

Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços

Austenita:

É uma solução sólida de carbono em ferro gama. Somente é estável as temperaturas superiores a 723 °C, desdobrando-se por reação eutetóide, a temperaturas inferiores, em ferrita e cementita. Somente pode aparecer austenita a temperatura ambiente nos aços austeníticos, nesse caso, a austenita é estável a temperatura ambiente. É deformável como o ferro gama, pouco dura, apresenta grande resistência ao desgaste, é magnética, e é o constituinte mais denso dos aços e não é atacada por reagentes. A resistência da austenita retida à temperatura ambiente oscila entre 80 e 100 daN/mm² e alongamento entre 20 e 25 %. Pode dissolver até 1,7 – 1,8 % de carbono. Apresente rede cristalográfica cúbica de face centrada.

Ferrita:

Este constituinte está formado por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. É o constituinte mais mole dos aços porém é o mais tenaz, e o mais maleável, sua resistência a tração é de 28 daN/mm² e alongamento de 35%. Sua solubilidade máxima é de 0,008 %. Pode também manter em solução de substituição a outros elementos tais como Si, P, Ni, Cr, Cu, que aparecem nos aços, bem como impurezas como elementos de ligação. A ferrita apresenta-se nos aços como constituinte e misturada com a cementita para formar parte da perlita. Se o aço é muito pobre em carbono, sua estrutura está formada quase que totalmente por grãos de ferrita cujos limites podem ser revelados facilmente com o microscópio, depois de um ataque com ácido nítrico diluído. Os grãos são equiaxiais.

Perlita:

Formada por uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, produzida a 723 °C quando a composição é de 0,8 %. Sua estrutura está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo a espessura das lâminas de ferrita superior ao das de cementita, estas últimas ficam em relevo depois do ataque com ácido nítrico. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais branda e maleável que a cementita. Apresenta-se em forma laminar, reticular e globular.

Cementita:

É o constituinte que aparece em fundições e aços. É o carboneto de ferro, de fórmula Fe₃C. É muito frágil e duro, apresentando mais de 840 Vickers, e é muito resistente ao cisalhamento. Em baixas temperaturas é ferromagnético e perde esta propriedade a 212 °C (ponto de Curie). O ponto de fundição acima de 1950 °C, e é termodinamicamente instável a temperaturas inferiores a 1200 °C.

Bainita:

É o constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C. Apresenta 2 tipos de estrutura: a bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 – 580 °C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos e a bainita inferior, formada a 250 – 400 °C, tem um aspecto similar a martensita e está constituída

por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. A bainita tem dureza que vai de 40 a 60 HRc.

Sorbita:

É obtida com um revenimento depois da têmpera. Ao realizar o aquecimento a martensita experimenta uma série de transformações e no intervalo compreendido entre 400 e 650 °C a antiga martensita perdeu tanto carbono, que se converteu em ferrita. A estrutura aí obtida é conhecida como sorbita.

Martensita:

É uma solução sólida, intersticial, supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Os átomos de ferro estão como na ferrita, nos vértices. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. Apresenta uma rede tetragonal. Suas características mecânicas são resistência a tração entre 170 – 250 kg/mm², dureza HRC entre 50 – 60, alongamento de 0,5 % e é magnética.

Ferros & aços - Alguns conceitos básicos

Introdução

Ferro é o metal mais utilizado pelo homem. A abundância dos minerais, o custo relativamente baixo de produção e as múltiplas propriedades físico-químicas que podem ser obtidas com adição de outros elementos de liga são fatores que dão ao metal uma extensa variedade de aplicações.

Alguns metais, como o cobre por exemplo, podem ser usados no estado quimicamente quase puro. Entretanto, isso não ocorre com o ferro. No uso prático, está sempre ligado ao carbono e a outros elementos e, assim, no âmbito da ciência dos materiais e também na linguagem do dia-a-dia, a palavra "ferro" deve ser entendida como uma liga dos elementos químicos ferro, carbono e outros.

Aço é a denominação genérica para ligas de ferro-carbono com teores de carbono de 0,008 a 2,11%, contendo outros elementos residuais do processo de produção e podendo conter outros elementos de liga propositalmente adicionados. Se o aço não contém estes últimos, é chamado especificamente de **aço-carbono**. Do contrário, **aço-liga**. **Ferro fundido** é a designação genérica para ligas de ferro-carbono com teores de carbono acima de 2,11%.

Produção

À metalurgia do aço, dá-se o nome de siderurgia. Neste tópico estão algumas informações resumidas sobre a produção siderúrgica, sem maiores detalhes.

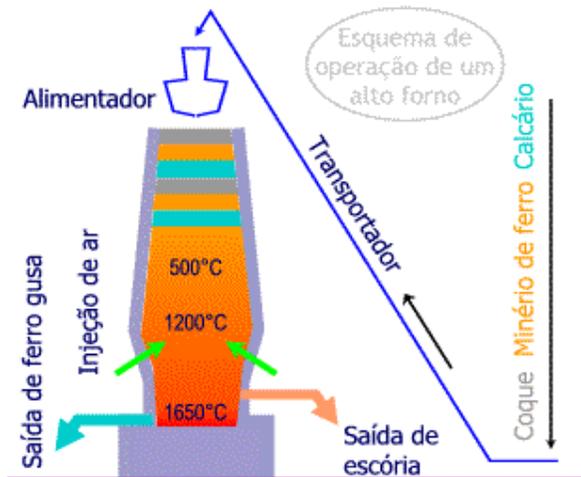


Figura 01

A produção do aço a partir do minério se dá pela redução química do óxido nele contido com o carbono. O equipamento usado é um forno de formato cilíndrico vertical e de grande altura, por isso chamado de alto forno.

São basicamente três os ingredientes que são dispostos no alto forno (fisicamente alimentados na parte superior do forno através de transportadores e outros equipamentos):

- 1) O *minério de ferro*, isto é, a substância que contém o óxido.
- 2) O *calcário* (rocha à base de carbonato de cálcio) para remover impurezas.
- 3) O *coque*, que é o agente combustível e redutor. Coque é normalmente produzido na própria siderúrgica, através da queima parcial do carvão mineral. Isto é necessário para remover o material volátil do carvão e, assim, aumentar sua resistência mecânica de forma a suportar a carga de minério e calcário.

O gás que sai da parte superior do forno é destilado para obter produtos como benzol, naftalina e outros. Após este processo, o gás ainda tem poder combustível e pode ser usado na própria siderúrgica ou distribuído para outros consumidores.

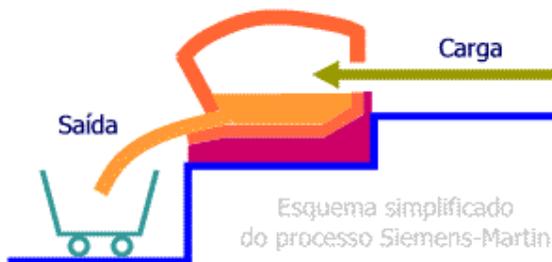


Figura 02

O processo é consumidor intensivo de ar. Para cada tonelada de ferro produzida, são usadas cerca de 2 t de minério, 0,5 t de calcário, 1 t de coque e 4 t de ar. E, como subprodutos, cerca de 0,5 t de escória e 6 t de gás.

O ferro que sai do alto forno, chamado *ferro-gusa*, contém elevados teores de carbono e de impurezas.

Para o refino do ferro-gusa de forma a transformá-lo em aço comercialmente utilizável, existem processos diversos, entre os quais, o Siemens-Martin, que consiste no aquecimento, por determinado período, do ferro-gusa misturado com sucata de aço, em temperaturas na faixa de 1650 °C. Esquema simplificado conforme Figura 02.

O equilíbrio ferro-carbono

Alguns elementos químicos apresentam *variedades alotrópicas*, isto é, estruturas cristalinas diferentes que passam de uma para outra em determinadas temperaturas, chamadas *temperaturas de transição*. O ferro apresenta 3 variedades, conforme a seguir descrito.

Ao se solidificar (temperatura de aproximadamente 1540 °C), o ferro apresenta estrutura cúbica de corpo centrado, chamada de *ferro delta* (Fe δ). Permanece nesta condição até cerca de 1390 °C e, abaixo desta, transforma-se em *ferro gama* (Fe γ), com estrutura cúbica de face centrada. Abaixo de 912 °C, readquire a estrutura cúbica de corpo centrado, agora chamada de *ferro alfa* (Fe α). Continuando o resfriamento, a 770 °C ocorre o *ponto de Curie*, isto é, ele passa a ter propriedades magnéticas. Entretanto, isto não se deve a um rearranjo da disposição atômica mas sim à mudança do direcionamento da rotação dos elétrons (spin). Em outras épocas, tal fato não era conhecido e se julgava corresponder a uma variedade alotrópica, chamada de *ferro beta*.

Ligado com o carbono, o comportamento das variedades alotrópicas do ferro e a solubilidade do carbono nele variam de forma característica, dependendo da temperatura e do teor de carbono. Isto pode ser visto em forma de gráfico, chamado *diagrama de equilíbrio ferro-carbono*. Abaixo, definições dos termos usados para o diagrama:

Austenita: é a solução sólida do carbono em ferro gama.

Ferrita: é a solução sólida do carbono em ferro alfa.

Cementita: o carboneto de ferro (Fe₃C).

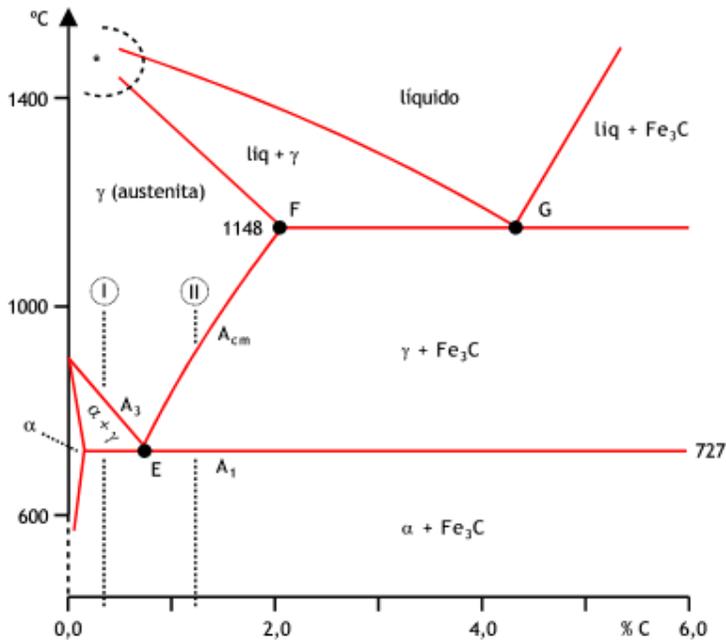
Grafita: a variedade alotrópica do carbono (estrutura cristalina hexagonal).

Obs: próximas ao ponto marcado com (*), existem na realidade linhas de equilíbrio com o ferro delta, mas não são exibidas por razões de clareza e de pouco interesse prático.

A adição do carbono altera as temperaturas de transição das variedades alotrópicas em relação ao ferro puro, dependendo do seu teor.

Exemplo: para um aço com cerca de 0,5% C, representado pela linha vertical I no diagrama, o ferro gama contido na austenita começa a se transformar em alfa na interseção com a linha A₃ e está totalmente transformado no cruzamento com a linha A₁, a 727 °C, inferior aos 912 °C do ferro puro.

Importante lembrar que, abaixo de 727 °C, não pode haver ferro gama. Somente a variedade alfa está presente.



O ponto **F** corresponde ao máximo teor de carbono que a austenita pode conter, isto é, 2,11%. É usado na distinção do aço do ferro fundido.

A solubilidade do carbono na ferrita é muito pequena (máximo 0,008%) e pode ser considerada nula em muitos casos práticos.

O ponto **E** (eutetóide) é a menor temperatura de equilíbrio entre a ferrita e a austenita, correspondendo a cerca de 0,77% C. E os aços podem ser eutetóides, hipoeutetóides ou hipereutetóides.

Obs: o termo *eutético* se refere ao equilíbrio entre fases líquida e sólida. Neste caso, usamos o sufixo *óide* (= semelhante a) para indicar que o equilíbrio ocorre entre fases sólidas.



Figura 02

O teor de carbono do aço afeta o seu aspecto granulométrico.

Um aço com muito pouco carbono (digamos, menos de 0,01%), se resfriado lentamente, deverá apresentar uma aparência razoavelmente uniforme, pois a maior parte será representada pela ferrita.

Na Figura 02 (a), um possível aspecto de uma microfotografia de um aço deste tipo.

Agora supomos um aço hipoeutetóide com 0,5% de carbono, representado pela linha vertical I no diagrama. Quando o resfriamento atinge a interseção com A_3 , começa a separação da austenita em austenita e ferrita. Logo acima da linha A_1 , haverá ferrita mais austenita, esta última, com o máximo teor de carbono que pode conter (0,77%).

Logo abaixo da linha A_1 , toda a austenita deverá se transformar em ferrita mais cementita. Entretanto, desde que o processo é rápido, fisicamente a separação se dá em forma de lâminas bastante finas, somente visíveis ao microscópio com elevadas ampliações. Tal estrutura, isto é, a ferrita e a cementita em forma laminar, é chamada de **perlita**.

Na figura 02 (b), a estrutura laminar típica da perlita, observada com elevada ampliação (as linhas escuras correspondem à cementita).



Figura 03

Na figura 03 (a), o aspecto típico de um aço hipoeutetóide visto com uma ampliação menor.

As áreas claras representam a ferrita e as escuras, a perlita. Entretanto, a estrutura laminar desta não pode ser observada devido à reduzida ampliação.

Um aço hipereutetóide (linha II no diagrama, com cerca de 1,5% C, por exemplo) tem, na interseção com A_1 , austenita com o máximo teor de carbono (0,77%) e cementita. A mudança brusca abaixo de A_1 faz a austenita se transformar em perlita conforme já visto. E a cementita envolve os grãos de perlita em forma de uma teia conforme Figura 03 (b), fazendo uma espécie de rede de cementita.

Um aço eutetóide, isto é, com 0,77% de carbono, deve apresentar somente perlita na sua estrutura granular.

O teor de carbono exerce significativa influência nas propriedades mecânicas do aço. Quanto maior, maiores a dureza e a resistência à tração. Entretanto, aços com elevados teores de carbono são prejudicados pela maior fragilidade devido à maior quantidade de cementita, uma substância bastante dura mas quebradiça.

É comum o uso da expressão *aço doce* para aços de baixa dureza, com teores de carbono menores que 0,25%.

Ferros & aços III - Efeito dos elementos de liga

Efeitos do teor de carbono

Conforme mencionado em página anterior, o teor de carbono exerce significativa influência nas propriedades mecânicas dos aços

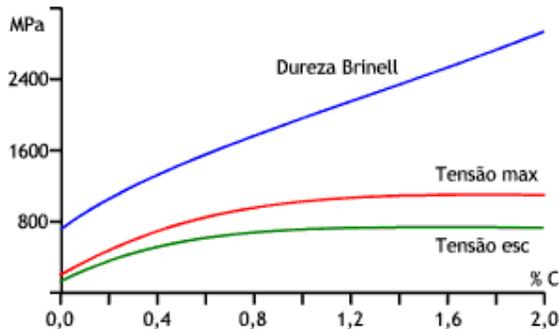


Figura 04

As curvas do gráfico da Figura 04 ao lado mostram, de forma aproximada, as variações de dureza e tensões de tração máxima e de escoamento com o teor de carbono do aço.

Podemos notar que a dureza aumenta progressivamente com o teor de carbono e que as tensões de tração também aumentam nos aços hipoeutetóides, mas tendem a se estabilizar nos hipereutetóides.

Na maioria dos materiais, a contrapartida para maior dureza é maior fragilidade ou menor ductilidade. E essa regra é também válida para os aços.

Efeitos dos elementos de liga

Quando mencionado *elementos de liga*, deve ficar subentendido que são outros elementos, além do ferro e do carbono, uma vez que estes são os constituintes básicos do aço.

Alumínio (Al): é usado em pequenas proporções, como desoxidante e agente de controle do crescimento dos grãos.

Chumbo (Pb): não se liga ao aço mas, quando adicionado, se distribui na estrutura em forma de partículas microscópicas, o que resulta em maior facilidade de usinagem. Entretanto, devido ao baixo ponto de fusão (cerca de 327 °C), aços com chumbo não devem ser usados em temperaturas acima de 250 °C.

Cobalto (Co): aumenta a dureza do aço sob altas temperaturas.

Cobre (Cu): melhora a resistência à corrosão por agentes atmosféricos, se usado em teores de 0,2 a 0,5%.

Cromo (Cr): melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12% Cr resiste à ação da água e de vários ácidos), aumenta a resistência à tração (em média, 80 MPa para cada 1% de cromo), melhora a facilidade de têmpera, aumenta a resistência à alta temperatura e ao desgaste.

Enxofre (S): é, na maioria dos casos, um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço. Entretanto, se combinado com o manganês na forma do

respectivo sulfeto, favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente.

Fósforo (P): é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Assim, os teores máximos permitidos devem ser controlados com rigor em aços para aplicações estruturais ou críticas.

Manganês (Mn): em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera.

Molibdênio (Mo): melhora a resistência a altas temperaturas, a resistência ao desgaste e a dureza após a têmpera. Para aços inoxidáveis, melhora a resistência à corrosão.

Níquel (Ni): em média, para cada 1% de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa, mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. O níquel altera a alotropia do ferro e teores acima de 25% fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um **aço austenítico**, que também é não magnético e bastante resistente à corrosão. Com 36% de Ni, o aço tem o menor coeficiente de dilatação térmica e é usado em instrumentos de medição. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18% Cr e 8% Ni.

Silício (Si): é um agente desoxidante na produção do aço. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência à tração mas prejudica a soldagem. O silício aumenta significativamente a resistividade elétrica do aço e, por isso, aços com silício são amplamente usados em núcleos magnéticos (motores, transformadores, etc) devido às menores perdas com as correntes parasitas que se formam.

Tungstênio (W): aumenta a resistência à tração em altas temperaturas. Forma carbonetos bastante duros e é usado em aços para ferramentas (aços rápidos).

Vanádio (V): refina a estrutura do aço, impedindo o crescimento dos grãos. Forma carbonetos duros e estáveis e é usado em aços para ferramentas para aumentar a capacidade de corte e dureza em altas temperaturas.

Codificação de aços

Existem várias entidades que estabelecem normas para codificação de aços de acordo com o teor de carbono e dos elementos de liga. Na tabela abaixo, alguns códigos da SAE (*Society of Automotive Engineers*).

Código SAE	Descrição ou principais elementos de liga
10xx	Aços-carbono de uso geral
11xx	Aços de fácil usinagem, com enxofre
13xx	Manganês (1,75%)
15xx	Manganês (1,00%)
23xx	Níquel (3,50%)
25xx	Níquel (5,00%)
31xx	Níquel (1,25%), cromo (0,65%)

33xx	Níquel (3,50%), cromo (1,55%)
40xx	Molibdênio (0,25%)
41xx	Cromo (0,50 ou 0,95%), molibdênio (0,12 ou 0,20%)
43xx	Níquel (1,80%), cromo (0,50 ou 0,80%), molibdênio (0,25%)
46xx	Níquel (1,55 ou 1,80%), molibdênio (0,20 ou 0,25%)
47xx	Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%)
48xx	Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%)
50xx	Cromo (0,28% ou 0,40%)
51xx	Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%)
61xx	Cromo (0,80 ou 0,95%), vanádio (0,10 ou 0,15%)
86xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50 ou 0,65%), molibdênio (0,20%)
87xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%)
92xx	Manganês (0,85%), silício (2,00%)
93xx	Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%)
94xx	Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%)
97xx	Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%)
98xx	Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%)

Obs: os dois últimos algarismos (xx) indicam o teor de carbono em 0,01%.
Exemplo: um aço SAE 1020 tem 0,20 % de carbono.

Ferros & aços - Alguns aços inoxidáveis

Introdução

Aços classificados como inoxidáveis são os que têm resistência à corrosão superior à dos aços comuns. Não são inertes em todos os meios, mas não são atacados por muitos deles ou são atacados de forma significativamente mais lenta do que os aços comuns.

Cromo é o elemento mais importante para aumentar a resistência à corrosão do aço. Ligado ao mesmo, com ou sem outros elementos (como níquel, o segundo mais importante), forma tipos com uma variedade de propriedades e características, alguns deles citados nesta página.

Aços inoxidáveis austeníticos

Na tabela anterior foi informado que o níquel junto com o cromo forma aços austeníticos e, portanto, os dois elementos estão presentes neste grupo. São provavelmente os aços inoxidáveis mais usados.

As propriedades comuns do grupo são: não magnéticos, não temperáveis, a dureza aumenta significativamente com a deformação a frio. Na tabela abaixo, alguns tipos de acordo com a classificação AISI (*American Iron and Steel Institute*).

Cod	Componentes (%)	Algumas propriedades / Algumas aplicações
301	0,15 C, 16-18 Cr, 6-8 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Fácil usinagem. / Estruturas, utensílios domésticos, indústrias químicas, alimentícias.
302	0,15 C, 17-19 Cr, 8-10 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Similar ao 301.
302B	0,15 C, 17-19 Cr, 8-10 Ni, <2 Mn, 2-3 Si	Maior resistência ao calor. / Partes de fornos.
303	0,15 C, 17-19 Cr, 8-10 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si, ≥ 0,07 P, ≤ 0,6 Mo	Fácil usinagem. / Parafusos, porcas, eixos, flanges, buchas, válvulas.
304	<0,08 C, 18-20 Cr, 8-10,5 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Soldável com menos risco de corrosão intergranular. / Equipamentos criogênicos, indústrias de alimentos.
308	≤ 0,08 C, 19-21 Cr, 10-12 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Maior resistência à corrosão. / Partes de fornos, eletrodos de solda.
309	≤ 0,2 C, 22-24 Cr, 12-15 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Boa resistência térmica, mecânica e química. / Estruturas, indústrias químicas, partes de fornos, bombas.
309S	≤ 0,08 C, 22-24 Cr, 12-15 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si	Soldável com menos risco de corrosão intergranular.
310	≤ 0,25 C, 24-26 Cr, 19-22 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1,5 Si	Boa resistência à oxidação em altas temperaturas. / Partes de fornos, equipamentos de indústrias químicas.
316	≤ 0,1 C, 16-18 Cr, 10-14 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si, 2-3 Mo	Maior resistência à corrosão. / Indústrias químicas, papel e celulose.
317	≤ 0,1 C, 18-20 Cr, 11-15 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si, 3-4 Mo	Maior resistência à corrosão que o 316. / Indústrias químicas, papel e celulose.
321	≤ 0,08 C, 17-19 Cr, 9-12 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si, 5x min C de Ti	Resistente à corrosão intergranular em altas temperaturas. / Uso intensivo de solda: vasos de pressão, juntas de expansão.
347	≤ 0,08 C, 17-19 Cr, 9-12 Ni, ≤ 2 Mn, ≤ 1 Si, 10x min C de Co	Similar ao 321.

Aços inoxidáveis martensíticos

São aços com cromo, em teores na faixa de 11 a 18%. São magnéticos e podem ser endurecidos por têmpera (a dureza pode chegar até cerca de 57 HRC).

Alguns podem conter níquel, mas o teor é baixo em comparação com os austeníticos. Na tabela abaixo, alguns tipos de acordo com a classificação AISI.

403	$\leq 0,15$ C, 11,5-13 Cr, ≤ 1 Mn, $\leq 0,5$ Si	Peças usinadas ou forjadas que sofrem elevados esforços (partes de compressores e turbinas, válvulas e anéis de segmento para motores, etc).
410	$\leq 0,15$ C, 11,5-13,5 Cr, ≤ 1 Mn, $\leq 0,5$ Si	Peças de turbinas aeronáuticas, válvulas, eixos, parafusos, buchas, etc.
414	$\leq 0,15$ C, 11,5-13,5 Cr, 1,25-2,5 Ni, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	Peças de fornos, lâminas, facas, etc.
416	$\leq 0,15$ C, 12-14 Cr, ≤ 1 Mn, $\leq 0,5$ Si, $>0,07$ P, $\leq 0,6$ Mo	Aplicações similares às do 410, com usinagem mais fácil.
431	$\leq 0,2$ C, 15-17 Cr, 1,25-2,5 Ni, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	Eixos, peças para aviões, bombas, máquinas industriais, etc.
420	$>0,15$ C, 12-14 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	Cutalaria, instrumentos cirúrgicos e odontológicos, molas, etc.
420F	0,3-0,4 C, 12-14 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si, $> 0,07$ P, ≤ 1 Mo	Aplicações similares às do 420, com usinagem mais fácil.
440A	0,6-0,75 C, 16-18 Cr, $\leq 0,75$ Mo, ≤ 1 Si	Cutalaria, instrumentos cirúrgicos, mancais, válvulas, etc.
440B	0,75-0,95 C, 16-18 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si, $\leq 0,75$ Mo	Similar ao 440A.
440C	0,95-1,2 C, 16-18 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si, $\leq 0,75$ Mo	Aplicações similares às do 440A, que exigem durezas maiores.

Aços inoxidáveis ferríticos

Em relação aos martensíticos, o teor de cromo é em geral maior e o de carbono, menor. Isso faz as estruturas sempre ferríticas e, portanto, não são endurecidos por têmpera. A tabela abaixo dá informações sobre alguns tipos, conforme classificação AISI.

Cod	Componentes (%)	Algumas propriedades e/ou aplicações
405	$\leq 0,08$ C, 11,5-14,5 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si, 0,1-0,3 Al	Reservatórios, caldeiras, radiadores, etc.
409	$\leq 0,15$ C, 12-14 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si, 3,5-4 Al, $\leq 0,75$ Ti	Aplicações similares às do 405.
429	$\leq 0,12$ C, 14-16 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	Resistente ao ácido nítrico, boas propriedades de soldagem.
430	$\leq 0,12$ C, 16-18 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	De fácil conformação, é usado em peças decorativas, equipamentos de cozinha, etc.
430F	$\leq 0,12$ C, 16-18 Cr, $>0,07$ P, $\leq 0,6$ Mo	De fácil usinagem, Usado em parafusos, porcas, etc.
442	$\leq 0,2$ C, 18-23 Cr, ≤ 1 Mn, ≤ 1 Si	Peças que trabalham em altas temperaturas (partes de fornos, etc).
443	$\leq 0,2$ C, 18-23 Cr, $\leq 0,5$ Ni, $\leq 0,75$ Si, 0,9-1,25 Cu	Aplicações que exigem boa resistência à corrosão e a altas temperaturas.
446	$\leq 0,2$ C, 23-27 Cr, $\leq 0,25$ Ni, 1,5 Mn, 1 Si	Do grupo, é o que apresenta melhor resistência à corrosão e a altas temperaturas. Usado em fornos, queimadores, etc.

Ferros & aços - Aços para ferramentas

Introdução / Classificação

De forma genérica, podemos dizer que este grupo é formado por aços-carbono e aços-liga específicos para o uso. A natureza da aplicação requer normalmente propriedades superiores, algumas delas conflitantes entre si.

Aços para ferramentas precisam em geral combinar propriedades como dureza, resistência à tração e à compressão, tenacidade e outras. Muitas vezes, operam sob elevadas temperaturas, situação em que a maioria das propriedades tendem a piorar

Para atender às exigências, o controle da composição desses aços é mais rigoroso, bem como processos e métodos de tratamento térmico.

A tabela abaixo resume a classificação dos tipos mais comuns segundo padrões AISI / SAE.

Aços para trabalho a frio	Aços para trabalho a quente	Aços resistentes a choques	Aços rápidos	Aços para moldes	Aços para aplicações especiais
W - temperáveis em água. O - temperáveis em óleo. A - média liga, temperáveis ao ar. D - alto carbono, alto cromo.	H10 / H19 - Aços ao cromo. H20 / H39 - Aços ao tungstênio. H40 / H59 - Aços ao molibdênio.	S1, S2, S4, S5, S6, S7.	Série molibdênio (M1 a M52). Série tungstênio (T1 a T15).	P2, P20, P21, P3, P4 P5, P6.	L2, L6.

Aços temperáveis em água

São basicamente aços-carbono com teores na faixa de 0,6 a 1,4%. Alguns podem ter adição de pequena quantidade de vanádio para melhor tenacidade.

Faixas de composições típicas são: 0,6 - 1,4% C; 0,25% Mn; 0,25% Si; 0,0 - 0,50% Cr; 0,0 - 0,50% V.

A Figura 05 deste tópico dá o diagrama TTT aproximado para um aço com 1% de carbono. Notar que o resfriamento da têmpera deve ser rápido (em água ou salmoura) para a obtenção de uma estrutura de martensita. Assim, o

endurecimento fica restrito à camada superficial e o interior menos duro confere a necessária tenacidade.

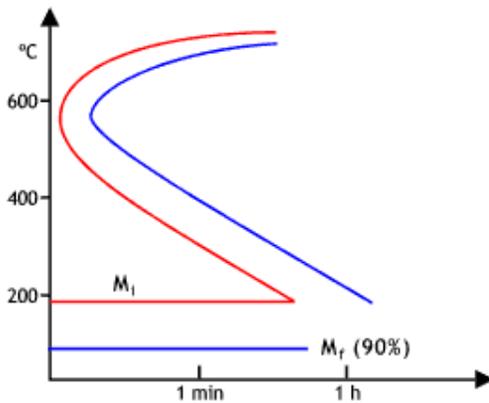


Figura 05

Profundidade do endurecimento na faixa de 3 mm para têmpera a 780°C e cerca de 6 mm para têmpera a 870°C. Mas a tenacidade diminui com o aumento da temperatura da têmpera

Tratamentos anteriores à têmpera e revenido podem ser: normalização (para uniformidade da estrutura), recozimento (após trabalho a frio, para refinar grãos) e alívio de tensões após usinagem.

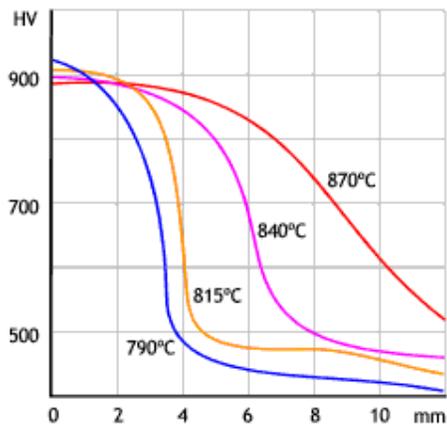


Figura 06

Temperaturas de revenido costumam variar de 170 a 350 °C dependendo da dureza desejada.

Na faixa de 230 a 290 °C há uma acentuada queda da tenacidade, ou seja, um aumento da fragilidade do material.

A Figura 06 dá curvas aproximadas de dureza versus profundidade para uma peça cilíndrica de aço com cerca de 0,92% C em diferentes temperaturas de têmpera.

A Figura 07 dá as curvas para o mesmo aço com pequenas adições de elementos de liga (0,35% Mn; 0,13% Cr; 0,08% V). Notar o aumento considerável na profundidade de endurecimento.

Algumas aplicações típicas: ferramentas manuais (martelos, formões, talhadeiras, punções, limas, tarraxas e similares), fresas e outras ferramentas para trabalhar madeiras, ferramentas diversas para trabalhos a frio.

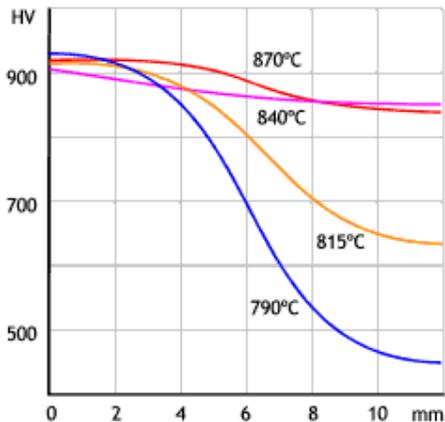


Figura 07

É possível estabelecer características de aplicações de acordo com o teor de carbono: de 0,7 a 0,9% para usos com choques; de 0,9 a 1,0% para ferramentas de deformação a frio; de 1,0 a 1,1% para uso genérico; de 1,1 a 1,4 para máxima resistência à abrasão.

Algumas vantagens são: baixo custo, facilidade de usinagem e de têmpera, boa aresta de corte, boa tenacidade devido ao não endurecimento do núcleo.

Algumas desvantagens: pouca estabilidade dimensional, susceptibilidade a trincas no tratamento de têmpera, não resistente a temperaturas mais altas.

A tabela abaixo dá composições para alguns tipos conforme especificações AISI.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	% Co	% Cu	% P	% S
W1	0,70/1,50	0,10/0,40	0,10/0,40	0,15	0,20	0,10	0,15	0,10	-	0,20	0,025	0,025
W2	0,85/1,50	0,10/0,40	0,10/0,40	0,15	0,20	0,10	0,15	0,15/0,35	-	0,20	0,025	0,025
W5	1,05/1,15	0,10/0,40	0,10/0,40	0,40/0,60	0,20	0,10	0,15	0,10	-	0,20	0,025	0,025

Aços temperáveis em óleo

A série O compreende aços com teores de carbono entre 0,90 e 1,45%, além de manganês, silício, cromo, tungstênio e molibdênio. A tabela abaixo dá a composição de alguns tipos.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	% Co	% Cu	% P	% S
O1	0,90	1,00	0,25	0,50	-	-	0,50	-	-	-	-	-
O2	0,90	1,60	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O6	1,45	0,80	1,00	-	-	0,25	-	-	-	-	-	-
O7	1,20	0,25	0,25	0,75	-	0,25	1,75	-	-	-	-	-

Temperaturas comuns de têmpera são 790 / 815°C para O1, 760 / 800°C para O2 e 855 / 885°C para O7. É recomendável um preaquecimento (antes da formação da austenita) entre 650 e 700°C para melhor estabilidade dimensional. Revenido na faixa de 170 a 200°C para durezas acima de 60 HRC.

Podem conter grafita na estrutura endurecida, o que atua como lubrificante e facilita usinagem posterior. Tipos com tungstênio são mais resistentes à abrasão e têm melhores propriedades de aresta, adequados para facas de corte.

Aplicações típicas são parecidas com as da série W (tópico anterior), com solicitações mais severas e melhor estabilidade dimensional.

Aços de média liga temperáveis ao ar

Contêm proporções razoáveis de elementos de liga como Manganês, Silício, Cromo, Níquel, Molibdênio e Vanádio para melhorar endurecimento, resistência ao desgaste e tenacidade.

A tabela abaixo dá alguns tipos conforme classificação AISI.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	% Co	% Cu	% P	% S
A2	0,95/1,05	1,00	0,50	4,75/5,50	0,30	0,90/1,40	-	0,15/0,50	-	0,25	0,03	0,03
A3	1,20/1,30	0,40/0,60	0,50	4,75/5,50	0,30	0,90/1,40	-	0,80/1,40	-	0,25	0,03	0,03
A4	0,95/1,05	1,80/2,20	0,50	0,90/2,20	0,30	0,90/1,40	-	-	-	0,25	0,03	0,03
A6	0,65/0,75	1,80/2,50	0,50	0,90/1,20	0,30	0,90/1,40	-	-	-	0,25	0,03	0,03
A10	1,25/1,50	1,60/2,10	1,00/1,50	-	1,55/2,05	1,25/1,75	-	-	-	0,25	0,03	0,03

As combinações dos elementos de liga dão a esses aços a possibilidade de têmpera ao ar (menor deformação, menor tendência a trincas), fazendo-os adequados para peças de geometria complexa como matrizes.

O tipo A2 é o mais usual do grupo. O maior teor de cromo (também do A3 e de outros não listados na tabela) modera o amolecimento em temperaturas elevadas.

Temperaturas de têmpera na faixa de 790 / 870°C e 925 / 980°C para os tipos com maiores teores de cromo. Revenido entre 150 e 565 °C, dependendo da dureza desejada.

Ferros & aços - Tratamentos térmicos

Efeito da velocidade de resfriamento

As transformações vistas no diagrama Fe-C pressupõem velocidades de resfriamento bastante baixas, de forma que todos os rearranjos atômicos possam se completar. Mudanças importantes podem acontecer se o aço, sob temperatura acima de 727 °C, for bruscamente resfriado. As transformações podem não se efetivar totalmente e outras podem ocorrer, afetando sensivelmente as propriedades mecânicas.

O gráfico da Figura 01 é um exemplo aproximado para um aço eutetóide, considerado inicialmente em temperatura na região da austenita (acima de 727 °C, linha A) e posteriormente resfriado.

Generalidades

A têmpera, rapidamente comentada no tópico anterior, é apenas um dos possíveis tratamentos térmicos. De forma genérica, podemos dizer que os tratamentos térmicos de aços (e também de outros metais) têm o objetivo de proporcionar alterações de propriedades mecânicas, térmicas, químicas, elétricas ou magnéticas para atender os processos de fabricação ou as especificações finais do produto.

Há uma variedade de tratamentos para, por exemplo, aumentar dureza e tenacidade, melhorar ductilidade e facilidade de trabalho, remover tensões residuais, refinar estrutura de grãos, aumentar resistência ao desgaste, melhorar resistência à corrosão, etc. A tabela abaixo dá um resumo dos principais tipos de tratamento para aços.

Recozimento	Normalização	Têmpera	Endurecimento superficial
<ul style="list-style-type: none"> • recozimento completo • alívio de tensões • esferoidização 		<ul style="list-style-type: none"> • têmpera e revenido convencionais • austêmpera • martêmpera 	<ul style="list-style-type: none"> • cementação • nitretação • têmpera superficial • carbo-nitretação

Recozimentos & normalização

Muitas vezes, devido ao próprio processo de produção ou a trabalhos anteriores como deformações a quente ou a frio, o aço apresenta dureza excessiva ou pouca maleabilidade e ductilidade, inadequadas para operações como usinagem, dobra e outras.

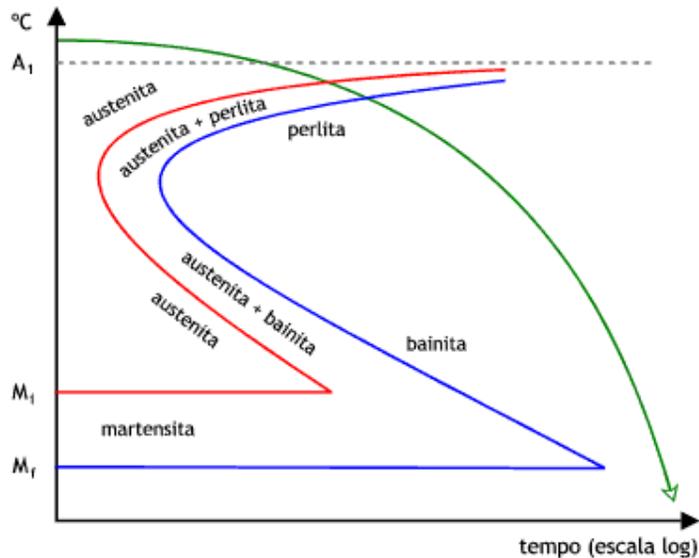


Figura 08

O **recozimento** tem a finalidade de modificar esses aspectos (reduzir dureza, melhorar ductilidade, etc) e também outros como remover gases dissolvidos, homogeneizar estrutura dos grãos, etc.

A Figura 08 ao lado é o diagrama de transformação da austenita versus tempo do tópico anterior, acrescido da curva de resfriamento típica do recozimento (verde).

O processo consiste no aquecimento até temperatura acima da transformação da austenita (linha tracejada preta) e resfriamento lento no próprio forno.

A transformação da austenita ocorre na parte superior, produzindo, portanto, perlita de baixa dureza.

Este exemplo é para um aço eutetóide. Para um aço hipoeutetóide, há também ferrita e, para um hipereutetóide temos a presença da cementita.

O **alívio de tensões** é um processo geralmente feito sob temperaturas acima de 500°C e inferiores à da transformação da austenita e resfriamento ao ar. É usado para eliminar tensões resultantes de operações como deformações a frio e soldas.

A **normalização** é um procedimento similar ao recozimento, mas com resfriamento ao ar. Isso significa uma maior velocidade de resfriamento. A curva verde da Figura 09 dá uma idéia aproximada.

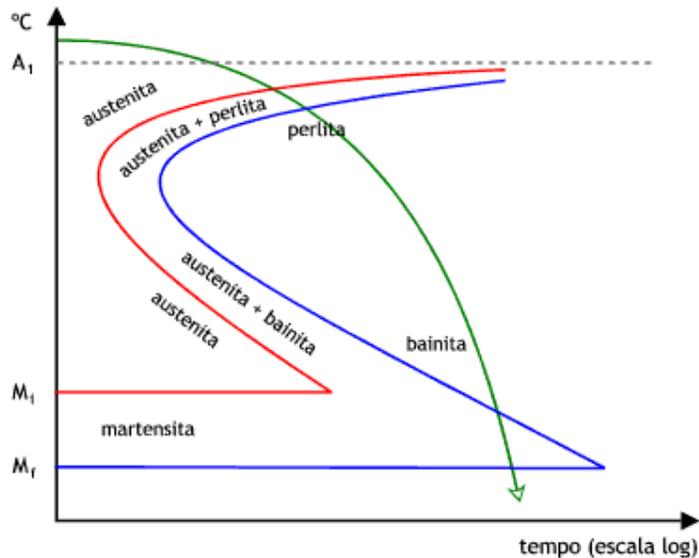


Figura 09

A normalização pode ser usada para obter uma boa ductilidade sem redução significativa da dureza e resistência à tração. Também para facilitar a usinagem e refinar a estrutura dos grãos. É um tratamento comum para aços-liga, antes da usinagem e posteriores tratamentos como têmpera e revenido.

Devido à maior velocidade de resfriamento, aços normalizados tendem a ser menos dúcteis e mais duros que os plenamente recozidos, mas as diferenças são significativas para teores acima de 0,5% de carbono.

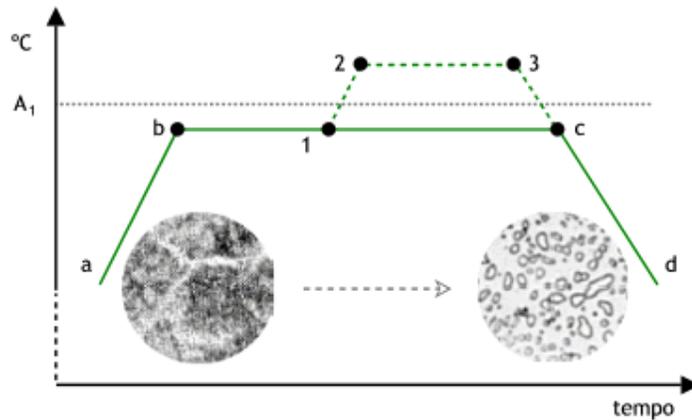


Figura 10

A **esferoidização** é um processo normalmente usado com aços hipereutetóides. Nesses aços, a perlita é envolvida por uma rede de cementita que dificulta trabalhos de usinagem e outros processos de fabricação.

O tratamento consiste em aquecer, manter por um longo tempo a peça em temperatura um pouco abaixo da formação da austenita e resfriar (exemplo: abcd da Figura 10). Valores típicos podem ser, por exemplo, 24 h a 700 °C.

Também é possível alternar temperaturas abaixo e acima, como ab123d da mesma figura.

O resultado é uma estrutura globular de cementita em uma matriz de ferrita, o que facilita a usinagem e outros trabalhos. Essa estrutura é denominada *esferoidita* e um aspecto micrográfico típico é dado na parte direita da Figura 03.

O **patenteamento** se dá pelo aquecimento acima de A_3 e resfriamento ao ar ou em banho líquido (chumbo ou sal fundido) com temperaturas na faixa de 450 / 550 °C. O objetivo é a obtenção de uma estrutura com perlita fina ou somente bainita. Usado especificamente em aços para trefilação, a fim de combinar adequadamente resistência à tração e tenacidade suficiente para permitir deformações.

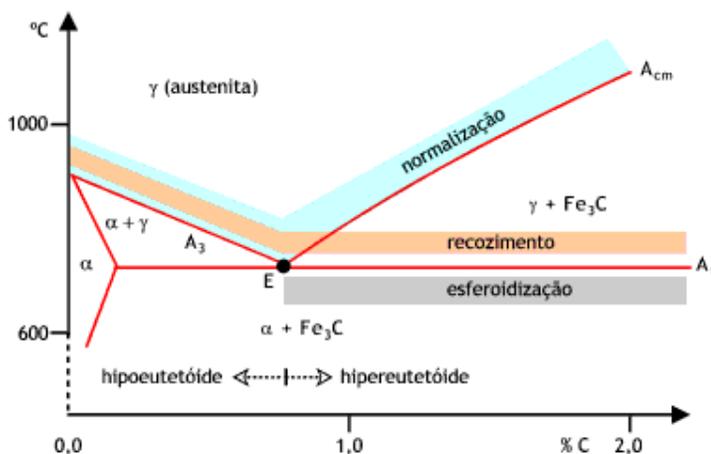


Figura 11

A Figura 11 exibe parte ampliada do diagrama Fe-C já visto em página anterior. Corresponde à faixa dos aços e temperaturas até a formação da austenita.

Temos as seguintes definições.

Temperatura crítica inferior: temperatura abaixo da qual não existe austenita. Linha A_1 .

Temperatura crítica superior: temperatura acima da qual todo o material é austenita. Linha A_3 para aços hipoeutetóides e A_{cm} para aços hipereutetóides. As faixas do gráfico são apenas indicações aproximadas para as temperaturas de aquecimento, sem compromissos com escalas e valores reais. Podemos observar que a temperatura de normalização é um pouco acima da temperatura crítica superior. Essa situação vale também para o recozimento de aço hipoeutetóide, mas a referência muda para temperatura crítica inferior no caso de hipereutetóide. A esferoidização, em geral somente para este último, ocorre em temperaturas pouco abaixo da crítica inferior, mas pode alternar com temperaturas pouco acima conforme já mencionado.