

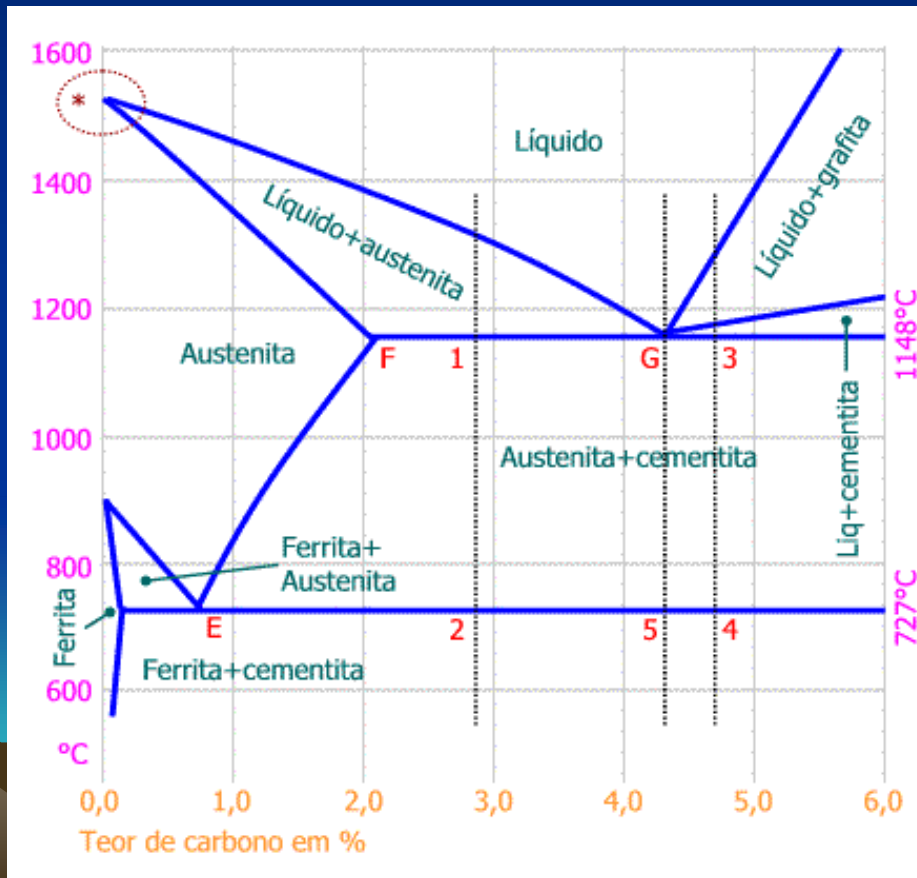
FERROS FUNDIDOS

(PROPRIEDADES E TRATAMENTOS TÉRMICOS)

	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Dúctil	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

Ferros Fundidos - Definição

É o termo genérico utilizado para as ligas Ferro-Carbono nas quais o conteúdo de Carbono excede o seu limite de solubilidade na Austenita na temperatura do eutético. A maioria dos ferros-fundidos contém no mínimo 2% de carbono, mais silício (entre 1 e 3%) e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga.



De forma similar aos aços, ferros fundidos podem ser hipoeutéticos, eutéticos ou hipereutéticos, com o valor eutético definido pelo ponto de equilíbrio entre a austenita e a cementita (aprox 4,3%, linha G-5 no diagrama).

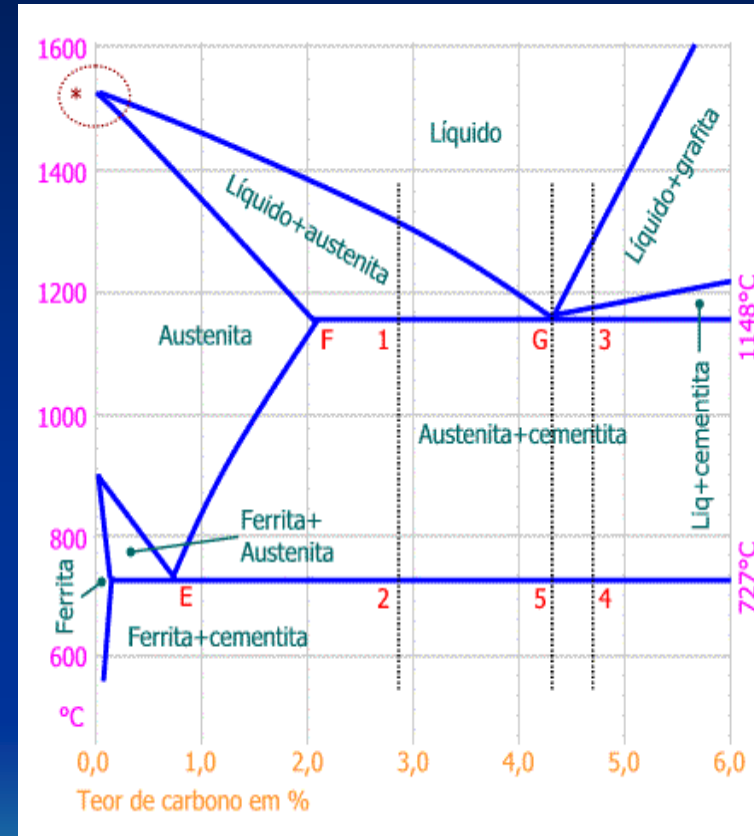
Ferros Fundidos - Definição

Quando o ferro fundido eutético é solidificado, logo abaixo do ponto G, há formação de uma estrutura com fundo de cementita e glóbulos de austenita, denominada ledeburita.

Continuando o resfriamento, abaixo de 727°C não poderá mais existir a austenita e, portanto, a ledeburita será composta de glóbulos de perlita sobre fundo de cementita.

Um ferro fundido hipoeutético (1-2) deve apresentar áreas de perlita, ledeburita e cementita.

Um ferro fundido hipereutético (3-4) apresenta cristais de cementita em forma de agulhas sobre fundo de ledeburita.



Ferros Fundidos - Classificação

Os ferros fundidos apresentam uma extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, e na maioria dos casos são de fácil usinagem.

Através da adição de elementos de liga é possível obter-se excelente resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão, porém em geral a resistência ao impacto e a ductibilidade são relativamente baixas, limitando sua utilização em algumas aplicações.

De acordo com a composição química e com a distribuição de carbono na sua microestrutura, os ferros fundidos podem ser classificados em quatro grandes categorias:

- Branco
- Cinzento
- Maleável
- Dúctil

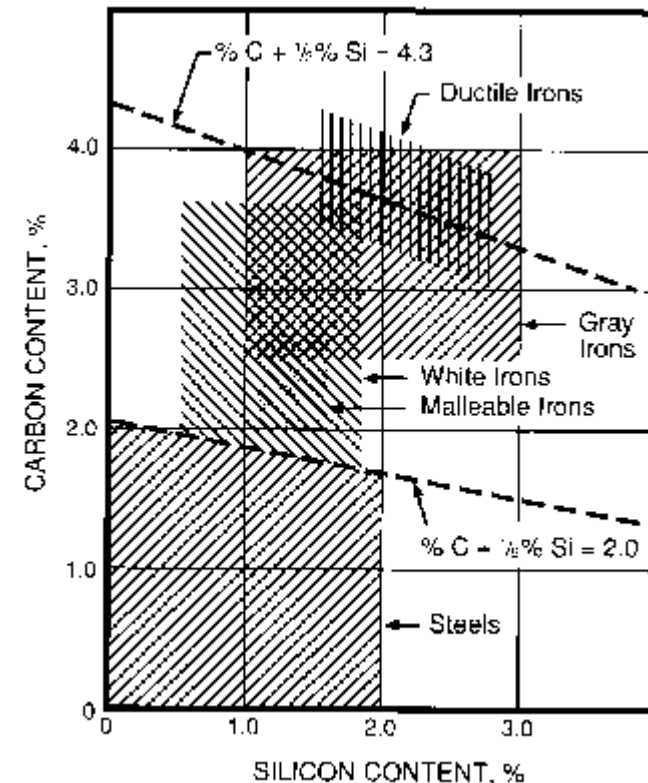
Nota: Algumas literaturas fazem também referência aos ferros fundidos misturados (intermediário entre o branco e o cinzento); nodulares (similares ao dúctil) e os especiais (quando observa-se a presença de outros elementos de liga além dos usuais).

Ferros Fundidos - Classificação

	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Dúctil	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

A tabela acima ilustra os intervalos de composição química dos ferros fundidos típicos, não ligados.

O gráfico ao lado ilustra a relação típica existente entre os teores de Carbono e Silício nas famílias de ferros fundidos.

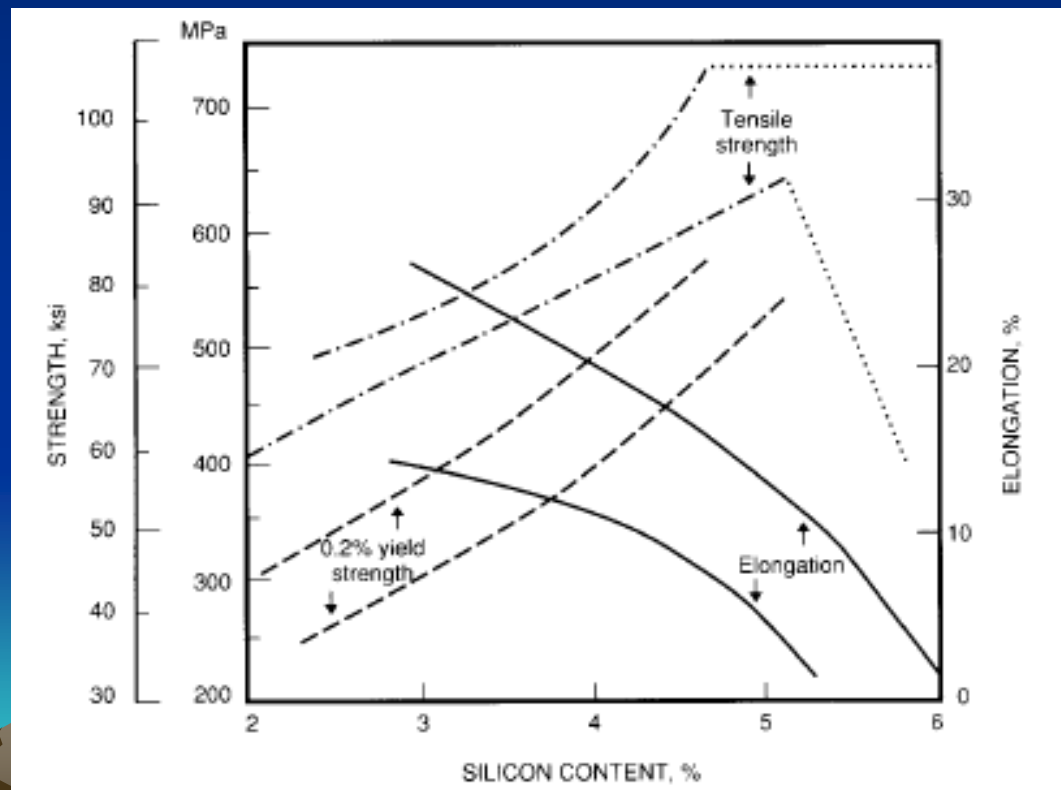


Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

Alguns elementos de liga, tais como o Si, Ni, Cu, favorecem a formação de estrutura gráfica (estável), sendo destes o Silício o mais importante, pois aumenta a velocidade de decomposição da cementita.

Elementos como H, B, N, S, Cr, Mo, Mn mesmo em pequenas quantidades favorecem a obtenção de carbonetos, resultando numa estrutura metaestável típica dos ferros fundidos brancos.

O Silício influencia nas propriedades mecânicas do ferro fundido dúctil à temperatura ambiente através da formação de solução sólida e endurecimento da matriz ferrítica.



Influence of silicon on the room temperature mechanical properties of ferritic Ductile Iron.

Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

O enxofre quando combinado com o ferro formando o FeS tende a ser muito prejudicial devido ao seu baixo pontos de fusão. Seu efeito pode ser controlado através da adição de Mn, que favorecerá a formação do MnS, muito estável e com elevado ponto de fusão.

O Cromo é forte estabilizador de carboneto; pporcentualmente em pêso, favorece a obtenção de um ferro fundido branco com o mesmo poder que o silício favorece a de um cinzento.

Altos teores de Si combinados com o Mo tendem a elevar significativamente os limites de resistência dos ferros fundidos dúcteis e cinzentos, bem como melhorar seu comportamento à fluência.

Material	Tensile Strength ksi (MPa)			Stress Rupture ksi (MPa)
	800°F 425°C	1000°F 540°C	1200°F 650°C	1000h @ 1000°F 540°C
Gray Iron	37(255)	25(173)	12(83)	5.9(41)
60-40-18 D.I.	40(276)	25(173)	13(90)	8.3(57)
4% Si D.I.	56(386)	36(248)	13(90)	10(69)
4% Si - 1% Mo D.I.	61(421)	44(304)	19(131)	14(97)
4% Si - 2% Mo D.I.	65(449)	46(317)	20(138)	17(117)

Gray Iron: Unalloyed, stress-relieved. Ductile Irons: Sub-Critically annealed at 1450°F (788°C).

Effect of silicon and molybdenum on the high temperature tensile and creep rupture strengths of ferritic Ductile Iron.

Ferros Fundidos - Classificação x Propriedades

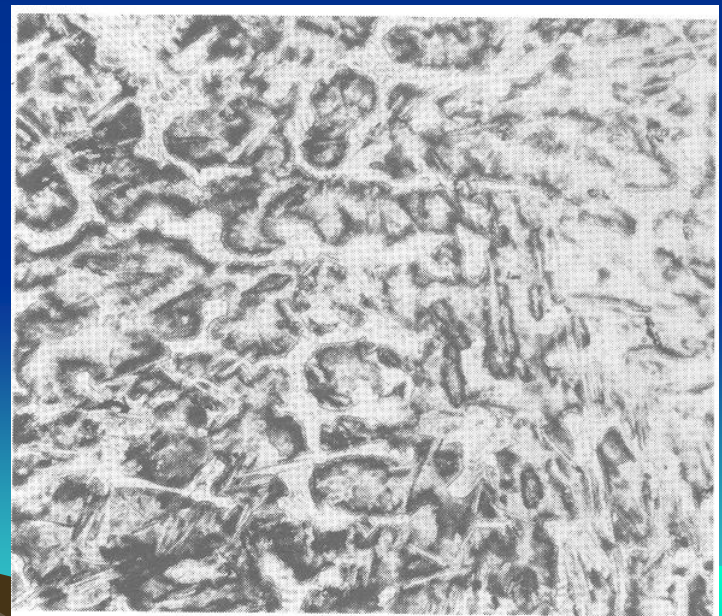
No Ferro Fundido Branco todo carbono presente está na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos, de tal modo que sua estrutura pode ser interpretada como metaestável no sistema ferro-cementita.

Os ferros fundidos brancos contém grandes quantidades de carboneto de ferro numa matriz perlítica conforme mostra figura abaixo. Para tal faz-se necessário que o teor de carbono e silício seja relativamente baixo (2,5-3,0%C e 0,5-1,5%Si), bem como os demais elementos grafitizantes, e que a velocidade de solidificação seja elevada.

Estes materiais ao fraturarem apresentam uma superfície branca, de aspecto cristalino ou brilhante.

A grande quantidade de carbonetos de ferro na estrutura é responsável pela boa resistência ao desgaste, definindo desta forma as principais aplicações deste material.

Na figura ao lado, o constituinte branco é o carboneto de ferro e as áreas cinzentas a perlita.



Ferros Fundidos - Classificação x Propriedades

O **ferro fundido cinzento** forma-se quando o teor de carbono da liga excede a quantidade que se dissolve na austenita, precipitando sob a forma de lamelas de grafita.

Ao fraturar, a superfície apresenta um aspecto cinzento devido a grafita exposta.

O ferro fundido cinzento associa importantes propriedades mecânicas, tais como: bons níveis de dureza com conseqüente elevada resistência ao desgaste, boa usinabilidade e excelente capacidade de amortecimento de vibrações.

O silício atua como elemento estabilizador da grafita, por esta razão é adicionado em teores elevados. A velocidade de solidificação também constitui-se um fator importante na determinação da quantidade de grafita formada. Velocidade baixas e moderadas favorecem a formação de grafita. Entretanto, velocidades baixas originam uma matriz ferrítica, enquanto velocidades moderadas favorecem a obtenção de uma matriz perlítica.

Na figura ao lado observam-se veios/lamelas de grafita numa matriz com pequena porção de ferrita limpa e predominância de perlita.



Ferros Fundidos - Classificação x Propriedades

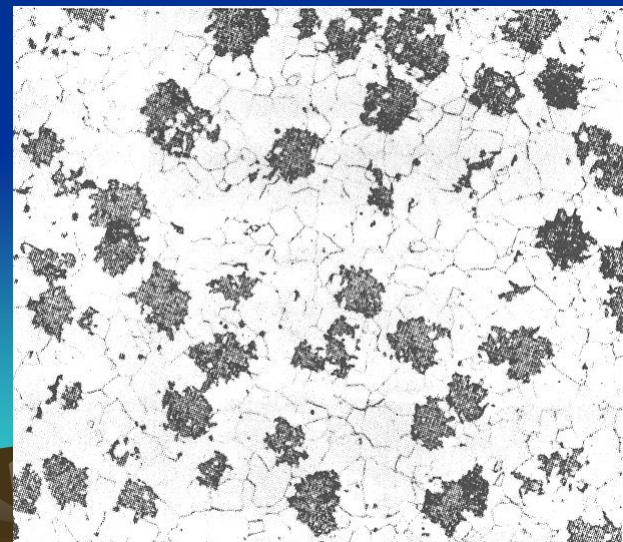
Os **ferros fundidos maleáveis** são obtidos a partir do ferro fundido branco, quando submetidos a um tratamento térmico de grafitização (aprox. 940°C), quando os carbonetos de ferro transformam-se em grafita (nódulos de carbono revenido).

O modo de resfriamento após o tempo de encharque para grafitização é que determinará a matriz da microestrutura formada por nódulos de carbono revenido, como segue:

- Ferro Maleável Ferrítico: resfriamento rápido até 740°C a 760°C, seguido de resfriamento lento.
- Ferro Maleável Perlítico: resfriamento lento até 870°C seguido de resfriamento ao ar
- Ferro Maleável Martensítico Revenido: resfriamento em forno até a temperatura de tempera de 845 a 870°C, mantendo-se 15 a 30 minutos para homogeneização, resfriando-se em seguida em banho de óleo agitado para obtenção de uma matriz martensítica.

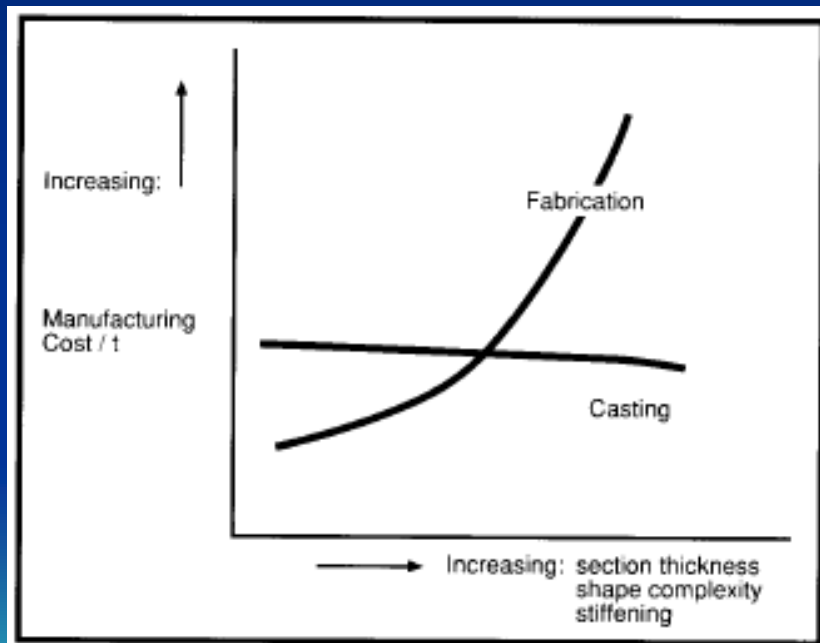
Os ferros fundidos maleáveis por serem resultantes de um processo de tratamento térmico, em geral apresentam boas propriedades mecânicas, tais como usinabilidade, tenacidade e resistência a corrosão.

Na figura ao lado vemos nódulos de grafita (carbono revenido) numa matriz ferrítica. Neste caso ocorreu completa grafitização.

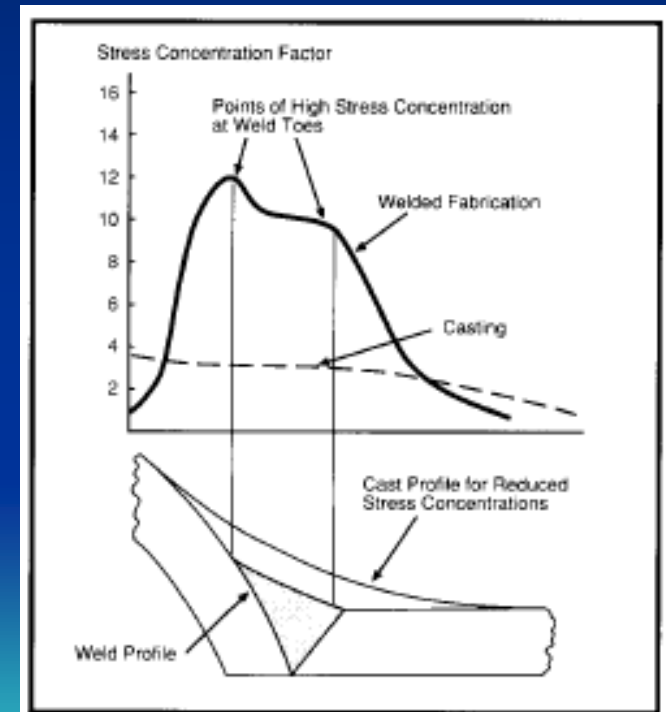


Ferros Fundidos - Classificação x Propriedades

Os **ferros fundidos dúcteis**, também chamados de ferros fundidos com grafite nodular ou esferoidal, concilia as vantagens de processamento dos ferros fundidos cinzentos com as propriedades de engenharia dos aços, apresentando boa fluidez, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste, além de elevada resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, deformabilidade a quente e temperabilidade.



Schematic cost comparison between fabricated and cast components.

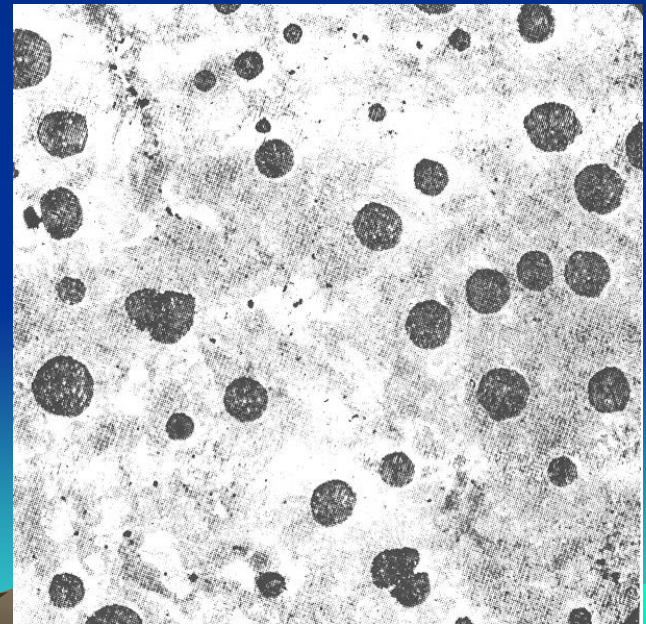
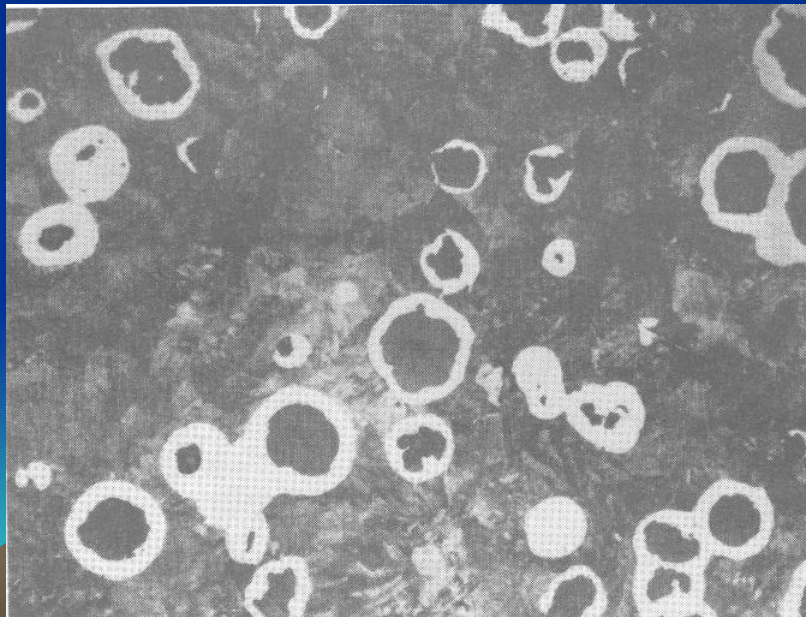


Acrylic model stress analyses of a welded fabrication and a casting.

Ferros Fundidos - Classificação x Propriedades

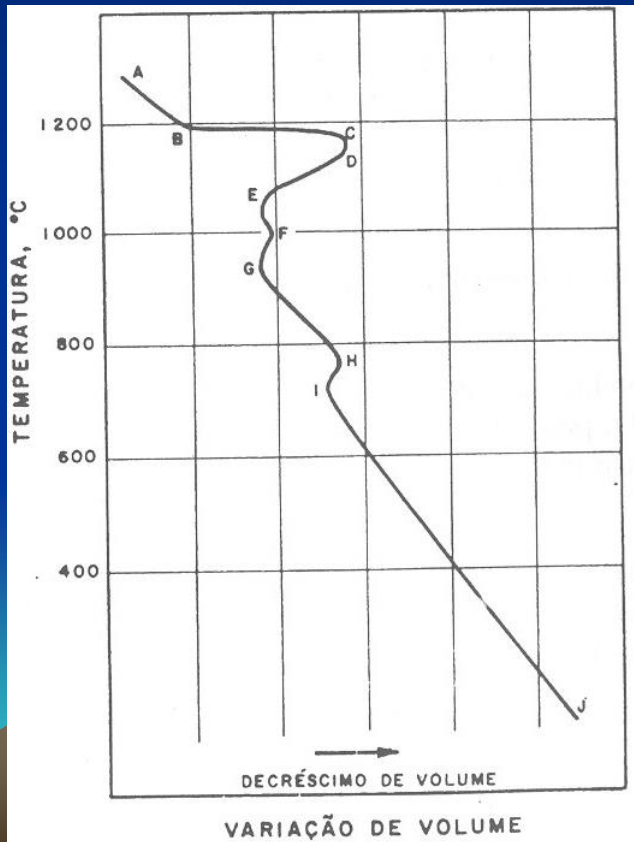
As boas propriedades dos ferros fundidos dúcteis devem-se à presença de nódulos esféricos de grafita na sua microestrutura, que geralmente no caso dos ferros não ligados, são compostas da seguinte forma: “nódulos esféricos de grafite rodeados por ferrita numa matriz de perlita, conforme mostram as figuras abaixo.

Impurezas, tais como o “P” e o “S”, dentre outras, devem ser mantidas em níveis muito baixos, uma vez que interferem com a formação dos nódulos de grafite nos ferros fundidos dúcteis, os quais formam-se durante a solidificação. Em geral utiliza-se o “Mg” como desoxidante e dessulfurizante afim de assegurar a perfeita formação dos nódulos de grafite.



Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O Tratamento Térmico mais generalizado é o alívio de tensões, aplicado em peças fundidas as quais, durante o resfriamento desde a solidificação no interior dos moldes até a temperatura ambiente, estão sujeitas a constantes mudanças de volume (ver gráfico abaixo), o que constitui, juntamente com a forma geométrica e volumes das peças, uma das principais causas de tensões internas,



AB – contração no estado líquido;

BC – contração na mudança do estado líquido para o sólido;

CD – contração pela mudança da austenita em ledeburita;

DE – expansão pela grafitização;

EF – contração pela queda de temperatura;

FG – expansão pela mudança da steadita ternária à forma binária;

GH – contração contínua pela queda da temperatura;

HI – expansão pela transformação da fase gama a alfa e da austenita em perlita

IJ – contração continuada pelo resfriamento até a temperatura ambiente.

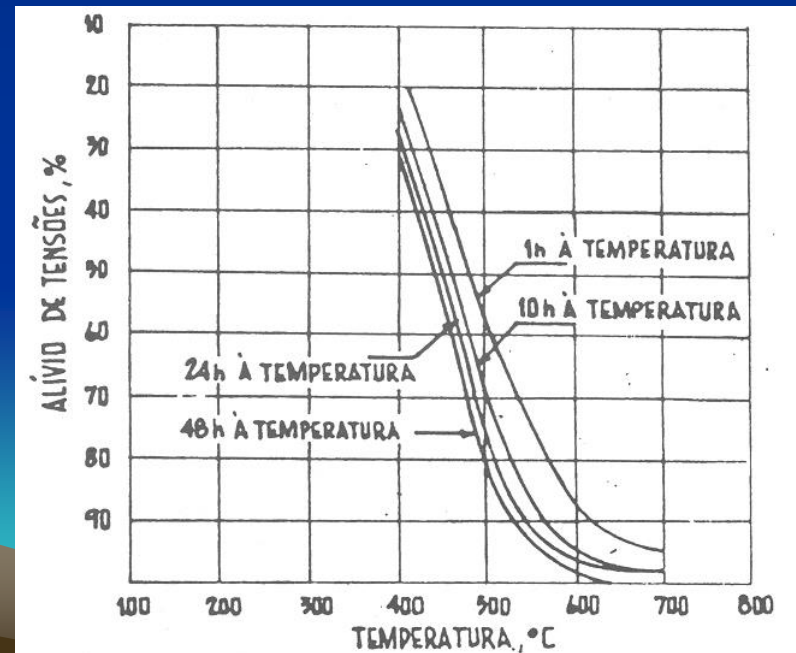
Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O “alívio de tensões” ou “envelhecimento” das peças de ferro fundido foi durante muito tempo, executado de forma natural, deixando-se as peças fundidas ao relento durante meses, para posterior usinagem e/ou colocação em serviço. Todavia, estudos comprovaram que por meio desta técnica apenas 10% das tensões residuais eram eliminadas.

O alívio de tensões “induzido” consiste basicamente no aquecimento das peças preferencialmente em forno numa temperatura entre 550° e 650°C durante um período de tempo que poderá variar entre 1,0 e 48,0 horas a depender do objetivo e aplicação da peça, seguido de resfriamento lento normalmente dentro do próprio forno.

Na figura ao lado pode-se observar que basta-se manter as peças durante 1,0h para que cerca de 80% das tensões residuais sejam aliviadas sem que ocorra qualquer transformação estrutural. Aplicando-se entre 10 e 48hs praticamente 100% das tensões são aliviadas.

Ferros fundidos ligados, com baixo teor em ligas (Cr, Mo, Ni e V) exigem temperaturas mais altas devido a tendência destes elementos aumentarem a resistência à fluência.



Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

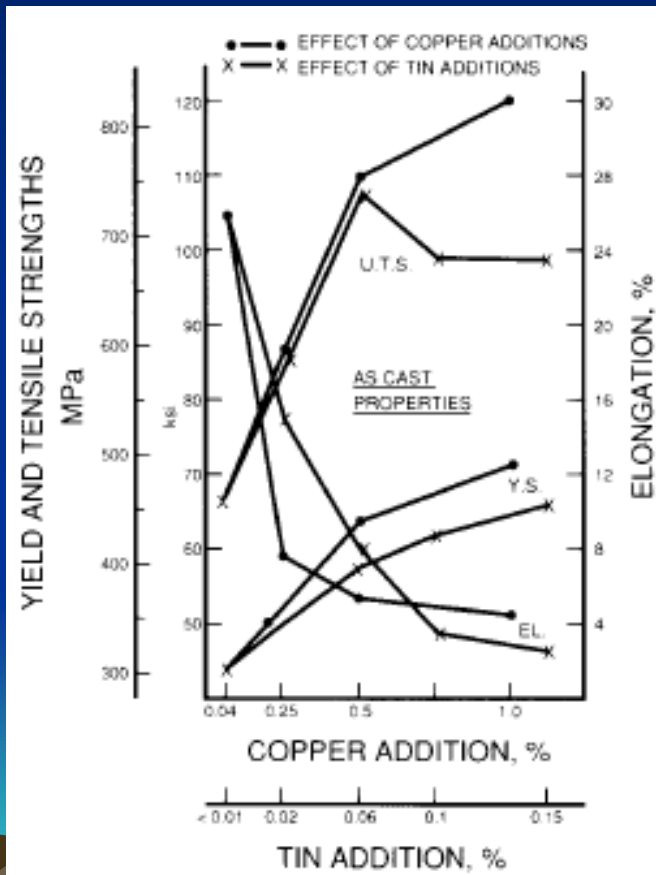
O Reozimento objetiva melhorar ainda mais a usinabilidade dos ferros fundidos, e muitas vezes faz-se necessário para eliminar ou amolecer zonas coquilhadas que podem ter surgido durante a solidificação, especialmente em seções mais finas. Isto muitas vezes implica na queda das suas propriedades relacionadas com a resistência mecânica.

Diferentes técnicas de reozimento podem ser adotadas, em função do material e da sua aplicação, conforme descrito abaixo e ilustrado na figura a seguir.

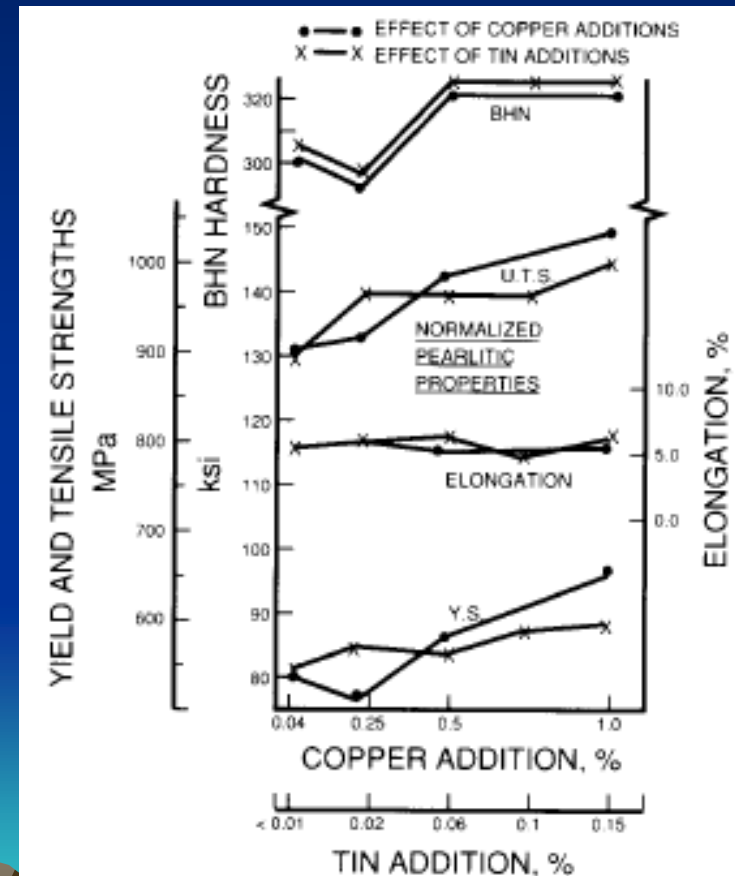
- O reozimento completo ou pleno ocorre numa faixa de temperatura entre 780°C a 900°C e é recomendado quando o ferro fundido apresenta os elementos de liga em teores mais elevados, objetivando-se a eliminação de pequenas quantidades de carbonetos dispersos.
- O reozimento a baixas temperaturas, entre 700°C e 760°C , chamado de reozimento de ferritização, objetiva a transformação dos carbonetos perlíticos em ferrita e grafita, de modo a melhorar a usinabilidade. Normalmente destinado a ferros fundidos não ligados ou com baixos teores de liga. O tempo de encharque depende da quantidade de grafitização desejada.
- O reozimento grafitizante, destinam-se a ferros fundidos que apresentam carbonetos maciços (em geral brancos ou mesclados), requerendo temperaturas entre 900°C a 950°C . Cuidado especial deve ser tomado quanto ao percentual de fósforo na liga, pois o eutético de fósforo pode fundir nestas temperaturas.

Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

A Normalização dos ferros fundidos visa obter uma matriz homogênea, com eliminação dos carbonetos maciços, totalmente perlítica, de granulação fina e propriedades correspondentes a uma maior resistência mecânica, aliada a boa tenacidade.

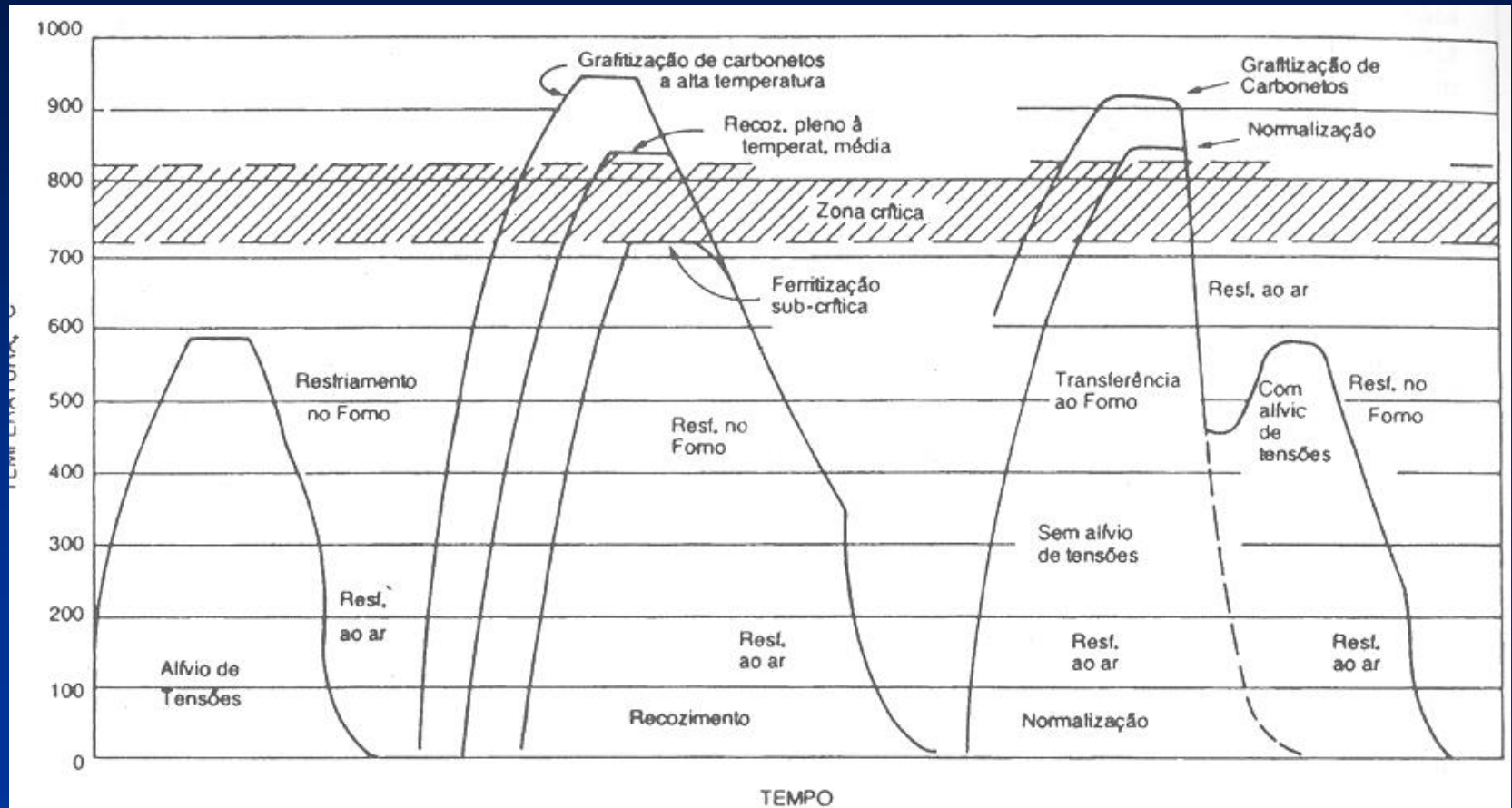


Tensile properties of as-cast Ductile Irons with different Cu and Sn contents.



Tensile properties of normalized (pearlitic) Ductile Irons with different Cu and Sn contents.

Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos



A etapa de aquecimento é idêntica ao recozimento, devendo o tempo de encharque ser de no mínimo 24min/centímetro de seção da peça, seguido de resfriamento ao ar, numa velocidade tal que evite o início da ferritização em torno dos veios de grafita, mas não deve ser tão rápida que possibilite a formação de bainita ou mertensita.

A figura ilustra os ciclos de alívio de tensões, dos diversos tipos de recozimento e normalização aplicáveis em ferros fundidos.

Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O ferro fundido, em especial o cinzento, apresenta uma estrutura muito semelhante aos aços, a exceção do carbono livre na forma de veios alongados, que quebra a continuidade da matriz e confere ao material fragilidade e propriedades mecânicas geralmente inferiores a dos aços. Tal semelhança na matriz estrutural confere aos ferros fundidos a possibilidade de endurecimento por têmpera.

Face aos elevados teores de carbono e silício, as temperaturas de austenitização são mais elevadas e os tempos de permanência nestas temperaturas mais longos, para que haja completa dissolução na austenita.

Ferros fundidos de estrutura inteiramente perlítica reagem melhor a têmpera do que os de estrutura ferrítica, requerendo menores tempos para obtenção de uma estrutura austenítica capaz de após resfriamento resultar numa estrutura final de maior dureza. Os ferros fundidos de matriz ferrítica exigem tempos muito longos à temperatura de encharque para permitir a dissolução do carbono livre na austenita.

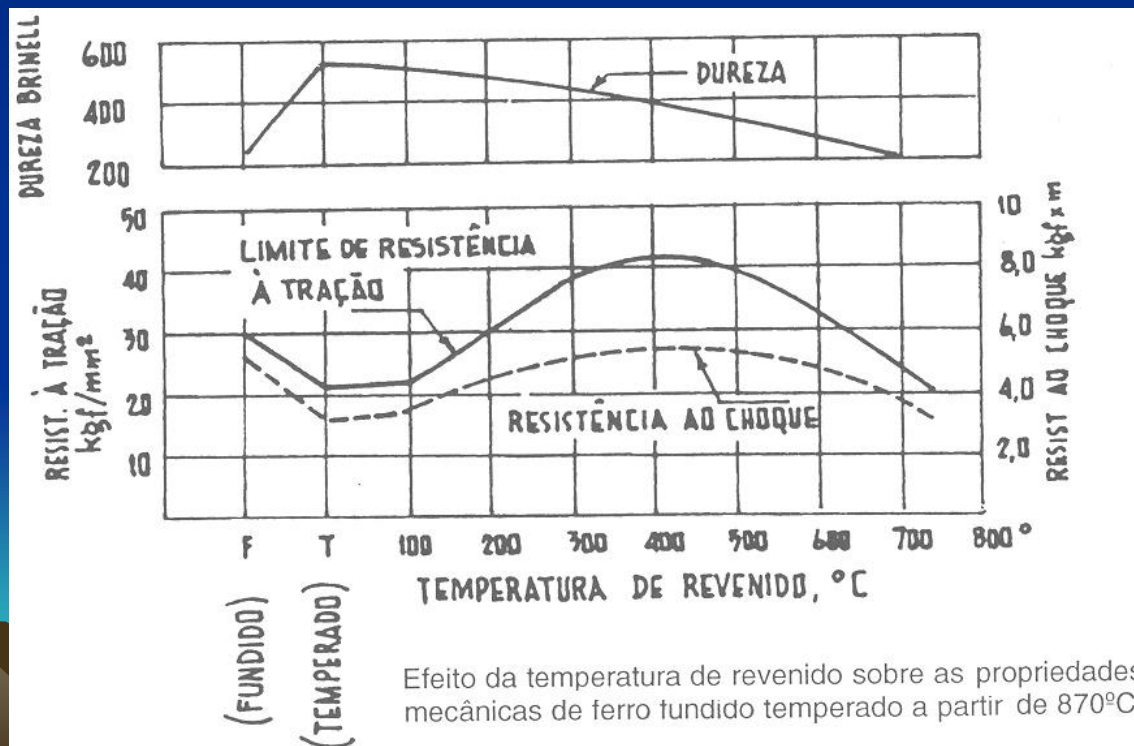
O ciclo térmico para execução de têmpera basicamente é o seguinte:

- ✓ Aquecimento gradual (aprox. $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$) para minimizar tensões térmicas e/ou fissurações;
- ✓ Manutenção na temperatura de encharque (em torno de 25°C a 65°C acima da temperatura de transformação) durante 8 a 24 minutos por centímetro de espessura da seção da peça;
- ✓ Resfriamento em banho de óleo agitado até aproximadamente 150°C quando se deve iniciar o ciclo de revenido, conforme ilustra figura a seguir.

Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O processo de têmpera resulta numa elevação da dureza superficial do ferro fundido, porém com prejuízo da resistência à tração e ao choque.

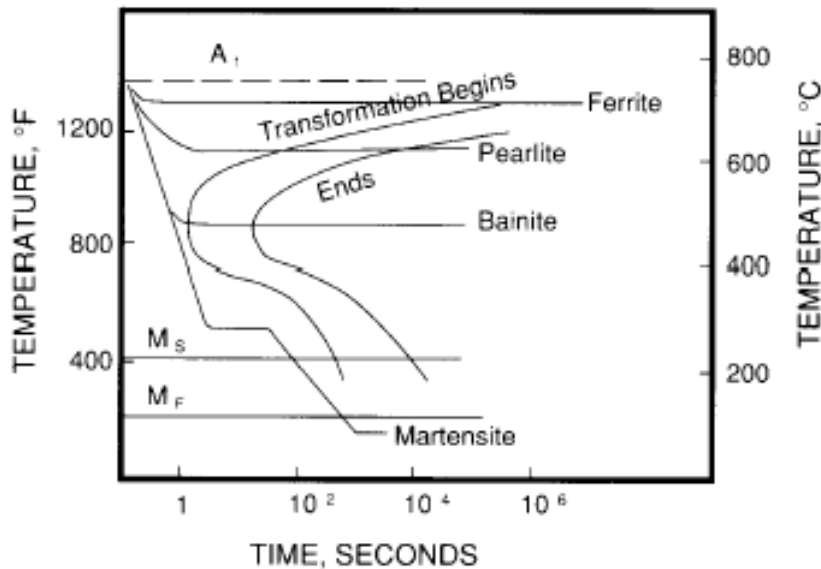
O ciclo de revenido subsequente à têmpera irá melhorar o comportamento do material com significativo acréscimo da resistência a tração e da tenacidade, requerendo entretanto atenção em relação a temperatura de aquecimento, visto que níveis mais elevados promovem uma ação nociva a estas propriedades, conforme ilustram gráficos abaixo.



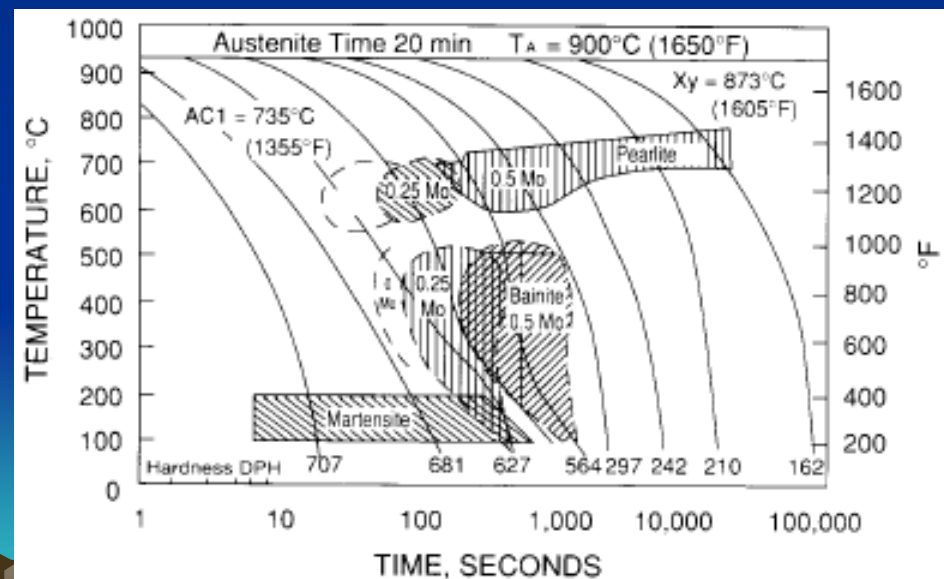
Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

A velocidade de resfriamento necessária para assegurar a obtenção da microestrutura e propriedades finais desejadas num tratamento térmico de têmpera e revenido dependerá da posição da curva TTT de cada material, a qual sofre influência direta dos elementos de liga presentes na composição química do material.

As figuras abaixo ilustram um diagrama típico de um ferro fundido cinzento com baixo teor de silício e a influência do molibidênio na posição da curva TTT de um ferro fundido dúctil.



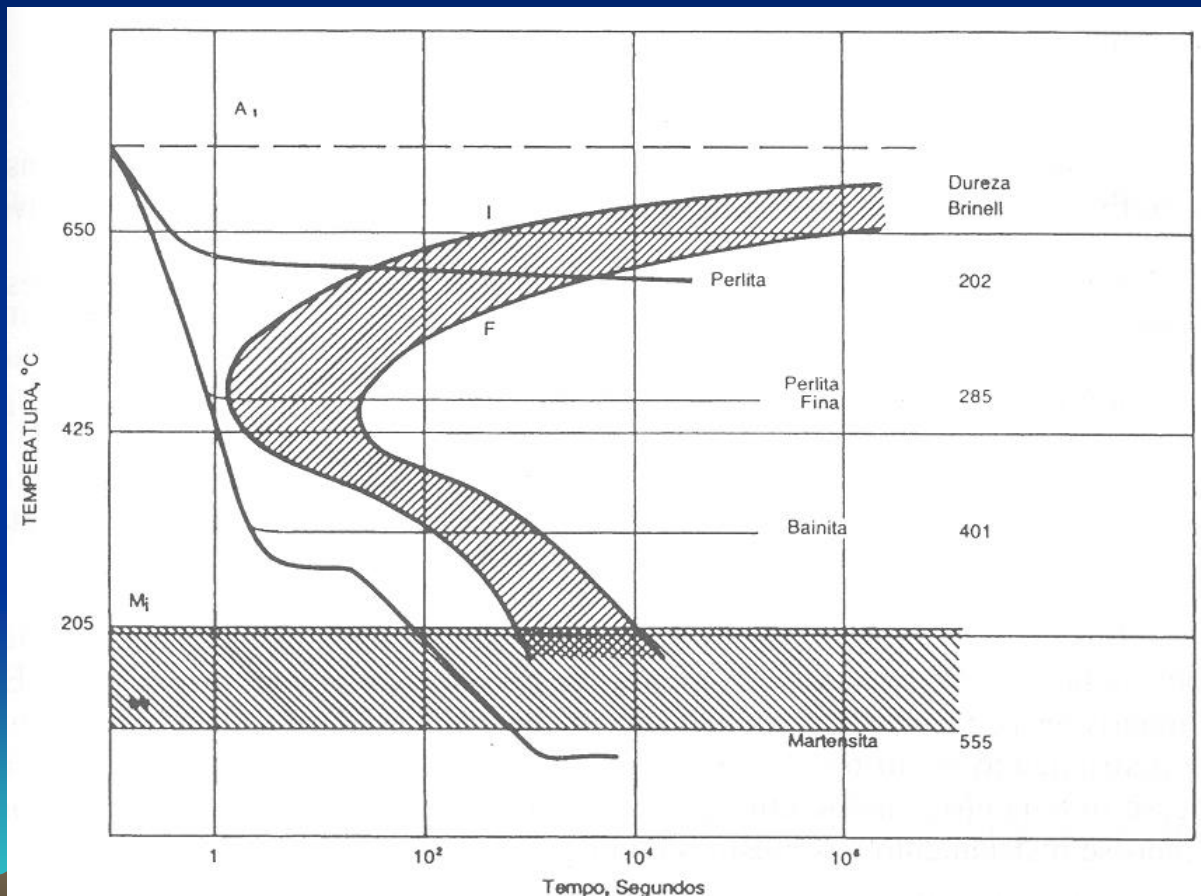
Typical TTT diagram for a low silicon Gray Iron.



The effect of molybdenum content on the TTT diagram for Ductile Iron.

Ferros Fundidos - Tratamentos Isotérmicos

As técnicas de Austêmpera e Martêmpera são idênticas as empregadas nos aços. A figura abaixo ilustra o ciclo de resfriamento para execução de cada um destes tratamentos num ferro fundido cinzento de baixo silício.



- Curva superior corresponde a um recozimento isotérmico resultando em perlita com 202HB.

- Curvas intermediárias correspondem a austêmpera resultando em perlita fina com 285HB e bainita com 401HB respectivamente.

- A curva inferior produz a martêmpera resultando em martensita com 555HB.

Ferros Fundidos

Bibliografias:

- **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas – Vicente Chiaverini (edição 2003)**
- **Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais – William F. Smith (3ª edição)**
- **Estrutura das Ligas de Ferro**
- **Ductile Iron Data for Design Engineers (Published by Rio Tinto Iron & Titanium Inc. – Canada)**

