

V I I

AÇOS-CARBONO E AÇOS-LIGA : INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA SÔBRE OS CARACTERÍSTICOS MECÂNICOS DOS AÇOS

1 — **Sistemas de classificação dos aços** — Dada a grande variedade de tipos de aços, tem-se procurado criar sistemas de classificação em que os aços são designados por letras e números.

Entre as designações em vigor mais conhecidas e utilizadas situam-se as americanas SAE e AISI, criadas respectivamente pela «Society of Automotive Engineers» e «American Iron and Steel Institute». Ambas seguem aproximadamente o mesmo sistema numérico de identificação, o qual, em linhas gerais, é o seguinte: quatro números são utilizados para designar os aços, os dois primeiros indicando o tipo e o teor aproximado de elementos de liga, ao passo que os dois últimos especificam o teor de carbono.

Esquemáticamente, o sistema adotado por essas Associações é o representado na Tabela VII, onde as letras XX correspondem aos números indicativos dos teores de carbono.

T A B E L A V I I

Sistema SAE de classificação dos aços

Designação	Tipo de aço
10XX	Aços-carbono comuns
11XX	Aços de usinagem fácil com alto S
13XX	Aços-manganês com 1,75 % de Mn
23XX	Aços-niquel com 3,5 % de Ni
25XX	Aços-niquel com 5,0 % de Ni
31XX	Aços-niquel-cromo com 1,25 % de Ni e 0,65 % de Cr
33XX	Aços-niquel-cromo com 3,5 % de Ni e 1,5 % de Cr
40XX	Aços-molibdênio com 0,25 % de Mo
41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,90 % de Cr e 0,20 % de Mo
43XX	Aços-niquel-cromo-molibdênio com 1,75 % de Ni, 0,80 % de Cr e 0,25 % de Mo
46XX	Aços-niquel-molibdênio com 1,75 % de Ni e 0,25 % de Mo
51XX	Aços-cromo com 0,80 % de Cr
52XX	Aços-cromo com 1,20 % de Cr
61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,90 % de Cr e 0,15 % de V
{ 86XX, 87XX e 94XX	Aços-niquel-cromo-molibdênio com baixos teores desses elementos de liga

Fácil é ver que quando o 1º número é 1, os aços são simplesmente ao carbono, não apresentando quaisquer elementos de liga a não ser os normalmente presentes. Quando o 1º número é 2, trata-se de aços ao níquel; quando é 3, aços ao níquel e ao cromo; quando é 4, aços ao molibdênio só ou com outros elementos de liga; quando é 5, aços ao cromo e assim em seguida.

O sistema SAE acima não leva em conta os aços-liga de alto teor em liga, os quais, apesar de indispensáveis na engenharia e na indústria, ainda constituem uma parcela muito pequena da produção total de aço (*).

2 — Importância e limitações dos aços-carbono — O carbono, como aliás já foi várias vezes mencionado, é o principal elemento de liga dos aços, pois a resistência e a maioria das outras propriedades mecânicas desses materiais dependem do tamanho e da distribuição das partículas de carbonetos. Nessas condições, não é de admirar que os aços simplesmente ao carbono constituam ainda a parcela mais importante dentro da enorme variedade de tipos de aços. Acresça-se ainda o fato de que para muitas e importantes aplicações, principalmente em construção civil, o aço também é empregado sem qualquer tratamento térmico, ou seja simplesmente no estado laminado a quente ou a frio, como é o caso da maioria dos perfis estruturais, trilhos, chapas, etc.

Num automóvel moderno, por exemplo, cerca de 2/3 em peso do material empregado é aço-carbono, somente laminado a quente ou a frio. Menos de 1/3 é de aço com elementos de liga ou tratado termicamente.

Antes da 2ª Guerra Mundial a produção de aço-liga representava apenas cerca de 6 % do total. Durante a Guerra, por motivos facilmente compreensíveis, subiu a 15 %, estabilizando-se posteriormente (1946 e 1947) em torno de 9 %.

(*) A engenharia e a indústria brasileiras ainda não dispõem de qualquer sistema nacional de classificação dos aços, nem de especificações próprias para esses materiais, a não ser nos casos mais simples de construção civil, como barras redondas para concreto armado.

Essa falha, de certo modo justificável há alguns anos atrás, pela inexistência no país das indústrias mecânica, de transporte ferroviário, de auto-peças etc., assim como pelo pouco ou nenhum emprêgo de materiais metálicos, outros que o aço comum de baixo carbono para construção, tende a ser rapidamente sanada, dado o próprio desenvolvimento da indústria nacional e tendo em vista a aplicação crescente dos aços nesses variados setores.

Assim é que, sob o patrocínio da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) fabricantes, consumidores e tecnólogos já iniciaram os estudos para a criação de especificações brasileiras abrangendo aços para construção mecânica, para equipamento ferroviário etc. Essas especificações representarão inegavelmente mais uma importante contribuição na expansão da indústria e grandes benefícios acarretarão para a engenharia e a técnica nacional.

Em resumo, os aços-carbono constituem ainda a liga mais importante da engenharia. É evidente que esses aços apresentam limitações, principalmente quando se deseja propriedades especiais como resistência à corrosão, ao calor, etc.

Recorre-se então aos aços-ligas, cuja importância cresce dia a dia, apesar deles representarem apenas cerca de 10 % da produção mundial.

3 — **Aços-liga** — A introdução de outros elementos de liga nos aços-carbono é feita quando se deseja um ou diversos dos seguintes efeitos :

- a) aumentar a resistência mecânica;
- b) conferir resistência uniforme através de toda a secção em peças de grande dimensões;
- c) diminuir o peso (consequência do aumento da resistência) de modo a reduzir a inércia de uma parte em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou numa estrutura;
- d) conferir resistência à corrosão;
- e) aumentar a resistência ao calor;
- f) aumentar a resistência ao desgaste;
- g) aumentar a capacidade de corte;
- h) melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Os três primeiros requisitos são alcançados porque os elementos de liga, como se viu, aumentam a resistência da ferrita e formam ainda outros carbonetos, além do Fe_3C , os quais modificam o tamanho e a distribuição das partículas existentes de Fe_3C , contribuindo para a melhora da resistência do aço, sobretudo em secções que, se se tratasse de aço-carbono comum, dificilmente teriam a resistência alterada.

Geralmente esse aumento da resistência é conseguido pela adição de um ou vários elementos de liga em teores relativamente baixos, não ultrapassando sua soma o valor 5 %. Nessas condições, os princípios fundamentais dos tratamentos térmicos permanecem, porque, ainda que a presença de novos elementos de liga obriguem a um ajuste nas temperaturas dos tratamentos, a transformação da austenita e as estruturas resultantes são as mesmas que ocorrem nos aços-carbono.

A obtenção dos outros característicos, de **d** a **h**, requer a introdução dos elementos de liga em teores mais elevados, produzindo-se alterações mais profundas na ferrita, além de resultarem carbonetos mais complexos. Agora, os tratamentos térmicos também devem ser mudados, para facilitar muitas vezes a formação dos carbonetos especiais.

Esses aços de alto teor em liga são muito difíceis de fabricar e de tratar termicamente de modo que são muito dispendiosos,

TABELA VIII

Efeitos específicos dos elementos de liga no aço
(Metals Handbook - Ed. 1948)

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a Ferrita	Influência sobre a Austenita (Endurecibilidade)	Influência exercida através dos carbonetos		PRINCIPAIS FUNÇÕES
	No ferro γ	No ferro α			Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
Al	1,1% (aumentada pelo C)	36%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Aumenta endurec. moderadamente se dissolvido na austenita	Negativa (grafitiza)	—	1 — Desoxidante eficiente 2 — Restringe o crescimento de grão (pela formação de óxidos ou nitretos dispersos) 3 — Elemento de liga nos aços para nitratação
Cr	12,8% (20% com 0,5% C)	Sem limites	Endurece ligeiramente; aumenta a resistência à corrosão	Aumenta endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn Menor que o W	Moderada Resiste à diminuição de dureza	1 — Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação 2 — Aumenta a endurecibilidade 3 — Melhora a resist. a altas temperaturas 4 — Resiste ao desgaste (com alto C)
Co	Sem limites	75%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Diminui endurec. no estado dissolvido	Semelhante ao Fe	Sustenta dureza pela solução sólida	1 — Contribui à dureza à quente pelo endurecimento da ferrita
Mn	Sem limites	3%	Endurece acentuadamente — reduz um tanto a plasticidade	Aumenta endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe Menor que o Cr	Muito pequena nos teores normais	1 — Contrabalança a fragilidade devida ao S 2 — Aumenta a endurecibilidade economicamente
Mo	3% \pm (8% com 0,3% C)	37,5%	Produz o sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo	Aumenta endurecibilidade fortemente (Mo > Cr)	Forte; maior que Cr	Opõe-se à diminuição de dureza criando a dureza secundária	1 — Eleva a temp. de cresc. de grão da austenita 2 — Produz maior profundidade de endurecimento 3 — Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4 — Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5 — Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6 — Forma partículas resistentes à abrasão
Ni	Sem limites	10% (sem relação com o teor do carbono)	Aumenta a resistência e a tenacidade por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade ligeiramente; mas tende a reter a austenita com C mais elevado	Negativa (grafitiza)	Muito pequena em teores baixos	1 — Aumenta a resist. de aços recozidos 2 — Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas) 3 — Torna austeníticas ligas Fe-Cr altas em Cr
P	0,5%	2,8% (sem relação com o teor do carbono)	Endurece fortemente por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade	Nenhuma	—	1 — Aumenta a resist. de aços de baixo C 2 — Aumenta a resist. à corrosão 3 — Aumenta usinabilidade em aços de usinagem fácil
Si	2% \pm (9% com 0,35% C)	18,5% (não muito alterada pelo C)	Endurece com perda de plasticidade (Mn < Si < P)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	Sustenta a dureza por solução sólida	1 — Desoxidante 2 — Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3 — Aumenta a resistência à oxidação 4 — Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes 5 — Aumenta a resistência de aços de baixo teor de liga
Ti	0,75% (1% \pm com 0,20% C)	6% \pm	Produz sistema endurec. por precipitação em ligas Ti-Fe com alto Ti	Provavelmente aumenta muito a endurec. no estado dissolvido. Os efeitos de carbonetos reduzem-na.	A maior conhecida (2% Ti torna aços com 0,5% não endurecíveis)	Carbonetos persistentes provavelmente não afetados. Algum endurecimento secundário.	1 — Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cr de médio Cr. 2 — Impede a formação de austenita em aços de alto Cr.
W	6% (11% com 0,25% C)	33%	Idem em ligas W - Fe com alto W	Aumenta endurec. fortemente em pequenos teores	Forte	Opõe-se à diminuição de dureza por endurecimento secundário.	1 — Forma partículas duras e resist. ao desgaste em aços-ferramenta 2 — Promove dureza e resistência a altas temperaturas
V	1% (4% com 0,20% C)	Sem limites	Endurece moderadamente por solução sólida	Aumento muito fortemente a endurec. no estado dissolvido	Muito forte (V < Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário.	1 — Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino do grão) 2 — Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3 — Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário.

mesmo porque alguns dos elementos de liga utilizados são raros. Essa é a principal razão porque a tonelagem total produzida de aços de alto teor em liga é ainda muito pequena.

Da quantidade total de aços-liga produzida, cerca de 60 % pertence à série 86XX, com 3 elementos de liga (Ni - Cr - Mo) em baixos teores.

A Tabela VIII, adaptada do «Metals Handbook» resume o efeito dos elementos de liga sobre os aços.

A Figura 46 dá uma idéia clara da influência dos elementos níquel e cromo sobre os valores obtidos no ensaio de tração de um aço com 0,2 % de carbono laminado a quente.

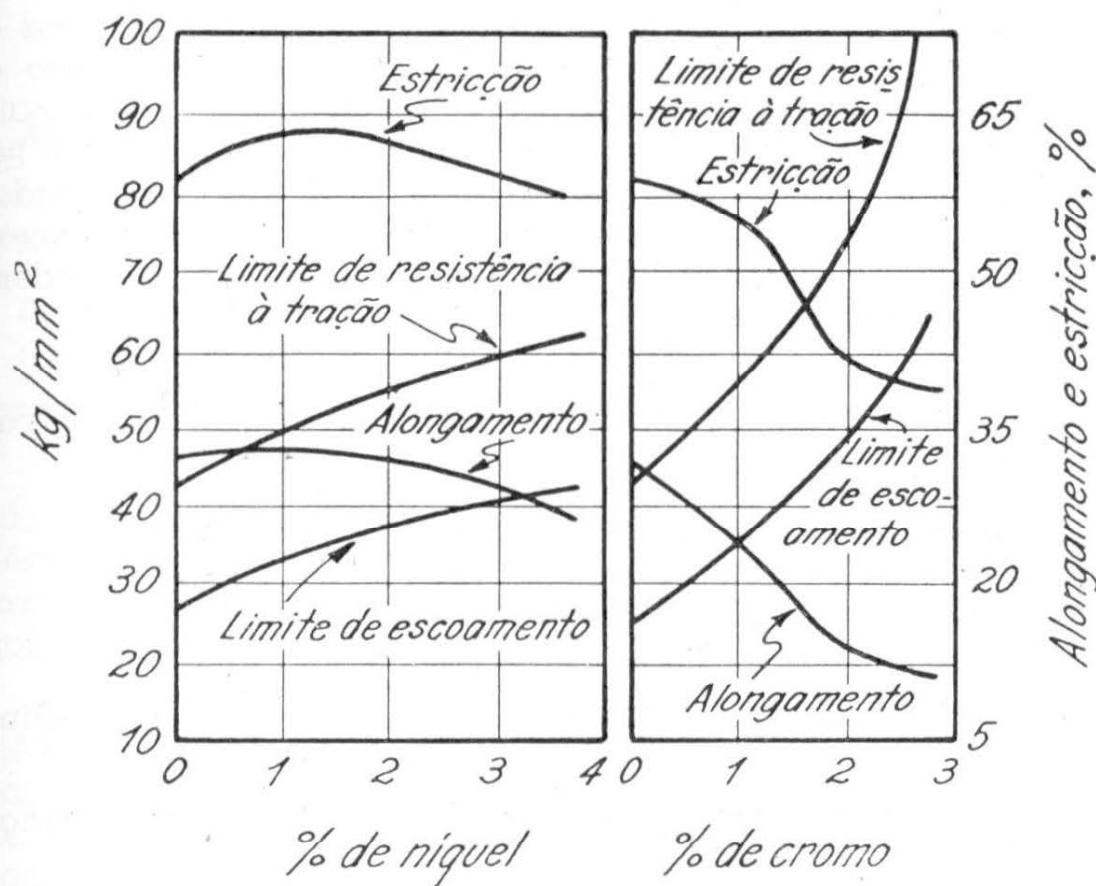


FIG. 46 — Efeito do Ni e do Cr sobre propriedades mecânicas de aço com 0,20 % de C laminado. (Figura extraída do livro «Modern Metallurgy for Engineers» de F. T. Sisco).

V I I I

AÇOS PARA FUNDIÇÃO

1 — **Introdução** — **Aço fundido** é aquele que é vasado em moldes de areia ou metálicos onde solidifica e adquire forma praticamente definitiva, sem necessidade de qualquer transformação mecânica posterior.

O grande emprêgo de aço em peças fundidas é devido ao fato de se obter dessa maneira produtos de custo relativamente baixo, suficientemente resistentes e tenazes.

Os requisitos mais importantes em peças de aço são: homogeneidade (secção sã em tôda a extensão), granulação fina e completa isenção de tensões internas. O primeiro requisito é alcançado mediante projeto adequado da peça, com os canais devidamente localizados e mediante desoxidação conveniente na fundição; os outros, através de tratamento térmico apropriado, pois as peças no estado fundido apresentam estrutura excessivamente grosseira e dendrítica e tensões internas que podem causar empenamento quando em serviço.

Podem ser consideradas cinco classes de aços fundidos comerciais:

- a) aços de baixo carbono (C inferior a 0,20%);
- b) aços de médio carbono (C entre 0,20 a 0,40%);
- c) aços de alto carbono (C acima de 0,40%);
- d) aços-liga de baixo teor em liga (teor total de liga inferior a 8%);
- e) aços-liga de alto teor em liga (teor total de liga superior a 8%).

2 — **Aços-carbono para Fundição** — As três primeiras classes acima, em que o C varia desde menos do que 0,20% até acima de 0,50%, contêm os outros elementos normalmente presentes nos aços, nos seguintes teores:

Mn — 0,50 % a 1,00 %

Si — 0,20 % a 0,70 %

P — 0,05 % max.

S — 0,06 % max.

As suas propriedades mecânicas variam com o teor de carbono, como pode ser verificado na Tabela IX.

TABELA IX

Propriedades de aços-carbono fundidos no estado normalizado.
(Adaptada do livro «Engineering Metals and Their Alloys» de
C. H. Samam)

PROPRIEDADES	Baixo C	Médio C	Alto C
Limite de resistência à tração (kg/mm ²)	29,5 — 49,0	42,0 — 56,0	49,0 — 84,0
Limite de escoamento, (kg/mm ²)	14,0 — 26,5	21,0 — 28,0	24,5 — 52,5
Alongamento, % (em 2")	35 — 22	30 — 20	25 — 3
Estricção, %	64 — 30	40 — 30	40 — 2
Dureza Brinell (10 mm — 3.000 kg)	90 — 143	130 — 325	156 — 500

Dentre os aços-carbono, os mais empregados para fundição são os de médio carbono, no estado normalizado. A aplicação desses aços faz-se sobretudo na indústria automobilística, ferroviária, naval, fabricação de tratores, maquinário agrícola, maquinário para construção, equipamento elétrico, etc.

Os aços de baixo carbono limitam-se a certo equipamento elétrico, a peças destinadas a serem cementadas como engrenagens, etc., e os aços de alto carbono são utilizados na fundição de cilindros de laminadores, matrizes e moldes especiais e uma variedade de peças em que se deseja considerável dureza e apreciável resistência ao desgaste.

3 — **Aços-liga para Fundição** — São considerados aços-liga para fundição aqueles em que os elementos de liga, residuais ou propositadamente adicionados, aparecem em teores superiores aos seguintes :

Mn — 1,00 %

Mo — 0,10 %

Si — 0,70 %

V — 0,05 %

Ni — 0,50 %

W — 0,05 %

Cu — 0,50 %

Ti — 0,05 %

Cr — 0,25 %

Al — 0,05 %

Os elementos de liga são adicionados, como seria de se prever, com o objetivo de aumentar a resistência mecânica e a tenacidade, além de melhorar a resistência ao desgaste e à corrosão. Estes dois últimos objetivos são melhor alcançados mediante o emprêgo de ligas em altos teores. Neste Capítulo o estudo será limitado aos aços-liga de baixo teor em liga, que constituem uma porção apreciável dos aços empregados em fundição.

O aço para fundição de baixo teor em liga apresenta normalmente os teores seguintes de elementos de liga:

Ni	—	0,25	α	5,00	%	Si	—	0,20	α	2,75	%
Mn	—	0,50	α	3,00	%	V	—	0,10	α	0,65	%
Cr	—	0,35	α	6,50	%	W	—	0,75	α	1,50	%
Mo	—	0,20	α	1,00	%	Cu	—	0,15	α	2,75	%

Com êsses aços pode-se conseguir resistência à tração da ordem de 140 kg/mm² desde que sejam tomadas as devidas precauções na fundição das peças e os tratamentos térmicos sejam convenientemente aplicados.

Aços para fundição ao níquel — São caracterizados por altas resistência e tenacidade (vêr gráfico da Fig. 46). Com níquel em torno de 2,5 % as propriedades mecânicas variam de 49,0 α 59,5 kg/mm² para limite de resistência à tração, 35,0 kg/mm² aproximadamente para limite de escoamento, alongamento em 2" em torno de 35 %, estrição em torno de 65 % e resiliência Izod de 4 α 10 kgm. São particularmente indicados em equipamento ferroviário, maquinário de mineração e escavação, equipamento marítimo, laminadores, pontes, engrenagens, etc.

Aços para fundição ao níquel-cromo — Constituem um grupo importante, pois a adição de cromo aumenta a profundidade de endurecimento, os limites de resistência à tração e de escoamento, a resistência ao desgaste, a ductilidade e a resiliência em relação ao tipo contendo somente níquel. Geralmente, êsses dois elementos são introduzidos na relação 2,5 de Ni para 1 de Cr. O teor de Cr pode variar de 0,50 α 2,00 %. Êsses aços são usualmente temperados e revenidos.

Uma adição de 0,20 α 0,60 % de molibdênio melhora a endurecibilidade dêsses aços tornando-os endurecíveis ao ar, de modo que êles devem ser revenidos depois de normalizados.

Aços para fundição de médio manganês — Adicionando-se em aços com carbono variando de 0,25 α 0,50, manganês em teores médios — 1,00 α 3,00 % — melhora-se grandemente a sua tenacidade e a resistência ao choque.

E' muito comum melhorar ainda mais as propriedades mecânicas dêsses aços pelas seguintes adições:

— **níquel** que aumenta a resiliência e diminui a fragilidade de revenido. (o aço torna-se, entretanto, endurecível ao ar);

— **cromo** que aumenta a resistência mecânica e a resistência ao desgaste, (a resiliência é, entretanto, um tanto prejudicial);

— **molibdênio** que aumenta os limites de resistência à tração, escoamento e a fluência a temperaturas elevadas; os aços ainda adquirirão granulação fina e serão endurecíveis ao ar;

— **vanádio** ou titânio, que aumentam o limite de escoamento e a resiliência, refinando ainda o grão.

Todos os tipos de aço acima são geralmente temperados e revenidos ou normalizados e revenidos, sobretudo nos casos em que as condições de serviço implicam em choques apreciáveis como em peças fundidas para locomotivas ou equipamento ferroviário. Outras aplicações dos aços de médio manganês para fundição, com ou sem os outros elementos de ligas, são: peças de escavadeiras, de tratores, maquinários de estradas, enfim, equipamento onde se requer tenacidade e resistência ao desgaste.

Aços para fundição ao molibdênio ou ao molibdênio-vanádio

— Quando as peças fundidas não são indicadas para têmpera em água ou óleo, procura-se conferir ao aço-carbono propriedades de endurecimento ao ar, o que se consegue, em aços com carbono médio (0,30 a 0,40) pela adição de 0,30 a 0,50 % de molibdênio, ou pela adição simultânea de 0,30 % de Mo e 0,10 de V. Esses aços, com tratamento térmico adequado, podem alcançar limite de resistência à tração da ordem de 70 kg/mm², alongamento de cerca de 25 a 20 %, estrição de 60 a 65 % e resiliência Charpy variando de 4,8 a 6,2 kgm.

O «Cast Metals Handbook», editado pela «American Foundrymen's Association» apresenta dados condensados, mas completos sobre todos os tipos de aços para fundição, devendo ser utilizado com fonte de referência pelos engenheiros e metalurgistas que se interessam pelo assunto.

4 — Tratamentos Térmicos dos Aços para Fundição — O principal objetivo do tratamento térmico das peças de aço fundido é, como se sabe, refinar a granulação, destruindo a textura bruta ou dendrítica típica desses materiais. Frequente também, principalmente nos aços-liga, é a têmpera seguida, evidentemente, do revenido.

Para normalizar a textura bruta de fusão, os tratamentos recomendados são recozimento ou normalização, preferindo-se este último devido às melhores propriedades mecânicas que resultam. Nos casos em que a normalização produzir tensões devido ao tipo de aço, deve-se revenir o que melhora também a ductilidade. Para os aços de composição normal a temperatura de recozimento ou de normalização é geralmente da ordem de 900° C e o tempo deve ser o necessário para assegurar máxima uniformidade de

aquecimento e temperatura através de toda a secção. No recozimento, é preciso que a carga esfrie até 260° C ou menos antes de ser retirada do interior do forno. Quando o revenido é necessário, após normalização, para alívio de tensões, a temperatura pode ser 400° C durante 2 horas, sem que as propriedades mecânicas sejam afetadas; se fôr necessário melhorar a ductilidade e a resiliência, mesmo à custa da resistência, a temperatura de revenido deve subir a 540°-700° C.

Para peças muito pesadas, de grande secção, muitas vezes é necessário um tratamento múltiplo: normalização a 900° C, recozimento a 840° C e prolongado coalescimento a 675°-705° C, para destruir completamente a textura bruta de fusão e produzir máxima ductilidade.

A têmpera é aplicada principalmente em aços-liga, mas mesmo nos aços-carbono é essa operação utilizada com o fim de melhorar as propriedades mecânicas.

Antes da têmpera, as peças geralmente devem ser recozidas ou normalizadas, visto que êstes tratamentos homogenizam a estrutura, diminuindo os perigos de fissuração na têmpera. Devido a êsses tratamentos prévios, a temperatura de têmpera é inferior à utilizada no recozimento ou na normalização (885°-855° C conforme o teor de C) e o tempo de aquecimento é também mais curto. Água ou óleo são usados como meios de esfriamento, dependendo do teor de carbono. A temperatura do revenido posterior varia de 425° a 700° C, durante cêrca de 12 horas.