

1.1 - ALÍVIO DE TENSÕES (STRESS RELIEVING)

“Alívio de Tensões” ou “Envelhecimento” das peças de ferro fundido foi, durante muito tempo, executado de modo natural, ou seja, as peças fundidas eram deixadas ao relento durante meses, para depois serem usinadas e postas em serviço. Acreditava-se, com isso, que as tensões internas eram eliminadas. Contudo, estudos mostraram que apenas 10% das tensões eram aliviadas por “envelhecimento natural” e os riscos de empenamento, após as peças montadas nos respectivos equipamentos, continuavam.

A técnica moderna consiste em aplicar o processo de “envelhecimento artificial” que é o verdadeiro tratamento de alívio de tensões: as peças são aquecidas a temperaturas elevadas, porém abaixo da temperatura de transformação (para evitar mudanças estruturais), durante tempo determinado. Normalmente são recomendados 24 minutos mais 24 minutos por centímetro de seção.

A maior plasticidade que o metal adquire às temperaturas mais elevadas, ou seja, a maior “fluência” é o fator essencial para que as tensões sejam aliviadas. As figuras 1 e 2 mostram os efeitos da temperatura e do tempo sobre a quantidade de tensões aliviadas.

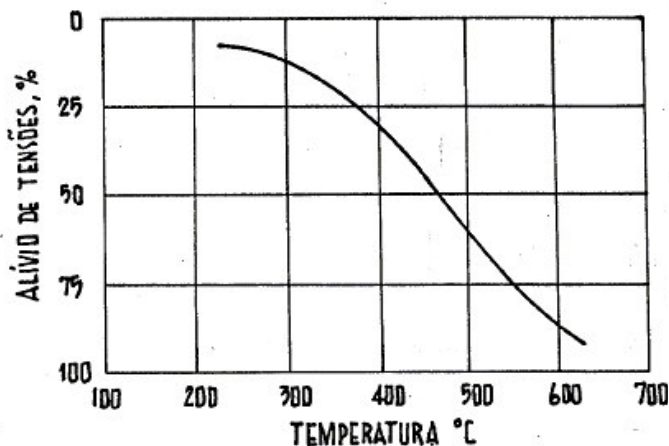


Fig. 1- Efeito da temperatura sobre o total de tensões aliviadas em ferro fundido

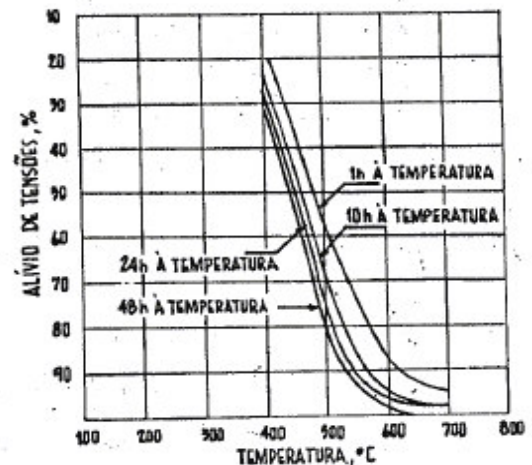


Fig. 2- Efeito do tempo e da temperatura sobre o total de tensões aliviadas em ferro fundido

Ambas as figuras mostram que a temperatura ideal situa-se entre 550° C e 650° C. Às temperaturas mais elevadas, basta manter-se as peças durante uma hora para ter-se cerca de 80% das tensões aliviadas, sem que ocorra qualquer transformação estrutural. Para quase total eliminação das tensões internas, tempos bem mais longos podem ser necessários, variando de 10 a 48 horas.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Os ferros fundidos ligados, com baixo teor em ligas (Mo, Cr, Ni, V) exigem temperaturas mais altas, pois esses elementos tendem a aumentar a resistência à fluência dos ferros fundidos.

A tabela 1 mostra as faixas de temperaturas mais recomendadas para alívio de tensões de peças de ferro fundido.

Tabela 1 - Faixas de temperaturas recomendadas para alívio de tensões de peças de ferros fundidos

Tipo de ferro fundido	Temperatura para alívio de tensões
Sem elementos de liga	510 – 565° C
De baixo teor de liga	565 – 595° C
De alto teor de liga	595 – 650° C

Na operação de alívio de tensões de peças de ferro fundido, alguns cuidados devem ser tomados:

- l A temperatura do forno, ao serem as peças carregadas, não deve ser superiores a 200° C, de modo a evitar-se choque térmico;
- l Embora as temperaturas empregadas não sejam muito elevadas, é recomendável que o resfriamento posterior ao aquecimento seja muito lento (no interior do próprio forno) no máximo 50° C / hora, até cerca de 300° C ou, se as peças forem de forma complexa, até cerca de 100° C, quando então elas poderão ser resfriadas livremente ao ar. Com isso, evita-se o surgimento de novas tensões, ocasionadas por um resfriamento mais rápido.

1.2 - RECOZIMENTO (ANNEALING)

Tratamento recomendado quando se deseja obter as máximas usinabilidade e ductilidade, ainda que com sacrifício da resistência mecânica. Resulta uma microestrutura composta de grafita e ferrita.

Este tratamento térmico consiste na elevação da temperatura acima da linha inferior de transformação ($\cong 723^{\circ}\text{C}$), quando já ocorre alteração estrutural. O tempo de permanência na temperatura de austenitização deve ser de 24 minutos mais 24 minutos por centímetro de seção. O resfriamento deve ser lento, não superior a 100° C / hora durante a faixa de transformação, ou seja, entre 790° C e 680° C.

O recozimento a temperaturas mais baixas – entre 700 a 760° C – é chamado “recozimento de ferritização”, ou seja, nele se visa à transformação perlita em ferrita, de modo a melhorar a ductilidade e a usinabilidade. Aplica-se a ferros fundidos comuns, ou com baixos teores de elementos de liga.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

O recozimento a temperaturas intermediárias – entre 780 a 900° C– é chamado de “recozimento pleno ou completo”. O objetivo é o mesmo do recozimento de ferritização, por em é aplicado em ferros fundidos com elevados teores de elementos de liga.

O recozimento a temperaturas mais altas – entre 900 a 950° C– é chamado de “recozimento grafitizante”, ou seja, nele se visa à transformação de carbonetos madços em grafita e matriz ferrítica.

A figura 3 mostra os ciclos de recozimento para ferros fundidos (curvas B, B₁ e C), em comparação com o tratamento de alívio de tensões (curva A)

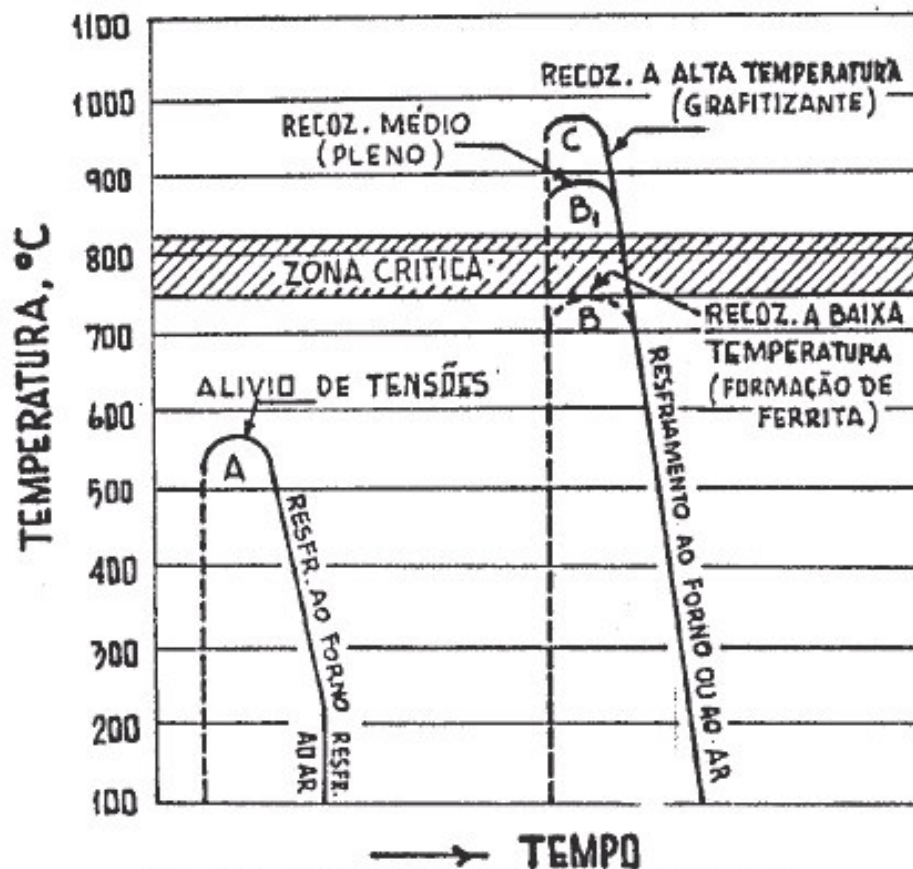


Fig. 3 – Ciclos de recozimento recomendados para ferro fundido

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

A tabela 2 indica as práticas recomendadas para recozimento de peças de ferro fundido, com pormenores sobre os tempos, às temperaturas e velocidades de resfriamento.

Tabela 2 - Práticas recomendadas para recozimento de peças de ferro fundido

Tipo de recozimento	Objetivos	Temperatura (° C)	Tempo (minutos)	Velocidade de Resfriamento
Baixa temperatura (ferritização)	Para conversão de perlita em ferrita em materiais não ligados, de modo a obter-se a máxima usinabilidade e ductilidade.	700 a 760	24 minutos + 24 minutos por centímetro de seção transversal	No forno (100° C / h) até 300° C. Em seguida retirar do forno e resfriar ao ar normal.
Média temperatura (pleno)	Para conversão de perlita em ferrita em materiais que não reagem ao tratamento a baixa temperatura. Para eliminação de pequenas quantidades de carbonetos bem dispersos em materiais não ligados.	815 a 900		
Alta temperatura (grafitização)	Para eliminação de carbonetos maciços e conversão de perlita em ferrita	900 a 950		

1.3 - NORMALIZAÇÃO (NORMALIZING)

A normalização dos ferros fundidos visa obter uma matriz homogênea, com eliminação dos carbonetos maciços, essencialmente perlítica, de granulação fina e propriedades correspondentes a uma maior resistência mecânica, aliada a boa tenacidade. O efeito da normalização é mais notável no caso de ferros fundidos ligados.

Este tratamento, na etapa de aquecimento, é idêntico ao recozimento, ou seja, a temperatura é superior à de transformação – entre 870 e 950 ° C– e o tempo de permanência deve ser no mínimo de 24 minutos + 24 minutos por centímetro de seção transversal da peça, seguindo-se de resfriamento ao ar ou forçado, dependendo da espessura da peça.

A velocidade de resfriamento deve ser tal que evite o início da ferritização em torno das grafitas, mas não deve ser tão rápida que possibilite a formação de bainita ou martensita.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Como regra empírica, recomenda-se que se deve esfriar de 770 a 700° C em um espaço de tempo de 1 a 5 minutos, ou seja, algo em torno de 1400° C / h.

A figura 4 apresenta, de forma esquemática, os diversos ciclos de aquecimento e resfriamento empregados para os tratamentos de alívio de tensões, recozimento e normalização de ferros fundidos.

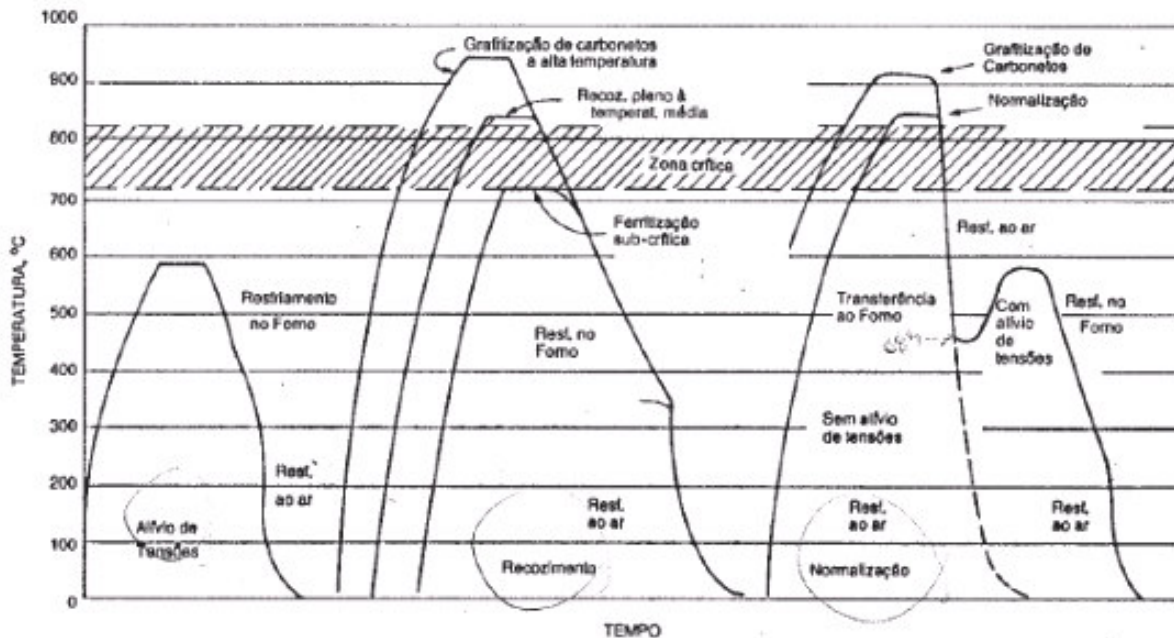


Fig. 4 - Representação esquemática dos ciclos de alívio de tensões, recozimento e normalização dos ferros fundidos

A tabela 3 indica as práticas recomendadas para normalização de peças de ferro fundido, com pormenores sobre os tempos, às temperaturas e velocidades de resfriamento.

Tabela 3 - Práticas recomendadas para normalização de peças de ferro fundido

Tipo de Tratamento	Objetivos	Temperatura (° C)	Tempo (minutos)	Velocidade de Resfriamento
Normalização	Para eliminação de carbonetos maciços com retenção da perlita para garantir resistência mecânica e dureza	870 a 950	24 minutos a 70 minutos+ 24 minutos por centímetro de seção transversal	No ar normal ou forçado até 480° C.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

1.4 - TÊMPERA E REVENIDO (HARDENING AND TEMPERING)

A estrutura do ferro fundido é muito semelhante à dos aços, a não ser pela presença de carbono livre na forma grafita, que quebra a continuidade da matriz e confere ao material melhor usinabilidade.

O fato de a matriz estrutural ser semelhante dos aços confere ainda aos ferros fundidos características de endurecimento por têmpera, contudo, nos ferros fundidos, os teores de silício e carbono são mais altos, necessitando de temperaturas de austenitização mais elevadas, bem como tempos mais longos, para que haja dissolução do carbono na austenita.

Algumas observações podem ser feitas nesse sentido:

- 1) Ferros fundidos de estrutura inteiramente perlítica reagem melhor à têmpera do que os com estrutura ferrítica; neles, em tempo mais curto a uma certa temperatura de aquecimento, consegue-se uma estrutura austenítica, a qual, ao ser resfriada em óleo, por exemplo, resulta em uma estrutura final de maior dureza;
- 2) O ferro fundido com matriz ferrítica, para boa reação à têmpera, exige tempo mais longo à temperatura, para permitir a dissolução do carbono livre (grafita) na austenita;
- 3) Na prática, as peças de ferro fundido a serem temperadas, devem ser austenitizadas a temperaturas 25° a 65° C acima da temperatura superior de transformação, durante 8 a 24 minutos por centímetro de espessura de seção, dependendo de sua composição e microestrutura inicial;
- 4) O aquecimento deve ser gradual (cerca de 100° C / h), através da faixa mais baixa de temperatura, de modo a minimizar as tensões térmicas e a possibilidade de fissuração;
- 5) Se o aquecimento, em função do tipo de material e do tipo de peça, tiver que ser prolongado ou quando as superfícies tiverem que ser protegidas de oxidação e decarbonetação, recomenda-se o emprego de banhos de sal ou fornos com atmosfera controlada;
- 6) O resfriamento na têmpera é, em geral, em óleo ou ar; este último é empregado quando os ferros fundidos forem altamente ligados; não recomenda-se a água como meio de resfriamento, porque ela é considerada um meio muito drástico para os ferros fundidos, podendo causar empenamento ou fissuração. Contudo, o choque térmico nesse meio pode ser atenuado colocando-se uma camada de óleo na superfície;
- 7) O meio deve ser bem agitado e, após o resfriamento, as peças devem ser imediatamente submetidas à operação de revenido; prefere-se leva-las ao revenido antes que tenham resfriado abaixo de 150° C.

Em resumo, o objetivo da têmpera é aumentar a dureza e a resistência mecânica e, em consequência, a resistência ao desgaste. Admite-se que a têmpera aumenta a resistência ao desgaste de um ferro fundido cinzento perlítico em até 5 vezes.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

O revenido é levado a efeito a temperaturas de acordo com a dureza final desejada, durante tempos, os quais, por razões práticas são mantidos os mais curtos possíveis. Contudo, peças de formas complexas, com grandes diferenças de espessura nas várias seções não podem ser aquecidas muito rapidamente, de modo que, nesses casos, recomenda-se mantê-las durante tempos mais longos a temperaturas mais baixas. A faixa de temperaturas varia de 180° a 650° C

O resfriamento, após o revenido, deve ser lento, sobretudo quando se emprega no aquecimento as temperaturas mais elevadas. Essa técnica diminui as tensões residuais em peças de forma complexas.

Exemplos típicos de ciclos de têmpera e revenido para ferros fundidos cinzentos estão indicados na tabela 4.

Tabela 4 - Ciclos de têmpera e revenido para ferros fundidos cinzentos

Objetivo	Temperatura e tempo de austenitização	Resfriamento	Ciclo de revenido
Máxima dureza	Pré-aquecimento a 650° C; aquecimento a 870° C; 24 minutos por centímetro de seção	Até 120° C em óleo agitado	205° C, uma hora; resfriamento em ar tranquilo
Ótima resistência e tenacidade			400° C, uma hora; resfriamento em ar tranquilo

A figura 5 mostra a tendência de queda da dureza e o comportamento da resistência à tração e ao choque em função da temperatura de revenido.

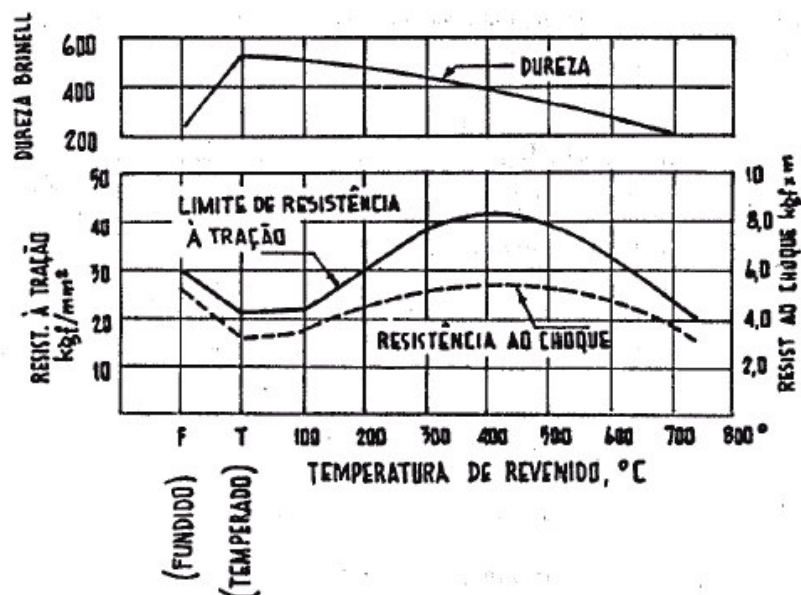


Fig. 5 – Efeito da temperatura de revenido sobre as propriedades mecânicas de ferro fundido baixo Si temperado em óleo a partir de 870°C.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Como se vê, o revenido melhora a resistência à tração e a tenacidade na faixa de temperatura entre 200° a 400° /450° C. As propriedades de fadiga não sofrem apreciáveis melhora.

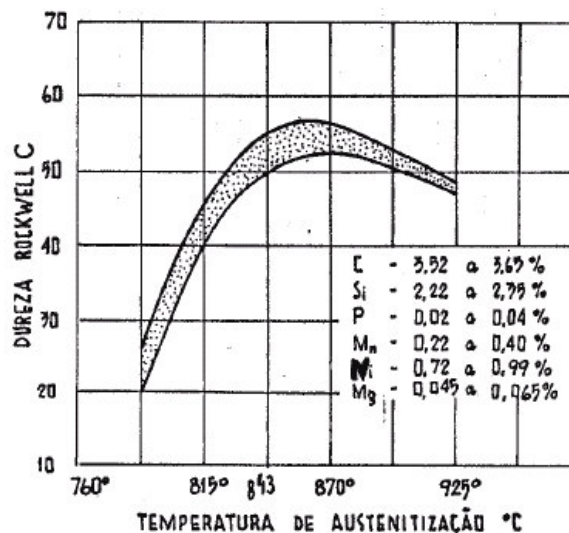
Em ferros fundidos nodulares, o tratamento de têmpera e revenido é largamente aplicado, resultando em excelente resistência mecânica e dureza.

A tabela 5 mostra os ciclos de têmpera e revenido de ferros fundidos nodulares.

Tabela 5 - Ciclos de têmpera e revenido para ferros fundidos nodulares

Objetivo	Temperatura e tempo de austenitização	Resfriamento	Ciclo de revenido
Para obter o tipo 120-90-02	900° C; 24 minutos por centímetro de seção	Em óleo agitado por 10 minutos	480° C, 2 horas; resfriamento no forno até 340° C; resfriamento ao ar.
Para obter o tipo 100-70-03			565° C, 2 horas; resfriamento no forno até 340° C; resfriamento ao ar.
Alternativa para o tipo 100-70-03		Ao ar	Resfriamento ao ar até 340° C
Preparo do ferro para têmpera superficial		Em óleo agitado por 10 minutos	650° C, 2 horas; resfriamento no forno até 340° C; resfriamento ao ar.
Nota: A temperatura do óleo deve ser controlada na faixa de 40° a 65° C			

A figura 6 mostra o efeito da temperatura de austenitização na dureza de ferro fundido nodular no estado temperado.



Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Nota-se que as máximas durezas foram obtidas na faixa de temperatura de austenitização entre 840° a 870° C, acima de 925° C, a dureza decresceu pela quantidade de austenita que resultou no material.

A figura 7 mostra a influência da temperatura de revenido sobre as propriedades mecânicas de ferro fundido nodular temperado a 870° C e revenido durante duas horas. Os dados que permitiram traçar as curvas da figura foram obtidos em amostras de quatro corridas que produziram ferro nodular dentro da seguinte faixa de composição:

Elemento	%
Carbono (C)	3,25 a 3,68
Silício (Si)	2,28 a 2,53
Fósforo (P)	0,02 a 0,04
Manganês (Mn)	0,22 a 0,41
Níquel (Ni)	0,69 a 0,99
Magnésio (Mg)	0,045 a 0,065

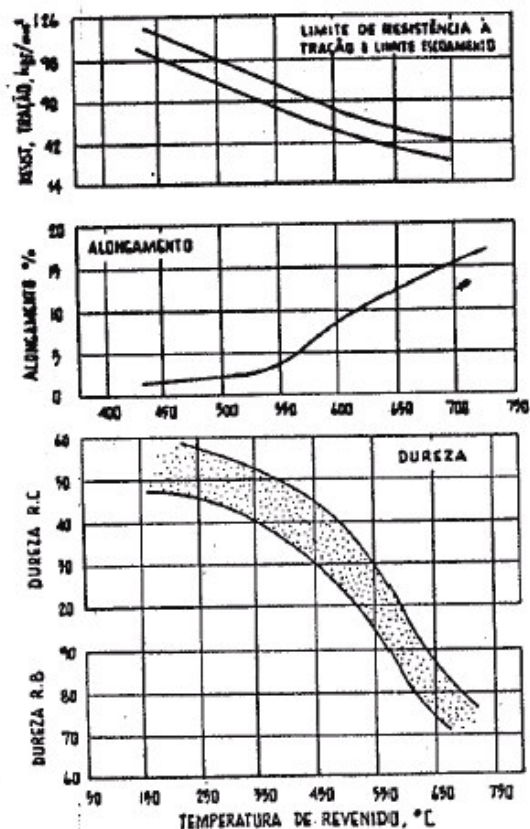


Fig. 7 – Efeito da temperatura de revenido sobre as propriedades mecânicas de ferro fundido nodular temperado

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

1.5 - AUSTÊMPERA (AUSTEMPERING)

Tratamento isotérmico composto de aquecimento até a temperatura de austenitização, permanência nesta temperatura até completa equalização, resfriamento rápido até a faixa de formação da bainita, permanência nesta temperatura até completa transformação da austenita em bainita e resfriamento qualquer até a temperatura ambiente.

A aplicação desse tratamento, também denominado "têmpera a quente", confere aos ferros fundidos nodulares (ADI) uma excelente combinação de propriedades de resistência e ductilidade, permitindo sua aplicação onde tradicionalmente se usavam aços forjados ou fundidos.

O efeito dos elementos de liga é mais ou menos semelhante ao que ocorre nos aços e dependendo da temperatura de transformação pode-se obter:

- }] Bainita Inferior → Quando a temperatura é próxima à formação inicial de martensita (em torno de 205° C). Nesse caso, os ferros dúcteis apresentam alta dureza, superior a 400 HB e elevada resistência mecânica. Tais propriedades são desejáveis, por exemplo, em engrenagens e outras aplicações que exigem resistência a altas tensões de contato;
- }] Bainita Superior → Quando a transformação se dá logo abaixo do cotovelo da curva em C (em torno de 400° C). Os ferros fundidos nodulares austemperados nessas condições apresentam dureza entre 260 e 350 HB. São dúcteis e tenazes, com boa resistência à fadiga e ao desgaste. São razoavelmente usináveis e entre as aplicações importantes podem-se mencionar os virabrequins.

A tabela 6 mostra as classes de ADI classificados conforme norma ASTM A 897.

Tab. 6 – Classes de ADI – ASTM A 897

Classe	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Resistência ao Impacto (J)	Dureza (HB)
1	850	550	10	100	269 - 321
2	1050	700	7	80	302 - 363
3	1200	850	4	60	341 - 444
4	1400	1100	1	35	366 - 447
5	1600	1300	NA	NA	444 - 555

Nos ferros nodulares, a reação bainítica é mais lenta que nos aços, o que deve ser levado em conta ao realizar-se a operação de austêmpera.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Outro fator importante é a temperatura de austenitização. Esta está geralmente localizada entre 815° a 925° C. Quanto mais alta a temperatura, maior a solução do carbono na austenita, o que pode provocar, no final, maior quantidade de austenita retida. Ocorre também um crescimento de grão da austenita, a que aumenta a endurecibilidade do material.

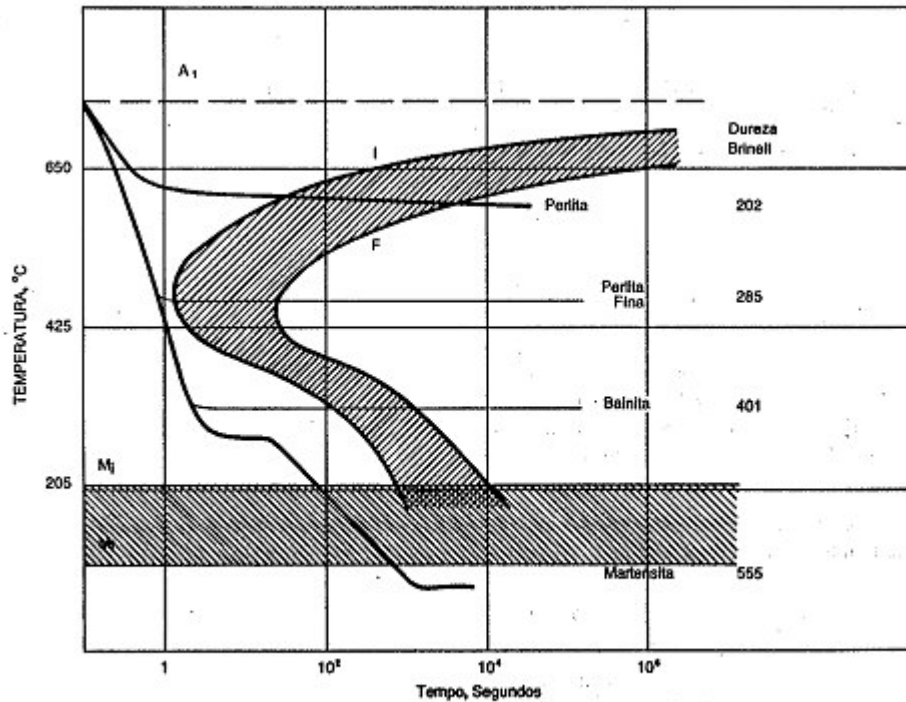


Fig. 8 – Diagrama esquemático de transformação isotérmica
Para um ferro fundido

Por outro lado, a presença de elementos de liga afeta o teor de carbono na austenita, pois eles influem na solubilidade do carbono. Silício, por exemplo, reduz a solubilidade que, ao contrário, é aumentada pela presença de manganês, cromo e molibdênio.

1.6 – TÊMPERA SUPERFICIAL (SURFACE HARDENING)

A têmpera superficial é uma técnica de endurecimento utilizada em aços e ferros fundidos que confere ao material tratado uma alta dureza em toda a sua superfície, ou, conforme se considere conveniente, em regiões localizadas. O objetivo portanto é de, em se obtendo altas durezas, aumentar a resistência à abrasão e, devido às tensões residuais criadas pelo tratamento térmico, aumentar também a resistência à fadiga.

Este tratamento térmico encontra aplicação em peças tais como, engrenagens, girabrequins, eixo comando de válvula, cilindro de laminação, suportes de mola, garfos de transmissão.

Algumas das vantagens da têmpera superficial sobre a têmpera plena são as seguintes:

- } Equipamentos mais simples, possibilitando o tratamento em peças dos mais diversos tamanhos e geometrias;
- } Possibilidade de realizar o endurecimento em regiões localizadas;
- } Menor consumo de energia visto que somente parte da peça é aquecida;
- } Menores distorções dimensionais.

Os processos de aquecimento mais comumente utilizados são os de aquecimento por chama e por indução, sendo também citados como alternativa para os processos convencionais o aquecimento por imersão em metal líquido e o aquecimento por laser e aquecimento solar.

O processo de têmpera superficial consiste no aquecimento de uma determinada camada superficial, que será submetida a esforços ou desgaste, em temperatura suficiente para a obtenção de estrutura austenítica, seguido de resfriamento brusco, normalmente realizado em água, para a transformação da camada austenítica em martensita.

A profundidade da camada transformada pode variar de 0,5 a 4,0 mm, dependendo da técnica empregada, podendo atingir valores de dureza da ordem de 60 HRC. A figura 1 apresenta as distribuições típicas de temperatura e dureza em peça cilíndrica endurecida superficialmente.

Nota-se que apenas uma pequena camada superficial atinge temperatura superior a A_3 (limite superior da zona crítica acima da qual a estrutura apresenta-se totalmente austenítica, podendo ainda conter carbonetos estáveis) existindo também uma região intermediária que permanece dentro da zona crítica, onde coexistem austenita + ferrita + carbonetos, e uma zona central onde não ocorrem transformações de fase.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

A presença da camada martensítica, além de conferir alta dureza superficial, ainda proporciona tensões residuais de compressão na superfície do componente tratado termicamente. A geração dessas tensões residuais deve-se à tendência à expansão volumétrica que ocorre quando da reação martensítica, e à restrição oferecida pelo restante do material não transformado. As tensões de compressão dificultam a nucleação de trincas na superfície tratada, elevando significativamente a resistência à fadiga.

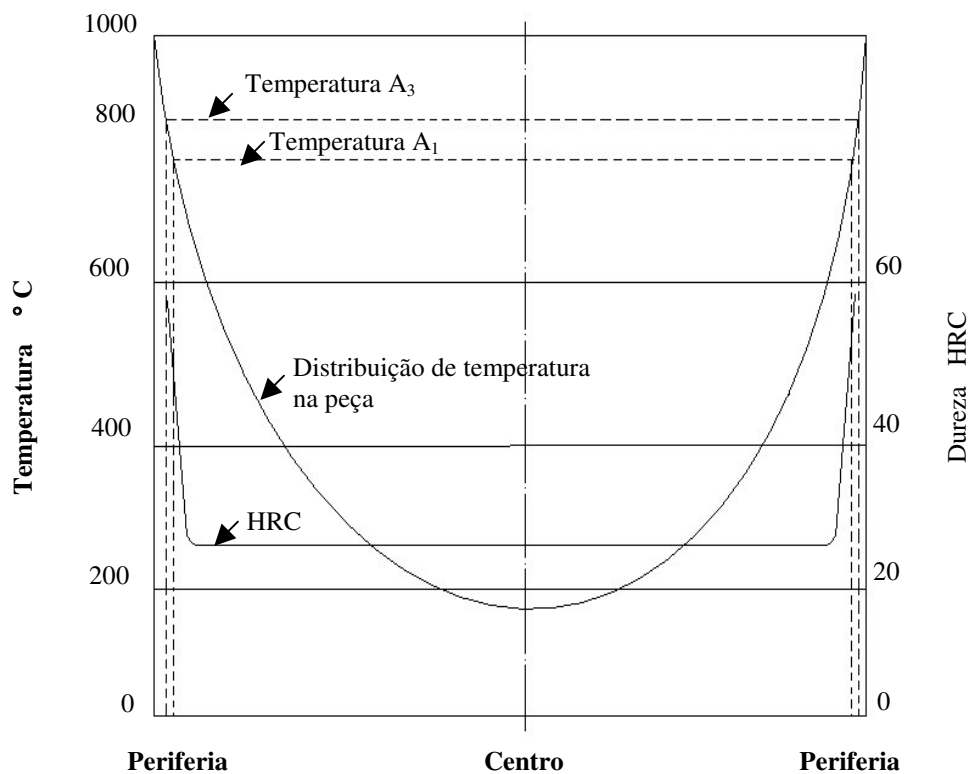


Fig. 1 – Perfil de temperatura antes da têmpera e distribuição de dureza na seção transversal de uma peça cilíndrica temperada superficialmente.

1.6.1 – Influência da Microestrutura

Um dos requisitos básicos para se obter um endurecimento superficial satisfatório é que a estrutura, após o aquecimento, seja totalmente austenítica.

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

Como os processos de aquecimento são, em geral, muito rápidos, a resposta dos ferros fundidos ao tratamento de têmpera superficial depende bastante da microestrutura anterior à realização deste tratamento, visto que o tempo de permanência acima da temperatura de transformação para se obter estrutura totalmente austenítica é muito curto.

Sendo a dureza da martensita dependente do teor de carbono dissolvido na austenita, conforme mostra a figura 2, procura-se ter na matriz metálica, antes do tratamento, a maior quantidade possível de carbono combinado, ou seja, matrizes perlíticas, bainíticas ou martensita revenida.

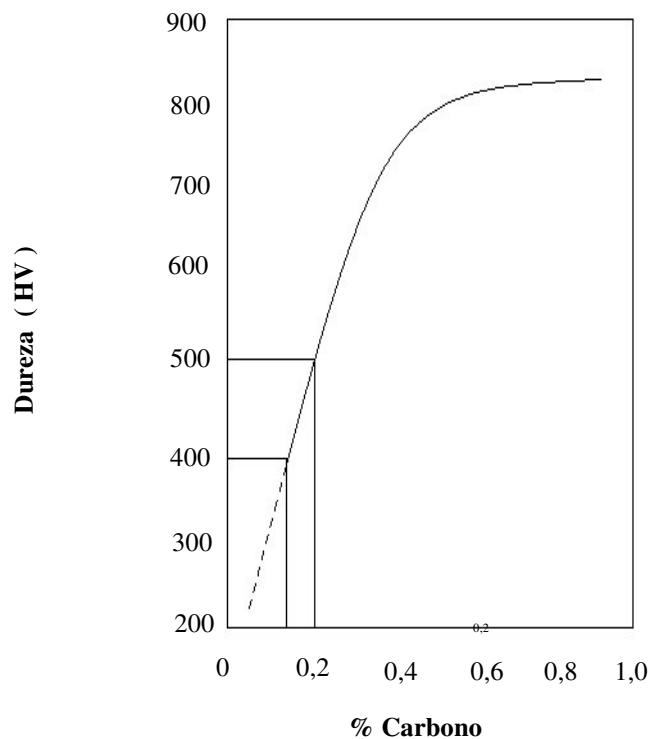


Fig. 2 – Efeito do teor de carbono na dureza da martensita.

1.6.2 – Influência da Composição Química

Qualquer que seja o processo selecionado para têmpera superficial de um componente, espera-se que para determinadas condições de aquecimento (tempo de aquecimento e temperatura de austenitização) uma camada superficial esteja completamente austenitizada, com carbono suficiente em solução sólida para, após resfriamento, obter-se uma martensita com a dureza especificada.

Para que se obtenha uma camada superficial totalmente martensítica, a matriz deve possuir uma determinada temperabilidade, que, entretanto, não precisa ser tão elevada como nos materiais

Tratamento Térmico dos Ferros Fundidos

submetidos à têmpera plena, uma vez que a velocidade de resfriamento é maior devido à extração de calor pelo material não aquecido.

Apesar de não ser necessário adicionar elementos de liga para aumentar a temperabilidade, em alguns casos eles são adicionados para obter mais facilmente estrutura prévia totalmente perlítica (Sn, Cu, Ni, Cr). Entretanto, a presença de elementos de liga pode retardar a austenitização por elevar a zona crítica, necessitando-se tempos mais longos de aquecimento. Além disso, dependendo do elemento de liga presente, pode ocorrer estabilização da austenita após têmpera, e, conseqüentemente, redução nos valores de dureza na superfície do componente tratado termicamente.

Outros elementos cuja presença deve ser controlada em materiais temperados superficialmente são o silício e o fósforo, o primeiro por estabilizar a ferrita e reduzir a solubilidade do Carbono na austenita necessitando-se, portanto, temperaturas mais elevadas para austenitização completa da matriz, e o segundo por formar compostos eutéticos de baixo ponto de fusão que podem fundir no aquecimento.