molecular (figura 3). Sua aplicação como material de engenharia está bastante diversificada, em função das várias composições possíveis desenvolvidas ao longo dos anos. Assim, os polímeros estão substituindo componentes importantes até então manufaturados a partir de metais ou outros materiais. As aplicações principais estão relacionadas principalmente em situações onde se requer baixo custo, boa resistência mecânica, razoável estabilidade estrutural, isolamento elétrico e baixa densidade. Desta maneira vemos nosso cotidiano sendo invadido por materiais desta natureza, porém encontrando limitações na maioria dos casos na baixa resistência mecânica para aplicações de maior responsabilidade na engenharia.

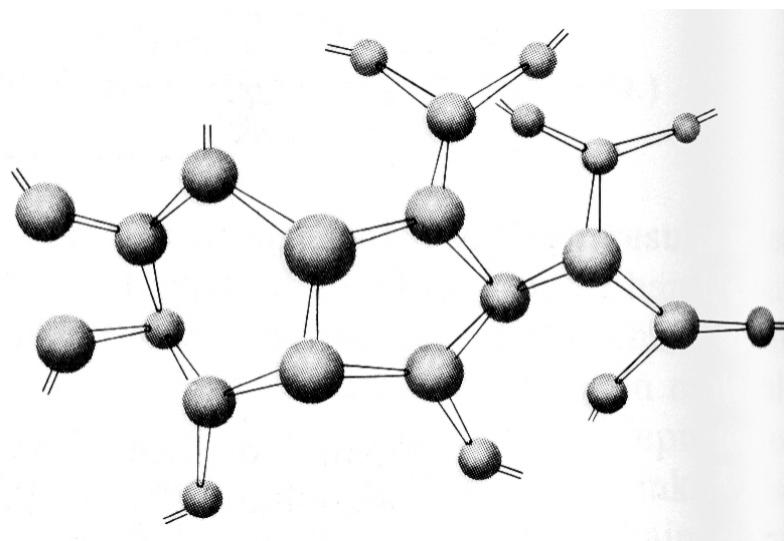
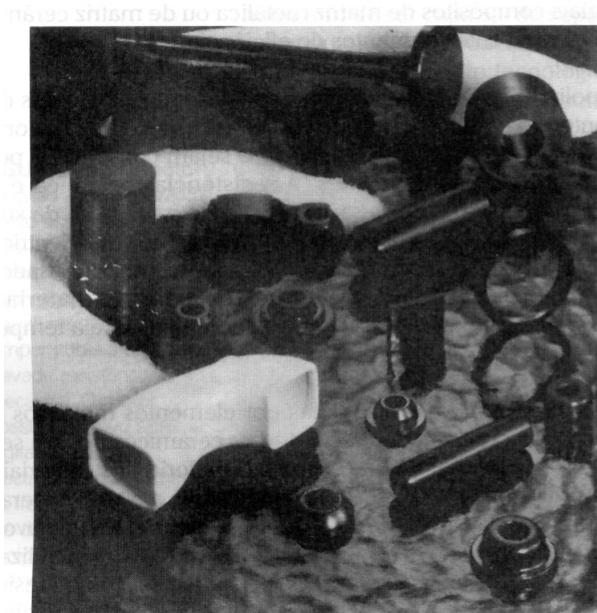


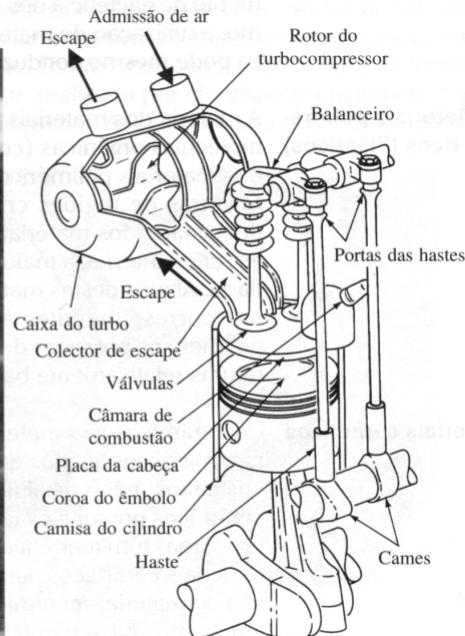
Fig. 3 – Arranjo molecular de um polímero

1.1.3 Materiais Cerâmicos

Os cerâmicos são caracterizados como materiais inorgânicos constituídos por elementos metálicos e não metálicos ligados quimicamente entre si. Podem apresentar arranjo atômico cristalino, não cristalino, ou mistura dos dois. Como características os cerâmicos apresentam elevada dureza, grande resistência mecânica em temperaturas elevadas, porém manifestam grande grau de fragilidade. Uma das aplicações mais recentes dos materiais cerâmicos está na indústria automobilística como componente do motor. Suas propriedades de resistência ao desgaste, resistência ao calor, baixo coeficiente de atrito e baixo peso são vantajosos do ponto de vista de eficiência mecânica. Também muito importante é a propriedade relacionada com isolamento térmico que estes materiais apresentam, não só utilizando-os em motores como em fornos para a fusão e tratamentos térmicos dos metais e suas ligas.



(a)



(b)

Fig. 4 - a) Exemplos de aplicação de materiais cerâmicos. b) Possibilidades de utilização das cerâmicas em componentes do motor de combustão.

1.1.4 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são misturas de dois ou mais materiais. A maioria dos materiais compósitos é produzida a partir de uma mistura de um material de reforço, com características apropriadas ao produto e um material compatível que serve de matriz, de maneira que ao final obtém-se determinadas propriedades inerentes ao uso do objeto. De um modo geral, os componentes não se dissolvem uns nos outros e podem ser identificados pelas interfaces que os separam. Existem vários tipos de materiais compósitos que servem as mais diversas aplicações na engenharia. Assim, a análise detalhada da fibra de vidro, por exemplo, revela uma composição de poliéster (matriz) e fibra de vidro (reforço). Na indústria de alimentos pode-se encontrar embalagens para leite, sucos e outros produtos, utilizando a mistura de papelão e alumínio. São as conhecidas embalagens TETRA PAK®.

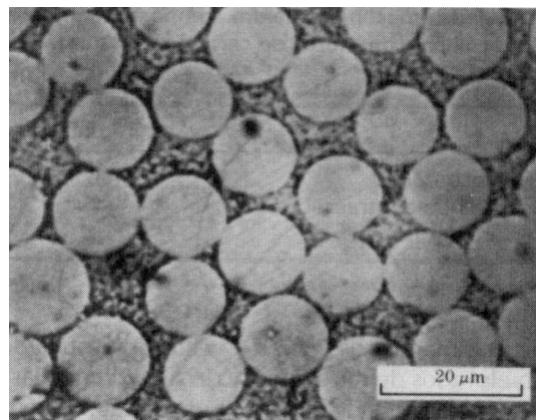


Fig. 5 – Fotomicrografia de uma secção de material compósito de poliéster com fibras de vidro unidirecionais.



1.1.5 Competição entre materiais

Com o objetivo de tornar produtos e serviços competitivos no mercado, as indústrias projetam os bens de consumo com materiais mais adequados a satisfação do cliente e ao mesmo tempo, preocupam-se com análise de custos de produção e disponibilidade do material no mercado. Desta maneira, há alguns anos, muitas montadoras de automóveis utilizavam madeiras nobres como elemento estético e de resistência, pela facilidade com que era encontrada. Para os dias atuais em que a preservação do meio ambiente é preocupante, este material caiu em desuso, dando oportunidade para o crescimento do segmento dos polímeros, utilizados principalmente em superfícies de acabamento dos veículos. Neste momento, em que a engenharia dos materiais trabalha para encontrar soluções alternativas (econômicas e funcionais), as pesquisas de novos materiais se torna imprescindível.

Até o momento, o segmento dos metais tem se mostrado importante como elemento estrutural para a construção mecânica, substituindo em muitas situações também a madeira (fabricação de móveis). Logicamente, nenhum material possui propriedades completas de uso para aplicação em todos os projetos, devendo a seleção ser baseada em critérios técnicos bem definidos. Assim é incompatível a idéia de combinar todas as boas propriedades de uso em um único material.

A figura 6 ilustra graficamente a demanda de utilização (em peso) de diversos materiais em uso nos Estados Unidos correspondentes aos últimos 80 anos. A partir de 1930 o que se percebe é o acentuado aumento no emprego de materiais com baixa densidade, como é o caso do alumínio e dos polímeros. Estes, como citado anteriormente, vêm de encontro a necessidade de produção de veículos automotores com peso final cada vez menor. Para se ter uma idéia, em 1978 no Estados Unidos um veículo médio pesava 1800 Kg, constituído por 60 por cento de ligas ferrosas, 10 a 20 por cento de plásticos e borracha, e 3 a 5 por cento eram alumínio. No ano de 1993 seu peso havia diminuído para 1430 kg e consistia em 50 a 60 por cento de aço e ligas ferrosas, 10 a 20 por cento de plásticos de borrachas e 5 a 10 por cento de alumínio. Desta maneira, a significativa redução de peso deve-se a utilização de uma quantidade maior de materiais de mais baixa densidade que as ligas ferrosas, até então de fundamental utilização nos veículos.

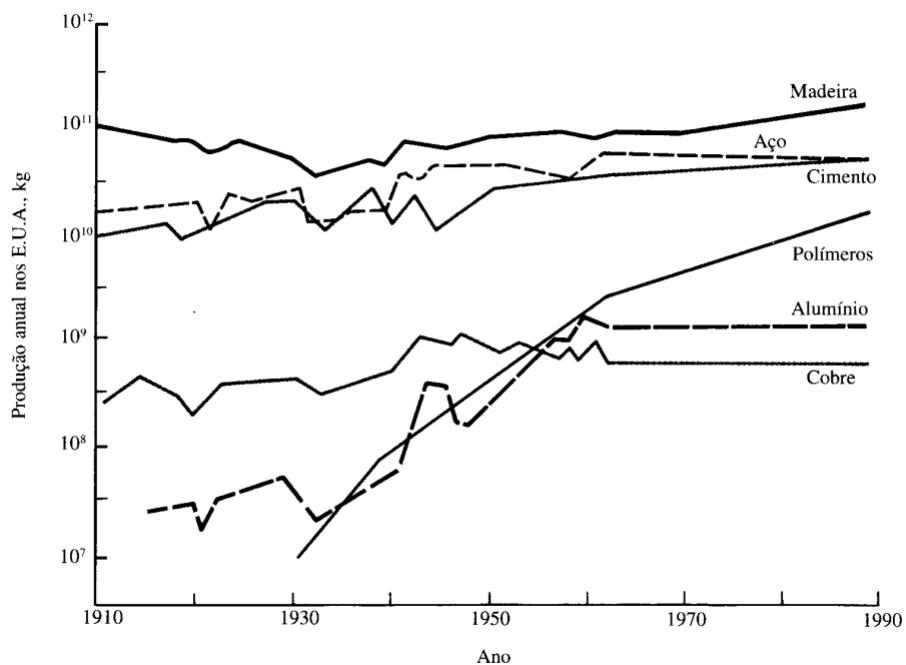


Fig. 6 – Gráfico comparativo mostrando a produção anual de diversos materiais de construção.

1.2 Atrações Interatômicas

As interações atômicas ocorrem porque, uma das leis que regem a matéria, é de que os materiais tendem a estabilidade, ou seja, a um mínimo nível energético. No caso de estarem ligados quimicamente, há um decréscimo em seu nível energético, favorecendo a uma condição energética mais estável.

Como os materiais que fazem parte das bases tecnológicas, deste eixo temático, encontram-se no estado sólido, é importante conhecer ou relembrar as interações ou ligações que unem os átomos nesse estado. As ligações químicas para os materiais no estado sólido, podem ser divididas em ligações fortes que se subdividem em ligações iônicas, ligações covalentes e ligações metálicas. Ligações fracas que para este estado podem ser agrupadas com o nome genérico de Forças de Van der Walls. Embora seja tratado isoladamente cada um dos tipos de ligação, muitos materiais podem apresentar mais de uma ligação simultaneamente. Em seguida será visto a caracterização das ligações citadas.



1.2.1 Ligações Iônicas

Estas ligações são caracterizadas por apresentarem forças interatômicas fortes, oriundas da transferência de elétrons entre átomos, gerando íons positivos e negativos que se atraem pelas forças de Coulomb (Lei de atração eletrostática – cargas de sinais diferentes tendem a se atraírem). Esta ligação obedece ainda uma premissa peculiar, o material que apresenta este tipo de ligação é eletricamente neutro, ou seja, a quantidade de íons negativos é igual aos íons positivos. Nota-se que este tipo de ligação acontece entre elementos químicos metálicos e não-metálicos. O elemento metal que tem tendência eletropositiva, doa elétrons para os não metais de tendência eletronegativa, como exemplo temos o NaCl (cloreto de sódio), mostrada na figura 7.

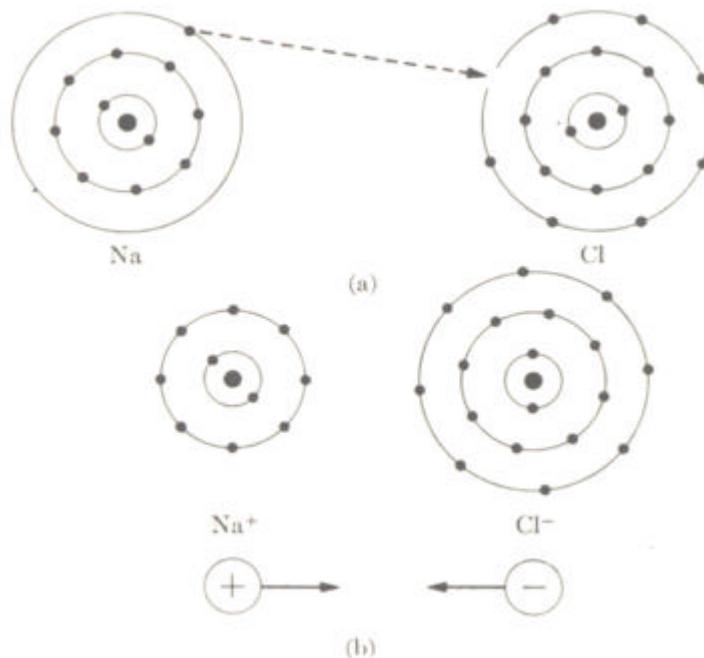


Fig. 7 – Ionização. A transferência de elétrons na formação do NaCl produz camadas externas estáveis. Os íons negativos e positivos que se formam se atraem mutuamente através de forças coulombianas, formando a ligação iônica.

1.2.2 Ligações Covalentes

Apresentam também forças interatômicas fortes, nestas ligações há o compartilhamento de elétrons entre dois átomos, ou seja uma superposição de orbitais. E alguns elétrons passam a pertencer aos dois átomos provocando uma atração eletrostática forte entre eles. Um material muito conhecido, no qual encontram-se somente ligação covalente é o diamante, ele é o mais duro material encontrado na natureza, sendo constituído inteiramente por carbono. Cada átomo de carbono tem quatro elétrons na camada de valência, que são compartilhados com quatro átomos adjacentes, para formar um reticulado tridimensional inteiramente ligado por pares covalentes. A intensidade da força de ligação covalente no diamante é notada não só pela sua elevada dureza como também pela temperatura extremamente elevada ($> 3300^{\circ}\text{C}$) a que pode ser aquecido antes da destruição da estrutura pela energia térmica. A ilustração da ligação covalente, do carbono formando o diamante, pode ser visto na figura 8.



As ligações covalentes normalmente ocorrem entre elementos químicos não metálicos, porém, alguns semimetais e metais de transição podem apresentar um certo grau de caráter covalente em suas ligações.

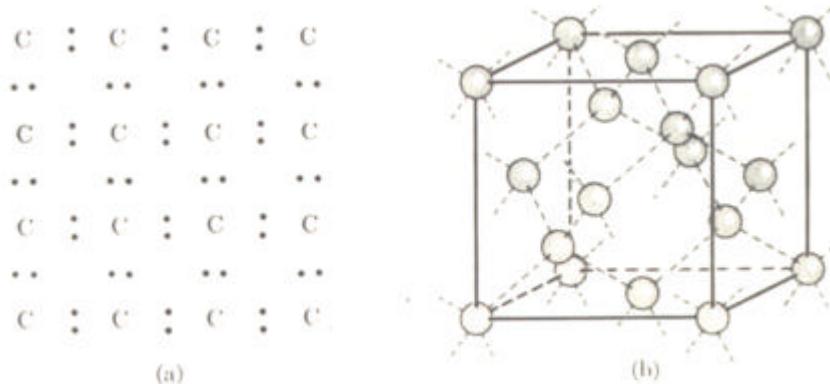


Fig. 8 – Estrutura do diamante. A força de ligação covalente explica a grande dureza do diamante. (a) Representação bidimensional. (b) Representação tridimensional.

1.2.3 Ligações Metálicas

As ligações metálicas, como o próprio nome diz, são típicas dos materiais metálicos. São ligações fortes. Os átomos dos metais têm, em geral, de um a três elétrons no seu último subnível. Estes elétrons não estão fortemente ligados ao núcleo e podem libertar-se facilmente. Quando se colocam átomos metálicos em contato, os elétrons que se libertam do núcleo formam uma nuvem em torno dos íons positivos formados, mantendo a estrutura coesa. No caso dos metais, os átomos se arranjam formando uma estrutura cristalina, como visto a seguir.

A ligação metálica é responsável por uma série de propriedades que caracterizam os metais. Os metais são bons condutores térmicos e elétricos, devido a mobilidade da nuvem de elétrons, ilustrado na figura 9.

Um fato importante que deve ser levado em conta quando se estuda o metal é que, à medida que aumentam os elétrons de valência (elétrons da última camada) e a atração dos mesmos pelo núcleo, aumenta a tendência dos átomos de formarem ligações covalentes. Desta forma alguns metais de transição (que apresentam subnível d incompleto) como o ferro, o níquel e o tungstênio, por exemplo, podem apresentar frações significativas de ligações covalentes, o que é, em parte, responsável pelos altos pontos de fusão destes materiais.

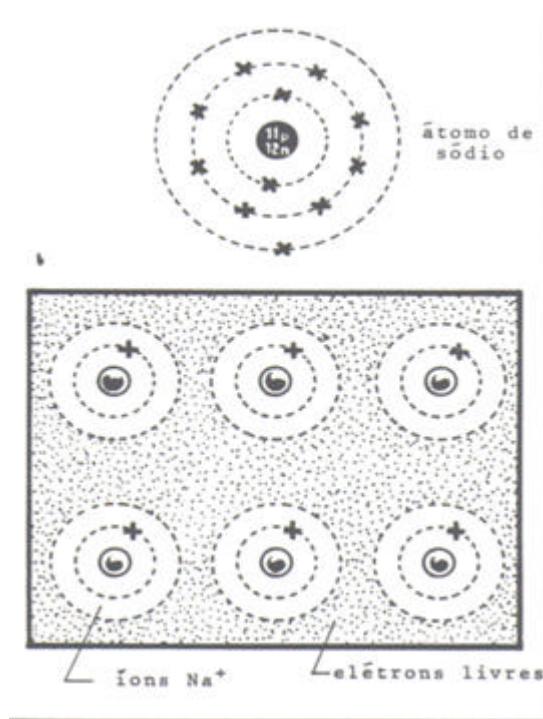


Fig. 9 – Ilustração da nuvem eletrônica, que caracteriza a ligação metálica

1.2.4 Forças de Van Der Waals

Os três tipos de ligação considerados anteriormente correspondem, todos, a ligações fortes. Ligações secundárias, mais fracas, que também contribuem para a coesão da matéria, são agrupadas sob o nome genérico de forças de Van Der Waals. Como exemplo dessas ligações temos a Polarização molecular, a ponte de hidrogênio e outras. Embora sendo ligações fracas, são as únicas forças que atuam em alguns casos, como nos polímeros que apresentam dentro das macromoléculas ligações iônicas e covalentes gerando as forças conhecidas como intramoleculares, porém entre as macromoléculas as forças que normalmente estão presentes são as de Van Der Waals denominadas de intermoleculares.

1.3 Arranjos atômicos

A importância dos arranjos atômicos, para o estudo da tecnologia dos materiais, deve-se ao fato que eles determinam as propriedades (qualidades) que os materiais apresentam.

Os arranjos atômicos são classificados em:

- Estruturas moleculares apresentam um agrupamento de átomos, este tipo de arranjo está presente nos materiais poliméricos.
- Estruturas cristalinas apresentam um arranjo repetitivo de átomos é o arranjo comum dos materiais metálicos, porém podem aparecer nos materiais poliméricos e nos materiais cerâmicos.
- Estruturas amorfas apresentam um arranjo sem nenhuma regularidade, é encontrada nos materiais cerâmicos.



1.3.1 Estrutura Cristalina do Ferro

Para uma melhor compreensão das reações que podem ocorrer com as ligas metálicas ferrosas, torna-se necessário o estudo da sua rede cristalina. Como já é de conhecimento, o elemento ferro é o principal componente destas ligas e na composição química é designado como solvente.

Abaixo estão estabelecidas algumas características do elemento químico ferro:

Número atômico: 26

Massa atômica: 55,847

Diâmetro atômico: 2,5 Å (Um angstrom corresponde a 1×10^{-7} mm)

1.3.1.1 Estrutura Cristalina Ideal do Ferro

No ferro em fusão não existe uma disposição regular dos átomos. Isto só vai ocorrer na solidificação, quando os átomos formam uma rede espacial regular, repetitiva, com ligações de longo alcance, que é a característica de um **cristal**.

O ferro cristaliza-se sob a forma cúbica e dependendo da disposição dos átomos no cubo e a temperatura em que aparecem, pode-se designá-las pelas letras do alfabeto grego, alfa (a), gama (g), delta (d). Um estudo mais detalhado destas formas é que interessa ao nosso estudo imediato.

a) Ferro gama: Na figura 10, as esferas atômicas do ferro (todas do mesmo diâmetro) estão dispostas sob a forma de uma rede espacial com disposição gama. Pode-se imaginar esta rede como sendo constituída de muitas células cúbicas (elementares) das quais uma está representada na figura a seguir à direita. Existem átomos ocupando os oito vértices e os centros das superfícies do cubo. Esta disposição da rede espacial é chamada cúbica de face centrada. A dimensão característica da rede espacial é o comprimento da aresta da célula elementar, também chamada de parâmetro da rede **a**. Ela pode ser derivada a partir da dimensão **D** dos átomos de ferro por simples raciocínio. As esferas atômicas tocam-se na direção da diagonal superficial **df** de uma célula elementar. A diagonal corresponde a duas metades de átomos e um inteiro, isto é, **df = 2D = a $\sqrt{2}$ = 3,6 Å**. Na direção das arestas do cubo elementar os átomos não se tocam. Sobra um intervalo **z = a - D = 1,1 Å**.

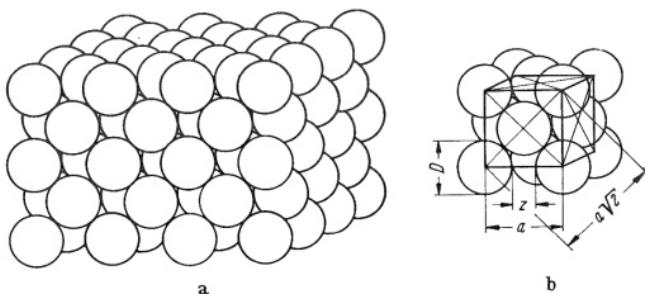


Fig. 10 - a. rede cristalina b. célula elementar (D = diâmetro atômico, z = interstício, a = parâmetro da rede).

b) Ferro alfa: Na figura 11 está representada a disposição de átomos na rede espacial do ferro alfa. Ao seu lado está representada a célula elementar cúbica de corpo centrado, uma vez que encontramos um átomo em cada vértice e um no centro do cubo.



Os átomos tocam-se na direção da diagonal do cubo $dc = 2D = a\sqrt{3}$, portanto $a = 2,9 \text{ \AA}$. Em vista disso a célula elementar do ferro alfa é menor que a do ferro gama, uma vez que ela contém menos átomos. Também a distância entre os átomos é menor, $z = a - D = 0,4 \text{ \AA}$

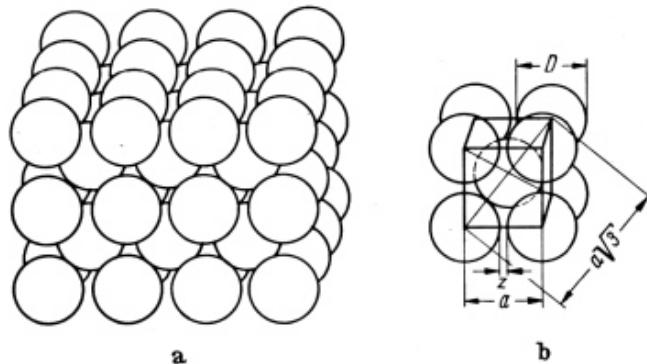


Fig. 11 – a) rede cristalina b) célula elementar (D= diâmetro atômico, z= interstício, a= parâmetro da rede).

c) A Transformação Polimórfica

Tal transformação ocorre em função da temperatura. Em baixas temperaturas existe o ferro alfa que, a 912° C se recristaliza formando ferro gama, o qual se transforma novamente em ferro CCC a 1392° C , mas que agora, para diferenciar, é chamado de ferro delta. Continuando o aquecimento, o ferro se funde a 1534° C . Se o metal em fusão for esfriado, as transformações para ferro delta, gama e alfa ocorrem praticamente nas mesmas temperaturas, como no aquecimento. Ambas as redes espaciais do ferro têm faixas de temperaturas determinadas em que são estáveis.

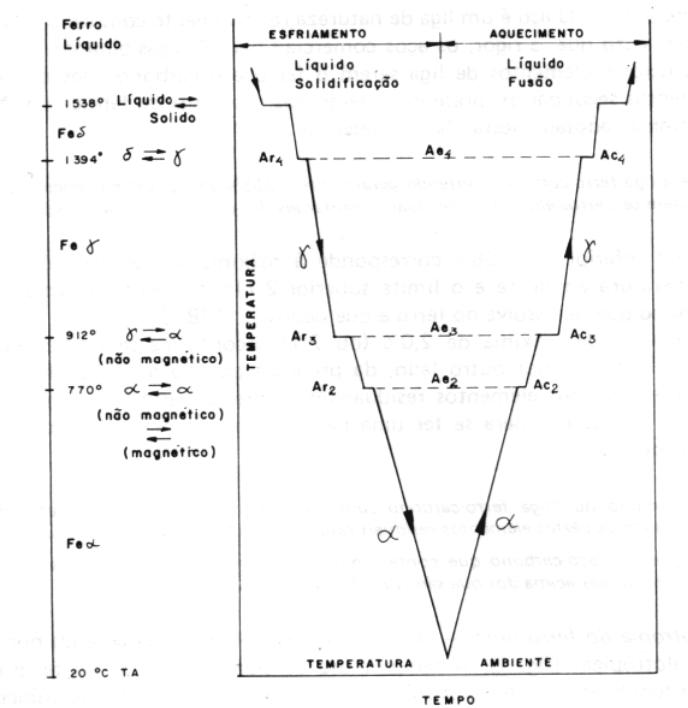


Fig. 12 – Transformações polimórficas do ferro



1.3.1.2 Estrutura Cristalina Real do Ferro

O ferro não se apresenta exatamente da forma como foi visto até aqui ou seja, com sua rede espacial ordenada e isenta de defeitos. Torna-se necessário portanto, um estudo preliminar destes defeitos para podermos avaliar as consequências que eles trarão posteriormente.

a) Defeitos da Rede Cristalina do Ferro

Contorno do grão: durante a solidificação do ferro, começam a surgir núcleos de cristalização, que são átomos que iniciam a aglomeração com outros átomos. Esses núcleos surgem de todas as partes ao mesmo tempo. Acontece que as direções das redes dos núcleos são ocasionais e podem variar de núcleo para núcleo, não havendo ao final uma união completa. Dessa forma surge então o contorno do grão. (fig. 13).

Vazios: Ocorrem quando um ponto da rede cristalina não está ocupado. Seu número aumenta com a temperatura, pois os átomos oscilam mais violentamente e é provável que saltem para um interstício da rede ou em direção a superfície. Por exemplo: a 700º C, de cada 100.000 pontos da rede, um está vazio. Vazias são imperfeições puntiformes da rede, em contraste com linhas de discordâncias e superfícies de contorno de grão. (fig.13)

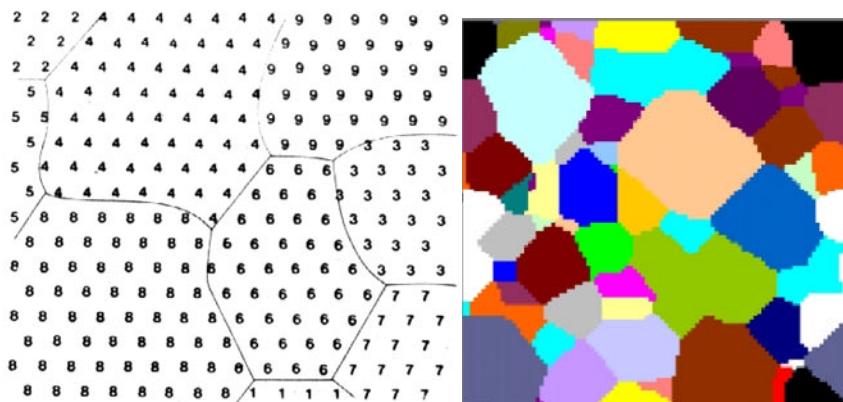


Fig. 13 - Representação esquemática do contorno de grão e do grão
Fonte: <http://www.pmt.usp.br/paulob/montecarlo/modelar/default.htm>

Discordâncias: Discordâncias são defeitos lineares, relacionados com fenômenos de escorregamento de planos cristalinos. A deformação plástica de um **cristal perfeito** pode ocorrer pelo deslizamento de um plano de átomos com relação ao outro. São caracterizadas pela presença de um plano extra de átomos na formação da rede cristalina.(fig. 14)

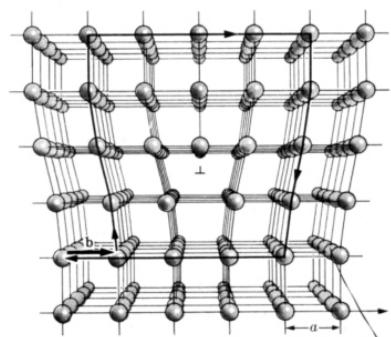


Fig. 14 - Representação esquemática de uma discordância em forma de cunha



1.3.1.3 Estrutura Cristalina do Aço

No modelo de átomos sólidos criados para estudar a rede cristalina do ferro constatou-se a presença de um único elemento químico. Ao transportar-se tal estudo para uma situação em que existe a presença de outros elementos químicos ligados, deve-se ter o cuidado de observar algumas modificações, segundo descrição abaixo.

a) Solução Sólida: É a liga homogênea de dois ou mais elementos que, em certas proporções, se misturam completamente no estado sólido, de modo que seus cristais ou grãos tem todos a mesma composição química. Esses cristais ou grãos chamam-se também cristais mistos.

b) Cristal misto: Os átomos de liga (Cr, Ni, W, C, etc), são dissolvidos prontamente no aço em fusão na aciaria, isto é, eles estão distribuídos uniformemente entre os átomos de ferro tal como sal na água.

Se os átomos de liga possuírem aproximadamente o mesmo diâmetro que os átomos de ferro, eles simplesmente ocupam os lugares dos últimos na rede cristalina. Eles substituem átomos de ferro. O resultado é o cristal misto por substituição. Ex: Níquel e Cromo - \varnothing atômico $\sim 2,5 \text{ \AA}$.

Se os átomos de liga forem pequenos, eles podem formar cristais mistos por inserção, ou seja, eles irão ocupar espaços interatômicos na rede.

Ex: O carbono \varnothing atômico $\sim 1,5 \text{ \AA}$, forma um cristal misto por inserção com o ferro.

Em um cristal podem ocorrer substituição e inserção simultaneamente. Assim, no aço cromo-níquel inoxidável, átomos dos elementos de liga cromo e níquel substituem alguns átomos de ferro na rede cristalina cúbica de face centrada, enquanto que o carbono é inserido em espaços interatômicos (fig. 15).

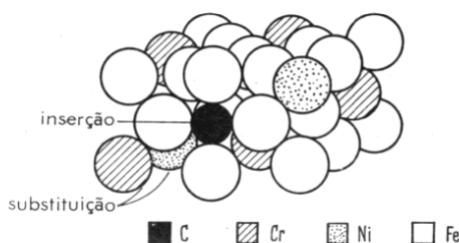


Fig. 15 - Cristal misto gama (Aço Austenítico 18-8)

1.3.1.4 Difusão Atômica no Estado Sólido

O fenômeno da difusão atômica está relacionado com o transporte de átomos, dentro da matéria, no estado sólido, através da movimentação relativa na estrutura cristalina (fig. 16).

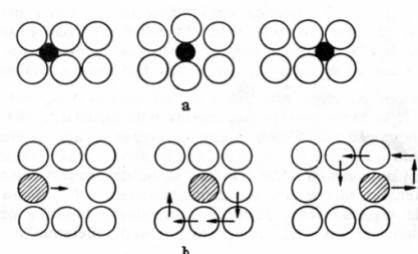


Fig. 16 - Difusão atômica. **a.** intersticial **b.** substitucional



1.3.1.5 Solubilidade

Por causa de seus espaços interatômicos maiores, é mais fácil inserir átomos de liga pequenos no ferro gama do que no ferro alfa. No entanto, mesmo para os espaços interatômicos maiores do ferro gama, a maioria dos átomos é grande demais. A inserção de átomos maiores do que os espaços interatômicos causa uma deformação da rede cristalina do ferro, que se torna maior a medida que aumenta o número de átomos inseridos e que por fim limita a solubilidade da rede do ferro para o elemento de liga. De maneira semelhante também é dificultada a solução de átomos de liga por substituição na rede espacial, se seu diâmetro desviar mais que 15% do diâmetro do ferro.

Uma vez que os átomos oscilam mais violentamente com o aumento da temperatura e alargam a rede (o parâmetro da rede aumenta), os espaços interatômicos também aumentam um pouco. O resultado é uma capacidade de recebimento maior da rede espacial do ferro em relação a átomos de liga, ou seja, a solubilidade aumenta com a temperatura (fig. 17 e 18).

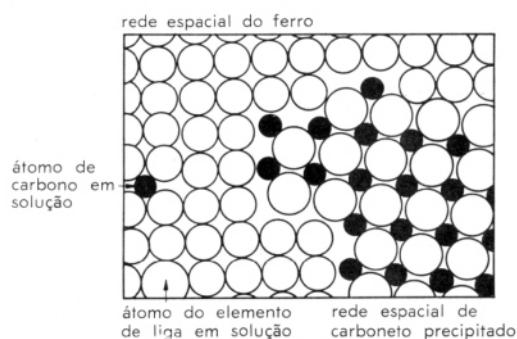


Fig. 17 - Solução sólida intersticial em ferro a e precipitação de carbonetos

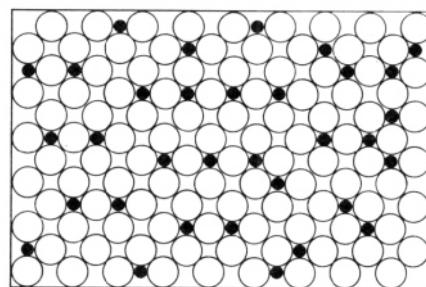


Fig. 18 - Solução sólida intersticial em ferro g

1.4 Propriedades dos materiais

Os materiais muitas vezes são identificados pelos atributos ou qualidades que apresentam, por exemplo os materiais que possuem boa condutibilidade térmica e elétrica são os materiais metálicos. Os atributos ou qualidades dos materiais são conhecidos tecnicamente como propriedades, e são fundamentais para seleção dos mesmos.

As propriedades dos materiais dependem da natureza do material, composição química e microestrutura.

Pode-se classificar as propriedades dos materiais em:

- Propriedades físicas (a tabela 2 apresenta a subdivisão dessas propriedades);
- Propriedades químicas;
- Propriedades físico-químicas;
- Propriedades tecnológicas.

Tabela 2 – Classificação das propriedades físicas

Propriedades Físicas			
Prop. Mecânicas	Prop. Térmicas	Prop. Elétricas	Outras Prop. Físicas
Ductilidade	Condutibilidade	Condutibilidade	Prop. Óticas: Transparência
Dureza	Térmica	Elétrica	
Elasticidade	Expansão	Resistência ao	Densidade
Res. a tração	Térmica	Arco	Outras
Outras	Outras	Outras	



É bom salientar, que as propriedades dos materiais, na área tecnológica devem estar associadas a relação custo/benefício dos componentes, pois não justifica-se economicamente selecionar materiais devido a suas propriedades, sendo que o custo é inviável comercialmente.

Todas as propriedades, tem sua importância. Em particular para área tecnológica de mecânica, veremos mais detalhadamente as propriedades mecânicas.

1.4.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas constituem uma das características mais importantes das ligas metálicas ferrosas em suas várias aplicações, visto que o projeto e a execução de componentes mecânicos estruturais são baseados nestas propriedades.

As propriedades mecânicas definem o comportamento do material quando sujeito a esforços de natureza mecânica e correspondem as propriedades que, num determinado material, indicam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que produzam deformações incontroláveis.

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais, pode ser obtida através de ensaios mecânicos, que será abordado num próximo tópico.

A propriedade mecânica que geralmente está associada com componentes mecânicos estruturais e a resistência mecânica. Outras propriedades mecânicas são elasticidade, ductilidade, dureza, tenacidade, resiliência e outras. A caracterização dessas propriedades pode ser vista a seguir:

- a) **Resistência mecânica** – pode-se conceituar resistência mecânica como sendo, a capacidade dos materiais de resistir a esforços de natureza mecânica, como tração, compressão, cisalhamento, torção, flexão e outros sem romper e/ou deformar-se. Porém, o termo resistência mecânica, abrange na prática um conjunto de propriedades que o material deve apresentar, dependendo da aplicação ao qual se destina. É muito comum para efeito de projeto relacionar diretamente resistência mecânica com resistência a tração.
- b) **Elasticidade** – é a capacidade que o material apresenta de deformar-se elasticamente. A deformação elástica de um material, acontece quando o material é submetido a um esforço mecânico e o mesmo tem suas dimensões alteradas, e quando o esforço é cessado o material volta as suas dimensões iniciais.
- c) **Ductilidade e/ou Plasticidade** – é a capacidade que o material apresenta de deformar-se plasticamente ou permanentemente antes de sua ruptura. A deformação plástica de um material, ocorre quando o material é submetido a um esforço mecânico e o mesmo tem suas dimensões alteradas, e quando o esforço é cessado o material permanece com as dimensões finais.
- d) **Dureza** – essa propriedade embora tenha mais de uma caracterização, tecnicamente a definição mais utilizada é: Dureza é uma medida da resistência do material a deformações plásticas localizadas. Associada a essa propriedade, temos a resistência ao desgaste e a resistência a abrasão.
- e) **Resiliência** – é a capacidade do material absorver e devolver energia sem deformação permanente. Essa propriedade tem validade no campo elástico.
- f) **Tenacidade** – é a capacidade do material de absorver energia antes de sua ruptura. Uma outra definição para esse termo, é a capacidade que o material apresenta de resistir a esforços de impacto.



1.4.2 Propriedade Química

Uma propriedade importante, que servirá de critério para escolha do material em nosso instrumento gerador (extrusora de massa), é a resistência a corrosão, e pode ser definida como: A resistência que o material apresenta a deterioração, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente.

1.4.3 Propriedades Tecnológicas

No processamento de componentes mecânicos, certas propriedades tecnológicas devem ser consideradas, para que o material a ser processado tenha um comportamento que não comprometa seu desempenho tanto durante o processamento, como em sua utilização. Essas propriedades derivam-se das propriedades físicas, químicas e físico-químicas dos materiais, mas que devido a sua importância são tratadas como uma nova classe de propriedades, que são:

- **Usinabilidade** – de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou percentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do material, em relação a um outro tomado como padrão.
- **Conformabilidade** – é a capacidade do material de ser deformado plasticamente, através de processos de confomação mecânica. Essa propriedade está associada a ductilidade ou plasticidade do material.
- **Temperabilidade** – ou endurecibilidade de aços está diretamente relacionada com a capacidade que os mesmos tem de endurecer da superfície em direção ao núcleo, considerando-se a quantidade de martensita formada durante o resfriamento.
- **Soldabilidade** – é a capacidade que os materiais tem de ser unidos pelo processo de soldagem, tendo por objetivo a continuidade das propriedades físicas (mecânicas) e químicas dos mesmos.
- **Sinterabilidade** – é a capacidade dos materiais na forma de pó, apresentarem difusão no estado sólido, ativada por energia térmica, obtendo-se como produto final, coesão do material na forma desejada.



Referências Bibliográficas

1. VAN VLACK, Lawrence H.. Princípios de Ciência dos Materiais. 8^a Edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1988.
2. COUTINHO, Telmo de Azevedo. Metalografia de Não-Ferrosos. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1980.
3. SOUZA, Sérgio Augusto de Souza. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 3^a Edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1974.
4. ROTHERY, W. Hume. Estrutura das Ligas de Ferro – Introdução Elementar. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1968.
5. CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 6^a Edição. Publicação da Associação Brasileira de Metais. São Paulo, 1988.
6. COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1974.
7. FAZANO, Carlos Alberto T.V.. A Prática Metalográfica. Editora Hemus. São Paulo, 1980.
8. VAN VLACK, L. H.. Princípios de Ciência dos Materiais. 8^a Edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1988.
9. COUTINHO, T. de A. Metalografia de Não-Ferrosos. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1980.
10. SOUZA, S. A. S.. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 3^a Edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1974.
11. ROTHERY, W. H.. Estrutura das Ligas de Ferro – Introdução Elementar. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1968.
12. CHIAVERINI, V.. Aços e Ferros Fundidos. 6^a Edição. Publicação da Associação Brasileira de Metais. São Paulo, 1988.
13. COLPAERT, H.. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1974.
14. FAZANO, C. A. T.V.. A Prática Metalográfica. Editora Hemus. São Paulo, 1980.
15. GARCIA, A. et ali. Ensaios dos Materiais. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 2000.
16. GENTIL, V.. Corrosão. Livros Técnicos e Científicos Editora. 3^a Edição. Rio de Janeiro, 1996.
17. SMITH, W. F.. Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Editora McGraw-Hill. 3^a Edição. Portugal, 1998.



18. TEICHERT, E. J.. Siderurgia Volume – Metalografia e Tratamento Térmico do Aço. Editora Globo. Porto Alegre, 1962.
19. MORETTO, V. P.. Eletricidade e Eletromagnetismo. Editora Ática. São Paulo, 1989.
20. MARTINS, M.. Temperabilidade dos Aços. UFSC. Florianópolis, 1999.
21. SILVA, A. L. C. S. et ali. Tecnologia dos Aços. Editora Hamburg. São Paulo, 1981.
22. SCHEER, L. O que é aço? Editora da USP. São Paulo, 1977.
23. Catálogo Villares Aços, São Paulo.
24. Catálogo Piratini Aços, São Paulo.
25. <http://www.matls.com>

2 – Processos de obtenção das ligas metálicas ferrosas

2.1 – Aços e Ferros Fundidos

Um número considerável de utensílios e equipamentos, utilizados pelo homem, são construídos a partir de ferro ligado ao carbono, formando o aço e o ferro fundido.

Entretanto o ferro não se apresenta naturalmente na forma de metal, a não ser em mínimas quantidades nos meteoritos. Ele é extraído de minérios encontrados nas jazidas naturais, tais como mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Principais minérios de ferro

Minério de ferro	Fórmula	Quantidade média de ferro (%)
Hematita (Óxido ferroso férrico)	Fe ₂ O ₃	70,0
Magnetita (Óxido férrico)	Fe ₃ O ₄	72,4
Limonita (Óxido hidratado de ferro)	Fe ₂ O ₃ .3H ₂ O	59,9
Siderita (Carbonato de ferro)	FeCO ₃	48,3

Estes minérios são processados nas usinas siderúrgicas, obtendo-se o chamado ferro gusa.

Nas sociedades industriais, o ferro gusa é tão importante que o seu consumo aparente *per capita* -relação entre produção de aço e população absoluta - serve como elemento de comparação do nível de desenvolvimento econômico entre países.

A URSS, os EUA, o Japão, a República Federal da Alemanha, a Tchecoslováquia, o Canadá, a Bélgica, a Romênia e a Austrália possuem um consumo aparente *per capita* de aço superior a 500 kg, por , habitante, por ano. A Itália, a França, o Reino Unido e a Polônia possuem um consumo aparente *per capita* de aço situado entre 400 e 500 kg/hab/ano. A Espanha, um pouco acima de 300 kg/hab/ano. O Brasil situa-se em torno de 100 kg/hab/ano.

Esses dados poderiam levar à suposição de que países como EUA e Polônia possuíam as maiores reservas de minério de ferro. No entanto, a tabela 4, que



relaciona minerais e produção *per capita*, mostra como essa suposição não é verdadeira.

Como se observa na tabela 4, entre os países relacionados, o Brasil é o que apresenta maior reserva de minério de ferro. Apesar disso, a sua produção de aço *per capita* é menor do que a de outros países. Por outro lado, nota-se que países como Itália, Alemanha Ocidental e EUA apresentam produção de aço muito além das possibilidades de suas reservas.

Isso sugere que muito do minério de ferro das jazidas brasileiras está sendo processado e consumido no exterior.

Na obtenção das ligas metálicas ferrosas nas usinas siderúrgicas, o alto forno constitui ainda o principal aparelho utilizado na metalurgia do ferro. 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. A metalurgia do ferro consiste essencialmente na redução dos óxidos dos minérios de ferro, mediante o emprego de um redutor, que é um material a base de carbono – o carvão – o qual atua igualmente como combustível e, indiretamente, supridor do carbono para as ligas ferro carbono, que são os principais produtos do alto forno.

Tabela 4 – Relação de minério de ferro e produção de aço

País	Reserva de Minério de ferro (kt/m ³)	Produção aço (kt/m ³)
EUA	23.005	67.656
China	53.660	37.160
Polônia	15	14.142
Alemanha Ocidental	387	35.880
África do Sul	15.370	8.383
França	6.200	18.402
BRASIL	81.559	7.660
Itália	2	24.188
Peru	4.403	274
Venezuela	7.258	2.296

2.1.1 – Histórico

O processo de produção de ferro já era dominado pelos hititas (c.3000 a.C.), que o mantiveram em segredo por muito tempo. Com a queda do império hitita (c.1200 a.C.), os ferreiros dispersaram-se e já entre os gregos a produção de ferro favoreceu o desenvolvimento de novas técnicas e ferramentas.

Apesar das modificações técnicas ocorridas desde a Antiguidade até nossos dias, esse processo sempre esteve baseado na interação entre minério e monóxido de carbono produzido pela combustão do carvão.

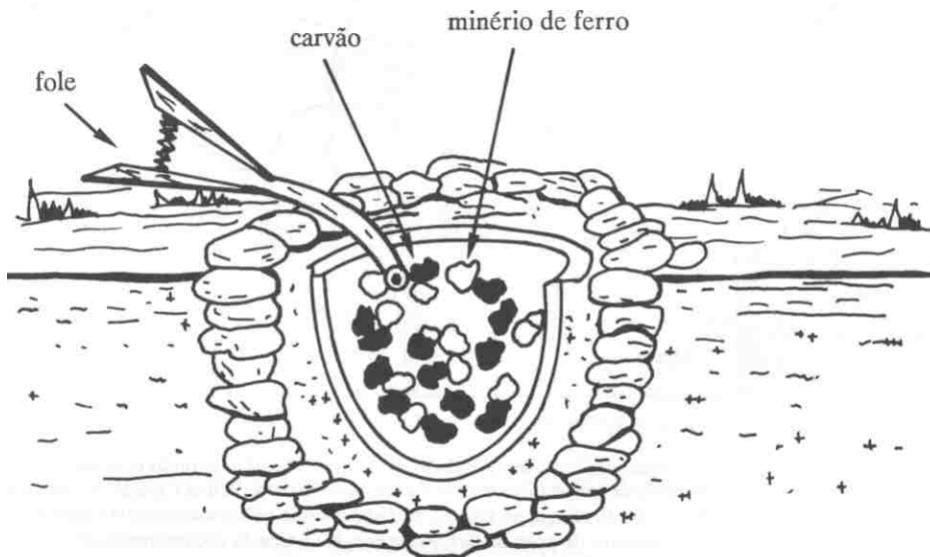


Fig. 19 – Representação esquemática da produção primitiva do ferro.

A figura 19 se refere à produção primitiva do ferro. O minério de ferro entra em contato com o carvão vegetal (C) e o oxigênio (O_2) do ar, soprado pelo fole. Esse contato, sob determinadas condições, produz uma liga de ferro e carbono. A liga produzida pelo povo hitita, pioneiro desse processo, era utilizada para a fabricação de armas. Este "segredo" fez do povo hitita detentor do monopólio da metalurgia do ferro por aproximadamente duzentos anos (c.1400-1200 a.C.). Mais tarde esse povo guerreiro perdeu sua exclusividade e o conhecimento se espalhou para outras civilizações.

O ferro assim obtido apresentava-se em geral relativamente dúctil, mole, maleável e podia ser trabalhado por martelamento a temperaturas relativamente elevadas. Na realidade, os processos eram de "redução direta", sem que se formasse ferro inteiramente líquido; de fato, as temperaturas alcançadas não eram suficientes para liquefazer o metal, o qual se apresentava no estado pastoso, misturado com as impurezas do minério. O operador juntava, no fundo do forno, o material com auxílio de uma vara metálica, formando-se uma bola que, depois de atingido um certo peso, era retirada e martelada, para eliminar as impurezas, que apresentavam na forma de uma escória. O resultado final era uma barra ou "lupa", posteriormente reaquecida e trabalhada por martelamento. Esse produto consiste no "ferro pudlado". Em épocas mais recentes, a partir provavelmente do século XIII, o processo mais comum era o da "forja catalã", na qual o material comumente obtido era exatamente o ferro pudlado. Esses fornos primitivos podiam ser operados de modo a provocar a absorção pelo ferro de uma certa quantidade de carbono, por exemplo até 1%. Esse material revelou-se mais duro e mais resistente que o ferro; além disso, o fenômeno mais importante então verificado foi a possibilidade de tornar o material muito mais duro, quando resfriado rapidamente em água ou outro meio líquido, a partir de altas temperaturas. Praticava-se, assim, um processo empírico de têmpera em ferro com carbono relativamente elevado.

As principais datas relativas ao desenvolvimento do alto forno, processo de redução indireta para obtenção do aço, na Inglaterra foram:

- 1500 - Perfil de construção próximo ao dos atuais;
- 1619 - Primeiro emprego do coque como carvão metalúrgico;
- 1800 - Primeiro emprego do ar aquecido no alto forno.



No Brasil, o grande passo para o estabelecimento da grande siderurgia, baseada em carvão coque, foi dado durante o governo Getúlio Vargas, com a instituição em 4 de março de 1940, da “Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional”, resultando na fundação da Companhia Siderúrgica Nacional em janeiro de 1941. A Usina foi construída em Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro e inaugurada em outubro de 1946.

2.1.2 - Matérias-primas da Indústria Siderúrgica

As matérias-primas básicas da indústria siderúrgica são as seguintes:

- Minério de ferro;
- Carvão;
- Calcário.

Outras matérias-primas, minérios principalmente, são igualmente importantes, sobressaindo-se o minério de manganês, pela sua presença constante em todos os tipos de produtos siderúrgicos. O minério de ferro, como é óbvio, constitui a matéria-prima essencial, pois dele se extrai o ferro. 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 calcário atua como fundente, ou seja, reage pela sua natureza básica, com as substâncias estranhas ou impurezas contidas no minério e no carvão – geralmente de natureza ácida – diminuindo seu ponto de fusão e formando a escória, subproduto do processo clássico do “alto-forno”. Na figura 20, podem ser visualizados a ilustração do alto forno com os principais elementos que participam de todo o processo de produção.

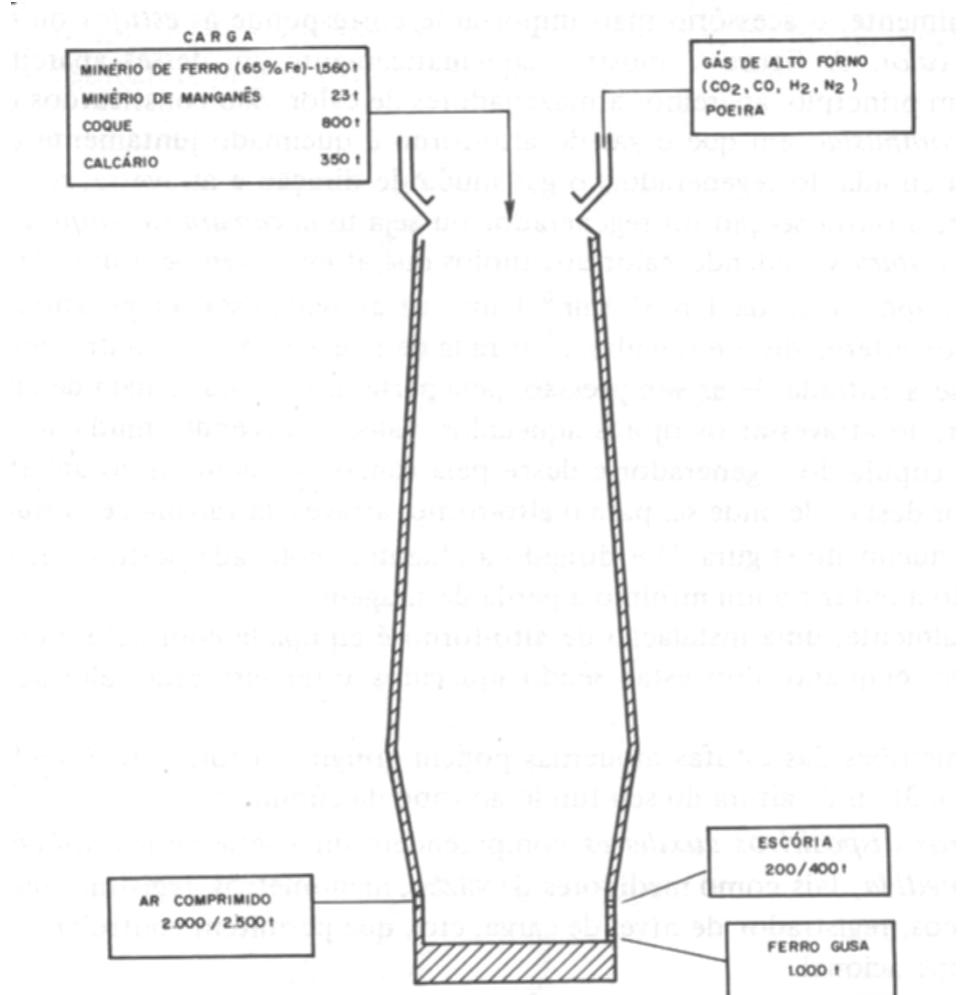


Fig. 20 – Carga e produtos resultantes de um alto-forno

a) Minério de Ferro

O minério de ferro constitui a principal matéria prima para extração do ferro. Encontrado na natureza principalmente sob a forma de óxidos, são classificados segundo a concentração de ferro, como mostrado na tabela 3.

a.1) Beneficiamento do Minério de Ferro

O termo genérico “beneficiamento” compreende uma série de operações a que os minérios de ferro de várias qualidades podem ser submetidos, com o objetivo de alterar seus característicos físicos e químicos e torná-los mais adequado para a utilização nos altos-fornos. Essas operações são geralmente: britamento, peneiramento, mistura, moagem, concentração, classificação e aglomeração.

Será abordado neste texto apenas os métodos de aglomeração. Existem 4 processos principais de aglomeração do minério de ferro:

- Sinterização, que produz “sínter”;
- Pelotização, que produz “pelotas”;
- Briquetagem, que produz “briquetes”;
- Nodulização, que produz “nódulo”;



Os mais importantes são os dois primeiros, os quais serão, descritos a seguir:

- **Sinterização:** consiste em aglomerar-se finos de minério de ferro numa mistura com aproximadamente 5% de um carvão finamente dividido, coque ou antracita. A carga é colocada em grelhas que se movem a uma determinada velocidade e, num determinado ponto próximo ao fim de percurso das grelhas, a carga é aquecida superficialmente, por intermédio de queimadores de gás. As temperaturas utilizadas variam de 1300 a 1500 °C, suficientes para promover a ligação das partículas finas do minério e resultando um produto uniforme e poroso, denominado "sinter".
- **Pelotização:** este é o mais novo processo de aglomeração e talvez o de maior êxito. Neste processo, produzem-se inicialmente "bolas" ou "pelotas" cruas de finos de minério de alto teor ou de minério concentrado. A granulação do minério deve ser normalmente inferior a 325 mesh; adiciona-se cerca de 10% de água e, geralmente, um aglomerante de natureza inorgânica, como "bentonita" em proporção de 0,5 a 0,75% de carga. Uma vez obtidas as pelotas cruas, são as mesmas queimadas, para o que se utilizam vários dispositivos de aquecimento. Um deles é constituído por uma "grelha contínua e móvel". No processo, as pelotas são inicialmente secadas, depois pré-aquecidas e finalmente queimadas. Mais recentemente, tem sido utilizado um forno rotativo, onde as temperaturas podem atingir valores da ordem de 1350 oC.

b) Carvão:

O carvão pode ser de dois tipos: o mineral, que é de origem fóssil, e o vegetal. Antigamente, apenas o carvão vegetal era utilizado. Mas, devido à grande devastação das reservas florestais, esse tipo de carvão tornou-se raro, sendo substituído, gradativamente, por carvão mineral.

O Brasil conta com pequenas reservas de carvão mineral nos Estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No entanto, esse carvão é considerado de "má qualidade" para uso siderúrgico, devido a sua alta porcentagem de cinzas e enxofre, que, além de reduzir o poder calorífico do carvão, também influí nas características do aço.

Entretanto, essa "ma qualidade" também é decorrência do fato de os altos-fornos brasileiros serem cópias dos estrangeiros, construídos para utilização de carvão com características diferentes.

As grandes siderúrgicas brasileiras, como Usina de Volta Redonda – CSN (RJ), Usina de Ipatinga -USIMINAS (MG) e Usina de Piaçaguera -COSIPA (SP), utilizam carvão mineral proveniente de Santa Catarina. Este carvão possui um poder calorífico em torno de 5 000 kcal/kg (20 900 kJ/kg), enquanto o do carvão estrangeiro é da ordem de 8 000 kcal/kg (33 440 kJ/kg).

O combustível utilizado no alto-forno é o carvão – coque ou de madeira – cuja as funções são:

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

b.1) Carvão Coque:

O coque é obtido pelo processo de "coqueificação", que consiste, em princípio, no aquecimento a altas temperaturas, geralmente em câmaras herméticas, portanto com ausência de ar, exceto na saída dos produtos voláteis, do carvão mineral. Este último é



constituído sobretudo dos restos de matéria vegetal que se decompõe 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 e antracito. A ação de destilar o carvão mineral pretende eliminar materiais voláteis, resultando num resíduo que se apresenta como substância porosa, heterogênea, sob os pontos de vista químico e físico.

c) Calcário:

O calcário (CaCO_3) é utilizado no alto forno como fundente, ou seja, combina-se com as impurezas (ganga) do minério de ferro e com as cinzas do carvão, formando as chamadas "escórias".

2.1.3 – Conhecendo uma usina siderúrgica

Através do relato de visita a uma usina siderúrgica, será visto o processo de obtenção do ferro, mais detalhadamente.

a) Relato da Visita

"Chegando à usina, recebemos algumas informações gerais sobre o processo de obtenção do ferro-gusa."

As matérias-primas principais são os minérios de ferro, o coque e calcário. Esses materiais, no momento de seu uso, são peneirados e dosados para poderem ser introduzidos no alto-forno. Assim se inicia o controle das transformações químicas que aí ocorrem, através da medida das quantidades relativas de matérias-primas.

É comum comparar-se as siderúrgicas a cozinhas gigantes. Nas cozinhas necessitamos de ingredientes, de panelas adequadas e de fornos - objetos indispensáveis para a preparação de alimentos. O mesmo ocorre na siderúrgica, na qual os "ingredientes" são as citadas matérias-primas. Estas são colocadas numa "panela especial" - o alto-forno - em que são obtidos o ferro gusa e a escória resultante da transformação da ganga - componentes do minério de ferro que não interessam para a fabricação do aço.

Tanto o ferro gusa como a escória escoam do alto-forno como líquidos incandescentes. Assim, uma diferença marcante entre os procedimentos culinários e os siderúrgicos está na diversidade da temperatura de "cozimento". Enquanto o forno doméstico se limita a poucas centenas de graus celsius, os altos fornos das siderúrgicas rompem a fronteira dos milhares de graus.

Para entrar nos setores de produção, foi necessário o uso de capacete e óculos de segurança.

Chegando ao pátio de matérias-primas, vimos montes separados de coque de cor preta, minério de ferro de cor cinza e calcário de cor branca. O minério de ferro utilizado nesta usina é a hematita, que é constituída principalmente por óxido de ferro, Fe_2O_3 .

Pela parte superior do alto-forno, é introduzida a mistura de minério de ferro, carvão e calcário. Na parte inferior, através de orifícios, é introduzido ar quente sob pressão, que, interage com o carvão, liberando calor.

Na base do alto-forno, vimos a saída de ferro gusa líquido, rubro e incandescente, seguido da escória líquida, também incandescente e brilhante. No local sentíamos um imenso calor.

O carvão é o combustível que alimenta o alto-forno. Este foi construído para

funcionar continuamente, não dependendo assim de energia de fonte externa.

A cada 40 minutos são produzidas cerca de 40 toneladas de ferro gusa. Isto corresponde a uma "corrida do ferro". Com esta informação, pode-se imaginar a grande quantidade de ferro produzida diariamente, levando-se em conta que as siderúrgicas não interrompem seu funcionamento. Além disso, segundo informação que recebemos, a produção de ferro gusa prevista para um ano é de aproximadamente 530000 toneladas, mantidas constantes as condições de produção.

O ferro gusa que sai do alto forno vai sendo armazenado no carro-torpedo, sendo, como pode ser visto na fig. 21, depois transferido para caçambas, que o transportam até o forno Siemens-Martin, localizado na aciaria. É aqui que o ferro gusa é transformado em aço. Durante este processo, periodicamente são retiradas amostras para serem analisadas no laboratório de controle.

Por último, o aço passa por uma "panela", na qual é feito o "ajuste fino" de suas características e, para isto ocorrer, são acrescentados os metais que lhe conferem propriedades especiais - tungstênio, níquel, crômio, nióbio etc.

O aço líquido é vazado em moldes, nos quais fica até solidificar, formando os lingotes, cujas massas variam de 50 kg a 30 toneladas. Os lingotes são depois submetidos ao processo de conformação mecânica, por intermédio de laminadores, resultando "blocos", "tarugos" e "placas". Estes, finalmente, ainda por intermédio de laminadores, são transformados em formas estruturais como "tês", "duplos tês", "cantoneiras", etc., e em outros produtos siderúrgicos importantes, tais como trilhos, tubos, chapas, barras e outros."

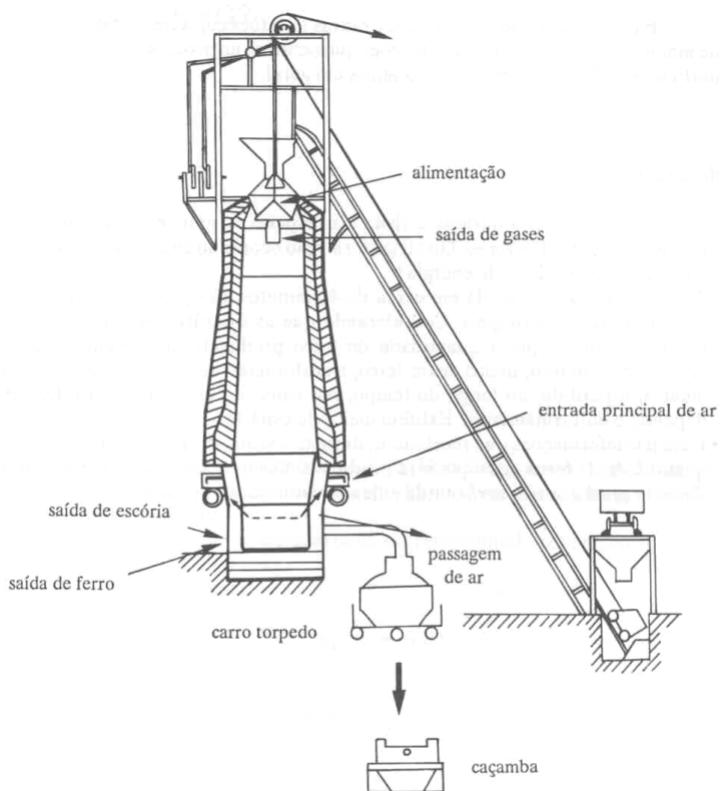
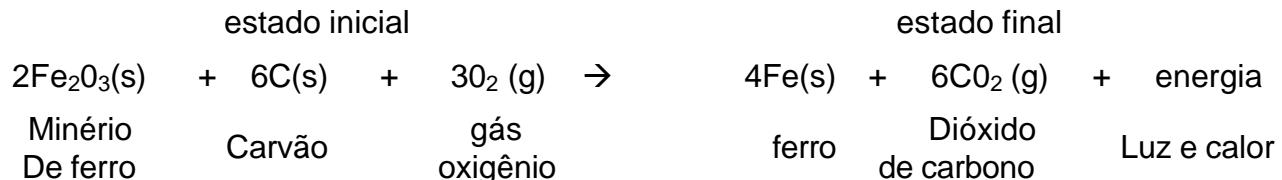


Fig. 21 – Representação esquemática de um alto forno

b) Principais transformações que ocorrem no alto forno

As matérias-primas -minério de ferro (hematita), coque e calcário (carbonato de cálcio)- são colocadas no alto forno, obtendo-se como produto final ferro gusa e a escória. O processamento do minério pode ser representado pela equação global:



Essa equação representa o que é observado na "entrada" (estado inicial) e na "saída" (estado final) do alto-forno. No entanto, nesse trajeto, ocorrem várias etapas.

Para dar início ao processo de transformação, é injetado ar quente pela parte inferior do alto-forno. O gás oxigênio, contido no ar injetado, interage com o carvão, que contém carbono, liberando energia.



Essa interação constitui a primeira etapa, e os seus produtos - o monóxido de carbono e o calor - são os principais agentes do processo siderúrgico global.

O calor liberado nessa combustão causa elevação da temperatura no interior do alto-forno, obtendo-se temperaturas variáveis nas diferentes regiões do alto-forno, favorecendo a ocorrência de transformações químicas distintas.

Na figura 22, estão representadas algumas dessas transformações até a obtenção do ferro-gusa.

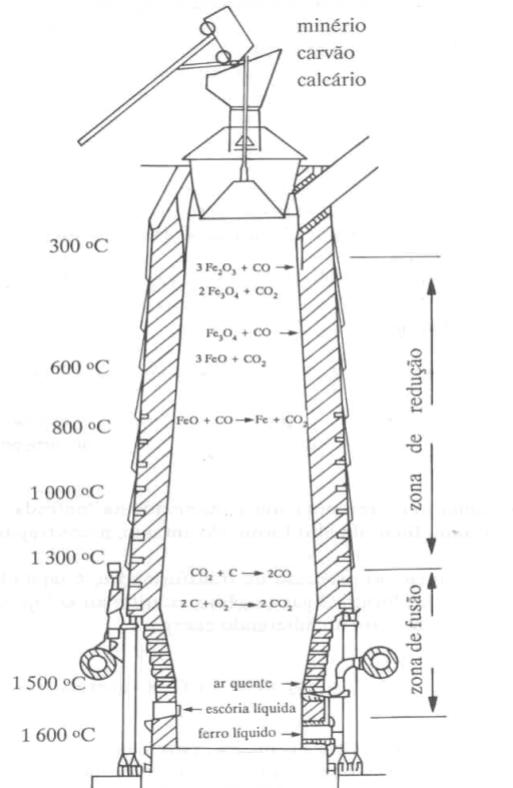


Fig. 22 – Representação das transformações que ocorrem dentro do alto forno

Nota-se que essas transformações têm um reagente comum, o monóxido de carbono. Este gás se difunde pelo interior do alto-forno, entrando em contato com os diferentes compostos de ferro, formados nas diferentes etapas do processo.

Analizando as equações de cada etapa, observa-se que o óxido magnético de ferro (Fe_2O_4) é produzido numa transformação e consumido em outra. O mesmo ocorre com o monóxido de ferro (FeO). Desse modo pode-se representar o processo pela equação global, embora, na prática, a obtenção do ferro ocorra através de várias etapas.

A existência de impurezas no ferro gusa abaixa o ponto de fusão do metal, que é da ordem de 1500°C, para cerca de 1100°C. Como a temperatura na região inferior do alto forno é muito superior ao ponto de fusão do metal impuro, este funde, escorrendo para aparte inferior, onde é recolhido.

Ao mesmo tempo em que o minério é processado, a ganga, constituída geralmente por sílica (SiO_2), é transformada em escória (silicato de cálcio, CaSiO_3) através de processo do qual participa o calcário.

Esse processo também ocorre em etapas, mas pode ser representado pela equação global:



O calcário, devido ao calor, decompõe-se em óxido de cálcio e gás carbônico.



O óxido de cálcio interage com a ganga (impurezas do minério) para formar escória, baixando o ponto de fusão da mesma.



No processo ocorrido dentro do alto forno, observa-se que o minério, o carvão e o calcário (matérias-primas ou reagentes) se transformam em ferro-gusa e escória (produtos), sendo este um exemplo de transformação que se dá através de etapas. Estas correspondem a diversas transformações químicas em que os produtos de uma são os reagentes de outra. Além disso, a maioria das transformações que ocorrem no alto forno são exotérmicas. Isso explica por que esse processo é auto-suficiente em termos energéticos, já que as transformações endotérmicas utilizam energia das transformações exotérmicas, que liberam tanto calor para o ambiente, como foi observado no relato da visita.

2.1.4 – Processos de obtenção do aço

2.1.4.1 – Classificação dos processos

Os processos de fabricação do aço podem ser classificados em:

- a) Quanto a matéria-prima , o aço pode ser obtido a partir de:
Gusa – através dos processos Bessemer, Thomás, LD e Siemens-Martin
Sucata de aço – através dos processos Siemens-Martin e Forno elétrico a arco



Ferro-esponja – através de forno elétrico a arco

b) Quanto a fonte de energia os processos podem ser:

Autógenos – conversores, em que o calor é gerado pelas reações de oxidação

Não autógeno – em que o calor é gerado por combustível (processo Siemens-Martin) ou energia elétrica (forno a arco ou indução)

c) Quanto ao tipo de forno:

Conversores – Bessemer, Thomas e LD

Fornos com abóboda – Siemens-Martin, forno elétrico a arco

Forno a cadiño – Forno elétrico a indução

d) Quanto ao produto (tipo de aço)

Aços comuns – conversores, Siemens-Martin, forno elétrico

Aços especiais para construção mecânica – Siemens-Martin, forno elétrico a arco.

Aços de alta liga (aço ferramenta, aços inoxidáveis, aços refratários) – forno elétrico a arco e forno a indução

Aços muito especiais – forno elétrico a arco, forno de indução à vácuo

2.4.1.2 – Processos de obtenção do aço através do refino do gusa

O ferro de primeira fusão (ferro gusa), é bastante heterogêneo e impuro, e os elementos químicos de sua composição, estão acima dos valores aceitáveis para ser considerado aço, como pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre a composição química do gusa, e dos aços

E.Q.	Composição aproximada do ferro gusa (%)	Composição aproximada do aço (%)
C	3,50 a 4,50	0,06 a 2,00
Mn	0,50 a 2,50	0,50
Si	0,50 a 4,00	0,25
P	0,05 a 2,00	< 0,05
S	0,20	< 0,05

- E.Q. – Elemento Químico

Para transformar o ferro gusa em aço é necessário fazer uma sensível redução de todos os elementos de sua composição, entre os processos mais utilizados para produção de aço em escala industrial, temos o processo Bessemer, o processo Thomas, o processo LD, que são classificados também como processos pneumáticos, o processo Siemens-Martin e os fornos elétricos.

a) Caracterização do Processo Bessemer

Este processo baseia-se em diminuir o C, Si e Mn do gusa líquido soprando ar através do banho e assim convertendo-o em aço. Por ser um processo ácido não são eliminados o P e S, por este motivo a presença desses elementos deve ser mínima.

O oxigênio do ar que se combina com o C e Si do gusa gera calor suficiente para manter fundido o metal e a escória. O equipamento em que se efetua este processo é chamado de conversor (figura 23), suas características de construção, compreendem de uma carcaça de chapa de aços em forma de pera, revestida internamente com tijolos refratários. Normalmente usa-se refratários de sílica (ácido) para evitar a reação com a escória ácida, resultante do processo. O fundo do conversor é perfurado, para injeção de ar, e de fácil troca, já que sua vida útil, devido a severidade no uso é baixa.

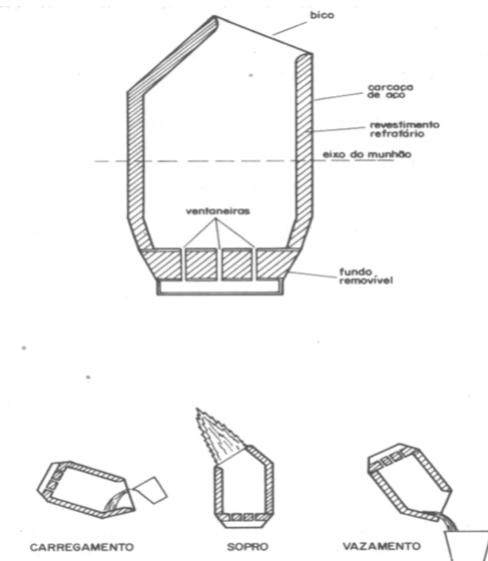


Fig. 23 – Representação esquemática de um conversor Bessemer, e as etapas de operação.

Características técnicas do processo e conversor:

- Carga \approx minério de ferro (pequena quantidade, opcional) + sucata (pequena quantidade) + ferro gusa (líquido);
- Tempo de cada corrida \approx 15 minutos;
- Pressão do ar injetado \approx 1,4 a 1,7 atm;
- Capacidade de carga do conversor \approx 25 a 40 toneladas;
- Temperatura máxima utilizada no processo \approx 1600°C;
- Devido as reações de oxidação dos elementos químicos, serem fortemente exotérmicas (principalmente a do silício), dispensa qualquer tipo de combustível;
- A desoxidação é realizada através da adição de Fe-Si, Fe-Mn ou Al;
- Principais reações do processo: oxidação do silício e oxidação do carbono nesta ordem

b) Caracterização do processo Thomas

Processo semelhante ao Bessemer, porém é indicado para o ferro gusa rico em fósforo e com baixo teor de silício, diferindo na composição da carga, pois adiciona-se cal, para redução do P e S. O conversor é identico ao Bessemer, porém o material refratário para o revestimento interno do conversor é básico (tijolos de dolomita), devido a escória resultante do processo ser básica. A quantidade de cal utilizada depende do teor de Si e P.

Seqüência de operação:

1. carregamento de sucata e minério;
2. carregamento de gusa líquido;
3. injeção de ar;
4. vazamento e desoxidação do aço.

As principais reações ocorrem nesta seqüência, oxidação do Si e Mn, oxidação do C, oxidação do P.



c) Caracterização do processo LD

O processo LD, tem como princípio injeção de oxigênio, pela parte superior do conversor. A injeção do oxigênio é realizada através de uma lança, constituída de três tubos concêntricos de aço, em que O₂ passa pelo tubo central, e os dois tubos adjacentes servem para refrigeração com água. A forma do conversor é similar ao conversor Bessemer e Thomas, conforme figura 24.

Características técnicas do processo e conversor:

- Carga \approx minério de ferro (pequena quantidade, opcional) + sucata (pequena quantidade) + ferro gusa (líquido) + cal;
- Tempo de cada corrida \approx 40 a 50 minutos;
- Distância da lança a superfície do banho \approx 0,3 a 1,2 metros
- Capacidade de carga do conversor \approx 100 toneladas;
- Temperatura máxima utilizada no processo \approx 2500 °C;
- Possuem sistema de tratamento de resíduos gasosos e sólidos, resultantes do processo.
- Oxigênio injetado tem uma pureza que varia de 90 a 95%.
- As principais reações ocorrem nesta ordem, oxidação do Si, oxidação do C.

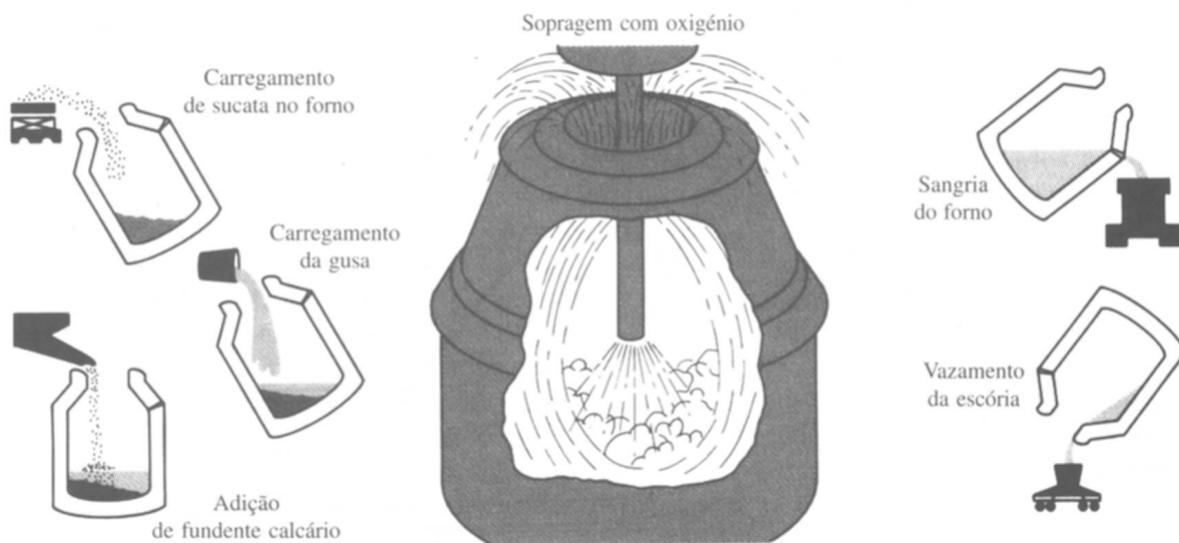


Fig. 24 – Representação da produção de aço num conversor LD.

d) Caracterização do processo Siemens-Martin

Os fornos Siemens-Martin são fornos nos quais podem ser realizados o refino do gusa e também, a elaboração de aço a partir de sucata, o que não é possível nos conversores, pois nestes o calor consumido é proveniente das reações de oxidação dos elementos do banho metálico (carga líquida) por meio da introdução de ar ou oxigênio.

Esses fornos são constituídos de um mufla de tijolos refratários para receber a carga que pode ser sólida ou líquida, e de dois pares de câmaras recuperadoras, também de tijolos refratários.



O forno funciona pelo sistema de regeneração do calor os gases quentes que saem do forno vão aquecendo o gás (combustível se for o caso) e o ar, respectivamente, dando entrada no forno em alta temperatura (figura 25). A inversão da câmara é feita de hora em hora, por meio de válvulas, com o aquecimento da coroa, as chamas de natureza oxidante vão reduzindo o teor de carbono, silício e mangânes do gusa.

Os materiais refratários utilizados no revestimento dos fornos, dependem da natureza da carga, se for silicosa (ácida) reveste-se com refratários ácidos, se for fosforosa (básica) reveste-se com refratários básicos.

Características técnicas do processo e do forno:

- Carga \approx minério de ferro (pequena quantidade, opcional) + sucata + ferro gusa (líquido)+ calcáreo (CaCO_3). A carga pode ser constituída somente de ferro gusa ou sucata.
- Tempo de cada corrida \approx 4 a 5 horas;
- Capacidade de carga do conversor varia de 50 a 300 toneladas;
- Temperatura máxima utilizada no processo \approx 2000 °C;
- A desoxidação é realizada através da adição de Fe-Si, Fe-Mn ou cal dependendo da natureza da carga e do refratário;
- O combustível utilizado pode ser gás natural, gás de coqueria ou óleo combustível.

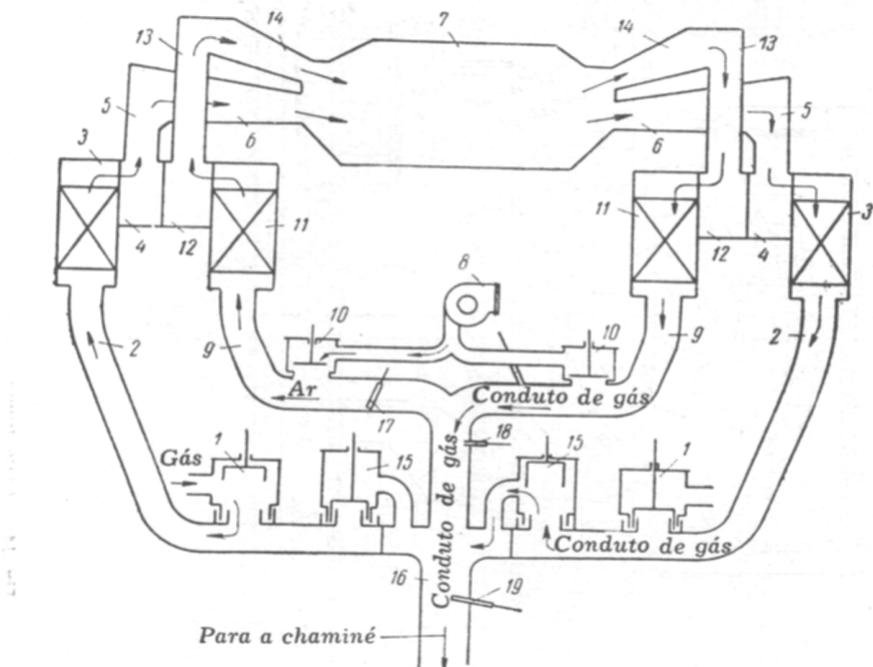


Fig. 25 – Representação esquemática de um forno Siemens-Martin

e) Fornos elétricos

A produção de aços liga de alta qualidade (grande refinamento), é realizada através da utilização de fornos elétricos. A grande vantagem desses equipamentos é a pureza da fonte de calor (energia elétrica), onde o material a ser processado, não interage com o combustível, o que não ocorre com os outros processos já descritos. Outro fator que diferencia esses equipamentos dos demais, é que consegue-se temperaturas elevadas, com fácil regulagem dos parâmetros de energia elétrica, o que não se



consegue por meio de combustíveis.

O sistema de aquecimento dos fornos elétricos podem ser direto e indireto. O aquecimento direto, é quando a corrente elétrica atravessa a carga. E o aquecimento indireto, ocorre quando a corrente não tem contato com a carga, o calor transmite-se por irradiação.

De acordo com a forma de aproveitamento da energia, os fornos elétricos são classificados em três tipos:

- Fornos de arco voltaico;
- Fornos de indução;
- Fornos de resistência.

A utilização dos fornos elétricos, e o processamento do ferro gusa para obtenção do aço, desenvolve-se em três fases:

1. Oxidação – onde são adicionados pedaços de minério de ferro, rico em óxido de ferro com a finalidade de oxidar o carbono, silício, mangânes, fósforo e enxofre.
2. Redução (desoxidação do aço) – feita com adições de ferro, silício, ferro manganês, e alumínio.
3. Acerto da composição desejada – com adições de elementos químicos previamente determinados como: cromo, níquel, vanádio, tungstênio, cobalto e outros. Obtendo-se os aços finos especiais para ferramentas, e os aços liga para componentes mecânicos de equipamentos de grande responsabilidade.

A figura 26, ilustra todo o processo de obtenção do aço desde o minério até os produtos siderúrgicos.

Referências bibliográficas

1. CHIAVERINI, V.. Tecnologia Mecânica. Volume II. Editora McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1979.
2. BOSQUILHA, G. E. et ali. Interações e Transformações I. 6^a Edição. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
3. ARANTE, J. T.. Metalurgia do Ferro. Apostila do curso de mecânica ETFSC. Florianópolis, 1987.



3 - Ligas metálicas ferrosas

As ligas metálicas ferrosas, são as mais utilizadas na construção mecânica, em elementos estruturais e componentes diversos.

O ferro é um metal abundante na crosta terrestre e caracteriza-se por ligar-se com muitos outros elementos metálicos e não-metálicos, o principal elemento dos quais o ferro combina-se, é o carbono. Por este fato, essas ligas também são denominadas de ligas ferro carbono, e dividem-se em dois tipos principais os aços e ferros fundidos.

O fenômeno do polimorfismo, como visto anteriormente com o ferro, também se apresenta nas ligas ferro carbono (será estudado no tópico seguinte). Característica que permite, a essas ligas (principalmente os aços) de serem tratadas termicamente, com o objetivo de alterar as propriedades mecânicas, possibilitando as mais variadas aplicações.

A adequada aplicação das ligas ferro carbono, exige um conhecimento das propriedades, e consequentemente da microestrutura, que são dependentes das condições de processamento e da composição química.

Esse texto consistirá nas definições das principais ligas ferro carbono, e nas classificações, segundo a composição química e também quanto as aplicações. Descrevendo ainda a influência dos elementos de liga.

3.1 - Definições

Definir as ligas ferro carbono, não é tão simples quanto parece, visto que apesar de levarem o nome de dois elementos químicos, na prática as mesmas não são ligas binárias, sempre se tem a presença de elementos químicos secundários oriundos da forma de obtenção desses materiais ou adicionados propositalmente para melhorar as propriedades mecânicas. Serão adotadas as seguintes definições, segundo a tabela 6.

Tabela 6 – Classificação geral e principais definições das ligas ferro carbono

Ligas ferro carbono	Aços	Aços carbono , é a liga contendo geralmente 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de obtenção.
		Aços liga , é a liga que contém, além dos teores de carbono já mencionados nos aços carbono, outros elementos de liga além dos residuais, com objetivo de conferir as propriedades especiais.
	Ferros Fundidos , liga ferro carbono silício, com teor de carbono entre 2,11 e 6,67%.	Branco , é caracterizado por apresentar baixo teor de silício, e microestrutura rica em Fe_3C .
		Maleável , obtido do fofão* branco, mediante trat. térmico de maleabilidade, transformando Fe_3C em grafita nodular.
		Cinzento , caracterizado por apresentar alto teor de silício, e microestrutura com grafita livre e Fe_3C .
		Nodular , obtido do fofão cinzento, através de um tratamento no estado líquido, resultando em grafita esferoidal.

* fofão - Ferro fundido



3.1.1 – Aços

Os aços em geral apresentam as seguintes características e propriedades:

- Cor acinzentada;
- Densidade = $7,8 \text{ g/cm}^3$;
- Temperatura de fusão entre 1250 a $1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Dutibilidade, tenacidade, elasticidade, resistência mecânica, resiliência;
- Soldabilidade, temperabilidade, usinabilidade, forjabilidade.

O principal elemento de liga é o carbono, a variação no teor desse elemento altera as propriedades mecânicas. Por exemplo, com o aumento do teor de carbono a dureza e a resistência a tração aumentam, mas diminui a resiliência e a dutibilidade. Esses materiais podem ser tratados termicamente como será visto no item 7.

Como foi visto anteriormente, esse material divide-se em duas classes os aços carbono e os aços ligas. Sendo que os aços ligas também subdivide-se em aços baixa e alta liga, dependendo do teor de elementos de liga. Se for abaixo de 5% é considerado de baixa liga, sendo superior a 5% é denominado de alta liga.

Os aços ao carbono, podem ser subdivididos também em aços baixo, médio e alto carbono, com teores que variam aproximadamente de: 0,008 a 0,3% para os baixos carbonos, de 0,3 a 0,5% para os aços de médio teor de carbono, e aços alto carbono acima de 0,5%, conforme classificação da ABNT.

3.1.2 – Ferros Fundidos

O ferro fundido, normalmente é obtido da fusão do ferro gusa com sucata (até 50%), em fornos do tipo cubilô, ou fornos elétricos.

O carbono está presente nos ferros fundidos sob duas formas:

- Grafite (carbono puro) – ferro fundido cinzento, nodular, e parcialmente no maleável.
- Cementita (carboneto de ferro Fe_3C) – ferro fundido branco, e parcialmente no maleável.

Os principais elementos que influenciam, na obtenção do tipo de ferro fundido, são o silício e o manganês, sendo que o primeiro elemento químico favorece na obtenção do fofão cinzento e o segundo elemento químico favorece na obtenção do fofão branco.

Ferro fundido cinzento – caracteriza-se por apresentar fratura cinzenta com grão finos. A forma da grafita (lamelar, acicular, esferoidal), serve para classificar os ferros fundidos cinzentos. O fofão nodular ou esferoidal, possui ótima fluidez e ótima usinabilidade. São designados pelos algarismos FCXX, os dois primeiros algarismos indicam que é fofão cinzento, e os dois últimos algarismos representam o limite de resistência a tração. Ex: FC10, fofão cinzento com L.R. a tração de 10 Kgf/mm^2 .

Ferro fundido branco – caracteriza-se por apresentar fratura branca acinzentada, com grão grosseiros. São duros, de difícil usinagem, apresentam notável resistência a abrasão.



3.2 – Classificação dos aços

As ligas ferro carbono, como foi visto, apresentam grande variedade de tipos, só os aços apresentam mais de 1200. Foram então criados sistemas de classificação, que se baseiam em dois critérios: composição química (aços carbono e aços liga), e também quanto a aplicação do aço (inoxidável, ferramenta), e serão vistos a seguir

3.2.1 – Classificação segundo a composição química

Existem vários sistemas para designar os aços, serão estudados os sistemas mais usuais.

a) Sistemas ABNT/SAE/AISI/ASTM de classificação dos aços

A importância do carbono no aço tornou desejável que se dispusesse de uma forma para designar os diferentes tipos de aço, na qual se pudesse indicar o teor de carbono. Usa-se um conjunto de quatro algarismos, no qual os dois primeiros algarismos indicam o tipo do elemento de liga adicionado ao ferro e carbono. E os dois últimos algarismos divididos por 100 indicam o teor de carbono no aço (tabela 7). Por exemplo, o aço ABNT 1020, os dois primeiros algarismos indicam que é um aço ao carbono, e os dois últimos algarismos indicam que o teor de carbono é igual a 0,2% (mais ou menos, permite uma pequena faixa de variação).

Essas designações são aceitas como padrão pela ABNT/SAE/AISI/ASTM. Muitos dos aços comerciais não se incluem nesta classificação, ou pelas composições serem diferentes das utilizadas nos tipos previstos, ou por envolverem faixas menores de variação dos teores dos elementos de liga. Entretanto, estes aços têm aplicações mais específicas e não são mantidos em estoque pelos fornecedores.



Tabela 7 – Classificação dos aços segundo a composição química

Designação	Tipos de Aço
ABNT/SAE/AISI/ASTM*	
10XX	Aços carbono comuns
11XX	Aços de usinagem fácil, com alto teor de S
12XX	Aços de usinagem fácil, com altos teores de P e S
13XX	Aços Mn com 1,75% de Mn médio
15XX	Aços Mn com manganês acima de 1,0%
40XX	Aços Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	Aços Cr Mo c/ 0,4 a 1,1% de Cr e 0,08 a 0,35% de Mo
43XX	Aços Ni Cr Mo c/ 1,65 a 2,0% de Ni, 0,4 a 0,9% de Cr e 0,2 a 0,3% de Mo
46XX	Aços Ni Mo com 0,7 a 2,0% de Ni e 0,15 a 0,3% de Mo
47XX	Aços Ni Cr Mo com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,2% Mo
48XX	Aços Ni Mo c/ 3,25% a 3,75% de Ni e 0,2 a 0,3% de Mo
51XX	Aços Cr com 0,7 a 1,1% de Cr
61XX	Aços Cr V com 0,6 ou 0,95% Cr e 0,1 ou 0,15% de V
86XX	Aços Ni Cr Mo c/ 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,2% de Mo
87XX	Aços Ni Cr Mo c/ 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,25% Mo
88XX	Aços Ni Cr Mo c/ 0,55% de Ni, 0,5% de Cr, 0,3 a 0,4% Mo
92XX	Aços Si com 1,8 a 2,2% de Si
50BXX	Aços Cr c/ 0,2 a 0,6% de Cr e 0,0005 a 0,003 de boro
51BXX	Aços Cr c/ 0,8% de Cr e 0,0005 a 0,003 de boro
81BXX	Aços Ni Cr Mo c/ 0,3% Ni, 0,45% Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003 de boro
94BXX	Aços Ni Cr Mo c/ 0,45% Ni, 0,4% Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003 de boro

* ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE – Society of Automotive Engineers (Sociedade dos engenheiros automotivos)

AISI – American Iron and Steel Institute (Instituto americano de aços e ferros fundidos)

ASTM – American Society for Testing Materials (Sociedade americana de testes de materiais)

b) Sistema de classificação dos Aços segundo as normas alemãs DIN

Uma outra forma de designar os aços é segundo a norma DIN. E pode ser melhor entendida como demonstrado a seguir.

b.1) Aços comuns para construção mecânicas

São indicados com o prefixo St seguidos pelo valor da resistência de ruptura a tração em Kgf/mm².

Ex. Aço St 37 (Aço com $\sigma_r = 37$ Kgf/ mm²)

b.2) Aços carbono de qualidade

São classificados com a letra C seguidos pela percentagem de carbono multiplicado por 100.



Ex. Aço C 15 (aço carbono com 0,15% C)

b.3) Aços liga

São indicados por uma expressão de letras e números com os seguintes significados:

1º Número representativo da % de C.

2º Símbolos químicos dos elementos de liga que mais caracterizam o aço.

3º Percentagem dos elementos de liga dividido por 4-10-100 respectivamente.

Ex: 15 Cr 3 (Aço cromo – 0,15% C – 0,75% Cr)

22 Cr Mo 54 (Aço cromo molibdênio com – 0,22%C – 1,25%Cr – 0,4%Mo)

Se a expressão indicativa for precedida por X, o último grupo de número não representa mais a percentagem convencional dos elementos de ligas e sim a percentagem real segundo ordem.

Ex: X 10 Cr Ni Ti 1892 (Aço com: 0,1%C – 18%Cr – 9%Ni – 2%Ti)

3.2.2 – Classificação quanto a aplicação do aço

Uma outra forma de classificarmos os aços, é segundo a sua aplicação, a seguir temos alguns exemplos deste tipo de classificação.

a) Aços de usinagem fácil – tem essa denominação, pois além de manterem boas propriedades mecânicas, apresentam “corte fácil”. A excelente usinabilidade, conseguida nesses materiais, deve-se a adição de Enxofre, Manganês e Chumbo.

Ex: aço ABNT 1111, aço ABNT 1112.

b) Aços para cementação – a cementação consiste na introdução de Carbono na superfície do aço de modo que este, depois de temperado e revenido, apresente uma superfície mais dura.

A cementação é empregada quando se deseja uma superfície dura e resistente ao desgaste, sobre um núcleo tenaz e insensível a choques e a flexão (engrenagens, eixos, pinos, outros).

Podem ser cementados os aços carbonos e os aços ligas de baixo teor de C (0,08 a 0,25 %). Ex: aço ABNT 1020, aço ABNT 8620.

c) Aços para beneficiamento – os aços para beneficiamento são indicados para a construção de elementos de máquinas de pequenas dimensões, alta resistência e máxima tenacidade.

Estes aços apresentam elevado limite de elasticidade, bom alongamento e grande resistência.

O beneficiamento é um tratamento térmico composto de têmpera e de revenido.

O beneficiamento melhora as propriedades mecânicas do aço, como a resistência a tração e dureza. Principalmente a resistência a solicitações dinâmicas. Ex: aço ABNT 4340, aço ABNT 8640.

d) Aços para molas – esses aços devem apresentar: alto limite de elasticidade, elevada



resiliência, grande resistência mecânica e alto limite de fadiga.

Quando as molas destinam-se a cargas fracas usam-se aços carbono, para cargas de alta intensidade usam-se aços ligados, como Aços Cr ou Aços Ni Cr Mo. Ex: aço ABNT 9260, aço ABNT 5160.

e) Aços para ferramentas e matrizes – estes aços além de apresentarem alta dureza e elevada resistência ao desgaste, devem possuir, boa endurecibilidade, elevada resistência mecânica, elevada resiliência, resistência ao calor, usinabilidade razoável.

As altas durezas e resistência ao desgaste são conseguidas pelo alto teor de carbono ou pela adição de elementos de ligas que aumentam também as outras propriedades. Ex: aço ABNT O₁ (Oil – Óleo), aço ABNT A₂ (Air – Ar).

f) Aços resistentes à corrosão – esses aços também chamados aços inoxidáveis, caracterizam-se por uma resistência a corrosão superior a dos outros aços. Sua denominação não é totalmente correta, porque na realidade os próprios aços ditos inoxidáveis são passíveis de oxidação em determinadas circunstâncias. A expressão é mantida por tradição. Quanto a composição química, os aços inoxidáveis caracterizam-se por um teor mínimo de cromo da ordem de 12%.

A resistência a corrosão destes aços é explicada por várias teorias. Uma das mais bem aceitas é a teoria da camada protetora constituída de óxidos. Segundo essa teoria, a proteção é dada por uma fina camada de óxidos, aderente e impermeável, que envolve toda superfície metálica e impede o acesso de agentes agressivos. Outra teoria, surgida posteriormente, julga que a camada seja formada por oxigênio adsorvido. O assunto é controverso e continua sendo objeto de estudos e pesquisas. Entretanto, o que parece estar fora de dúvida é que, para apresentarem suas características de resistência a corrosão, os aços inoxidáveis devem manter-se permanentemente em presença de oxigênio ou de uma substância oxidante.

Dependendo da aplicação, estes aços devem possuir boa resistência mecânica e ao calor, além da resistência a corrosão.

Classificação - costuma-se agrupar os aços inoxidáveis, segundo sua estrutura cristalina, nas seguintes classes:

- Aços inoxidáveis ferríticos – apresenta estrutura ferrítica em qualquer temperatura. É ferromagnético e não endurecível por têmpera. Ex: aço AISI 430.
- Aços inoxidáveis martensíticos – apresenta como característica predominante a capacidade de adquirir estrutura martensítica por têmpera. Este aço é ferromagnético. Ex: aço AISI 410 e 420.
- Aços inoxidáveis austeníticos – apresenta estrutura austenítica em qualquer temperatura. É paramagnético e não endurecível por têmpera. Mediante deformação a frio, pode adquirir estrutura parcialmente martensítica, apresentando então leve ferromagnetismo. Ex: aço AISI 302, 303, 304, 316L.

Podendo existir também as estruturas mistas, os chamados aços inoxidáveis duplex.

Influência do teor de carbono – o teor de carbono influencia nas características dos aços inoxidáveis de diferentes modos.

A partir de um certo teor, o carbono torna temperáveis determinados aços, que por este motivo são classificados como martensíticos; com teores mais baixos de carbono, o



mesmo aço não é temperável, enquadrando-se portanto entre os aços ferríticos. Esse é o caso típico dos aços cromo com 13% a 18% de Cr.

Quanto as características de resistência a corrosão, o carbono tem uma influência desfavorável nos aços austeníticos: os de teor mais elevado são normalmente mais propensos a sofrer corrosão intercristalina do que os de teor mais baixo.

Influência dos elementos de liga – Examinaremos rapidamente a função e a influência dos principais elementos de liga comumente adicionados aos aços inoxidáveis.

CROMO é o elemento de liga fundamental dos aços inoxidáveis, adicionado em teores mínimos da ordem de 12%, sua função básica está relacionada com a formação de uma película impermeável, que protege o aço contra o ataque de agentes agressivos.

NÍQUEL depois do cromo é o elemento de liga mais importante e mais característico dos aços inoxidáveis. O níquel favorece a formação de austenita, tendendo a aumentar o campo de existência desta fase, que se estende até a temperatura ambiente no caso dos aços inoxidáveis austeníticos. Além disso, o níquel aumenta consideravelmente a resistência ao calor e a corrosão.

MOLIBDÊNIO geralmente adicionado em teores da ordem de 2 a 4%, melhora sensivelmente a resistência a corrosão e ao calor.

TITÂNIO, NIÓBIO, TÂNTALO possuem grande afinidade pelo carbono e são adicionados aos aços inoxidáveis como estabilizadores de estrutura, formando carbonetos muito estáveis. Sua presença evita a formação de carbonetos de cromo, removendo assim o fator principal da corrosão intercristalina. Isso é particularmente importante nas peças soldadas que por qualquer circunstância não possam ser recozidas após a soldagem.

ENXOFRE, SELÊNIO quando adicionados intencionalmente aos aços inoxidáveis, tem a função de melhorar a usinabilidade, tal como nos aços para construção mecânica.

g) Aços para fins elétricos e magnéticos – destinados a fabricação de núcleos de equipamentos eletromagnéticos, geralmente caracterizado por alto teor de silício.

h) Aços resistentes ao calor – caracterizam-se por apresentar resistência química e mecânica a ação de altas temperaturas.

3.3 – Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços

A tabela 8 apresenta a influência de alguns elementos de liga nas propriedades dos aços.



Tabela 8 – Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços

Propriedades	Elementos Químicos													
	Si	Mn ¹	Mn ²	Cr	Ni ³	Ni ⁴	Al	W	V	Co	Mo	Cu	S	P
Químicas														
Resistência a corrosão	-	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	-	-	↑	↓	-
Tecnológica														
Nitretabilidade	↓	~	-	↑	-	-	↑	↑	↑	-	↑	-	-	-
Oxidação superficial	↓	~	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	~	-	-
Usinabilidade	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	↓	-	~	↓	~	↑	↑
Forjabilidade	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓
Resistência ao desgaste	↓	↓	-	↑	↓	-	-	↑	↑	↑	↑	-	-	-
Formação de carboneto	↓	~	-	↑	-	-	-	↑	↑	-	↑	-	-	-
Soldabilidade	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓	↓
Temperabilidade	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	-	-
Mecânicas														
Resis. mec. a quente	↑	~	-	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	-
Elasticidade	↑	↑	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resistência ao impacto	↓	~	-	↓	~	↑	↓	~	↑	↓	↑	~	↓	↓
Estricção	~	~	~	↓	~	↑	↓	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Alongamento	↓	~	↑	↓	~	↑	-	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Limite de escoamento	↑	↑	↓	↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
Lim. Ruptura a tração	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
Dureza	↑	↑	↓	↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-
↑ aumenta ↓ diminui ~ constante - não conhecido ↑ ou ↓ efeito pronunciado														

- 1 Manganês em aços perlíticos
- 2 Manganês em aços austeníticos
- 3 Níquel em aços perlíticos
- 4 Níquel em aços austeníticos



4 – Diagrama de Fase ou Equilíbrio

4.1 – Introdução

Diagrama de fase ou equilíbrio são representações gráficas de um sistema de ligas, por meio dos quais os estados físicos e os constituintes estruturais (fases), em suas quantidades relativas, são conhecidos em função das composições, temperaturas, e normalmente sob pressão atmosférica. Os diagramas normalmente são determinados sob condições de equilíbrio.

O estudo do diagrama de fase (ou de equilíbrio), é de grande importância para o técnico mecânico, pois o mesmo serve de instrumento para compreender e prever o comportamento dos metais e suas ligas nas transformações térmicas, como a solidificação, fusão, tratamentos térmicos e processos de difusão.

Algumas definições devem ser vistas, para um melhor entendimento do assunto.

4.1.1 – Definições das terminologias utilizadas no estudo do diagrama de equilíbrio

Fase – do ponto de vista microestrutural, fase é uma região num material que difere de outra, no que se refere à estrutura, e/ou composição, e consequentemente influencia nas propriedades dos materiais.

Equilíbrio - é a condição de mínima energia livre de um material puro ou ligado, que não apresenta modificações espontâneas em suas propriedades, com o decorrer do tempo, não absorvendo e nem perdendo energia, para certas imposições de concentração, pressão e temperatura. Enfim, podemos dizer que um material puro ou ligado está em equilíbrio, em relação a um processo, quando as reações em um sentido são equivalentes energeticamente as em sentido inverso.

Equilíbrio metaestável, ou equilíbrio instável - ocorre quando remanesce um estado de equilíbrio interno com íntima possibilidade de ser ativado, devendo, entretanto vencer uma barreira energética e atingir uma configuração mais estável, de menor energia. A martensita dos aços endurecidos é metaestável em relação aos constituintes ferrita e cementita do sistema Fe-C. Um líquido superrefriado é metaestável em relação ao estado sólido.

Componentes - são elementos químicos que participam na formação de uma liga, como por exemplo, o ferro e o carbono nos aços e ferros fundidos.

Constituintes - são quaisquer substâncias ou espécies químicas que participam na configuração de um sistema de ligas metálicas. Praticamente constituinte é sinônimo de fase, pois temos três possibilidades básicas nas formas de apresentação dos constituintes no estado sólido das ligas metálicas:

a. **Componentes** - constituintes simples ou elementos químicos, como por exemplo, nos bronzes ao chumbo para mancais, onde o cobre e o chumbo imiscíveis são perfeitamente identificados ao microscópio, constituindo um exemplo de sistema de dois componentes e de duas fases;

b. **Soluções sólidas**: como por exemplo, o cobre e o níquel, que são perfeitamente solúveis (mutuamente) em quaisquer proporções no estado sólido, constituindo um exemplo de sistema de dois componentes em uma única fase (constituinte);

c. **Compostos intermetálicos e fases intermediárias**, são constituintes com



propriedades e formulações atômicas específicas, citando-se como exemplos, a cementita (Fe_3C) nos aços, CuZn em latões comuns e Cu₃Sn nos bronzes para fundição, os quais participam com outras fases dos respectivos sistemas.

Linha Líquidus - é o conjunto de todos os pontos correspondentes às temperaturas de início de solidificação, de todas as ligas do sistema, acima da qual teremos somente constituintes no estado líquido.

Linha Sólidus - é conjunto de todos os pontos relativos às temperaturas de fim de solidificação das ligas do sistema, abaixo da qual somente teremos estados sólidos.

Linha Sólvs - é conjunto dos pontos que separam áreas de solubilidade sólida, parcial, de outras áreas sólidas bifásicas, sendo um dos limites das soluções sólidas terminais.

Linhas Intermediárias - é o conjunto de pontos que situam-se entre as linhas sólvs, no estado sólido, e delimitam os campos de domínios monofásicos e bifásicos dos compostos químicos e as fases intermediárias. Algumas dessas linhas são isotérmicas, pois seus pontos encontram-se sempre a mesma temperatura, para qualquer composição da liga.

4.1.2 – Informações que podem ser obtidas através dos diagramas de fases

Algumas dados podem ser obtidos através de análise do diagrama, como por exemplo.

- ✓ identificar, em condições de equilíbrio (de resfriamento lento), quais as fases presentes para diferentes composições e temperaturas.
- ✓ Indicar, em condições de equilíbrio, a solubilidade no estado sólido de um elemento (ou composto) no outro.
- ✓ Indicar a temperatura à qual uma liga, resfriada em condições de equilíbrio, começa a solidificar, assim como o intervalo de temperaturas em que a solidificação ocorre.
- ✓ Indicar a temperatura à qual as diferentes fases começam a fundir.

4.2 – Construção dos diagramas de fases

Os diagramas de fases podem ser construídos, através da determinação das linhas que delimitam as transformações polimórficas dos sistemas de ligas, através das seguintes técnicas experimentais (ensaios):

- a) de análise térmica;
- b) de dilatometria; (arranjo atômico)
- c) elétricas e magnéticas (resistividade e condutividade dos constituintes presentes);
- d) metalográficas ótica e eletrônica (microestruturas);
- e) mecânicas (propriedades mecânicas dos constituintes presentes);
- f) eletroquímicas;
- g) de difração por raios X (arranjo atômico);

O diagrama de fase que será estudado é o da liga ferro carbono, caracteriza-se por ser binário, pois apresenta apenas dois componentes como a própria designação indica.



4.2.1 – Diagrama de fase ferro carbono

O diagrama ferro carbono (fig. 27) é representado através de um sistema cartesiano, onde no eixo das ordenadas (eixo y), representa-se a escala de temperaturas. Normalmente essa escala inicia na temperatura ambiente e varia até uma temperatura superior a de fusão das ligas ferro carbono. E no eixo das abscissas (eixo x) estão indicadas as composições químicas em percentuais. Normalmente, na extrema esquerda desse eixo, representa-se o ferro puro sem nenhuma adição de carbono, e na extrema direita desse eixo, representa-se o ferro com a máxima adição de carbono que é de 6,7%, pois o carbono forma com o ferro o composto Fe_3C , que contém, aproximadamente 6,7% de carbono. Pouco se conhece acima desse teor de carbono, na realidade acima de 4,5% de carbono essas ligas não tem aplicação tecnológica.

A demarcação dos pontos se da através das técnicas citadas anteriormente, sendo que sobre o eixo das ordenadas, temos o ferro puro. Consequentemente as temperaturas de polimorfismo desse componente serão os pontos iniciais das linhas de transformação polimórficas das ligas ferro carbono. Construindo as linhas a partir desses pontos, todos os pontos críticos obtidos, são identificados no sistema de coordenadas, formando as linhas solidus, líquidus, solvus e intermediárias. Podemos representar as linhas de transformações polimórficas através das linhas GS ou A3, a linha PSK ou A1 e a linha ES ou Acm, indicam a transformação de $Fe\gamma$ em $Fe\alpha$.

O ponto A, do diagrama corresponde ao ponto de fusão do ferro puro que é igual a 1538 °C, e o ponto D ainda impreciso, é o ponto de fusão da cementita (Fe_3C).

A região superior do diagrama constituída pelas linhas AC, CD, AE e ECF delimitam as reações que ocorrem na mudança de estado líquido para o sólido. A região inferior do diagrama, formada pelas linhas GS, SE e PSK indicam que somente ocorrem reações de mudança de fase no estado sólido.

O ponto C, na região superior do diagrama, a 1148 °C indica a presença de uma liga eutética com 4,3% de carbono, consequentemente a presença de uma reação eutética, que é caracterizada por:

Fase Líquida « Fase Sólida A + Fase Sólida B

Para o diagrama ferro carbono, será:

Liga Fe-C líquida(com 4,3% C) « Austenita ($Fe\gamma$) + Cementita (Fe_3C)

Esta liga é a que apresenta menor ponto de fusão e solidificação. Existe uma similaridade entre os pontos C e S, este último representa uma reação eutetóide que é caracterizada por:

Fase Sólida C « Fase Sólida A + Fase Sólida B

Para o diagrama ferro carbono, será:

Austenita ($Fe\gamma$) (com 0,77% C) « Ferrita ($Fe\alpha$) + Cementita (Fe_3C)

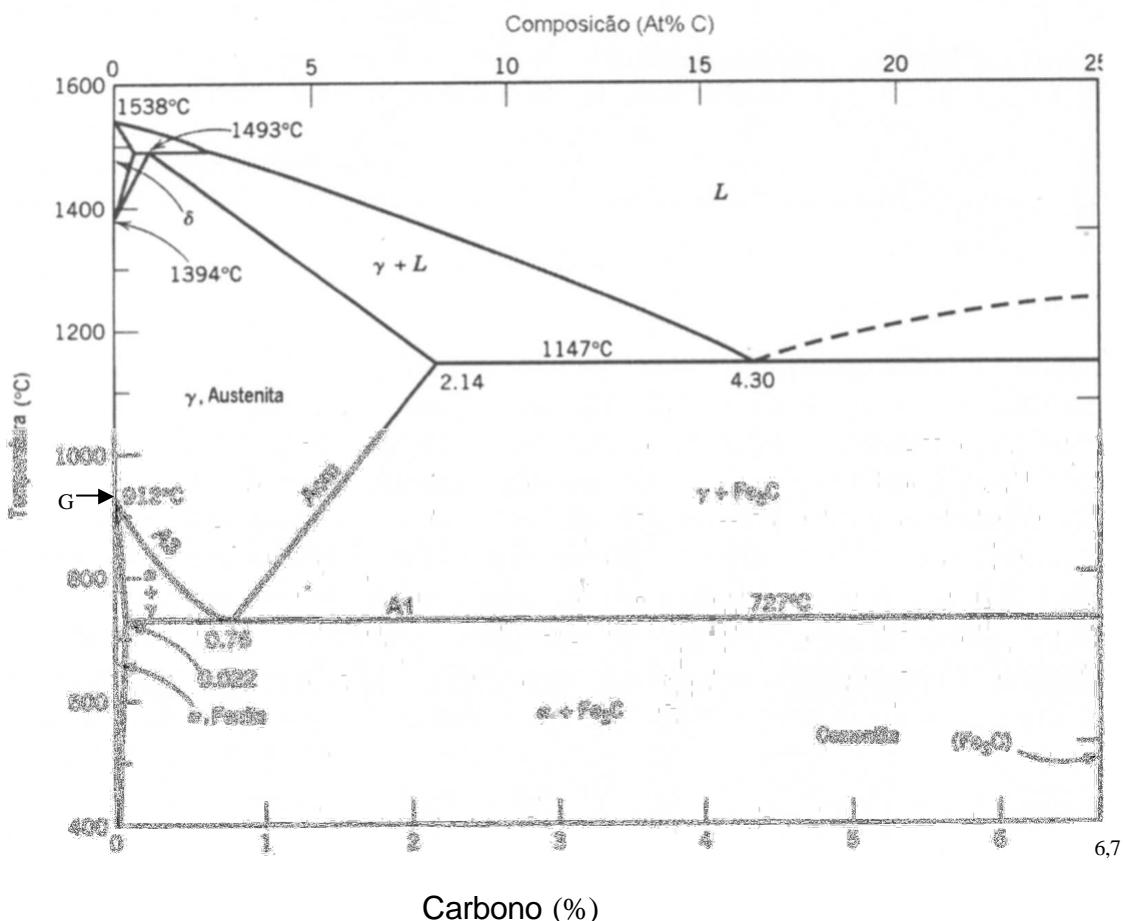


Fig. 27 – Diagrama de Fase (Equilíbrio) Ferro Carbono

Essas informações somadas as definições dos aços e fofos do item 3, permitem classificar as ligas ferro carbono, para uso no diagrama, da seguinte forma:

Aço	Hipoeutetóide	0,008 % < C < 0,77 %
	Eutetóide	C = 0,77 %
	Hipereutetóide	0,77 % < C < 2,11 %
Ferro Fundido	Hipoeutético	2,11 % < C < 4,3 %
	Eutético	C = 4,3 %
	Hipereutético	4,3 % < C < 6,67 %

Cada região do diagrama apresenta constituintes característicos, que serão definidos a seguir:

Austenita – é definida como uma solução sólida de carbono em ferro gama (Fe γ). Nos aços carbono, se os mesmos não contém elementos de liga, a austenita começa a se formar em temperatura de 727°C (linha A₁), e a partir da temperatura crítica superior (linhas A₃ e A_{cm}). A austenita é formada por cristais cúbicos de face centrada, tem dureza de aproximadamente 300 HB, L.R. (Limite de Resistência a ruptura) = 1000 N/mm², alongamento de 30% e não é magnética.

Ferrita – pode ser definida como uma solução sólida de carbono em ferro alfa (Fe α). Sua solubilidade a temperatura ambiente é muito pequena de 0,008% de



carbono, a máxima solubilidade é atingida a temperatura de 727°C. É um dos constituintes mais dúcteis dos aços. Cristaliza-se sob a forma cúbica de corpo centrado. Apresenta dureza de aproximadamente 90 HB, L.R.= 280 N/mm², alongamento de 35 a 40%, é magnética até 770°C.

Cementita – é o carboneto de ferro, de fórmula Fe₃C, e contém aproximadamente 6,7% de carbono e 93,3% de ferro. É um dos constituintes mais duros e frágeis dos aços, alcançando dureza de 700 HB ou 68 HRc. É magnética até a temperatura de 210 °C. Cristaliza-se sob a forma ortorrômbica.

Perlita – é um constituinte composto por 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita. A perlita tem uma dureza de aproximadamente 200 HB, L.R. = 800N/mm², e alongamento de 15%. Normalmente, em condições de equilíbrio a perlita apresenta estrutura lamelar, com placas alternadas de ferrita e cementita.

4.2.1.1 – Descrição do poliformismo na zona crítica durante o resfriamento ou aquecimento para os aços

As transformações polimórficas que ocorrem com as ligas ferro carbono, na zona crítica, que é delimitada pelas linhas A₁, A₃ e A_{cm}, na parte inferior, e na parte superior é envolvida pelas linhas sólidus. Podemos descrever essas transformações, exemplificando através de um aço hipoeutetóide, eutetóide e hipereutetóide.

a) **Aço hipoeutetóide** – se uma amostra de um aço com 0,4% de carbono for aquecida a cerca de 900 °C (fig. 28 ponto a), durante o tempo suficiente para todo o material se transforme em austenita. E posteriormente, se esse aço for resfriado lentamente até a temperatura b (aproximadamente 775°C), ocorre a nucleação e crescimento da ferrita, principalmente nos contornos de grãos da austenita. Se esta liga for resfriada lentamente da temperatura b até a temperatura c, a quantidade de ferrita aumentará, até que 50% da austenita tenha se transformado. Enquanto o aço é resfriado de b para c, o teor de carbono da austenita restante aumenta de 0,4% para 0,77%. Se as condições de resfriamento lento se mantiverem, a austenita restante transforma-se isotermicamente a temperatura de 727°C em perlita, através da reação eutetóide. A figura 29 é uma fotomicrografia obtida no microscópio ótico, da estrutura de um aço hipoeutetóide, com 0,35% C, que foi austenitizado e resfriado lentamente até a temperatura ambiente.

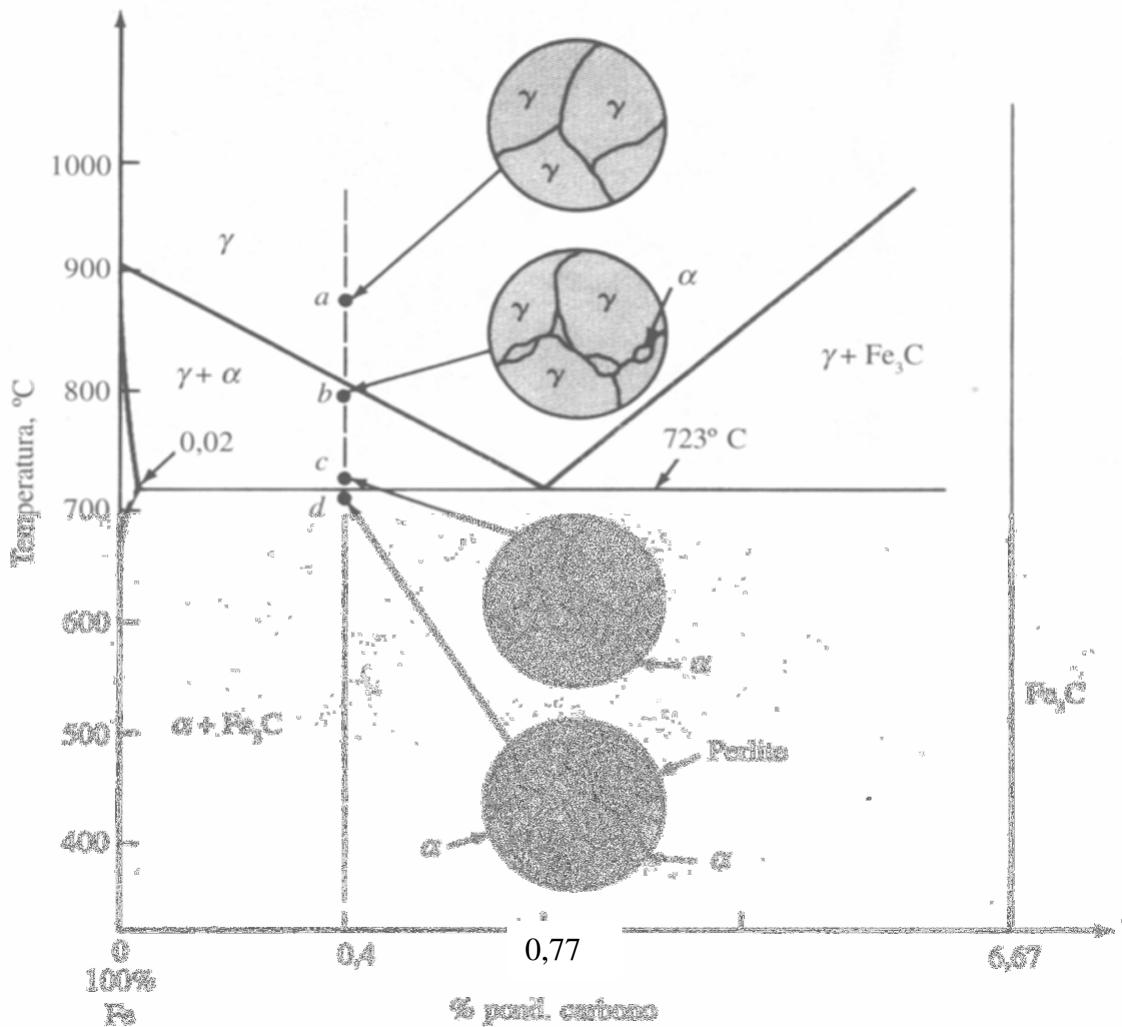


Fig. 28 – Transformação de um aço hipoeutetóide (0,4% C), em resfriamento lento.

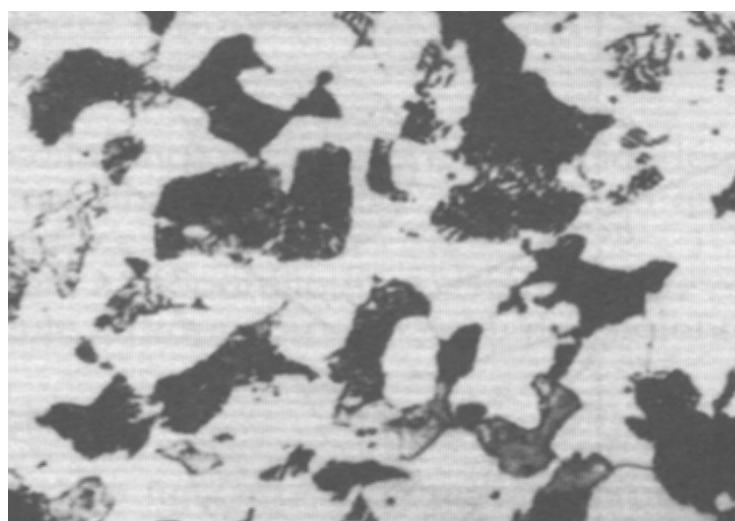


Fig. 29 – Micrografia de um aço hipoeutetóide com 0,35% C. O constituinte branco é a ferrita e o preto é a perlita.

- b) **aço eutetóide** – se uma amostra de um aço com 0,77% C, for aquecida a 750 °C e
- Professores Fernando José Fernandes Gonçalves e Marcelo Martins



mantida a essa temperatura durante o tempo suficiente, para que todo o material seja transformado em austenita. E depois, esse aço for resfriado lentamente, a uma temperatura um pouco acima da temperatura eutetóide, a sua estrutura permanecerá austenítica, como indicada no ponto a da figura 30. O resfriamento posterior até a temperatura eutetóide, ou uma temperatura um pouco abaixo, vai provocar a transformação de toda austenita numa estrutura lamelar de placas alternadas de ferrita e cementita, que recebe o nome de perlita. A figura 31, mostra a microestrutura de um aço eutetóide resfriado lentamente.

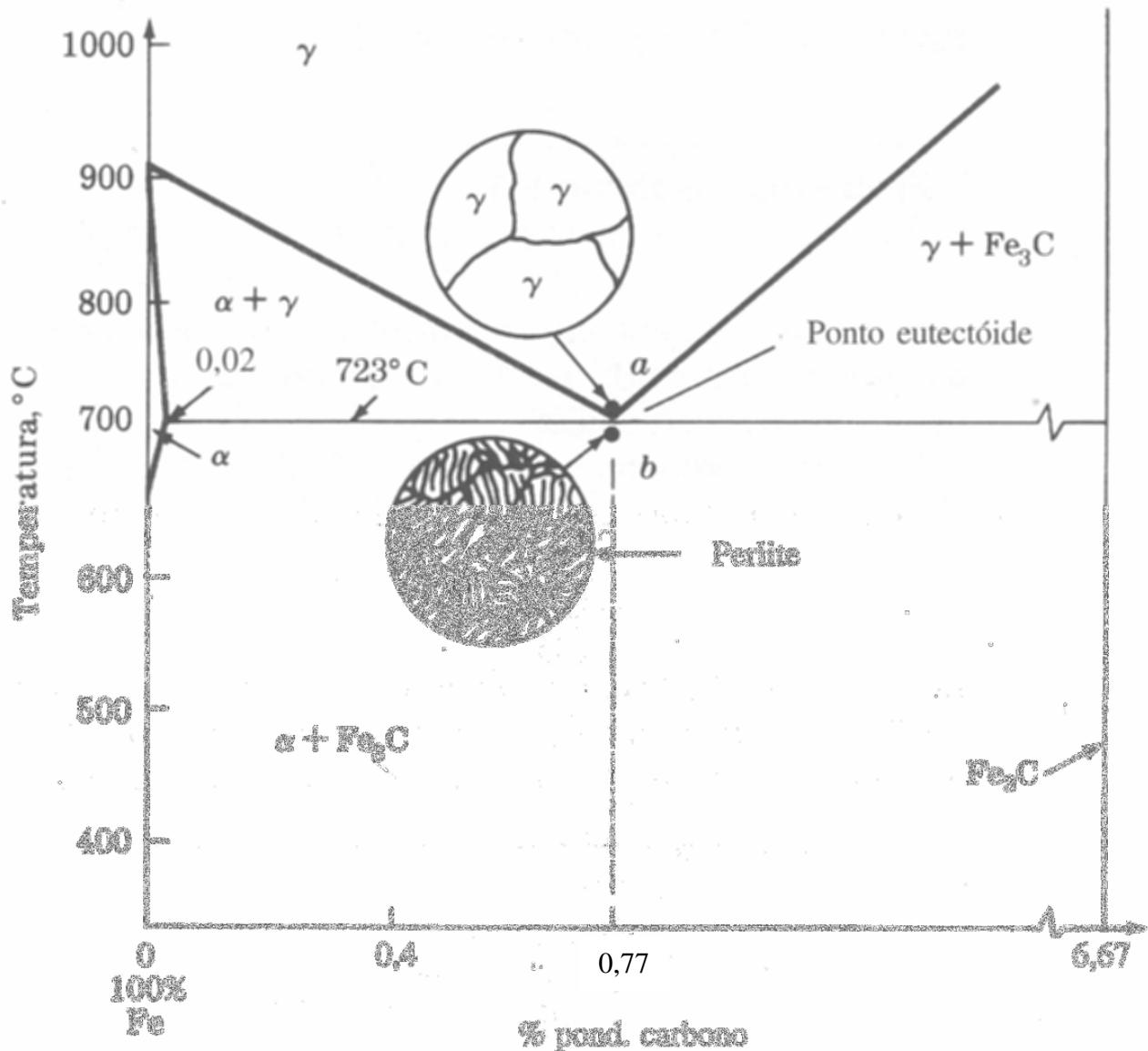


Fig. 30 – Transformação de um aço eutetóide, em resfriamento lento.

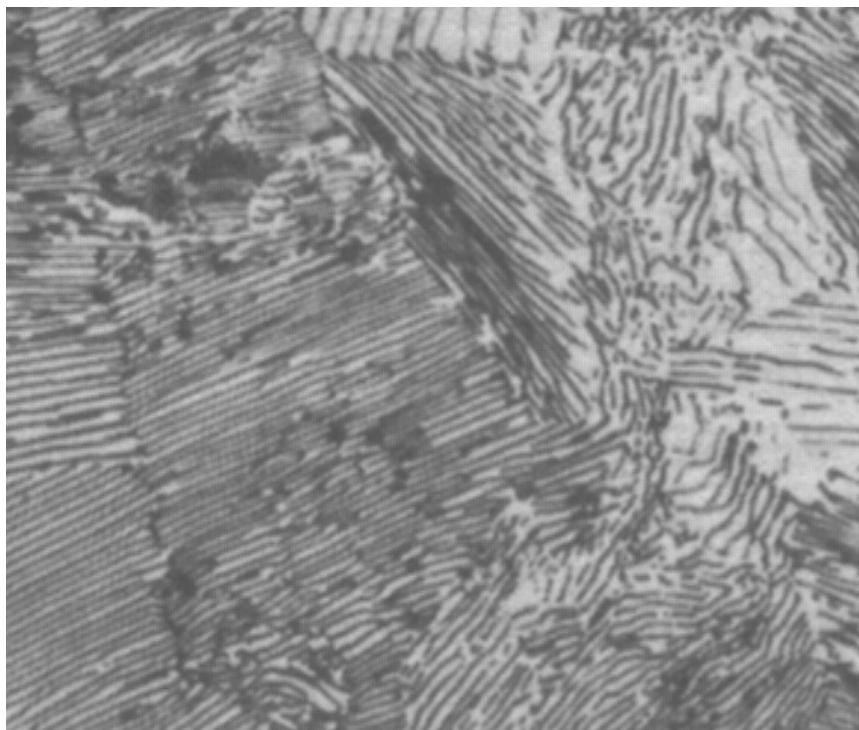


Fig. 31 – Microestrutura de um aço eutetóide, resfriado lentamente. Consiste em perlita eutetóide lamelar. A fase que após o contraste aparece mais escura é a cementita, e fase branca é ferrita.

c) **Aço hipereutetóide** – se uma amostra de aço com 1,2%C, for aquecida acerca de 950 °C e mantida a essa temperatura durante tempo suficiente, a sua estrutura tornar-se-á essencialmente austenítica (ponto a da fig. 32). Se o aço for resfriado lentamente até a temperatura b da figura 32, ocorre a nucleação e crescimento de cementita, inicialmente nos contornos de grãos da austenita. Continuando o resfriamento lento até o ponto c da figura 32 situado imediatamente acima de 727 °C, vai formar-se maior quantidade de cementita nos contornos de grãos da austenita. Se mantiverem as condições próximas do equilíbrio, ou seja, se a liga for resfriada lentamente, a quantidade total de carbono na austenita restante da liga varia de de 1,2 % para 0,77%.

Continuando o resfriamento lento até 727 °C ou a uma temperatura um pouco abaixo, a austenita restante vai transformar-se em perlita através da reação eutetóide, como indicado no ponto d da figura 32. A figura 33 apresenta um fotomicrografia, obtida no microscópio ótico, da estrutura de um aço hipereutetóide com 1,2%C, que foi austenitizado e posteriormente resfriado lentamente até a temperatura ambiente.

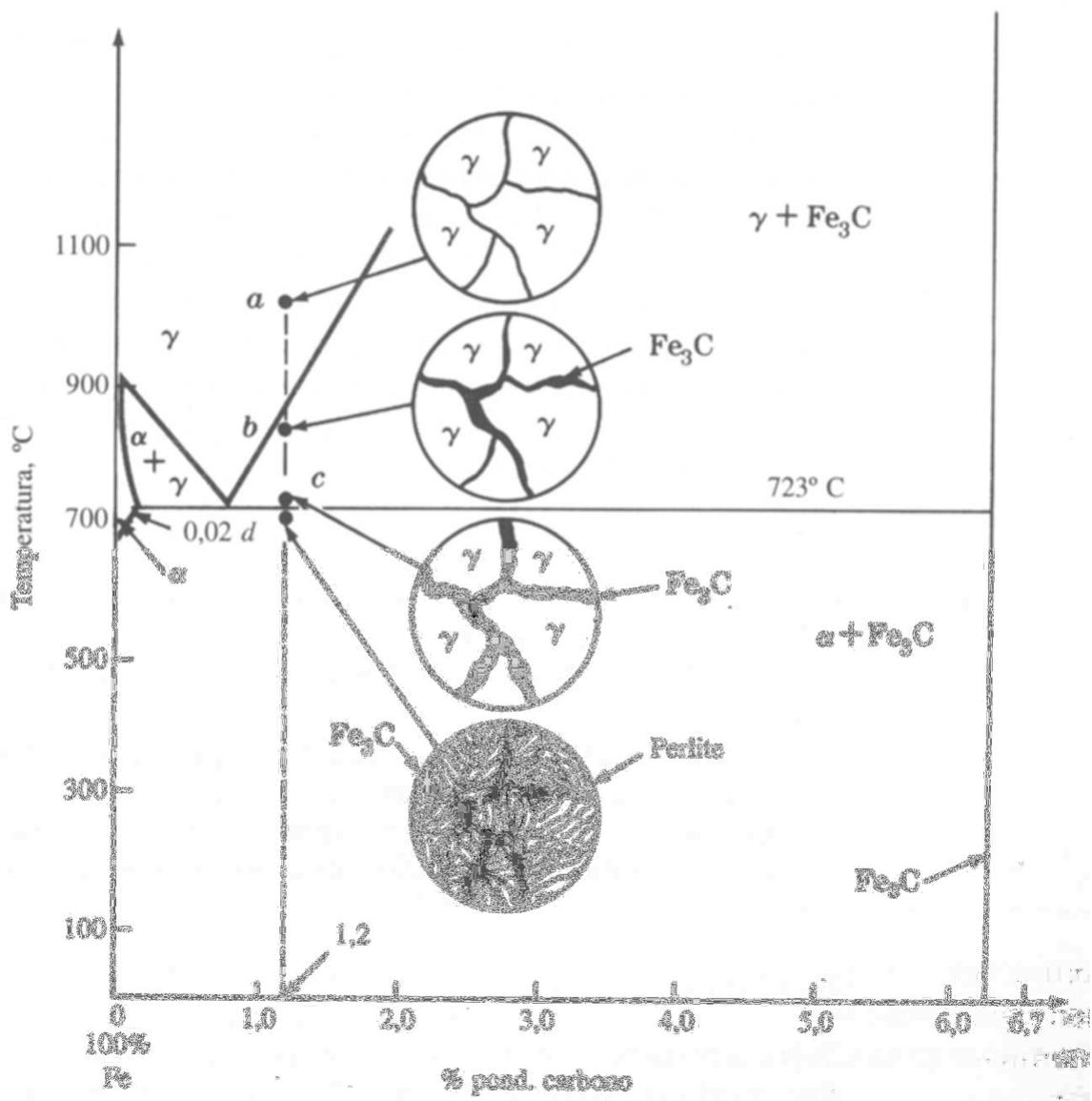


Fig. 32 – Transformação de um aço hipereutetóide, com 1,2% C, em resfriamento lento.



Fig.33 - Microestrutura de um aço hipereuteítico com 1,2%C, resfriado lentamente desde a região austenítica. A cementita é o contínuo branco no contorno de grão da perlita lamelar.

5 – Diagrama “Transformação-Tempo-Temperatura” (Curvas TTT)

5.1 – Introdução

O diagrama de fase Fe-C estudado anteriormente, permite a verificação das transformações que a austenita apresenta durante o resfriamento muito lento, resultando nos constituintes ferrita, cementita e perlita, que de acordo com sua quantidade relativa, influenciam nas propriedades mecânicas dos aços (uma das ligas ferro carbono mais utilizadas na construção mecânica), como pode ser observado na figura 34.

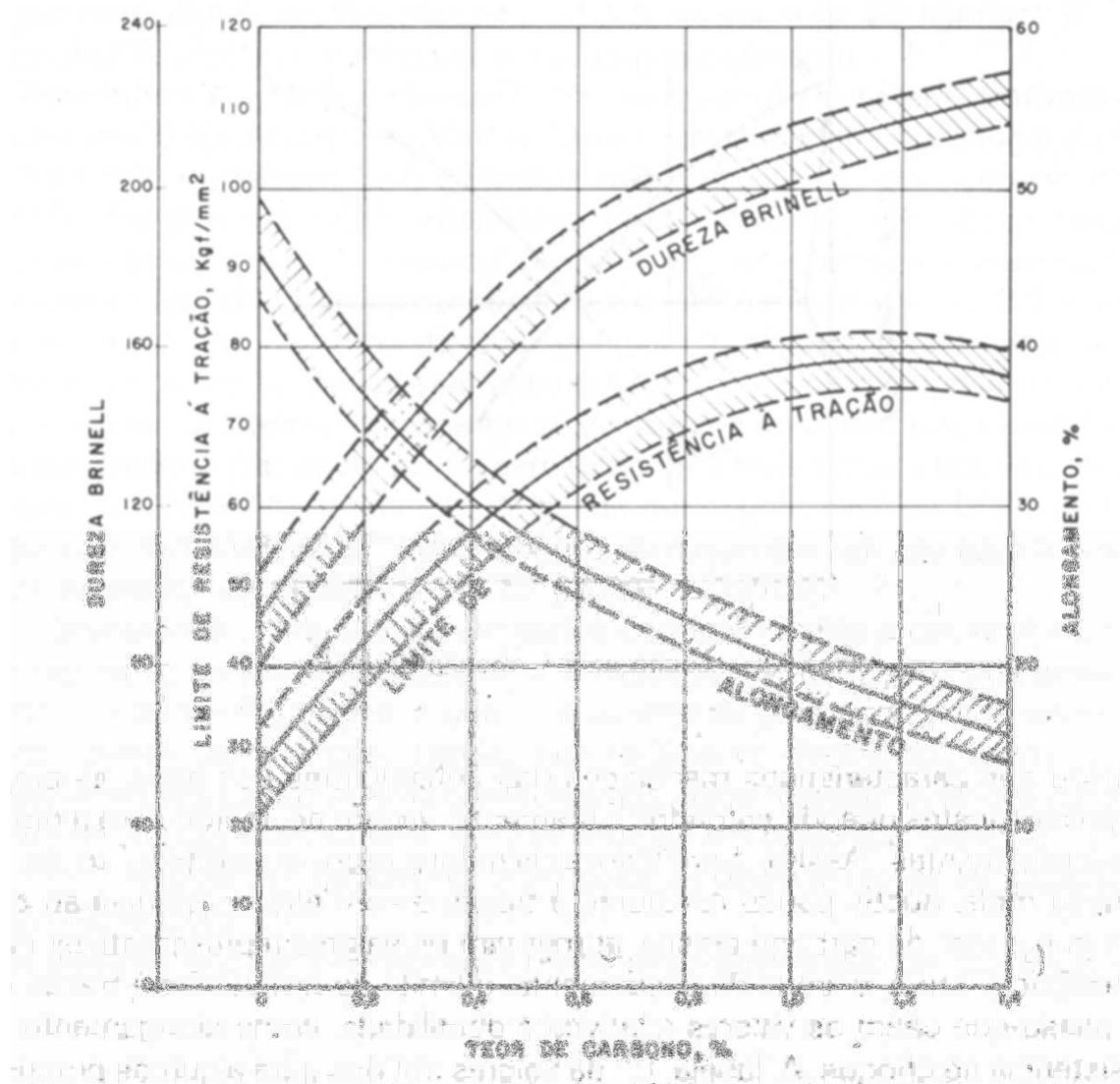


Fig. 11 – Influência do teor de carbono (e consequentemente dos constituintes) sobre as propriedades mecânicas de aços carbono esfriados lentamente.

A formação da ferrita e da cementita (consequentemente da perlita), deverá acontecer com o polimorfismo (mudança de reticulado cristalino do ferro), através da movimentação atômica (difusão) da austenita. Essas transformações necessitam de tempo para ocorrer.



Se a velocidade de esfriamento da austenita for aumentada significativamente, não haverá tempo para a transformação nesses constituintes. E a austenita formará outro constituinte, de grande importância para aplicação dos aços, a martensita.

Martensita é uma solução sólida saturada de carbono em ferro alfa ($Fe\alpha$). É obtida por esfriamento rápido dos aços. Apresenta-se sob a forma de agulhas e cristaliza-se na forma tetragonal, devido a deformação que se produz na rede cristalina com a inserção dos átomos de carbono. É um constituinte extremamente duro e resistente, podendo atingir uma dureza de até 68 HRC, e o L.R. pode ser de até 2500 N/mm^2 . Seu alongamento é de no máximo 2,5%, é magnética (fig. 35)



Fig. 35 – Martensita. Aço com 0,5% de carbono, temperado em água fria.

Para uma análise mais detalhada dessas transformações, será analisado o aço eutetóide. Esse aço apresenta uma única temperatura crítica a $727\text{ }^{\circ}\text{C}$. Abaixo dessa temperatura, se o esfriamento for extremamente lento, o constituinte obtido será a perlita. Se aumentarmos a velocidade de extração de calor, a temperatura crítica de transformação, será menor. O produto que resulta da transformação, nessas condições, até uma certa velocidade, ainda é perlita, com morfologia e propriedades que dependem, contudo da velocidade de extração de calor. A partir de uma certa velocidade, a uma temperatura mais baixa, formará além da perlita outro constituinte a martensita. Mas se a velocidade de extração for ainda maior, o constituinte resultante será só martensita. A velocidade que apresenta essa transformação, recebe o nome de velocidade crítica de esfriamento, de grande importância no estudo dos tratamentos térmicos dos aços.

Os fenômenos que ocorrem com os aços, quando este é esfriado a diferentes velocidades, serão estudados através das curvas TTT para transformação isotérmica e em resfriamento contínuo. Pois, as mesmas apresentam grande relevância, para compreensão da obtenção dos constituintes dos aços.



5.2 – Transformação isotérmica (Curvas TTT ou em C – também chamada em S)

A transformação isotérmica, pode ser melhor compreendida, pela análise da transformação da austenita em perlita, em diversas temperaturas abaixo de 727 °C, ou seja pelo esfriamento rápido de um aço eutetóide até uma temperatura abaixo de 727 °C, mantendo-se a seguir essa temperatura constante até que toda a transformação da austenita se processe. A transformação em perlita obedecerá a uma curva de reação isotérmica, como indicada na figura 36, na qual se considerou um resfriamento brusco da austenita a 600 °C, por exemplo.

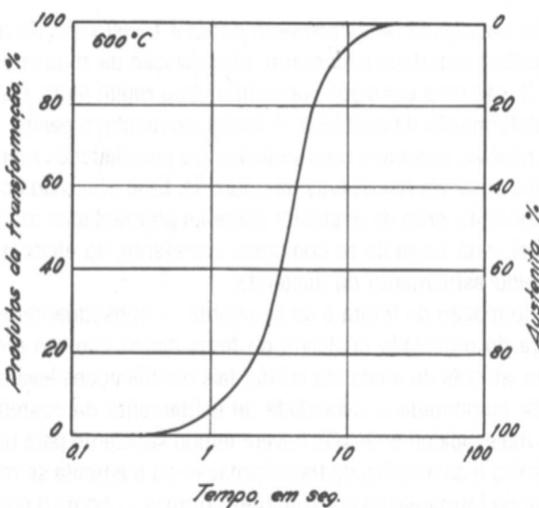


Fig. 36 – Curva de reação isotérmica representativa da transformação da austenita em perlita

O experimento para obtenção dessas curvas, consiste em submeter corpos de prova de aço de pequenas dimensões (para garantir que a extração de calor se processe em toda seção de forma homogênea), a um aquecimento até a zona crítica ou região austenítica, para que o constituinte resultante seja a austenita. Em seguida são mergulhados em um banho líquido (de chumbo fundido ou sal fundido ou outro meio), a uma temperatura abaixo da linha inferior da zona crítica (linha A₁) sendo mantidos para que possam ser observados os tempos necessários para que austenita se transforme em outros constituintes. O monitoramento da transformação pode ser feito, através de verificação das propriedades mecânicas, como a dureza, ou pelo seu volume. Ou ainda pela análise da microestrutura, utilizando as técnicas metalográficas, para obtenção de imagens dos constituintes do material.

Considerando-se ainda, corpos de prova de aço eutetóide austenitizados, e mergulhados bruscamente num banho de chumbo a uma temperatura de, por exemplo, 680 °C e aí mantidos durante tempo determinado, 10, 100, 200, 500 segundos. Como o esfriamento foi rápido da temperatura de austenitização até 680 °C, a austenita permaneceu estável, mas ela tenderá a transformar-se em perlita com o tempo.

Decorrido o tempo desejado, os corpos de prova são esfriados rapidamente (mergulhados em água) até a temperatura ambiente, as propriedades são medidas e a microestrutura analisadas, para verificar a transformação. Observa-se que a formação de perlita à temperatura considerada é progressiva, ou seja, as amostras esfriadas em água depois de mantidas a 680 °C, durante tempos diferentes, mostram



quantidades crescentes de perlita para tempos crescentes de permanência a essa temperatura.

Repetindo-se os experimentos, só alterando a temperatura de transformação isotérmica, obtém-se uma série de tempos os quais indicam, para várias temperaturas, o início e o fim da transformação.

Com esses dados, pode ser construído o diagrama “transformação-tempo-temperatura” onde, para cada temperatura, tem-se uma orientação da porcentagem de transformação em função do tempo. Tal diagrama é conhecido também como de “transformação isotérmica”.

Esse diagrama é representado também através de um sistema cartesiano, onde no eixo das ordenadas (eixo y), localiza-se a escala de temperaturas. Normalmente essa escala inicia na temperatura ambiente e varia até uma temperatura superior a linha A_1 . E a escala do tempo, esta indicada no eixo das abscissas (eixo x), e trata-se de uma escala logarítmica.

A determinação das curvas, é efetuada correlacionando-se para cada temperatura os pontos de início de transformação da austenita, e os pontos de fim de transformação. Os quais unidos entre si, originam duas curvas com a forma C (fig. 37). Essas curvas são também conhecidas “em C” ou “TTT” (transformação-tempo-temperatura). São também chamadas em “em S”, devido as formas das primeiras curvas obtidas.

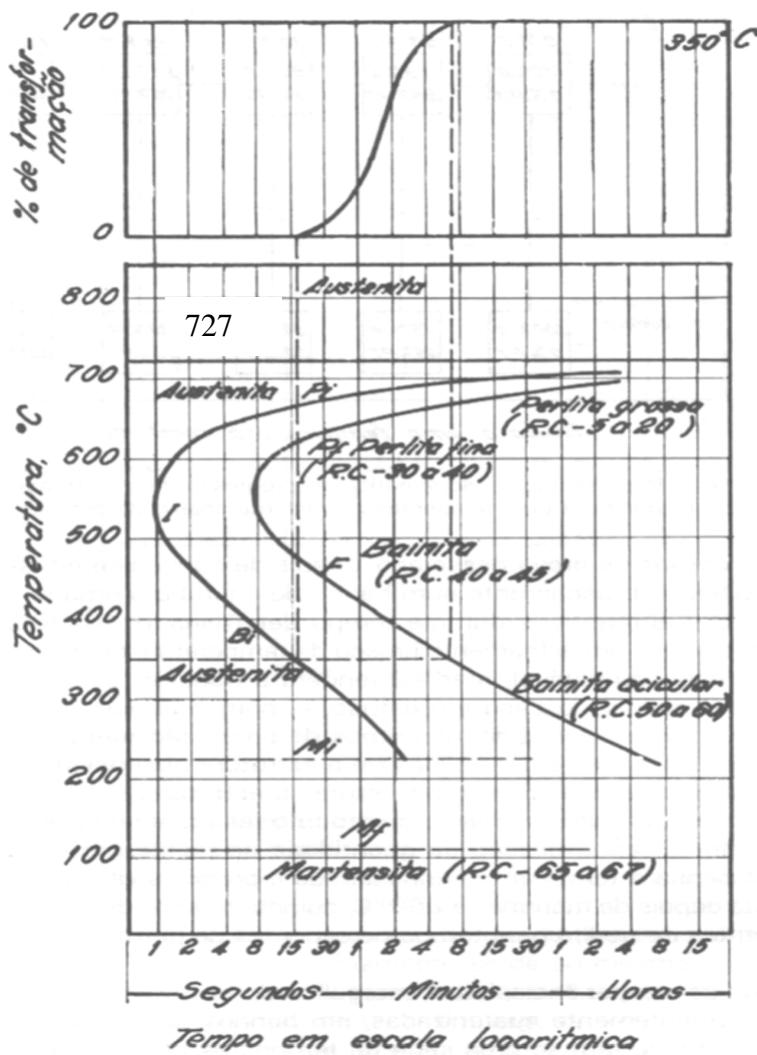


Fig. 37 – Representação esquemática do diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide.



A análise do diagrama, demonstra que:

- a linha horizontal, na parte superior do diagrama, representa a linha inferior da zona crítica, nesse caso linha A_1 , a temperatura de 727 °C;
- a linha em forma de C, indicada pela letra I, define o tempo necessário para o inicio da transformação;
- a linha em forma de C, identificada pela letra F, delimita o tempo necessário para o fim da transformação;
- a transformação é lenta logo abaixo da temperatura crítica, ou seja, o tempo necessário para o início e fim da transformação ocorre a uma velocidade baixa;
- a medida que decresce a temperatura, até 550 °C, a velocidade de transformação aumenta;
- abaixo de 550 °C, aumenta novamente o tempo para que a transformação se inicie, ao mesmo tempo que a velocidade de transformação decresce;
- a temperatura um pouco acima de 200 °C, tem-se a linha M_i e mais abaixo a linha M_f , que indicam o aparecimento de outra transformação, chamada de transformação martensítica;

5.2.1 – Constituintes resultantes da transformação da austenita

Observando a figura 37, vê-se que os constituintes resultantes da transformação da austenita, em diferentes faixas de temperaturas. Apresentam-se na seguinte seqüência:

1. Abaixo de 727 ° até cerca de 650 °C, tem-se perlita lamelar de granulação grosseira, com dureza variando entre 5 a 20 HRc;
2. Entre as temperaturas de 650 °C a 550 °C, tem-se perlita lamelar de granulação fina, com dureza de 30 a 40 HRc ou 400 HB. Para diferenciar-a da perlita lamelar formada na faixa de temperatura anterior, identifica-se a mesma de perlita fina (antigamente conhecida como troostita). É a forma mais dura da perlita.
3. A temperaturas entre 550 °C e um pouco acima de 200 °C, obtém-se como produto da transformação, um constituinte que varia de forma, desde um agregado de ferrita em forma de pena e carboneta de ferro muito fino, em torno de 450 °C, até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura, um pouco acima de 200 °C. Esse constituinte, com suas várias formas, são designados de bainita, sendo que sua dureza varia de 40 a 60 HRc.
4. Entre as temperaturas, um pouco acima de 200 °C e aproximadamente a 100 °C, tem-se a martensita. Sua aparência e forma são semelhantes as de bainita, ou seja, apresenta-se em agulhas, com coloração mais clara. Sua dureza pode chegar a 68 HRc.

A alta dureza conseguida pela martensita, pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gaama e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do ferro alfa (formado no esfriamento), impedindo a deformação;
- distorção do reticulado cristalino;
- tensões internas;
- tamanho do grão muito pequeno



5.2.2 – Curvas TTT para os aços hipoeutetóides e hipereutetóides

As curvas TTT, para os aços que não são os eutetóides, apresentam-se de forma distinta. A figura 38, mostra as curvas TTT para o aço hipoeutetóide, e pode ser notada a presença de mais uma linha horizontal A_3 , que representa a temperatura crítica superior. Além dessa isoterma, observa-se também a curva F_i . Que indica a separação inicial da ferrita quando o aço entra, durante o esfriamento lento, na zona crítica.

A figura 39, ilustra as curvas TTT para o aço hipereutetóide. Esse diagrama difere do anterior, pela segunda isoterma ser a linha A_{cm} . E a curva observada, além das normalmente apresentadas pelo aço eutetóide, tem-se a curva designada por C_i . Que indica a separação inicial da cementita quando esse aço ultrapassa, no esfriamento, a zona crítica.

Na análise das figuras 38 e 39, verifica-se que aumentando o teor de carbono, a curvas em C tende a se deslocar para a direita, ou seja, retarda o início e o fim da transformação.

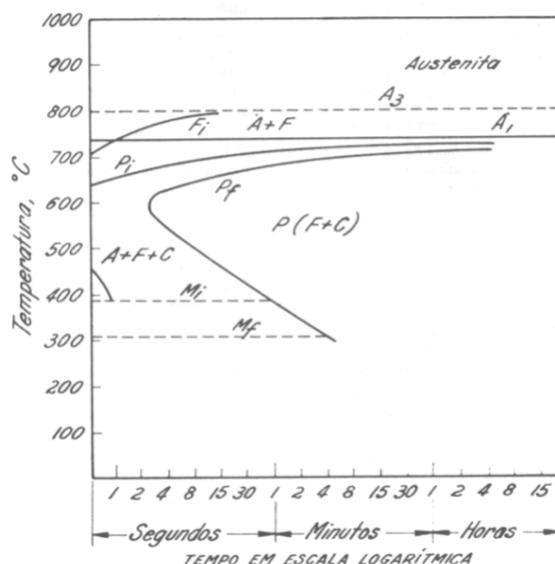


Fig. 38 – Diagrama de transformação isotérmica para um aço hipoeutetóide

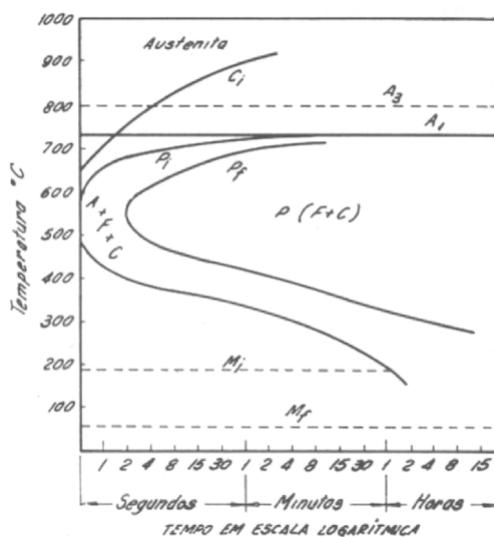


Fig. 39 – Diagrama de transformação isotérmica para um aço hipereutetóide



Além disso a temperatura para formação da martensita, abaixa consideravelmente, como pode ser observado na figura 40.

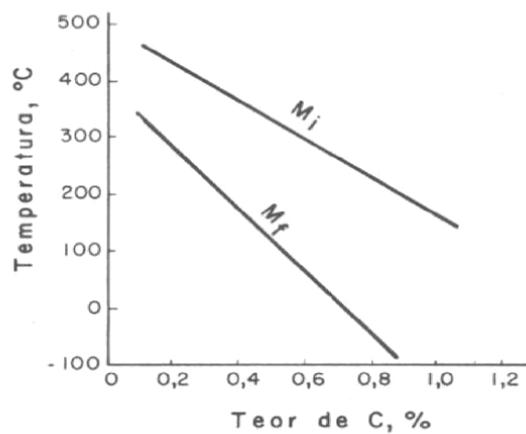


Fig. 40 – Influência do teor de carbono sobre a posição das linhas M_i e M_f .

A última observação, refere-se a tendência geral das curvas em C, de se aproximarem tanto mais do eixo das ordenadas quanto menor o teor de carbono. Esse comportamento indica, que será mais difícil de obter por esfriamento, ainda que muito rápido, a microestrutura unicamente martensítica.

5.3 – Transformação em resfriamento contínuo

Foram vistas as transformações isotérmicas, porém quando submete-se os aços a tratamentos térmicos, as transformações que mais interessam são as que ocorrem, quando a temperatura decresce continuamente, ou seja, transformações em resfriamento contínuo.

O diagrama TTT não pode ser utilizado, para determinar microestruturas resultantes de resfriamento contínuo. Contudo, é possível pelo emprego de técnicas semelhantes as utilizadas para a determinação de transformação isotérmica, obter um diagrama como o representado na figura 41.

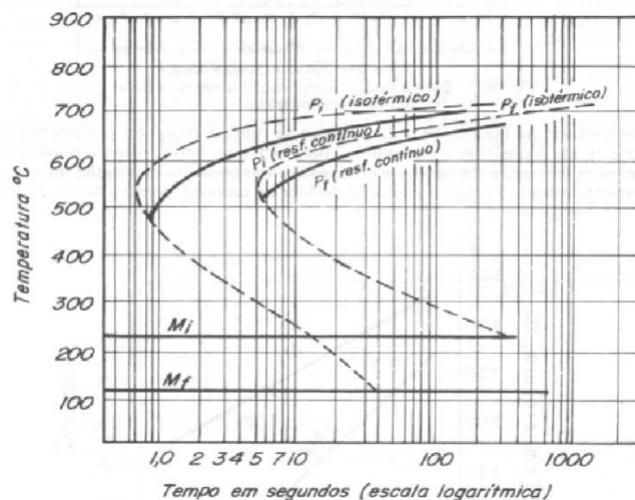


Fig. 41 – Representação esquemática do diagrama de transformação para resfriamento contínuo.



O diagrama obtido, sofre pequenas modificações em relação as curvas isotérmicas. Uma das alterações, é o deslocamento para direita e para baixo, das partes superiores das curvas de início e de fim de transformação.

Para uma melhor compreensão desse diagrama, vamos analisar os exemplos indicados na figura 42, relativos a várias velocidades de resfriamento para o aço eutetóide.

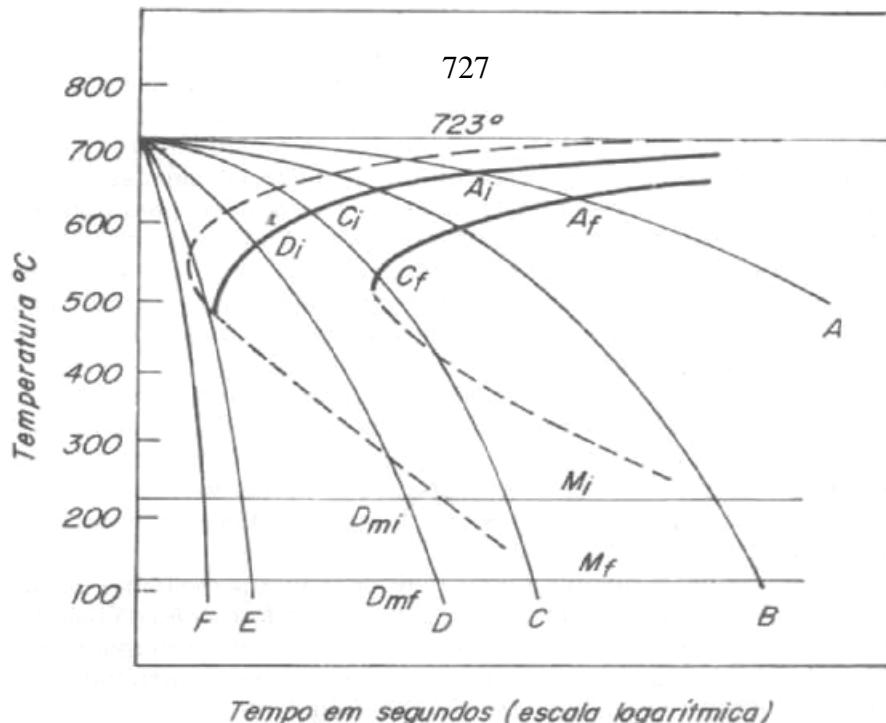


Fig. 42 – Representação esquemática da superposição de curvas de resfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo.

Da análise do diagrama acima, podemos afirmar que:

- um aço resfriado muito lentamente no forno, representado pela curva A, começa a sua transformação no ponto A_i , e ao atingir o ponto A_f é inteiramente constituído de perlita, de granulação grosseira de baixa dureza;
- aumentando um pouco a velocidade de extração de calor, por exemplo resfriado ao ar, como indicado pela curva B, obtém-se perlita mais fina, com dureza mais elevada;
- resfriando o aço em óleo, ou seja, aumentando ainda mais a velocidade de extração de calor, como mostrado pela curva C, o constituinte resultante será perlita ainda mais fina, com dureza mais elevada que a anterior;
- com resfriamento mais rápido, representado pela curva D, o início de transformação se dá no ponto D_i . A velocidade de resfriamento, não permite que a curva de resfriamento, intercepte a curva de fim de transformação. Sendo que a transformação em perlita apenas inicia, interrompendo-se em seguida, e ao atingir o ponto D_{mi} , a austenita que não se transformou passa a martensita, cuja formação termina em D_{mf} . A microestrutura final dessa velocidade de resfriamento é simultaneamente perlita e martensita.
- resfriando em água, como indicado na curva F, trata-se de um resfriamento brusco ou muito rápido. A curva de resfriamento não toca a curva de início de



transformação, de modo que não há transformação da austenita em perlita. A transformação que ocorre é unicamente martensítica, portanto os aços com esse constituinte apresentarão maior dureza;

- nota-se que a curva E, tangencia a curva C de transformação, para resfriamento contínuo. E ela indica, a velocidade crítica de esfriamento, que a menor velocidade de esfriamento que resultará unicamente em martensita.

Com as observações feitas a partir do diagrama, podemos concluir que:

1. Os tratamentos térmicos (e consequentemente as velocidades de esfriamento) devem ser escolhidos, de acordo com a microestrutura e propriedade que se deseja;
2. A velocidade de esfriamento muito baixa, para obtenção da perlita ou muito alta, para obtenção da martensita, é válida para todo aço que apresentar uma curva de transformação idêntica ao diagrama anterior (fig. 42). Pois as curvas podem ser modificadas por inúmeros fatores, que serão visto no item 5.5. Por exemplo para determinados aços, pode se obter a transformação martensítica, com resfriamento ao ar.
3. Velocidades de resfriamento muito altas, podem ocasionar em excessivas tensões internas, empenamentos das peças e até mesmo ao aparecimento de fissuras. Por isso deve-se sempre escolher um aço, que permita a obtenção de alta dureza com velocidade de resfriamento baixa.
4. No resfriamento contínuo, não é possível obter bainita. Pois esse constituinte é resultante somente de transformação isotérmica.

5.4 – Efeito da seção da peça

A velocidade de esfriamento é afetada pela seção da peça, pois é óbvio que o interior das peças se esfria mais lentamente que a sua superfície. A diferença é tanto maior quanto maior é a velocidade de esfriamento e, evidentemente, quanto maior a seção da peça. A figura 43, mostra a velocidade de esfriamento para meios diferentes de resfriamento, e a figura 44 representa a influência a velocidade de esfriamento em água de um componente mecânico de grande seção.

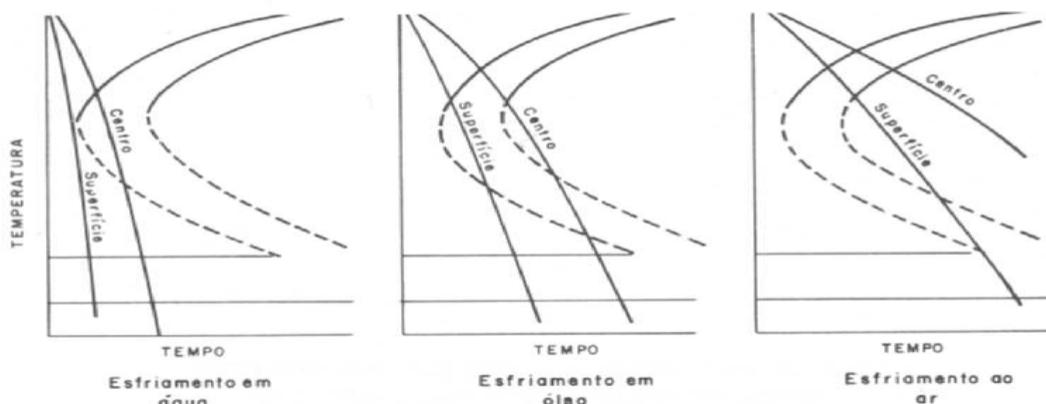


Fig. 43 – Representação esquemática da velocidade de resfriamento em água para algumas dimensões de componentes mecânicos.

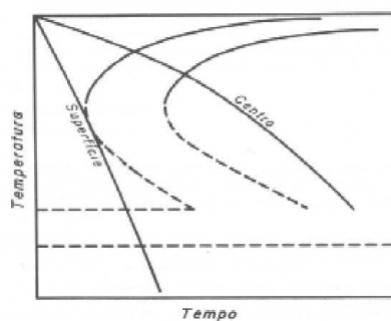


Fig. 44 – Representação esquemática do efeito da grande seção sobre a velocidade de esfriamento em água.

5.5 – Fatores que influem na posição das curvas dos diagramas TTT

Foi demonstrado que o teor de carbono altera sensivelmente a posição das linhas de início e fim de transformação. Outros fatores modificam a posição das curvas de transformação, e os principais fatores são:

- **Composição química** – os elementos de liga influenciam no deslocamento dessas curvas para a direita, facilitando a obtenção da transformação martensítica, a velocidades de esfriamento mais baixas (ver fig. 45).
- **Tamanho de grão da austenita** – quanto maior o tamanho de grão maior o deslocamento dessas curvas para a direita. É evidente pois, quanto maior o tamanho de grão, mais tempo ele levará para transformar-se. E portanto, facilitando a velocidades de esfriamento mais baixa a obtenção de martensita. Porém, a granulação grosseira, traz sérias desvantagens nas propriedades mecânicas dos aços, sendo desfavorável esse tipo de estrutura.
- **Homogeneidade da austenita** – é outro fator que influência sobre a posição das curvas de transformação. Quanto menos homogênea a austenita, ou seja, quanto maior a quantidade de carbonetos residuais ou de áreas localizadas ricas em carbono, tanto mais rápido é o início da reação de formação da perlita. De fato, carbonetos residuais não dissolvidos atuam como núcleos para a reação de formação da perlita, de modo que o início da transformação da austenita é acelerado.

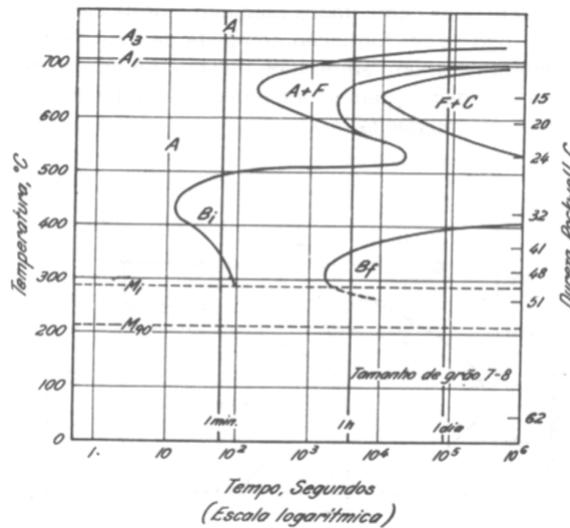


Fig. 45 – Curva TTT, para o aço ABNT 4340, com 0,42 % C, 0,78 % Mn, 1,79 % Ni, 0,80 % Cr e 0,33 % Mo.

6 – Ensaios Mecânicos

6.1 – Introdução

Os materiais para construção mecânica, são submetidos a ensaios, para avaliar suas características, propriedades e comportamento a determinadas condições previamente estabelecidas. O conhecimento dessas informações, são fundamentais para aplicação adequada dos materiais. Os ensaios geralmente são normalizados, para que se estabeleça uma linguagem comum entre usuários e fornecedores de materiais.

6.1.1 – Finalidades dos Ensaios dos Materiais

As duas principais finalidades dos ensaios são:

- Permitir a obtenção de informações rotineiras do produto – ensaios de controle: no recebimento de materiais de fornecedores e no controle final do produto acabado;
- Desenvolver novas informações sobre os materiais – no desenvolvimento de novos materiais, de novos processos de fabricação e de novos tratamentos.



6.1.2 – Vantagens da Normalização dos Materiais e Métodos de Ensaios

A normalização tem por objetivo fixar os conceitos e procedimentos gerais que se aplicam aos diferentes métodos de ensaios. Suas principais vantagens são:

- a) tornar a qualidade do produto mais uniforme;
- b) reduzir os tipos similares de materiais;
- c) orientar o projetista na escolha do material adequado;
- d) permitir a comparação de resultados obtidos em diferentes laboratórios;
- e) reduzir desentendimentos entre produtor e consumidor.

6.1.3 – Classificação dos Ensaios dos Materiais

Os ensaios podem ser classificados, de várias formas, a tabela 9, classifica os ensaios mecânicos, segundo dois critérios.

Tabela 9 – Classificação dos ensaios mecânicos

1. Quanto a integridade do componente, para posterior utilização		2. Quanto a velocidade para aplicação da carga de ensaio	
i) Destruídos : Inutilizam os componentes	Exemplos	i) Estáticos: carga aplicada lentamente (processo quase-estático)	Exemplos
	Tração, dureza, impacto e outros		Tração, compressão, dureza e outros
ii) Não Destruídos: Os componentes podem ser utilizados	Exemplos	ii) Dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente	Exemplos
	Raios X, ultra-som e outros		Fadiga, impacto e outros
		iii) Carga constante	Exemplo Fluência

Os Ensaios de Fabricação, avaliam as propriedades tecnológicas dos materiais, ou seja, o comportamento do material, quando submetido a um determinado processo de fabricação, a classificação dos processos de fabricação dos metais pode ser visualizada na tabela 10. Sendo que normalmente, a classificação desses ensaios, baseiam-se nos processos específicos aplicados ao materiais, como por exemplo a usinabilidade de um material, pode ser avaliada segundo o desgaste da ferramenta, ou forma do cavaco e outros.

Tabela 10 – Classificação geral dos processos de conformação dos metais

Processos mecânicos Aplicação de tensões (σ)	Conformação por deformação plástica ($\sigma < \sigma_{ruptura}$)	Forjamento Extrusão Laminação Trefilação
	Conformação por corte de usinagem ($\sigma > \sigma_{ruptura}$)	Torneamento Fresagem Retificação
Processos metalúrgicos Aplicação de calor (Temperatura)	Conformação por solidificação ($T > T_{fusão}$)	Fundição Soldagem Lingoteamento
	Conformação por sinterização ($T < T_{fusão}$)	Metalurgia do pó



É bom salientar, que os métodos de ensaios, determinam que os mesmos devem ser realizados em função da geometria da peça, do processo de fabricação e de acordo com as normas técnicas vigentes, e podem ser:

- Ensaios do componente;
- Ensaios de modelos;
- Ensaios de amostras;
- Ensaios de corpos-de-prova retirados de parte da estrutura.

Nesse texto, será abordado os ensaios mais utilizados na construção mecânica, que são o ensaio de dureza e o ensaio de tração

6.2 – Ensaio de Dureza

Uma das propriedades mecânicas que merece muitas considerações por sua importância é a dureza, que é uma medida da resistência do material a deformação plástica localizada. Inicialmente os testes de dureza nos minerais, foram realizados através de riscos de um mineral sobre o outro, foi desenvolvida uma escala denominada de Mohs (ver tabela 11), que trata-se de uma determinação qualitativa de avaliação da dureza.

Técnicas de quantificar a dureza de um material, vem sendo desenvolvida a muitos anos, e baseia-se em pequenas indentações (deformações), produzidas por um penetrador que é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e velocidade de aplicação da mesma. O resultado da indentação medida é pequena, sendo que a curvatura da indentação é relacionada a um valor convencionado ou número de dureza. O material mole tem uma indentação maior (deformação maior), e por isso tem baixo índice de dureza. Medidas de dureza são relativas, então cuidado no comparar valores obtidos por diferentes técnicas.

Ensaios de dureza são utilizados mais freqüentemente que outros ensaios mecânicos, pelas seguintes razões:

1. São simples e econômicos – não necessitam de nenhuma preparação especial do material a ser medido, e os aparelhos para o ensaio tem um custo relativamente baixo.
2. O ensaio não danifica significativamente o componente ensaiado – o componente ensaiado normalmente não fratura, nem deforma-se excessivamente, deixando apenas uma pequena indentação (deformação).
3. Pode ser obtido através do ensaio um valor orientativo da resistência a tração do material (tensão trativa de ruptura).

Tabela 11 – Tabela de dureza Mohs

Grau de dureza (crecente)	Nome do mineral	Fórmula
1	Talco	$Mg_3H_2Si_4O_{12}$
2	Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita	$CaCO_3$
4	Fluorita	CaF_2
5	Apatita	$CaF(PO_4)_3$
6	Ortose (Feldspato)	$KaSiO_4$
7	Quartzo	SiO_2
8	Topazio	$Al_2F_2SiO_2$
9	Corindum ou Alumina	Al_2O_3
10	Diamante	C



Correlação entre a dureza e a resistência a tração

A resistência a tração e a dureza são indicativos de resistência do metal a deformações plásticas. Consequentemente, elas são proporcionais, ressalvando que essa proporcionalidade tem restrições quanto ao tipo de material e a um determinado intervalo de dureza. Ex: Se compararmos a dureza em HB, com as ligas de cobre, Ferro Fundido nodular e aços para determinados intervalos de dureza teremos a tensão trativa a ruptura correspondente.

A fórmula para transformar a dureza HB em tensão trativa de ruptura é:

$$\sigma_{tr} = 3,45 \times HB \text{ (MPa)} \quad \text{onde } 1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$$

Os Métodos de medição de dureza mais utilizados, para materiais metálicos, são:

- Método Brinell;
- Método Rockwell;
- Método Vickers.

6.2.1 – Método de Dureza Brinell

Esse método é baseado na relação existente entre uma carga aplicada a uma esfera de aço temperado ou metal duro, sobre a amostra a ser ensaiada e a área da impressão produzida pela esfera na amostra. A dureza Brinell ou HB (Hardness Brinell), pode ser calculada através da equação:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \frac{d}{D}D^2 - d^2)} \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$$

Onde: F = carga aplicada em Kgf

S = área da calota esférica (impressão ou indentação) em mm²

D = diâmetro da esfera do penetrador em mm

d = diâmetro da impressão ou indentação em mm

Teoricamente, esse método foi desenvolvido para aceitar quaisquer cargas ou esferas de quaisquer diâmetros para um mesmo material, porém verificou-se na prática que existem certas restrições. Para realizar-se o ensaio, alguns critérios devem ser observados, como segue:

- O diâmetro da impressão ou indentação deve obedecer a seguinte relação:

$$0,3 D < d <$$

- A carga utilizada e o diâmetro da esfera dependem da dureza do material a ser ensaiado. Então, obtém-se o mesmo resultado para um mesmo material quando, além de se observar a relação acima, o valor (F/D^2) for constante. As tabelas 12 e 13 abaixo, tem o objetivo de orientar na escolha dos parâmetros desse ensaio.



Tabela 12 – Valores de grau de carga, para diversos grupos de materiais

Grau de carga	$F/D^2 = 30$	$F/D^2 = 10$	$F/D^2 = 5$	$F/D^2 = 2,5$	$F/D^2 = 1,25$
Intervalo de dureza abrangido	95,5 a 450	31,8 a 200	15,9 a 100	7,9 a 50	4 a 26
Grupos de metais para os quais devem ser empregados os graus de carga indicadas	Ligas ferrosas e ligas de alta resistência	Metais e ligas não ferrosas			
	Ferro Ligas de Al Alumínio Ligas de Sn	Ligas de Pb Aço Ligas de Cu Magnésio	Ligas de Pb Ligas de Sn FoFo Ligas de Mg	Cobre Metal patente Ligas de Ti Ligas de Zn	Zinco Ligas Ni níquel

Tabela 13 – Tabela para escolha da carga em função do material e do diâmetro da esfera do penetrador

Diâmetro (D) da esfera do penetrador (mm)	Carga F e campo de aplicação			
	$F = 30 D^2$ Aços e FoFos	$F = 10 D^2$ bronze e latão duro	$F = 5 D^2$ cobre, alumínio e suas mais moles	$F = 2,5 D^2$ metais moles
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625
1	30	10	5	2,5

Outros cuidados que devem ser observados, na realização do ensaio Brinell, são:

- Ao realizar-se ensaios Brinell, não deve-se considerar o resultado do primeiro ensaio após a troca do penetrador, para garantir o assentamento do mesmo;
- A espessura da peça a ser medida deve ser no mínimo igual a 17 vezes, a profundidade de impressão;
- A superfície a ser medida deve ter um raio de curvatura mínimo de 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada;
- Cada impressão deve estar distante de uma impressão vizinha, no mínimo 2,5 vezes o diâmetro da impressão (distância de centro a centro);
- A carga de ensaio deve ser mantida sobre a peça a ser medida no mínimo durante 30 segundos. Exceções para os materiais em que $HB > 300$, este tempo pode ser reduzido a 10 segundos. Para materiais moles em que $HB < 60$ a carga deve ser mantida durante 60 segundos;
- Os resultados obtidos por este método, devem ser expressos sempre acompanhados das condições do ensaio;

O uso do método Brinell é limitado pela dureza da esfera empregada. Usando-se esferas de aço temperado, só é possível medir durezas até 500 HB ou Kgf/mm²

O campo de aplicação desse método, são os metais não ferrosos, ferro fundido, aço, ou seja produtos siderúrgicos em geral. Principalmente os produtos que não foram temperados. Caso tenham sido tratados termicamente, pelo processo de têmpera, deve-



se utilizar esfera de metal duro.

Esse método é um dos mais utilizados, pela facilidade de execução, pois qualquer máquina de compressão e equipamentos portáteis de custo relativamente baixo podem ser empregados por esse método. Sua escala é contínua e normalmente serve como referência de dureza. Para facilitar ainda mais seu emprego pode se fazer ensaios Brinell, utilizando-se equipamento para medir dureza pelo método Rockwell. A obtenção da dureza Brinell através desses equipamentos, é conseguida por tabelas (ver tabelas 14, 15, 16, 17, 18, 19), que fornece em função da escala C, ou seja relacionando a profundidade de penetração da escala C.

Tabelas para obtenção da dureza Brinell, através da máquina para ensaio Rockwell:

Materiais: Aluminio e suas ligas; cobre puro; latão e bronze; aços carbono e aço-liga;

FoFos

Pré-carga = 10 Kg; Carga principal = 62,5 Kg; Diâmetro da esfera = 2,5 mm

Observação = os números comparativos são valores médio

Tabela 14

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Aluminio e suas ligas									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-20						23	23	23	24	24
-10	24	24	24	25	25	25	25	25	26	26
00	26	26	26	27	27	27	28	28	28	29
10	29	29	30	30	30	31	31	31	32	32
20	33	33	34	34	34	35	36	36	37	37
30	38	39	40	40	41	42	43	44	45	45
40	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
50	56	57	58	60	61	62	63	65	66	68
60	69	70	72	74	76	78	80	82	84	86
70	88	91	93	96	99	103	106	110	114	118
80	123	127	132	137	143	150	158			

Tabela 15

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Cobre puro									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10				39	39	39	40	40	40	40
20	41	41	41	42	42	42	43	43	44	44
30	44	45	45	46	46	47	48	48	49	49
40	50	51	51	52	53	54	54	55	56	57
50	58	59	60	61	62	63	64	65	67	68
60	69	71	72	73	75	76	78	80	81	83
70	85	86	89	91	93	96	99	102	106	110
80	115	120	128							



Tabela 16

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Latões e Bronzes									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40			52	53	54	55	56	57	58	59
50	60	62	63	64	66	67	69	70	72	73
60	75	77	78	80	82	84	86	88	90	92
70	95	97	100	103	106	110	114	118	122	127
80	132	138	144	150	158	168	180	212		

Tabela 17

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Aços carbono									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
30	131	133	135	138	140	143	146	148	151	154
40	157	160	163	166	169	172	175	178	182	185
50	189	192	196	200	204	208	212	216	221	226
60	230	235	240	246	252	258	265	273	280	288
70	296	305	314	324	334	345	356	367	380	394
80	409	424	440	458	478	500				

Tabela 18

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Aços cromo-níquel									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10						110	111	112	113	114
20	115	116	117	119	120	122	123	125	127	129
30	131	133	135	137	140	142	145	147	150	153
40	155	158	161	164	167	170	173	176	180	184
50	187	191	195	198	202	206	210	214	218	222
60	226	231	236	240	245	250	256	261	267	273
70	280	287	294	301	309	317	325	334	345	352
80	353	374	386	400	415	434	455	480		



Tabela 19

Leitura do Relógi o 2/1000 mm	Ferro Fundido									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60						65	65,5	66	66	66,5
70	67	67	67,5	68	68,5	69	69	69,5	70	70,5
80	71	71	72	72	73	73	74	74,5	75	75,5
90	76	77	77,5	78,5	79	80	81	82	82,5	83
100	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
10	94	95	96	97,5	99	100	101,5	103	104	105,5
20	107	108,5	110	111,5	118	115	117	119	121	123
30	125	127,5	130	132,5	135	137,5	140	143	146	149
40	152	155	158	161,5	165	168	172	175,5	179	183
50	187	191	195	199	203	207	211	215,5	220	225
60	229,5	234	239,5	245	250	255,5	261	267	273	279
70	285	293	300	308	317	325,5	335	344	354	365
80	378	392	408	425	445	470	505	550		

6.2.2 – Método de dureza Rockwell

Esse método é fundamentado na profundidade da indentação de um penetrador, que pode ser um cone de diamante ou uma esfera de aço temperado, na amostra a ser ensaiada, sob uma carga determinada.

O processo é realizado em três etapas:

- 1 – submete-se a amostra a uma pré-carga F_0 e acerta-se o medidor em “0”;
- 2 – aplica-se a carga que somada a pré-carga resulta a carga nominal do ensaio ($F_0 + F$) até o ponteiro do indicador ficar parado;
- 3 – retira-se a carga suplementar e faz-se a leitura.

O método Rockwell é muito utilizado pelo rapidez do ensaio. Ele é subdividido em várias escalas, sendo que as mais utilizadas são as escalas B e C. Estas escalas são independentes umas das outras. Ao escolher-se a escala para o ensaio Rockwell, deve-se levar em consideração, alguns fatores, como: material e tratamento térmico eventual.

A seguir temos a tabela 20, que fornece as características de cada escala.

Tabela 20 – Escalas Rockwell, para pré-carga de 10 Kgf

Escala	Carga (Kgf)	Penetrador	Cor da escala no relógio indicador (leitura)	Campo de aplicação
Rockwell C	150	Cone de diamante 120º	Preta	Aço cementado ou temperado
Rockwell B	100	Esfera de aço temperado 1/16"	Vermelha	Aço, bronze, latão até 240 HB

A espessura mínima da amostra a ser ensaiada, pode ser obtida, pela profundidade do penetrador, utiliza-se para calcular a profundidade as seguintes equações:



Para penetrador de diamante

$$\text{Profundidade} = (100-\text{HR}).0,002 \text{ (mm)}$$

Para penetrador de esfera de aço temperado:

$$\text{Profundidade} = (130-\text{HR}).0,002 \text{ (mm)}$$

Onde: HR (Hardness Rockwell) – valor da dureza Rockwell

É recomendado que a espessura mínima, para a amostra a ser medida igual a 17 vezes o valor da profundidade da indentação.

Outros cuidados que devem ser observados, na realização do ensaio Rockwell, são:

- Ao realizar-se ensaios Rockwell, não deve-se considerar o resultado do primeiro ensaio após a troca do penetrador, para garantir o assentamento do mesmo;
- A amostra e suporte de apoio devem estar bem limpos e um bem assentado sobre o outro;
- O penetrador deve estar perpendicular a amostra, sendo tolerada uma inclinação de até 7°;
- Se por engano for ensaiada uma amostra de material temperado com o penetrador de esfera temperada, deve-se inutilizar o penetrador;
- A carga deve ser aplicada sem choque e sem vibração, o que nos equipamentos para medição de dureza Rockwell, é conseguido por um amortecedor hidráulico.
- A carga de ensaio deve ser mantida sobre a peça a ser medida no mínimo durante 6 a 10 segundos. Para materiais moles deve ser prolongado para 30 segundos, contados depois de o ponteiro indicador ficar imóvel;
- Os resultados obtidos por este método, devem ser expressos sempre acompanhados das condições do ensaio;
- Deve-se indicar também a escala utilizada. Exemplo: 48 HRC, 76 HRB;
- Quando se mede a dureza de peças cilíndricas, pelo sistema Rockwell C e B, devido a deformação da amostra é necessário uma correção, conforme tabelas 21 e 22.



Tabela 21 – Correção da dureza HRC, em função do diâmetro da amostra

HRC	Diâmetro da amostra em mm								
	6	10	13	16	19	22	25	32	38
20				3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
25			3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30			2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35		3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
40		2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0	0

Os valores da tabela acima devem ser somados as leituras. Exemplo: Numa amostra com diâmetro de 10 mm, se o resultado obtido no aparelho for de 60 HRC, o resultado real deverá ser $60+1 = 61$ HRC

Tabela 22 – Correção da dureza HRB, em função do diâmetro da amostra

HRB	Diâmetro da amostra em mm						
	6	10	13	16	19	22	25
0					4,5	3,5	3,0
10				5,0	4,0	3,5	3,0
20				4,5	4,0	3,5	3,0
30			5,0	4,5	3,5	3,0	2,5
40			4,5	4,0	3,0	2,5	2,5
50			4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
60		5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
70		4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
80	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5
90	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
100	3,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5

6.2.3 – Método de dureza Vickers

Esse método baseia-se, na resistência que um material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga. O valor da dureza Vickers ou HV (Hardness Vickers) é o quociente da carga aplicada F, pela área da impressão S. E pode ser calculado pela equação:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot P}{d^2} \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$$

Onde: F = P = carga aplicada em Kgf
S = área da identação em mm^2
d = diagonal da identação em mm



Nesse método as cargas podem ser quaisquer (acima de 1 kgf), pois as indentações são sempre proporcionais às cargas para o mesmo material. Contudo são recomendadas as cargas de 1 kgf, 2 kgf, 3 kgf, 4 kgf, 5 kgf, 10 kgf, 20 kgf, 30 kgf, 40 kgf, 60 kgf, 80 kgf, 100 kgf, 120 kgf. Cargas menores do que um quilo são utilizadas para determinação de microdureza, em equipamentos próprios para essa finalidade.

Para cargas menores que um quilo as diagonais não são proporcionais e portanto os valores HV são diferentes para cada carga. Este método é mais versátil podendo ser utilizado para qualquer material, temperado ou não. Como as cargas aplicadas nesse método, variam desde cargas de baixa intensidade até cargas de alta intensidade, é possível ensaiar amostras de pequena espessura (ex.: chapas finas). Uma das características que destacam esse método, é a sua precisão. Permitindo a medição de dureza em ensaios rigorosos de laboratórios, e também em amostras cementadas, nitretadas, cromadas. O tempo de aplicação da carga, é de 15 a 30 segundos, para materiais cuja dureza seja $HV > 140 \text{ Kgf/mm}^2$. A leitura da medição da diagonal deve ser de 0,001 mm e em equipamentos para micro-durezas até 0,0001 mm. O valor deve ser tomado como a média das diagonais.

Para um cálculo rápido, podemos considerar a profundidade de penetração igual a 1/7 da diagonal, e a espessura mínima do material igual a 17 vezes a profundidade de indentação.

O número de dureza Vickers é independente da carga aplicada e corresponde até a dureza de 300 Kgf/mm^2 com a dureza Brinell. Até este limite, a dureza Vickers e a dureza Brinell permitem a determinação aproximada da resistência a tração de aços. A relação entre as durezas Vickers e Brinell e o Limite de resistência a tração é muito útil, mas não visa substituir o valor exato dado pelo ensaio de tração.

O estado da superfície tem grande influência na precisão da medição da diagonal.

6. 3 – Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo-de-prova específico até a ruptura. Mede-se a variação no comprimento (l) como função da carga (P). Trata-se de ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido a vantagem de fornecer dados quantitativos das propriedades mecânicas dos materiais. Entre as principais destacam-se: Limite de Resistência à tração (L.R.), Limite de Escoamento (L.E.), módulo de elasticidade(módulo de Young), ductilidade, tenacidade e outros. O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para o controle das especificações da entrada de matéria-prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais, além da importância da uniformidade e grau de rugosidade do corpo de prova a ser ensaiado.



6.3.1 – Corpos de prova para o ensaio de tração

Para o ensaio de tração utiliza-se corpos de prova preparados segundo as normas técnicas, por exemplo para materiais metálicos a norma da ABNT é a NBR-6152. Porém, podemos ensaiar com corpos de prova não normalizados, sendo que os resultados obtidos com esses corpos de prova não podem ser utilizados para comparação com especificações de normas. As dimensões dos corpos de prova devem estar de acordo com a capacidade da máquina de ensaio. Normalmente são utilizados corpos de prova de seção circular ou de seção retangular (ver figura 46), porém pode-se ensaiar também tubos, arames, fios e outros.

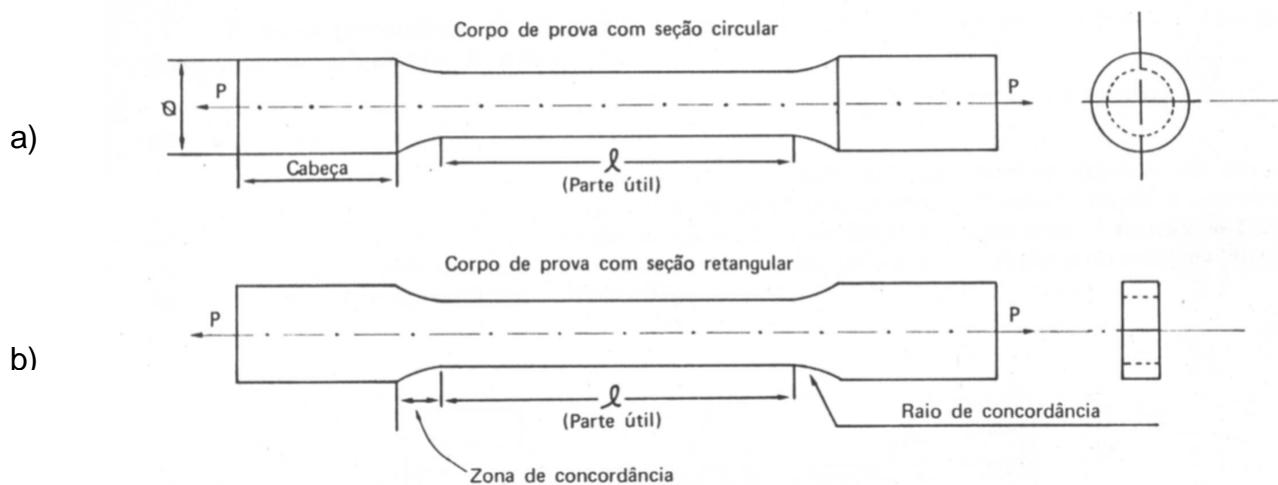


Fig. 1 – Corpos de prova para ensaio de tração. a) Corpo de prova de seção circular, b) Corpo de prova de seção retangular

Cada corpo de prova compõe-se de cabeças e parte útil, unidas por concordâncias. As cabeças são regiões extremas que servem para fixar o corpo de prova a máquina de modo que a força de tração atuante seja axial, elas tem seção maior do que a parte útil para que a ruptura não se processe nelas, suas dimensões e formas dependem do tipo de fixação na máquina, como pode ser visto na figura 47.

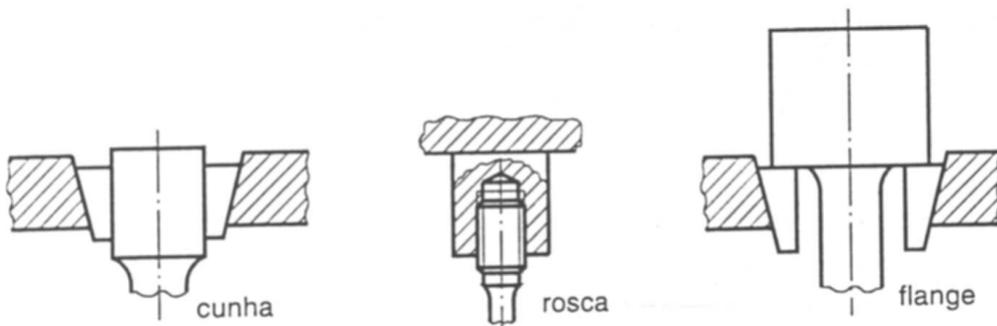


Fig. 2 – Tipos de cabeças de corpos de prova e sua fixação a máquina



A parte útil do corpo de prova, é a região onde são realizadas as medidas das propriedades mecânicas do material.

O corpo de prova sempre que possível, deve ser produzido com 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial (parte útil). Quando não for possível obter o corpo de prova com essas dimensões, é recomendado que o mesmo tenha dimensões proporcionais a citada, ou seja, a parte útil deve corresponder a 5 vezes o diâmetro da seção da parte útil.

6.3.1.1 – Preparação do corpo de prova para o ensaio de tração

O procedimento para obtenção do corpo de prova, deve seguir as etapas relacionadas abaixo:

- 1 – Identificar o material do corpo de prova;
- 2 – Medir o diâmetro da parte útil do corpo de prova em dois pontos, utilizando um micrômetro, e calcular a média;
- 3 – Traçar divisões no comprimento útil, para o corpo de prova de 50 mm de comprimento, as marcações devem ser feitas de 5 em 5 mm, conforme a figura 48.

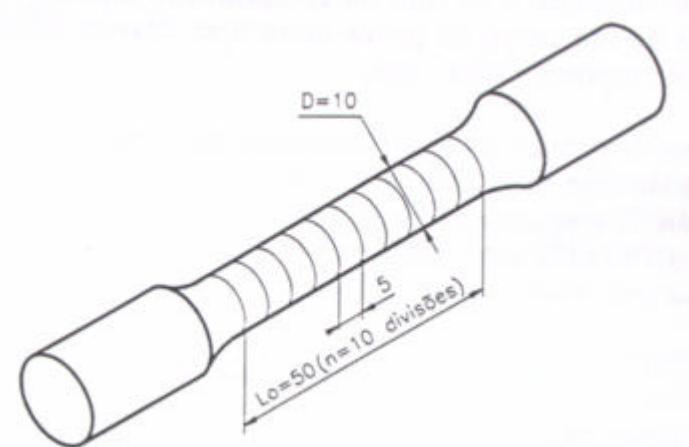


Fig. 3 – Representação esquemática da preparação do corpo de prova

Os corpos de prova podem ser produzidos a partir da matéria-prima ou de partes específicas do produto acabado

6.3.1 – Resultados obtidos pelo ensaio de tração

O equipamento de ensaio registrara um gráfico de tensão x deformação e a partir dele poderemos obter os dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Cada material apresenta uma curva de tensão x deformação, pode-se observar na fig. 4 , as curvas de tensão x deformação para alguns materiais metálicos. Na figura 5 temos a representação do diagrama tensão x deformação para diferentes tipos de materiais. O material correspondente a figura 5a, apresenta apenas deformação elástica, ou seja, não deforma plasticamente antes da ruptura, portanto é um material de comportamento frágil. O material dúctil além da deformação elástica apresenta também deformação plástica ou permanente, como pode ser visto na figura 5b. Nota-se também na figura 5b que existe um limite de escoamento bem definido, próprio dos aços carbono com baixo teor de carbono, que determina a capacidade do material de resistir a deformação plástica. Em



outros materiais não ocorre um escoamento propriamente dito, para esses, define-se

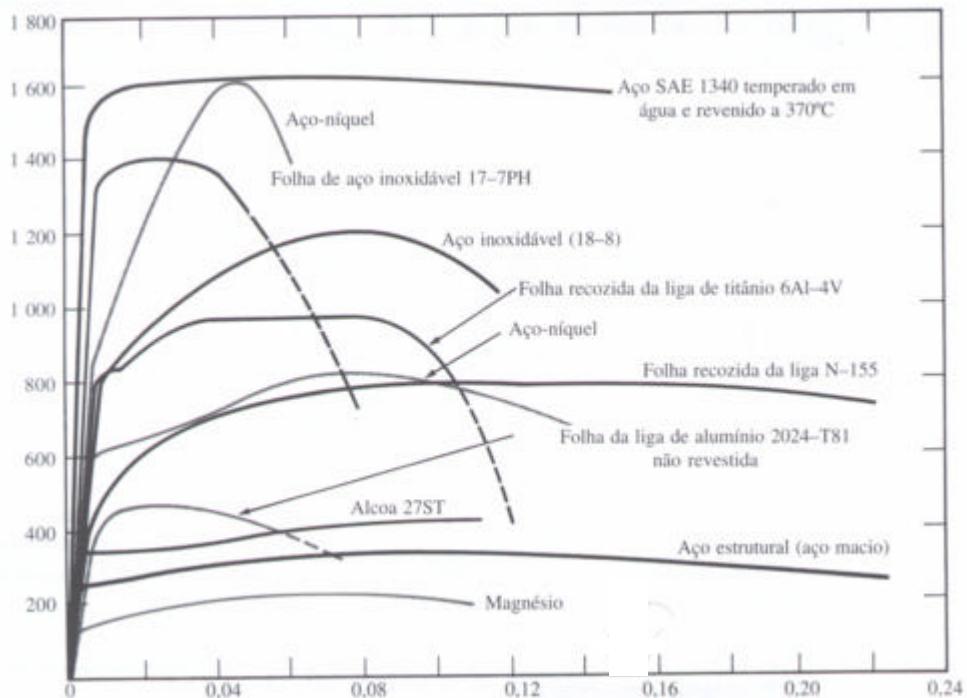


Fig. 4 – Curvas tensão x deformação de alguns materiais metálicos

limite convencional de escoamento que corresponde a tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% (ou um outro valor especificado), como pode ser visto na figura 5c. Deve-se notar também, como mostrado na figura 5d, que tensão verdadeira para ruptura do material é maior que a tensão de ruptura convencional. Realmente para materiais dúcteis é correto fazer esta afirmação, pois estes materiais deformam-se antes de romper, e consequentemente ocorre a redução da área da seção transversal do material, e como a tensão é a relação entre força aplicada e área da seção transversal do corpo de prova, para o cálculo da tensão verdadeira de ruptura utiliza-se a área da seção transversal real e para o cálculo da tensão convencional de ruptura utiliza-se a área da seção transversal inicial da parte útil do corpo de prova. Porém devemos usar a tensão convencional de ruptura, pois os projetos devem ser feitos com base nas dimensões iniciais.

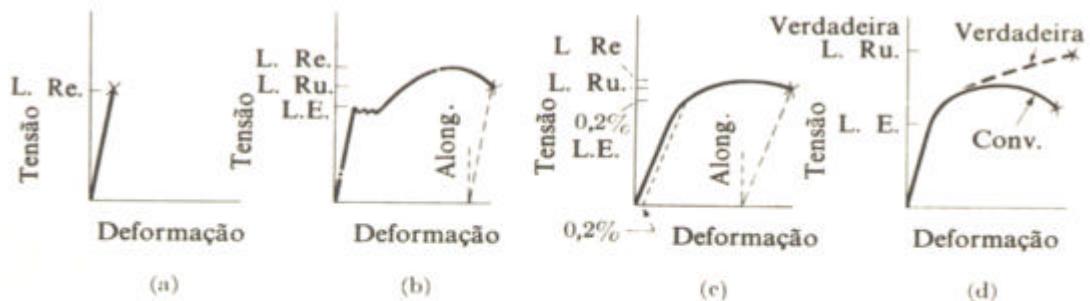


Fig 5 – Diagramas tensão deformação. a) Material frágil, não apresenta deformação plástica significativa (exemplo : Ferro fundido). b) Material dútil, com Limite de Escoamento visível (exemplo: aço de baixo carbono). c) Material dútil sem limite de escoamento nítido (exemplo: alumínio). (d) Curva verdadeira tensão x deformação versus curva convencional. Nas figuras acima usou-se a seguinte simbologia: L. Ru. = Limite de Ruptura; L.. Re. = Limite de Resistência; L.. E. = Limite de Escoamento, Elong. ϵ = Elongação; X = Ruptura.

6.3.1.1 – Diagrama Tensão x Deformação

Aplicando-se forças crescentes e de sentidos opostos nas extremidades de um corpo de prova pode-se observar, através de instrumentos, a variação do comprimento do corpo de prova (Δl) em função da força aplicada (F). Medidas simultâneas de "F" e " Δl ", efetuadas um certo número de vezes durante o ensaio, permitem traçar um gráfico "F" em função de " Δl ", a fig. 6 representa um gráfico deste tipo. No mesmo gráfico, se dividirmos o valor de F por A_0 e o valor de Δl por Δl_0 teremos o gráfico tensão x deformação, com a mesma forma do anterior, que traduz o comportamento do material durante o ensaio.

Devemos lembrar o conceito de tensão e deformação, que pode ser definido como: Tensão – é o quociente da força (carga) aplicada pela área inicial da seção transversal do corpo de prova. A tensão geralmente é expressa em MPa ou N/mm².

Deformação – é a variação de comprimento, por unidade de comprimento, entre dois pontos situados sobre superfície da parte útil do corpo de prova. A deformação é geralmente expressa em porcentagem (%).

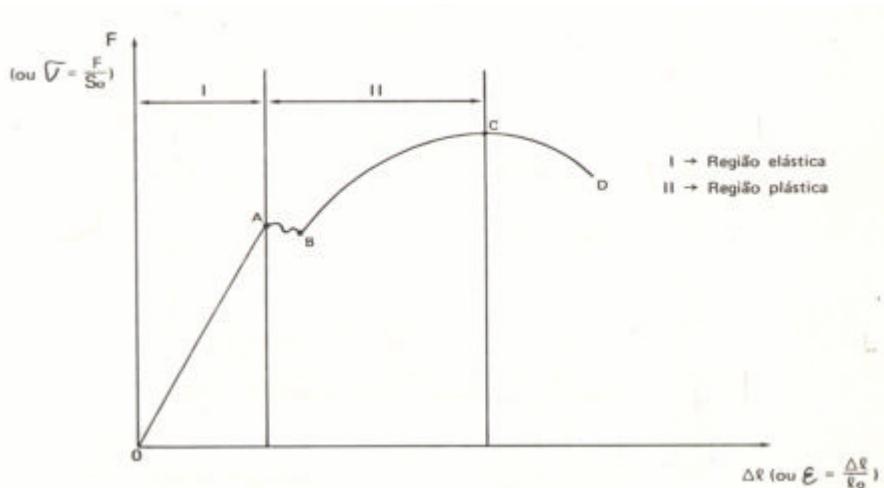


Fig. 6 – Diagrama tensão x deformação



Na figura 7 temos a representação esquemática do comportamento de um corpo de prova de material dúctil durante o ensaio.

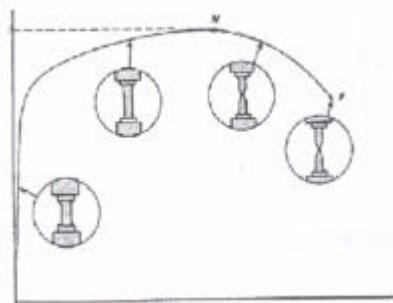


Fig. 7 – Diagrama tensão x deformação, para cada região do gráfico temos o comportamento do C.P. com a variação da tensão

A seguir teremos a descrição dos dados quantitativos das características mecânicas e/ou das propriedades mecânicas que podem ser obtidos com o ensaio de tração.

- a) **Módulo de elasticidade** – analisando-se o diagrama tensão x deformação, na região elástica, nota-se que os materiais principalmente os metais e suas ligas obedecem a lei de Hooke. Essa lei, baseia-se na proporcionalidade entre tensão e deformação obtida, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \Rightarrow \quad E = \sigma / \varepsilon$$

Onde: σ = tensão (MPa) ; ε = deformação ; E = módulo de elasticidade.

A fórmula acima, mostra que o módulo de elasticidade, é o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante. O módulo de elasticidade está relacionado com a rigidez do material, quanto maior o módulo de elasticidade maior a rigidez, materiais que apresentam elevado módulo de elasticidade não fletem facilmente. O módulo de elasticidade está relacionado com a força de ligação entre os átomos do material.. A tabela 1 apresenta o módulo de elasticidade de alguns materiais metálicos.

Tabela 1 – Módulo de elasticidade, materiais metálicos

Material	Módulo de Elasticidade – E (MPa)
Aço (Ex: ABNT 1020)	210000
Alumínio	70000
Bronze (95% Cu e 5% Sn)	110000
Magnésio	44000

- b) **Limite de escoamento (tensão de escoamento)** – pode ser caracterizado também por ser o limite de elasticidade ou limite de proporcionalidade. Representa o início da plasticidade do material, como pode ser visto na figura 5 b (materiais que apresentam escoamento nítido).

O fenômeno do escoamento é caracterizado por uma discreta oscilação da tensão e uma deformação significativa do material.



A esse limite está associada a tensão de escoamento, que pode ser determinada através da fórmula:

$$\sigma_e = F_e / A_o$$

Onde: σ_e = tensão de escoamento; F_e = carga para que o material inicie a deformação plástica; A_o = área inicial da seção transversal do C.P..

Quando não for possível determinar o limite de escoamento, ou seja, quando o material não apresentar limite de escoamento nítido (ver figura 5c). Deve-se adotar por convenção o limite convencional "n" de escoamento, definido pela fórmula abaixo:

$$\sigma_n = F_n / A_o$$

Onde: σ_n = tensão de escoamento convencional; F_n = carga para determinar a tensão de escoamento convencional; A_o = área inicial da seção transversal do C.P..

Para estes casos o limite n (σ_n) que corresponde ao limite de escoamento, é a tensão aplicada que após sua retirada, provoca n% de deformação permanente. Arbitrariamente escolheu-se $n = 0,2\%$, que pode variar dependendo da natureza do material. E para determinar-se o limite "n" no diagrama tensão x deformação, marca-se no eixo das abscissas do diagrama do material considerado, o valor n, e do ponto obtido traça-se uma paralela a região retilínea da curva tensão x deformação, até encontrá-la. A tensão correspondente ao ponto em que a reta corta a curva tensão x deformação é o limite de escoamento convencional.

A determinação do limite de escoamento ou do limite convencional n dos metais e suas ligas é muito mais fácil que a do limite de elasticidade. Por este motivo o limite de escoamento é utilizado pelos projetistas, dividido por um coeficiente de segurança, garantindo que o material trabalhe em regime elástico.

- c) **Limite de Resistência (resistência a tração ou tensão máxima)** – corresponde ao limite de resistência a tração ou a carga máxima atingida, como pode ser visto na figura 7 no ponto M. O limite de resistência a tração ou tensão máxima é calculado dividindo-se a maior carga pela área inicial da seção transversal do C.P., conforme a

$$\sigma_{Re} = F_{máx} / A_o$$

fórmula:

Onde: σ_{Re} = tensão de resistência máxima; $F_{máx}$ = carga máxima suportada pelo C.P.; A_o = área inicial da seção transversal do C.P..

Pode-se observar na figura 5b e 5c que o limite de ruptura (LRu), é inferior ao limite de resistência (LRe ou LR), isto ocorre para os materiais dúteis, pois a área da seção transversal é reduzida antes da ruptura, e por definição ambos são calculados considerando-se a área inicial. Porém, para os materiais dúteis, a área inicial é reduzida durante o ensaio, modificando o comportamento da curva como ser observado na figura 5d.



- d) **Alongamento percentual até a ruptura (ϵ)** – este característica está associada a dutilidade do material. E corresponde ao acréscimo de comprimento (de referência), depois da ruptura, em relação ao comprimento inicial do corpo de prova. Quanto maior for a dutilidade, maior é o alongamento percentual. O alongamento do C.P., pode ser avaliado pelo equipamento utilizado para o ensaio ou ajustando as duas partes do corpo de prova e medindo o alongamento final. O alongamento percentual pode ser calculado através da fórmula:

$$\text{Alongamento (\%)} = ((\text{comprimento final do C.P.} - \text{comprimento inicial do C.P.}) / \text{comprimento inicial}) \times 100$$

O comprimento inicial do corpo de prova, é o comprimento entre as marcas de referência da zona útil do corpo de prova; e o comprimento final, é o comprimento entre as mesmas marcas após o ensaio. Ao se registrar o valor do alongamento percentual, deve-se registrar também o comprimento inicial, pois os valores de alongamento variam em função do comprimento considerado. Se o material fraturar fora da região central do C.P. (comprimento inicial do C.P./3, localizado no centro da zona útil), o ensaio deve ser repetido, pois o resultado obtido para o alongamento pode não ser verdadeiro.

O alongamento também serve como um indicativo de qualidade do material, se o mesmo tiver descontinuidades (porosidades, inclusões) ou alterações devido a um aquecimento indevido, neste caso o alongamento do C.P. pode ser inferior ao normal.

- d) **Coeficiente de estrição (Z)** – é a percentagem de redução transversal até a ruptura. A dutilidade de um material também pode ser determinada por este coeficiente. E quanto maior ele for, maior será a dutilidade do material. Este coeficiente pode ser determinado medindo-se a área inicial e área final após o ensaio de tração. O coeficiente de estrição pode ser determinado através da equação:

$$Z = ((A_o - A_f) / A_o) \times 100$$

Onde: A_o = área inicial da seção transversal do C.P.; A_f = área final da seção transversal do C.P.; Z = coeficiente de estrição.

O coeficiente de estrição também pode ser utilizado como um indicativo de qualidade do material pela mesma razão do alongamento.



7. Tratamentos Térmicos dos Aços

7.1 Definição e Objetivos

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidas as ligas metálicas, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

As propriedades das ligas metálicas dependem, em princípio, de sua microestrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a microestrutura das ligas, resultando, em consequência na alteração, de suas propriedades.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- remoção de tensões,
- aumento ou diminuição da dureza,
- aumento da resistência mecânica,
- melhora de ductilidade,
- melhora da usinabilidade,
- melhora da resistência ao desgaste,
- melhora das propriedades de corte,
- melhora da resistência à corrosão,
- melhora da resistência ao calor,
- modificação das propriedades elétricas e magnética.

A simples enumeração dos objetivos acima evidencia claramente a importância e a necessidade do tratamento térmico dos aços.

Em geral, a **melhora** de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com **prejuízo** de outras. Por exemplo, o **aumento da ductibilidade** provoca simultaneamente **queda nos valores da dureza e resistência à tração**.

É necessário, pois, que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Não se verifica, pela simples aplicação de um tratamento térmico, qualquer alteração da composição química do aço. Há casos, entretanto, em que interessa somente uma modificação parcial de certas propriedades mecânicas; por exemplo, melhorar superficialmente a dureza do aço. Esse efeito é conseguido pela alteração parcial da sua composição química. Os tratamentos em que a combinação de operações de aquecimento e resfriamento é realizada em condições tais que conduzem a uma mudança parcial da composição química da liga e, consequentemente, uma modificação parcial de



suas propriedades mecânicas, serão chamados de “tratamentos termo-químicos”.

7.2 Fatores de influência nos tratamentos térmicos

Antes de serem definidos e descritos os vários tratamentos térmicos, será feita uma rápida recapitulação dos diversos fatores que devem ser levados em conta na sua realização, são eles:

- Aquecimento
- Tempo de permanência à temperatura de aquecimento
- Resfriamento
- Atmosfera do forno

7.2.1 Aquecimento

O aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, porque tem-se a completa austenitização do aço, ou seja total dissolução do carboneto de ferro gama: essa austenitização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em função da velocidade de resfriamento adotada.

Na caso do aquecimento, dentro do processo de tratamento térmico, devem ser apropriadamente consideradas as velocidades de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento.

A velocidade do aquecimento, embora na maioria dos casos seja fator secundário, apresenta certa importância, principalmente quando os aços estão em estado de tensão interna ou possuem tensões residuais devidas a encruamento prévio ou ao estado inteiramente martensítico porque, nessas condições, um aquecimento muito rápido pode provocar empenamento ou mesmo aparecimento de fissuras. Há casos, contudo, de aços fortemente encruados que apresentam uma tendência para excessivo crescimento de grão quando aquecidos lentamente dentro da zona crítica, sendo então conveniente realizar um aquecimento mais rápido através dessa zona de transformação.

A temperatura do aquecimento é mais ou menos um fator fixo determinado pela natureza do processo e dependendo, é evidente, das propriedades e das estruturas finais desejadas, assim como da composição química do aço, principalmente do seu teor do carbono.

Quanto mais alta essa temperatura, acima da zona crítica, maior segurança se tem da completa dissolução das fases no ferro gama; por outro lado, maior será o tamanho do grão da austenita. As desvantagens de um tamanho de grão excessivo são maiores que as desvantagens de não se ter total dissolução das fases no ferro gama, de modo que se deve procurar evitar temperaturas muito acima da linha superior A_3 da zona crítica. Na prática, o máximo que se admite é 50 $^{\circ}\text{C}$ acima de A_3 e assim mesmo para os aços



hipoeutetóides. Pare os hipereutetóides, a temperatura recomendada é inferior à da linha A_{cm} . A razão é óbvia a linha A_{cm} sobe muito rapidamente em temperatura com o aumento do teor de carbono; para que haja, portanto, completa dissolução do carboneto de ferro gama, são necessárias temperaturas muito altas com consequente e excessivo crescimento de grão de austenita, condição essa mais prejudicial que a presença de certa quantidade de carboneto não dissolvido.

7.2.2 Tempo de permanência à temperatura de aquecimento

A influência do tempo de permanência do aço à temperatura escolhida de aquecimento mais ou menos idêntica à da máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, tanto mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou outras fases presentes (elementos de liga) no ferro gama, entretanto maior o tamanho de grão resultante, como mostra a figura 1.

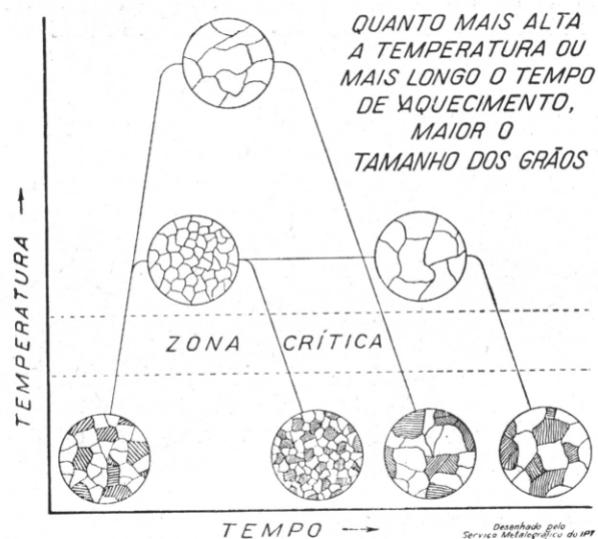


Fig. 1 – Influência da temperatura e do tempo no tamanho dos grãos.

Procura-se evitar, pois, permanência à temperatura além do estritamente necessário para que se obtenha uma temperatura uniforme através de toda a secção do aço e para que consigam as modificações microestruturais mais convenientes. Tempo muito longo pode também aumentar a oxidação ou descarbonetação do material. Sob o ponto de vista de modificação microestrutural, admite-se que uma temperatura ligeiramente mais elevada seja mais vantajosa que um tempo mais longo a uma temperatura inferior, devido a maior mobilidade atómica. De qualquer modo, o tempo à temperatura deve ser pelo menos o suficiente a se ter sua uniformização através de toda a secção.

7.2.3 Resfriamento

Este é o fator mais importante, pois é ele que determinará efetivamente a microestrutura e, em consequência, as propriedades finais dos aços. A figura 2 mostra que, pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos. Por outro lado, a obtenção desses constituintes não é só função da velocidade de resfriamento, dependendo também como se sabe, da composição do aço (teor em elementos de liga, deslocando a posição das curvas em C), das dimensões das peças, etc.

Os meios de resfriamento usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais brando é, evidentemente, o realizado no próprio interior do forno e ele se torna mais severo à medida que se passa para o ar ou para um meio líquido, onde a extrema agitação dá origem aos meios de resfriamento mais drásticos ou violentos.

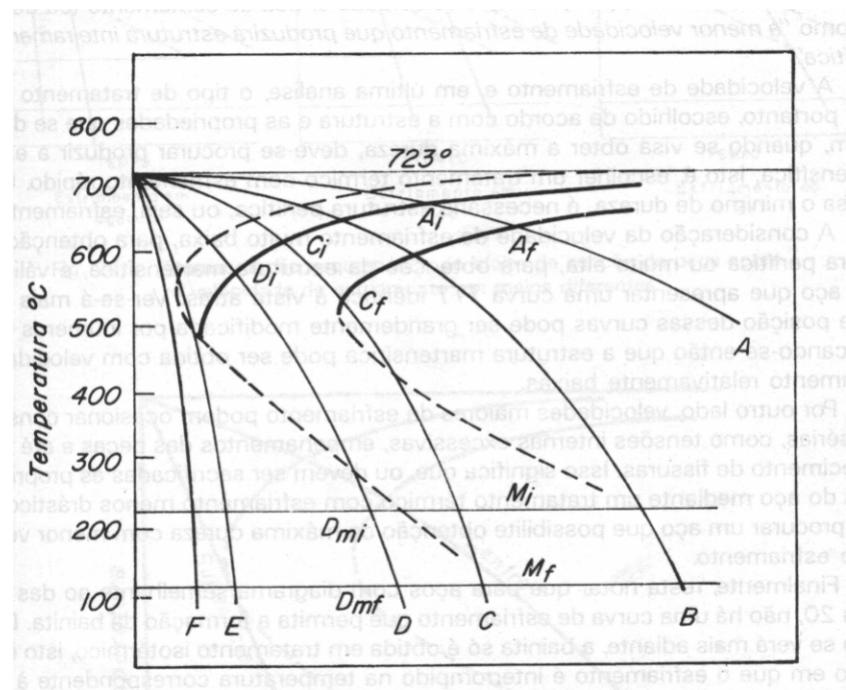


Fig. 2 – Curvas de resfriamento, traçadas sobre curvas TTT.

Na escolha do meio de resfriamento, o fator inicial a ser considerado é o tipo de estrutura final desejada a uma determinada profundidade. Não é só, entretanto. De fato, a secção e a forma da peça influem consideravelmente na escolha daquele meio. Muitas vezes, por exemplo, a secção da peça é tal que a alteração microestrutural projetada não ocorre a profundidade esperada, conforme mostrado na figura 3.

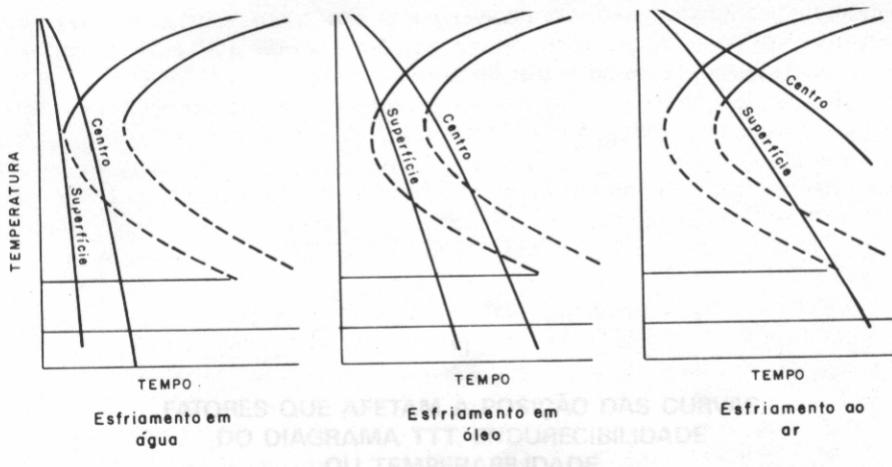


Fig. 3 – Diferentes meios físicos para alcançar taxas de resfriamento em tratamentos térmicos.

Por outro lado, algumas vezes a forma da peça é tal que um resfriamento mais drástico, como em água, pode provocar consequências inesperadas e resultados indesejáveis tais como empenamento e mesmo ruptura da peça. Um modo de resfriamento menos drástico, como óleo, seria o indicado sob o ponto de vista de empenamento ou ruptura, porque reduz o gradiente de temperatura apreciavelmente durante o resfriamento, mas pode não satisfazer sob o ponto de vista de profundidade de endurecimento. É preciso, então, conciliar as duas coisas: resfriar adequadamente para obtenção da estrutura e das propriedades desejadas A profundidade prevista e, ao mesmo tempo, evitar empenamento, distorção ou mesmo ruptura da peça quando submetida ao resfriamento. Tal condição se consegue com a escolha apropriada do aço.

De qualquer modo, o meio de resfriamento é fator básico no que se refere à reação da austenita, em consequência, em produtos finais de transformação.

Os meios de resfriamento mais comumente utilizados são: soluções aquosas, água, óleo e ar.

Como já foi observada, a escolha do meio de resfriamento não depende somente das propriedades finais desejadas no aço, pois o empenamento ou as fissuras que podem resultar ao ser o material resfriado, assim como o aparecimento de apreciáveis tensões internas podem determinar o substituto do meio ideal sob o ponto de vista de propriedades desejadas, por um meio menos severo, de modo a serem contornadas aquelas dificuldades. Pode-se chegar, então, à necessidade de se usar meios de resfriamento cada vez menos severos, o que implica na escolha simultânea de aços com temperabilidade cada vez maior, de modo a ser atingido o objetivo final — estrutura e propriedades desejadas com um mínimo de empenamento e tensões internas — nas melhores condições.

Meios de resfriamento ainda menos severos que óleo, água aquecida ou ar, são banhos de sal ou banhos de metal fundido.



7.2.4 Atmosfera do forno

Nos tratamentos térmicos dos aços, deve-se evitar dois fenômenos muito comuns que podem causar sérios aborrecimentos: a oxidação que resulta na formação indesejada “casca de óxido” e a descarbonetação que pode provocar a formação de uma camada mais mole na superfície do metal.

Tais fenômenos, de oxidação e de descarbonetação, são evitados pelo uso de uma atmosfera protetora, ou controlada no interior do forno, a qual, ao prevenir a formação da “casca de óxido”, torna desnecessário o emprego de métodos de limpeza e, ao eliminar a descarbonetação, garante uma superfície uniformemente dura e resistente ao desgaste.

Os tratamentos térmicos usuais dos aços são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos.

7.3 Recozimento pleno ou total

Sob o ponto de vista de ganho de propriedades, o recozimento tem papel fundamental na construção mecânica quando se trata de obter características de **baixa dureza e elevada dutilidade** nas ligas metálicas. Em especial, quando aplicado a ligas de aço de baixo e médio teores de carbono, o objetivo claro de tal tratamento é a obtenção da perlita grosseira. Na prática, a execução do recozimento pleno ou total exige a austenitização, o que implica na dissolução completa dos elementos químicos que compõem a liga de aço. A velocidade de resfriamento é estabelecida desligando-se o forno com a peça no seu interior ou controlando-se a queda de temperatura conforme pode ser observado na figura 4. O recozimento Pleno ou Total pode ainda ser empregado para regularizar a estrutura bruta de fusão, modificar propriedades elétricas, remover gases e eliminar quaisquer tratamentos térmicos que a peça tenha sofrido anteriormente (têmpera, normalização).

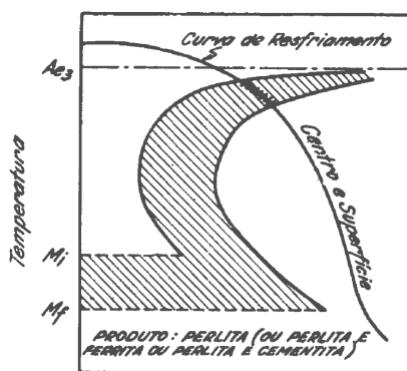


Figura 4 – Curva TTT, com sobreposição da curva de resfriamento para recozimento pleno ou total.



Na figura 5 observa-se a microestrutura do tratamento para um aço hipoeutetóide resultando em um ganho considerável de produtividade na usinagem, em função da baixa dureza que apresenta.

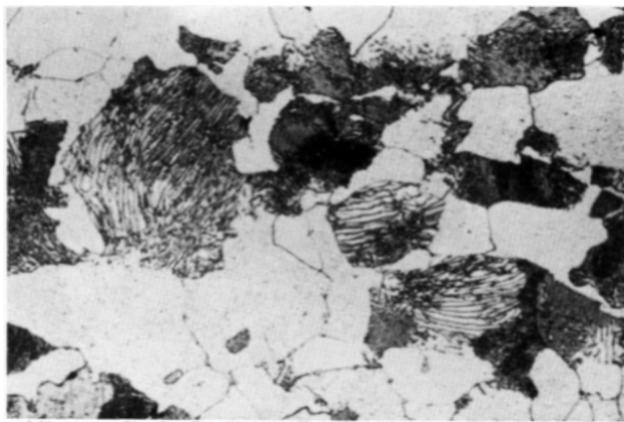


Figura 5 – Microestrutura de um aço hipoeutetóide recozido.

A figura 6 representa graficamente o ciclo térmico onde pode-se observar os três estágios do tratamento (aquecimento, encharcamento e resfriamento). A temperatura deve ser estabelecida diretamente sobre o diagrama de equilíbrio Fe-C, quando forem tratados aços comum ao carbono. Para aços-liga deve-se consultar literaturas específicas.

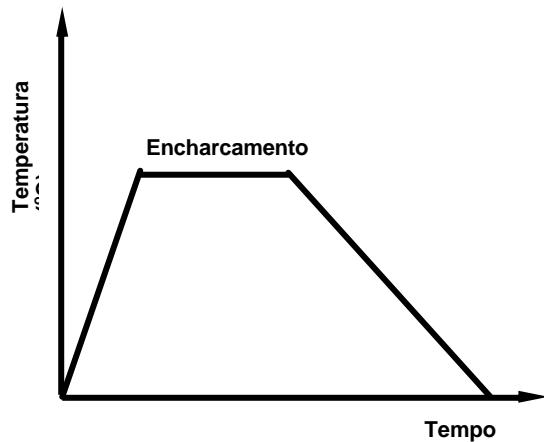


Figura 6 - Ciclo térmico para recozimento pleno ou total.

7.3.1 Determinação da Temperatura de Tratamento

O aquecimento do aço para o Recozimento Pleno ou Total deve ser feito com o objetivo de obter transformação de fase cristalina. Para tanto, aplica-se a seguinte lógica:

- Para aços hipoeutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A₃ (γ)

- Para aços eutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A₁ (γ)
 - Para aços hipereutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A₁ (γ +Fe₃C)

Utilizando-se então o diagrama, a leitura de temperatura é feita diretamente sobre o mesmo. Por exemplo: Para um Aço ABNT 1050 (0,5% C), têm-se a leitura do diagrama igual a 770°C obtida sobre a linha de transformação A₃. Deve-se ainda somar 50°C a este valor o que resultará numa temperatura de aquecimento para recocimento pleno ou total de 820°C, conforme mostrado na figura 7.

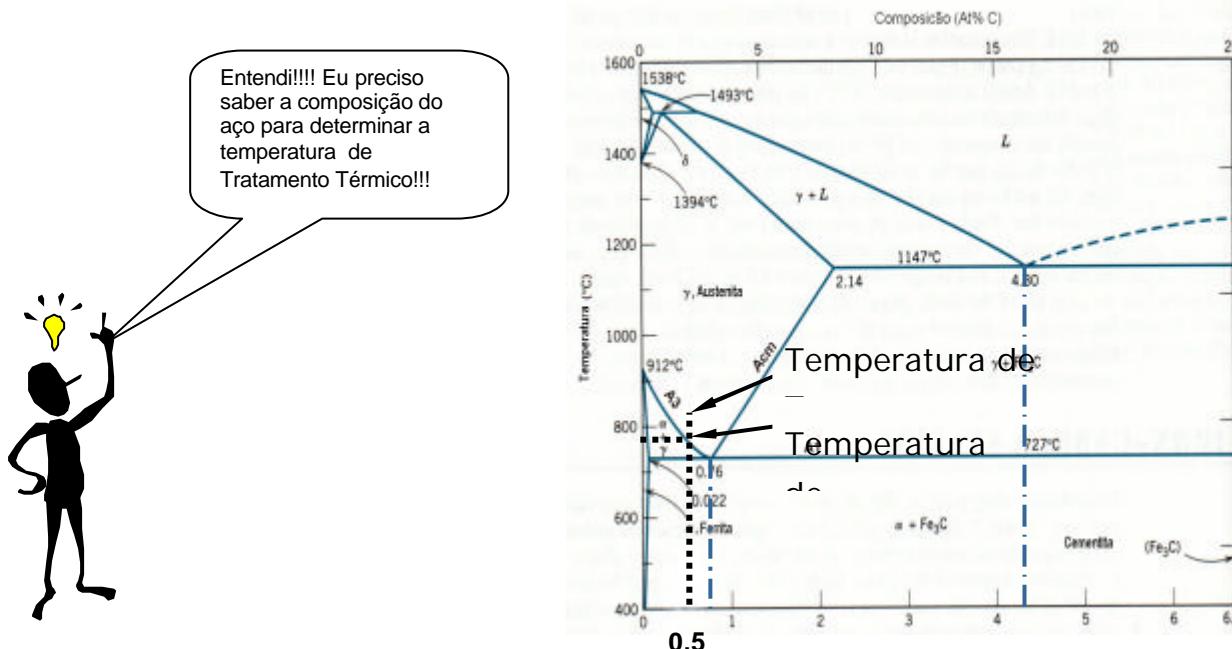


Figura 7 – Diagrama de Equilíbrio Fe-C com detalhes da determinação de temperatura de tratamento, para um Aço ABNT 1050.

É utilizado para corrigir a morfologia dos grãos de metais ou ligas metálicas que passaram por processos de **conformação mecânica a frio**. Como consequência do trabalho de conformação mecânica os grãos deformam-se e assumem o aspecto alongado, gerando no material características de aumento de dureza, aumento da resistência mecânica e diminuição da resistência ao impacto (material **encruado**). Em algumas situações é conveniente manter-se este tipo de propriedades, mas na maioria dos casos torna-se indesejável. As temperaturas de recozimento de recristalização variam conforme o tipo de metal ou liga metálica que está sendo tratado. Na tabela 1 estão identificados algumas temperaturas de tratamento e nas figuras 8a e 8b, aspectos da morfologia dos grãos de um aço ABNT 1005 antes e depois da recristalização.

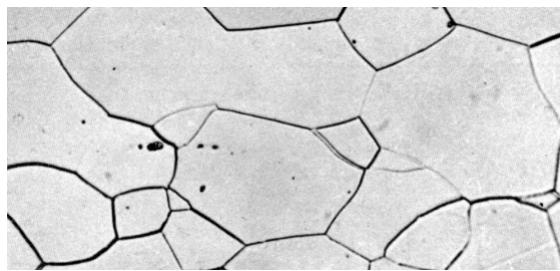


Tabela 1 – Alguns metais e ligas metálicas com suas respectivas temperaturas de recristalização.

Metal ou liga metálica	Temperatura de Recristalização (°C)
Chumbo	-4
Estanho	-4
Alumínio (99,999%)	80
Alumínio (99%)	275
Aço de Baixo Carbono	540



a)



b)

Fig. 8 – a) Aço ABNT 1005 Encruado. b) Aço ABNT 1005 Recristalizado.

7.4 Recozimento para alívio de tensões

Este tratamento não necessita de temperaturas austeníticas para produzir os resultados esperados. O aquecimento é feito em temperaturas sub-críticas, utilizando-se normalmente fornos com circulação forçada de ar (garantindo homogeneidade de aquecimento), podendo ser resfriado posteriormente ao ar calmo. Tem como objetivos fundamentais o **alívio das tensões** originadas durante a **solidificação** ou que surgem durante operações de **conformação mecânica a frio (estampagem, endireitamento), soldagem e usinagem**. É importante observar que esta operação não gera transformações de fase cristalina como o tratamento anterior de recozimento pleno ou total. As temperaturas empregadas dependem de cada liga de aço a ser tratada, normalmente em torno de 600 °C, conforme o ciclo térmico apresentado na figura 9.

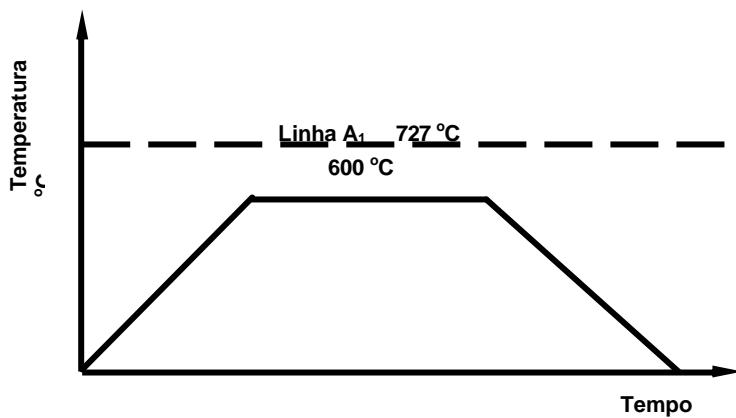


Figura 9 – Ciclo térmico para recozimento de alívio de tensões.

7.5 Recozimento de Recristalização x Recozimento para Alívio de Tensões

Um modo relativamente fácil de estudar-se as modificações de propriedades alcançadas nestes dois tratamento térmicos é apresentado graficamente na figura 10.

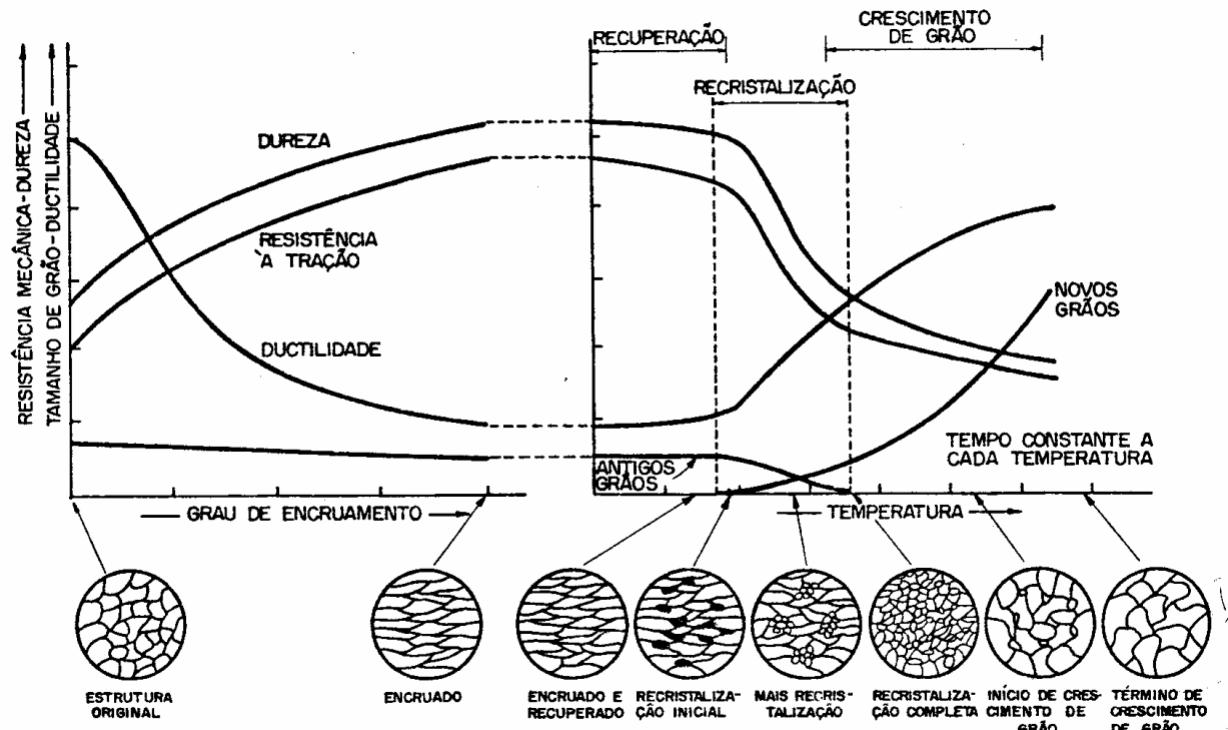


Figura 10 – Gráfico representando a modificação de propriedades de um material submetido a recozimento para alívio de tensões e recristalização.



7.6 Normalização

A normalização visa **refinar a granulação grosseira** das peças de aço fundido principalmente. Com o mesmo objetivo, é também aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. A normalização é ainda usada como **tratamento preliminar** a têmpera e ao revenido, justamente para produzir microestrutura mais uniforme do que a obtida por laminação, por exemplo, além de reduzir a tendência ao empenamento e facilitar a dissolução dos carbonetos e elementos de liga.

Nos aços-liga quando os mesmos são resfriados lentamente após a laminação, os carbonetos tendem a ser maciços e volumosos, difíceis de se dissolver em tratamentos posteriores de austenitização. A normalização corrige esse inconveniente.

Os aços-liga hipereutetóides são normalizados para eliminação total ou parcial dos rendilhados dos carbonetos que caracterizam suas microestruturas. Obtém-se, assim, uma microestrutura que, num tratamento de esferoidização posterior, apresenta-se cem por cento esferoidizada, conferindo boa usinabilidade ao material e é mais adequada ao tratamento de têmpera.

Os constituintes que se obtém na normalização são ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina. Eventualmente, dependendo do tipo do aço, pode-se obter a bainita.

A normalização consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar. Esse tratamento está esquematizado na figura 11. Para os aços hipoeutetóides, pode-se admitir que a temperatura de aquecimento ultrapasse a linha A_3 e para os hipereutetóides a linha A_{cm} , sem os inconvenientes, neste último caso, no resfriamento ao ar que se seguem da formação do invólucro frágil de carbonetos.

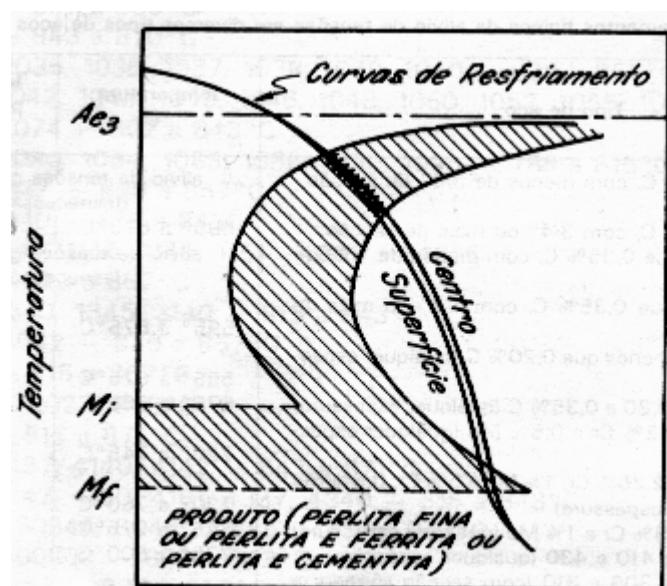


Figura 11 – Curva TTT, com sobreposição da curva de resfriamento para a normalização.



No estado normalizado, a dureza, bem como os limites de escoamento e resistência são um pouco mais elevados do que no estado plenamente recocido, como mostra a tabela 2, ao passo que o alongamento e a estrição sofrem ligeira diminuição.

A causa dessas alterações reside no fato de não se processar completamente a separação da ferrita, que deveria separar-se na zona crítica. A austenita transforma-se, então, em uma perlita lamelar muito fina, que contém mais ferrita que proporção normal.

Tabela 2 – Propriedades dos aços: normalização X recocimento.

	NORMALIZADO						RECOZIDO							
	Limite de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento em 50 mm, %	Estricção %	Dureza Brinell	Limite de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento em 50 mm, %	Estricção %	Dureza Brinell
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa				kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa			
0,01	18,0	180	31,5	305	45	71	90	12,5	125	29,0	280	47	71	90
0,20	31,5	305	45,0	440	35	60	120	25,0	250	41,0	400	37	64	115
0,40	35,5	345	50,5	585	27	43	165	31,0	300	52,5	515	30	48	145
0,60	42,0	410	76,5	755	19	28	220	34,5	335	67,0	660	23	33	190
0,80	49,0	480	94,0	920	13	18	260	36,5	355	80,5	785	15	22	220
1,00	70,0	690	106,5	1045	7	11	295	36,5	355	75,5	745	22	26	195
1,20	70,0	690	107,0	1050	3	6	315	35,5	345	71,5	705	24	39	200
1,40	67,0	660	103,5	1015	1	3	300	35,0	340	69,0	680	19	25	215

7.7 Tratamento Térmico de Têmpera

7.7.1 Objetivos

Sob o ponto de vista de propriedades mecânicas requeridas em componentes mecânicos e ferramentas industriais, a têmpera tem papel fundamental no sentido de garantir o aumento de resistência mecânica e também da dureza. Estas duas propriedades estão associadas no mesmo material, quando este é resfriado rapidamente da região austenítica até a temperatura de formação martensítica. Para o sucesso de tal operação deve-se, durante o resfriamento, evitar o cotovelo da curva TTT específica de cada tipo de aço (figura 12). É possível, para determinados tipos de aços-liga, obter-se a martensita a partir de velocidades de resfriamento muito brandas (ao ar, por exemplo), o que permite que ferramentas de geometrias complexas não corram o risco de empenamentos ou trincas, o que pode ocasionar a perda das mesmas.

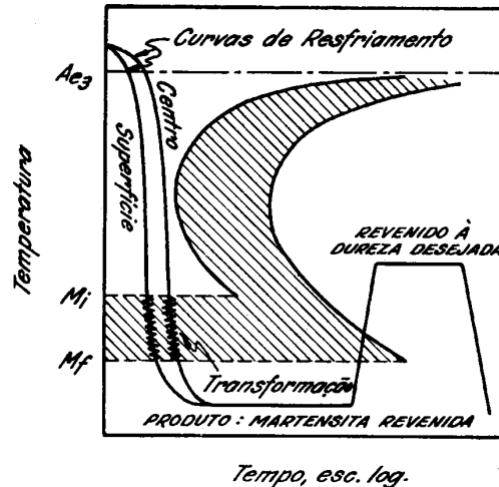


Figura 12 – Curva de resfriamento para martensita

7.7.2 Temperaturas do Processo

Assim como outros tipos de tratamento térmico, a têmpera requer a transformação de fase cristalina, bastando para tanto a análise da composição química do aço a ser tratado. Para aços-liga a temperatura de têmpera é obtida através de catálogos de fabricantes de aços ou literaturas especializadas em metalurgia. Isto é necessário porque a adição de elementos de liga modifica a posição das linhas de transformação do diagrama de equilíbrio. Para aços comuns ao carbono, as temperaturas de têmpera, podem ser obtidas diretamente sobre o diagrama de equilíbrio Fe-C, aplicando-se a seguinte lógica:

- Para aços hipoeutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A_3 (γ)
- Para aços eutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A_1 (γ)
- Para aços hipereutetóides deve-se somar 50 °C acima da linha A_1 ($\gamma + Fe_3C$)

Utilizando-se então o diagrama, a leitura de temperatura é feita diretamente sobre o mesmo. Por exemplo: Para um Aço ABNT 1050 (0,5% C), têm-se a leitura do diagrama igual a 770 °C obtida sobre a linha de transformação A_3 . Deve-se ainda somar 50 °C a este valor o que resultará numa temperatura de aquecimento para têmpera de 820 °C.

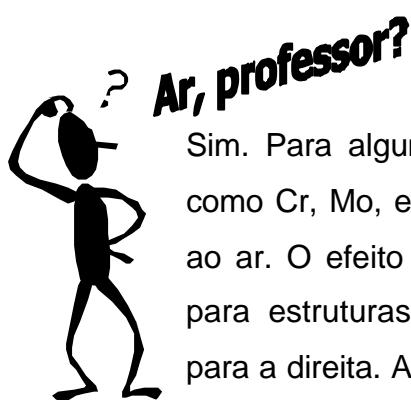


7.7.3 Resfriamento

A seleção do meio de têmpera é feita a partir da observação de cada tipo de aço a ser tratado. Para tanto, deve-se seguir a orientação descrita em literaturas apropriadas ou então, fazer a leitura das curvas TTT específicas para os mesmos. De uma maneira geral, pode-se optar pelos seguintes meios de resfriamento:

Aços-carbono: água ou salmoura (água + 10% de NaCl) → Resfriamento drástico

Aços-liga: óleo, banho de sais, ar soprado ou mesmo ar → Resfriamento brando



Sim. Para alguns aços-ligas que contém altos teores de elementos de liga como Cr, Mo, e Ni é possível obter-se martensita a partir de um resfriamento ao ar. O efeito destes elementos de liga é o de retardar as transformações para estruturas ferrítico-perlíticas, deslocando as curvas de transformação para a direita. A utilização destes aços é conveniente quando é grande o risco de surgimento de trincas em ferramentas com geometrias complexas e de grandes dimensões. A figura 13 mostra uma curva TTT de um aço com este tipo de comportamento.

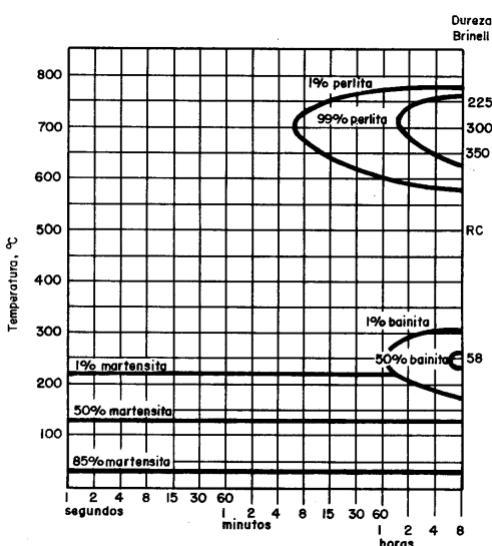


Fig. 13 – Curva TTT de um aço ABNT D2, de resfriamento ao ar para peças de até 60mm de diâmetro. Composição: 1,50 C; 1,00 Mo; 12,00 Cr; 1,00 V.



7.7.4 Revenido

Revenido é um tratamento térmico aplicado aos aços que foram temperados, com o objetivo de **aliviar as tensões e corrigir a dureza** obtida ao final do processo. Deve-se programar o revenido imediatamente após a têmpera, pois o risco de aparecimento de



trincas é muito grande. Não se pode, de maneira nenhuma, colocar em serviço os componentes mecânicos que não tiveram suas tensões aliviadas por revenido.

Para entender melhor como ocorre este alívio de tensões, é necessário primeiro saber-se como surge a martensita, que é a fase cristalina característica das peças temperadas.

O surgimento da martensita – a martensita é uma fase cristalina que têm sua formação associada ao resfriamento rápido da austenita. Esta operação faz com que a transformação microestrutural fuja do equilíbrio termodinâmico, não possibilitando o surgimento dos produtos normais de transformação (ferrita, perlita). O aço, quando aquecido a temperaturas elevadas, têm seus átomos de carbono solubilizados na rede cristalina do ferro gama, ou seja, os espaços interatômicos desta rede, sendo maiores, permitem que o átomo intersticial (C) se movimente entre os átomos de ferro. Quando esta estrutura é resfriada rapidamente, não existe tempo para o átomo de carbono sair da posição intersticial e formar carbonetos. O que ocorre é simplesmente uma passagem do cristal de ferro gama para alfa, formando a **martensita**. Portanto, a martensita nada mais é do que **uma solução super-saturada de carbono em ferro alfa**. Estudos mais recentes comprovam que o reticulado cristalino formado na têmpera não é cúbico, mas sim tetragonal, formado a partir da distorção causada pelo átomo de carbono nos interstícios do reticulado CCC, conforme pode ser observado na figura 14.

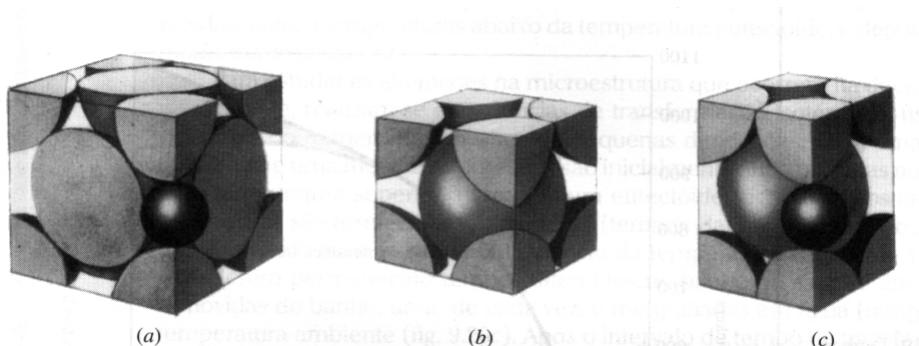


Fig. 14 – a) Célula **CFC** (austenita) com átomo intersticial no seu interior; b) Célula **CCC** (ferrita) sem átomo intersticial; c) Célula **TCC** (martensita) com átomo intersticial representando a supersaturação de carbono no ferro alfa que ocorre na têmpera.



Diante do exposto, fica fácil analisar o efeito de uma operação de revenido sobre um componente mecânico temperado. A seleção de temperaturas aplicadas a este tratamento térmico deve ter como orientação geral o princípio de que, **quanto maior a temperatura de tratamento, menor será a dureza final obtida**, mostrado em um diagrama de revenimento para um aço Q na figura 15. A reação do aço temperado quando reaquecido a baixas temperaturas durante o revenido, pode ser entendida como difusão atômica, resultado da liberação de alguns átomos de carbono dos interstícios da rede cristalina, dando origem a formação de carbonetos. Desta maneira, a referência a este tipo de estrutura que surge após o revenido é dita martensita revenida. Comumente, emprega-se temperaturas na faixa de **100 a 700 °C**, conforme dureza final desejada no componente mecânico e composição do aço a ser tratado.

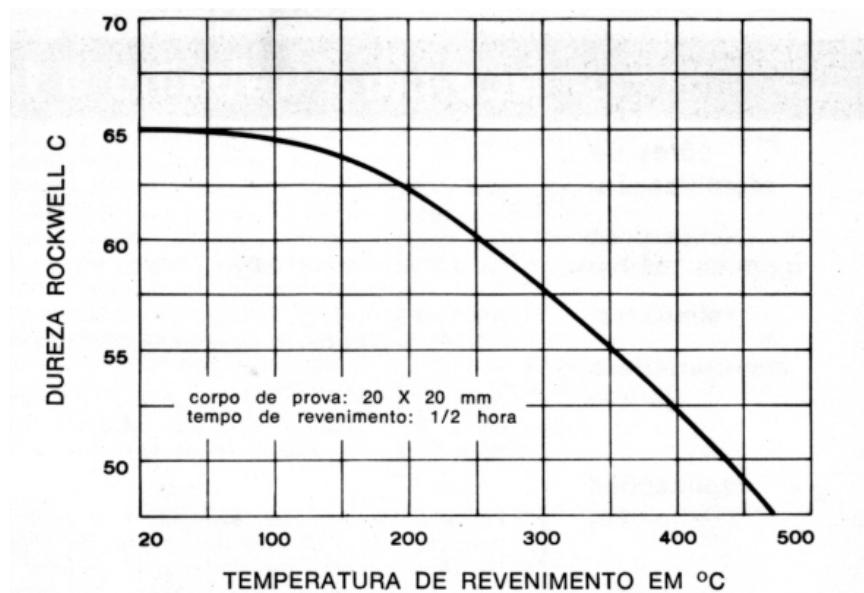
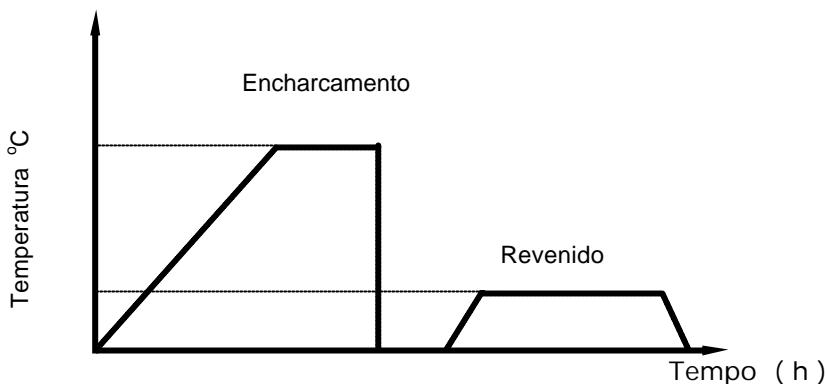


Fig. 15 – Curva de Revenimento de um aço ABNT O1 (Villares VND), mostrando a queda de dureza em função do aumento de temperatura de tratamento.



7.7.4.1 Ciclo Térmico de Têmpera e Revenido



7.7.5 Temperabilidade dos Aços

Temperabilidade ou endurecibilidade dos aços é a **capacidade do aço endurecer da superfície em direção ao núcleo**. Ao contrário do que se pensa, a dureza estabelecida na superfície do aço durante uma têmpera, não é a mesma do seu centro. Isto pode ser explicado pelas diferentes velocidades de resfriamento que ocorrem com o componente mecânico quando este sofre o choque térmico necessário para produzir-se a martensita. A princípio este fato não teria muita importância se a análise se limitasse somente a **resistência ao desgaste** que muitas peças são projetadas. Um bom exemplo são as esferas de rolamento, idealizadas para minimizar o atrito em mancais que devem associar também tratamento térmico de têmpera para possibilitar uma vida útil adequada ao equipamento no qual será instalado. Para peças em que a têmpera tem por objetivo um **aumento de resistência mecânica**, interessa que a martensita se forme em distâncias maiores a partir da superfície, o que garantirá melhores resultados de comportamento mecânico. Assim, têm-se no mercado, aços considerados de **baixa, média e alta temperabilidade**, aplicados segundo critérios de projetos bem definidos. Para classificá-los, existem dois ensaios de temperabilidade usuais em aciarias: Ensaio Jominy e Ensaio Grossmann.

7.7.5.1 Ensaio de Temperabilidade Jominy

É o ensaio mais usado na indústria, pois a partir de um único corpo de prova é possível determinar-se a diminuição do teor de martensita no aço, como função do seu tamanho.

O ensaio consiste na austenitização, seguido de um resfriamento rápido, de um corpo de prova de dimensões normalizadas (25,5 mm de diâmetro por 101 mm de



comprimento). Como a estrutura inicial tem uma importância muito grande na temperabilidade, o corpo de prova é submetido a um tratamento térmico de normalização antes de ser ensaiado (refino dos grãos de perlita). Para realização do ensaio, é necessário a construção de um aparato específico, no qual se tem controle de pressão da água de resfriamento sobre o corpo de prova (figura 16).

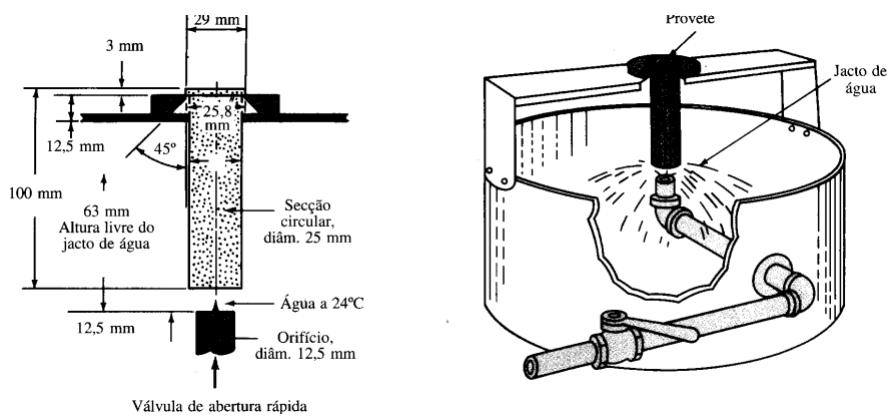


Fig. 16 – Corpo de prova e aparato para ensaio de temperabilidade Jominy.

Depois da peça resfriada até a temperatura ambiente, são feitos planos longitudinais paralelos na mesma de 0,5 a 0,9 mm de profundidade, e então são realizadas medições de dureza Rockwell para distâncias de até 50 mm ao longo do corte, a partir da extremidade resfriada pelo jato de água; para os primeiros 12,8 mm, as leituras de dureza são feitas no intervalo de 1/16" (1,6 mm) e para os restantes 38,4 mm todos a 1/8" (3,2 mm).

Para que o ensaio tenha êxito é importante que alguns cuidados sejam observados ao executar-se o tratamento térmico, tal como segue abaixo:

- Período de tempo entre a retirada do corpo de prova do forno e início da têmpera pela água deve ser no máximo 5 segundos;
- O dispositivo de têmpera deve estar seco;
- Acionamento do dispositivo de abertura rápida da água, dando início a têmpera;
- Evitar agitação do ar ambiente em torno do corpo de prova;
- Deixar a água fluir durante no mínimo 10 minutos sob a superfície do corpo de prova.
- Decorrido o período de tempo previsto no item anterior, considerar terminada a têmpera, podendo então o corpo de prova ser indiferentemente mergulhado em água ou deixado ao ar até atingir a temperatura ambiente.



7.7.5.2 Curvas de temperabilidade

Uma curva de temperabilidade Jominy relaciona a dureza Rockwell C na ordenada com o comprimento do corpo de prova na abscissa. Os resultados dessas medições geram uma curva que decresce da posição de 100% de transformação martensítica até obtenção de microestrutura perlítica ou ferrito-perlítica. Observa-se na figura 17, a correlação entre esta curva e o corpo de prova que lhe deu origem.

A velocidade de resfriamento decresce da extremidade da barra temperada e, consequentemente a dureza também cai. Com a diminuição da velocidade de resfriamento, mais tempo é permitido para a difusão e a formação de outras fases cristalinas além da martensita (bainita, perlita e/ou ferrita). A figura 18 mostra a correlação entre a curva Jominy, posição do corpo de prova e as diferentes velocidades de resfriamento obtidas e na figura 19, observa-se curvas de temperabilidade de alguns tipos de aços.

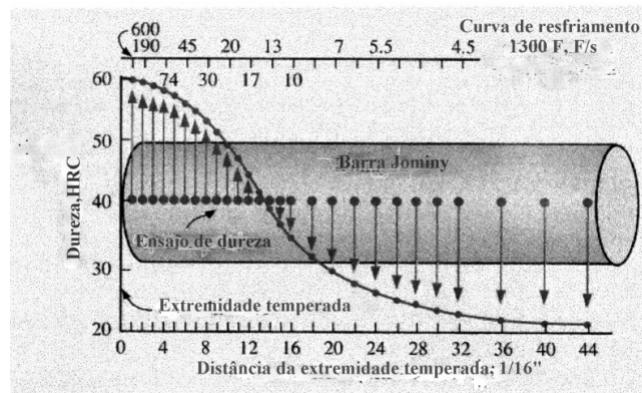


Figura 17 - Correlação entre dureza Rockwell C e distância da extremidade temperada, gerando a curva de temperabilidade Jominy.

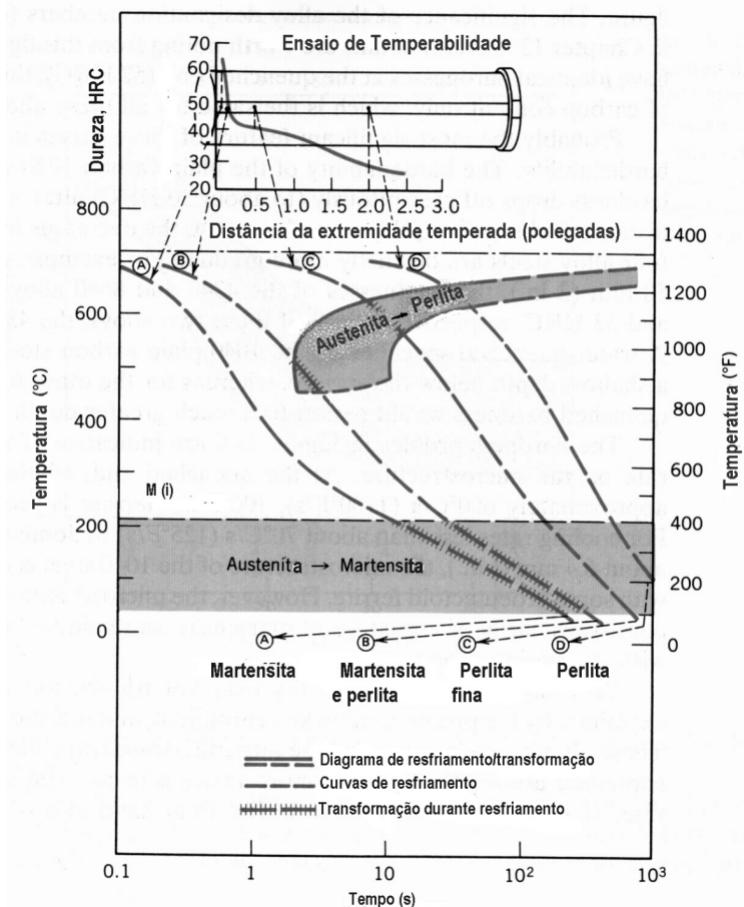


Fig. 18 – Correlação entre o diagrama de arrefecimento (transformação) contínuo e os resultados do ensaio de temperabilidade Jominy de um aço carbono eutetóide.

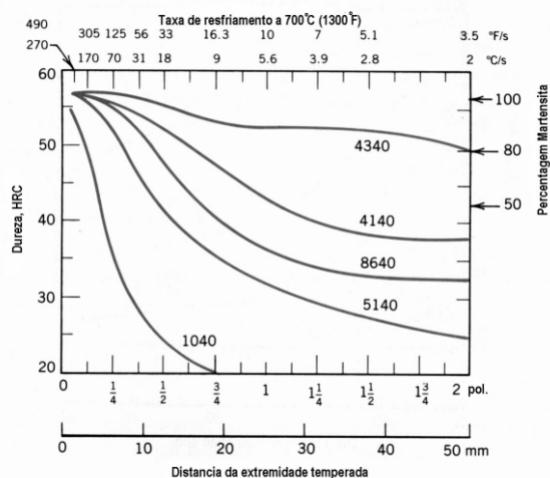


Fig. 19 – Curvas de Temperabilidade Jominy para diversos tipos de aços.



7.7.5.3 Ensaio de Temperabilidade Grossmann

Assim como no ensaio de temperabilidade Jominy, este ensaio parte do resfriamento do aço a partir da zona austenítica. A diferença está no fato de que o método Jominy, para cada tipo de aço, levanta apenas uma curva completa com base em um único corpo de prova enquanto que o método Grossmann usa várias barras de aço de diâmetros crescentes para o mesmo. Estas barras, após serem convenientemente temperadas, são cortadas transversalmente e a dureza é medida da superfície em direção ao centro a distâncias específicas. Este ensaio permite a determinação da profundidade de endurecimento do aço, não só pela medida de dureza, mas também pelo exame das microestruturas resultantes. A construção do gráfico resultante do ensaio, estabelece a ordenada para indicar a dureza (HRC) e a abscissa para as distâncias de medição linear, do centro para a superfície, conforme mostra a figura 20 .

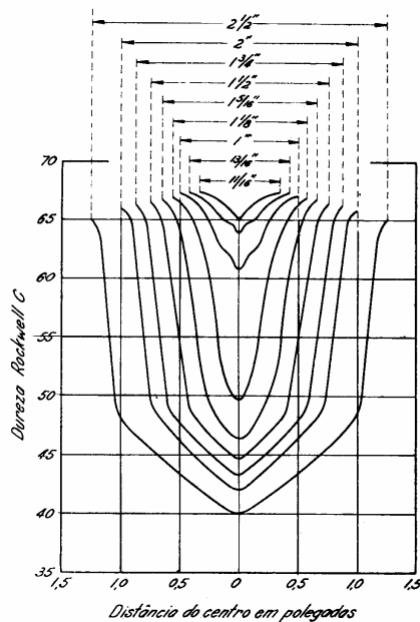


Fig. 20 – Curvas de dureza para um aço SAE 1090 (0.89% C), em uma série de barras redonda, esfriamento em água.



7.7.6 Têmpera Superficial

A Têmpera Superficial é vantajosa na construção de componentes mecânicos que requerem combinação de tenacidade e dureza superficial, aplicados em situações de trabalho onde a **resistência ao impacto** é fundamental. Como exemplo de aplicações pode-se citar: juntas homocinéticas (figura 21^a e 21b), eixos, engrenagens, virabrequins, eixos de comando de válvulas e outros.

O princípio do processo baseia-se no aquecimento rápido da superfície da peça através de diferentes formas de geração de energia térmica até a temperatura de austenitização. No processo mais simples, o aquecimento pode ser realizado através de chama oxiacetilênica e no mais complexo e preciso, o aquecimento é realizado através de indução eletromagnética.



Fig. 21a – Capa da junta homocinética de um automóvel, mostrando o alojamento das esferas de aço, com tratamento de têmpera superficial.

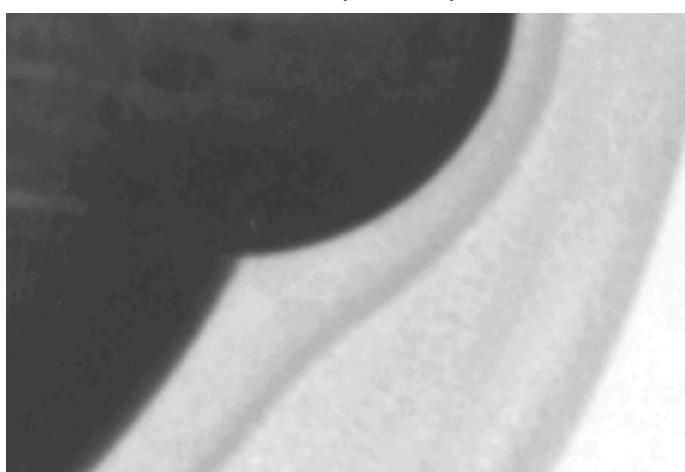


Figura 21 b– Detalhe do alojamento das esferas, mostrando o contorno da camada temperada por indução eletromagnética.



7.7.6.1 Têmpera por chama

Neste processo o calor é gerado por uma chama de gás oxiacetilênico, localizada sobre a superfície da peça a ser tratada, de maneira que proporcione um aquecimento rápido e com uma profundidade determinada, seguindo-se um resfriamento em meio adequado, dependendo da composição do aço a ser tratado. Os dispositivos de têmpera superficial são projetados em função da geometria da peça a ser temperada. Em casos mais simples pode-se fazer têmpera localizada. Em outros mais precisos, pode-se adaptar o cabeçote de chama múltipla e o jato de água em um torno, o que permite aquecimento e resfriamento de eixos e pequenas engrenagens.

7.7.6.2 Têmpera por indução

Da mesma maneira que a têmpera por chama, o objetivo é aquecer rapidamente a superfície da peça, seguindo-se um resfriamento rápido, porém com a diferença que o controle do processo é bem mais preciso, levando-se em conta profundidade desejada e temperatura estabelecida para a austenitização do aço tratado. O princípio físico da geração de calor é explicado da seguinte maneira:

“Quando uma corrente alternada flui através de um indutor ou bobina de trabalho, estabelece-se nesta um campo magnético altamente concentrado, o qual induz um potencial elétrico na peça a ser aquecida e envolvida pela bobina e, como a peça representa um circuito fechado, a tensão induzida provoca o fluxo de corrente. A resistência da peça ao fluxo da corrente induzida causa aquecimento por perdas I^2R ”, (Chiaverini, 1984). A profundidade e temperatura de trabalho são estabelecidas através da alta freqüência gerada por equipamento apropriado. Assim, estabelece-se a seguinte relação: **quanto maior a freqüência, menor a profundidade de aquecimento e quanto menor a freqüência, maior a profundidade de aquecimento.**

Sob o ponto de vista de vantagens do processo sobre a têmpera convencional, podemos relacionar os seguintes fatores:

1. O aquecimento é tão rápido (alguns segundos na maioria dos casos), que a superfície praticamente não oxida. Nota-se apenas uma certa modificação na cor.
2. O aquecimento é perfeitamente uniforme e reproduzível de peça para peça, por meio de um rigoroso controle de tempo de aquecimento.
3. O aquecimento pode ser localizado, isto é, limitado com grande exatidão a determinadas áreas.
4. A estrutura cristalográfica do aço se mantém inalterada (dureza de forja, fundição ou laminação), pois a têmpera atinge só a superfície.
5. O calor é gerado na própria peça, objeto de tratamento. Isto ocorre sem qualquer contato com o indutor (bobina).
6. A peça não fica deformada porque as forças produzidas na superfície não chegam a alterar a forma do núcleo, que permanece frio.
7. O aquecimento indutivo proporciona a possibilidade de usar aços carbono comum na fabricação de diversas peças que, com o emprego de processos de tratamentos térmicos convencionais, deveriam ser feitos de aços especiais de alto teor de liga. Resulta disso uma grande economia na produção de certas peças.
8. O tratamento por indução pode ser facilmente automatizado, devido a grande uniformidade do processo, reduzindo-se ao mesmo tempo, a quebra e o refugo.



9. A área de aquecimento é limitada a superfície coberta pelo indutor.
10. Pela variação de freqüência, é possível controlar com absoluta precisão a penetração do aquecimento, sendo possível limitar o processo a uma fina camada superficial. A variação da freqüência somada a do tempo de aquecimento permite obter infinitas combinações de tratamento térmico.
11. Economia por eliminação das operações de limpeza, remoção da crosta por meio de jato de areia ou outros.
12. Distorção mínima: a ausência quase absoluta de distorção durante a têmpera, elimina operações posteriores de endireitamento e retífica.
13. O processo garante alta dureza superficial, e tenacidade do núcleo, ideal para peças sujeitas a impacto.
14. Além da têmpera é possível realizar revestimentos através de equipamentos para indução eletromagnética. (Hemer, 1986).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. JÚNIOR, W. D. Callister. Materials Science and Engineering an Introduction.
Fourth Edition. United States, 1997.
- [2]. SMITH, W. F. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. 3^a ed. McGraw Hill, Portugal, 1998
- [3]. CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 5^a edição. Ed. ABM, São Paulo, 1984.
- [4]. RAUTER, Raul Oscar. Aços Ferramenta. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1974.
- [5]. Norma ABNT NBR 6339 ABR/89
- [6]. http://psme.atc.fhda.edu/engineering/e45/lab_sum/Lab8.htm