

X V I

AÇOS PARA FERRAMENTAS E MATRIZES

1 — **Introdução** — Os aços para ferramentas e matrizes são provavelmente os aços que requerem maior atenção e cuidados sob o ponto de vista de fabricação, desde a fundição até o tratamento térmico final. Isso é perfeitamente justificável, tendo em vista os requisitos que êles devem preencher. De fato, êsses aços, além de terem que apresentar alta dureza e elevada resistência ao desgaste, devem possuir mais os seguintes característicos: endurecibilidade satisfatória, elevada resistência mecânica, elevada resiliência, usinabilidade razoável, resistência ao calor, etc. Não basta, pois, que um aço para ferramenta ou matriz, possua uma dureza superior à do material sob usinagem ou conformação ou que sua resistência ao desgaste seja suficientemente elevada de modo a prolongar a vida da ferramenta o necessário para compensar seu elevado preço de custo; é também indispensável que sua profundidade de endurecimento permita uniformidade de característicos mecânicos através de toda a secção; que resista aos choques inerentes de todas as operações de usinagem e conformação; que seja capaz de absorver energia tanto estática como dinâmica sem aparecimento de falhas; que possua limite elástico ou de escoamento relativamente elevado; que possa ser conformado sem dificuldades especiais; que retenha finalmente as formas e as dimensões às temperaturas por vezes elevadas que se desenvolvem durante as operações de usinagem e conformação.

As altas dureza e resistência ao desgaste são conseguidas através de um alto teor de carbono; no caso mais simples, em que não se adiciona quaisquer outros elementos de liga ou que os teores dêstes são insuficientes para afetar a endurecibilidade, o aço deverá ser temperado em água.

Para aumentar a endurecibilidade e melhorar os outros característicos físicos, adiciona-se elementos de liga em quantidades variáveis; nessas condições o aço poderá ser temperado em óleo ou mesmo ao ar, conseguindo-se obter estrutura inteiramente martensítica mesmo em secções espessas.

Os aços-liga para ferramentas e matrizes foram introduzidos em 1890 por Taylor, um dos pioneiros no estudo e adoção de métodos científicos de administração de emprêsas, e White. Êsse desenvolvimento revolucionou os métodos de corte dos metais, mesmo porque posteriormente Taylor dirigiu as primeiras experiências no sentido de determinar as velocidades de corte, profundidades de corte e os avanços mais convenientes.

2 — **Classificação dos aços para ferramentas e matrizes** — Adotou-se neste trabalho, com algumas modificações, a classificação elaborada pela «Sub-Comissão de Aços-Ferramenta» da

„American Society for Metals». De acôrdo com essa classifica-
ção, êsses aços estão agrupados da seguinte maneira:

I — Aços ao carbono:

- A — Aços-carbono comuns
- B — Aços-carbono-cromo
- C — Aços-carbono-vanádio

II — Aços indeformáveis:

A — De baixa liga e temperáveis em óleo:

- 1 — De baixo manganês
- 2 — De alto manganês
- 3 — Ao tungstênio

B — De baixa liga e temperáveis ao ar:

- 1 — Ao manganês
- 2 — Ao cromo

C — De alta liga e temperáveis em óleo:

- 1 — De alto carbono e alto cromo

D — De alta liga e temperáveis ao ar:

- 1 — Com 1,0% de carbono e alto cromo
- 3 — Com 2,0% " " "
- 2 — Com 1,5% " " "

III — Aços resistentes ao choque:

- A — Ao cromo-vanádio
- B — Ao manganês e baixo silício
- C — Ao manganês e alto silício
- D — Ao tungstênio

IV — Aços para trabalho a quente:

A — Ao cromo:

- 1 — Com 0,65% de carbono
- 2 — Com 0,90% "

B — Ao cromo-molibdênio.

C — Ao cromo-tungstênio:

- 1 — com 5% de Cr e 5% de W
- 2 — com 7,5% de Cr e 7,5% de W

D — Ao molibdênio:

- 1 — baixo Mo
- 2 — alto Mo

- E — Ao tungstênio:
- 1 — com 9% de W
 - 2 — com 12% " "
 - 3 — com 15% " "
 - 4 — com 18% " "

V — **Aços rápidos:**

- A — Ao molibdênio:
- 1 — com vanádio
 - 2 — com baixo tungstênio e 1% de vanádio
 - 3 — com alto tungstênio e 2% " "
 - 4 — com " " e 4% " "
- B — Ao molibdênio e cobalto:
- 1 — baixo tungstênio e 5% de cobalto
 - 2 — " " e 8% " "
 - 3 — alto tungstênio e 5% " "
 - 4 — " " e 8% " "
- C — Ao tungstênio:
- 1 — com 18% de tungstênio e 1% de vanádio
 - 2 — com 18% " " e 2% " "
 - 3 — com 18% " " e 3% " "
- D — Ao tungstênio-cobalto:
- 1 — com 14% de W, 2% de V e 5% de Co
 - 2 — com 18% " " 1% " " e 5% " "
 - 3 — com 18% " " 2% " " e 9% " "
 - 4 — com 20% " " 2% " " e 12% " "

VI — **Aços para ferramenta e matrizes miscelâneos:**

- A — De baixo carbono para matrizes de plásticos ou de fundição sob pressão.
- B — Ao níquel-cromo:
- 1 — de baixo carbono e baixo cromo
 - 2 — de baixo carbono e médio cromo
 - 3 — de alto carbono e baixo cromo
- C — Ao cromo.
- D — Ao níquel-cromo-molibdênio:
- 1 — com 0,70 de C e 0,30 de Mo
 - 2 — com 0,50 " " e 0,30 " "
 - 3 — com 0,55 " " e 0,75 " "
- E — Ao cromo-molibdênio.
- F — Ao cromo-manganês.
- G — Ao cromo-manganês-molibdênio.

VII — **Aços-grafíticos:**

A — Ao silício.

B — Ao níquel.

C — Ao alumínio.

D — Ao molibdênio.

E — Ao molibdênio-tungstênio

Verifica-se que os elementos de liga mais importantes nos aços para ferramentas e matrizes são os que possuem forte afinidade pelo carbono e têm a tendência a formar carbonetos. Os elementos que se dissolvem na ferrita e tendem a decompor os carbonetos produzindo grafita livre, como o níquel e o silício, só são adicionados em casos especiais.

A atuação dos vários elementos de liga nos aços para ferramentas e matrizes é a seguinte :

— **carbono** — é o elemento essencial, pois é êle que confere dureza e resistência ao desgaste; seu teor geralmente é eutetoide ou hiper-eutetoide pois as partículas de carboneto não dissolvido aumentam grandemente a resistência ao desgaste, prolongando a vida da ferramenta. Entretanto, há também aços para ferramentas com teor de carbono inferior ao eutetoide; de fato a melhora da dureza e da resistência ao desgaste faz-se com sacrifício da ductilidade e da tenacidade, de modo que quando êstes últimos característicos são importantes — no caso de um formão, por exemplo — é-se forçado a baixar o carbono, até cêrca de 0,60 %;

— **silício** — geralmente em teores baixos — sua função é de desoxidante; como se dissolve na ferrita e tende a decompor os carbonetos, nunca é usado sozinho como elemento de liga, a não ser que se procure propositadamente formar grafita livre (aços grafíticos); em combinação com o manganês, melhora apreciavelmente o limite de fadiga;

— **manganês** — adicionado devido suas propriedades desoxidantes, melhora também a endurecibilidade e como produz a queda da temperatura e do teor de carbono do eutetoide contribue para diminuir a fragilidade para uma mesma dureza;

— **cromo** — dissolve-se tanto na ferrita como forma carbonetos; refina e reforça a ferrita, melhora a dureza e contribue para a estabilidade dos carbonetos. Devido sua ação simultânea na ferrita e em carbonetos, a melhora da dureza é realizada sem aumento da fragilidade;

— **vanádio** — atua como desoxidante e impede o crescimento do grão da austenita; no mais, atua mais ou menos como o cromo;

— **tungstênio** — é essencialmente um formador de carbonetos, melhorando a dureza do aço. Talvez sua ação mais importante seja a de conferir ao aço grande estabilidade a altas temperaturas, produzindo a chamada «**dureza a quente**», de grande importância nas ferramentas operando a velocidades apreciáveis;

— **molibdênio** — dissolve-se na ferrita e também tende a formar carbonetos, sem que esta última tendência seja tão pronunciada como no caso do cromo e do tungstênio. Usa-se o molibdênio como um substituto parcial para o tungstênio — condição importante no caso da falta deste. A prática mostra que apenas a metade da quantidade de molibdênio, em relação à de tungstênio, produz propriedades comparáveis (por exemplo, 6% Mo + 5% W equivalem a 18% de W);

— **cobalto** — confere maior resistência ao desgaste apesar de prejudicar a tenacidade; é o único elemento de liga que diminui a endurecibilidade; mas esse efeito não é muito significativo nos aços para têmpera ao ar, onde o cobalto é comumente usado.

3 — **Aços-carbono para ferramentas (Tabela XXIII)** — Os aços apresentando o carbono como principal elemento de liga são os mais simples dentre os utilizados em ferramentas. São, na realidade, esses os aços mais generalizados nas formas mais comuns e leves de usinagem. Neles, a tenacidade é garantida pela manutenção de uma granulação fina.

A escolha do tipo apropriado de aço-carbono para ferramenta depende, evidentemente, das condições de serviço. Geralmente os diversos tipos são classificados pela porcentagem de carbono e de acordo com o teor desse elemento, pode-se estabelecer uma escala, como se vê abaixo, correspondendo à tenacidade e dureza do aço :

0,50 %	C	— simplesmente tenaz;
0,60 %	C	— muito tenaz, com característicos adequados para têmpera e revenido; resistente ao choque;
0,70 %	C	— tenacidade excelente e gume cortante; resistente ao choque;
0,80 %	C	— tenaz e resistente ao choque;
0,90 %	C	— gume cortante satisfatório aliado a boa tenacidade;
1,00 %	C	— gume cortante e tenacidade aproximadamente idênticos;
1,20 %	C	— grande dureza aliada a certa tenacidade;
1,30 %	C	— grande dureza no gume cortante; a tenacidade é menos importante;
1,40 %	C	— o primeiro requisito é grande dureza no gume cortante; a tenacidade é secundária.

TABELA XXIII

Aços-Carbono para Ferramentas

TIPO	COMPOSIÇÃO, %					TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS				
	C	Mn	Si	Cr	V	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de deformabilidade	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Resistência ao amolecimento pelo calor	Usinabilidade		
I A	0,60 — 1,40	0,25	0,25	—	—	760	Água	Pequena	Pequena	Bôa	Regular a Bôa	Pequena	Exce-lente		
I B	0,60 — 1,40	0,25	0,25	0,20 — 0,75	—	α	ou Sal-moura	Pequena	Pequena	Bôa	Regular a Bôa	Pequena	Exce-lente		
I C	0,60 — 1,40	0,25	0,25	—	0,20 — 0,50	900	—	Pequena	Pequena	Bôa	Regular a Bôa	Pequena	Exce-lente		

Assim sendo, as aplicações dos vários tipos de aço-carbono para ferramentas são as seguintes :

— **aços com carbono até 0,80 %** — martelos, ferramentas de ferreiro, matrizes para forjamento a quente em matriz, etc. — ou seja, emprêgos onde se exige grande tenacidade aliada a conveniente dureza, além de alta resistência ao choque;

— **aços com carbono de 0,80 a 1,00 %** — formões, punções, ferramentas pneumáticas, lâminas de tesoura, matrizes para estampagem profunda, etc. — ou seja, emprêgo onde se exige superfície dura com considerável tenacidade, além de certa resistência ao desgaste e bôa resistência ao choque;

— **aços com carbono de 1,00 a 1,20 %** — frezas, mandrís, matrizes para corte, embutimento, navalhas, etc. — ou seja, aplicações em que é essencial gume cortante de grande dureza, além de bôa resistência ao desgaste;

— **aços com carbono de 1,20 a 1,40 %** — ferramentas de tornos, plainas, brocas, limas, matrizes para cunhagem, estiramento, etc. — ou seja, emprêgos em que se exige gume cortante de máxima dureza e máxima durabilidade, além de alta resistência ao desgaste.

A introdução do cromo em baixos teores nos aços-carbono para ferramentas tem duas finalidades: aumentar ligeiramente a profundidade de endurecimento e melhorar ligeiramente a resistência ao desgaste. O vanádio irá melhorar ligeiramente a tenacidade.

Para os aços-carbono utilizados em ferramenta, as curvas em C têm a forma da Figura 50, representativa de um aço com 1,12 % de carbono. Verifica-se que tais aços devem ser resfriados rapidamente até 500° C para evitar a formação de perlita fina.

4 — **Aços indeformáveis** (Tabela XXIV) Na prática não existe aços que sejam absolutamente indeformáveis, pois todos êles, durante a têmpera, sofrem alterações na forma, nas dimensões, etc. Os aços para ferramentas chamados «indeformáveis» são os menos sujeitos a essas variações, razão pela qual sua principal utilização é feita em ferramentas e matrizes para trabalho a frio onde é imprescindível rigorosa conservação da forma e dimensões. Para melhor garantia dessa inalterabilidade evita-se, no tratamento de têmpera, esfriamento em água, recomendando-se, pois, a têmpera em óleo ou ao ar. As aplicações mais importantes dêsses aços, através dos seus vários tipos representados na Tabela XXIV são: matrizes para os mais diversos fins, como estampagem profunda, estiramento e trefilação, cunhagem, para tirar rebarbas, rosqueamento, matrizes para plásticos, diversos tipos de ferramentas, tais como punções, brochas, alargadores, lâminas

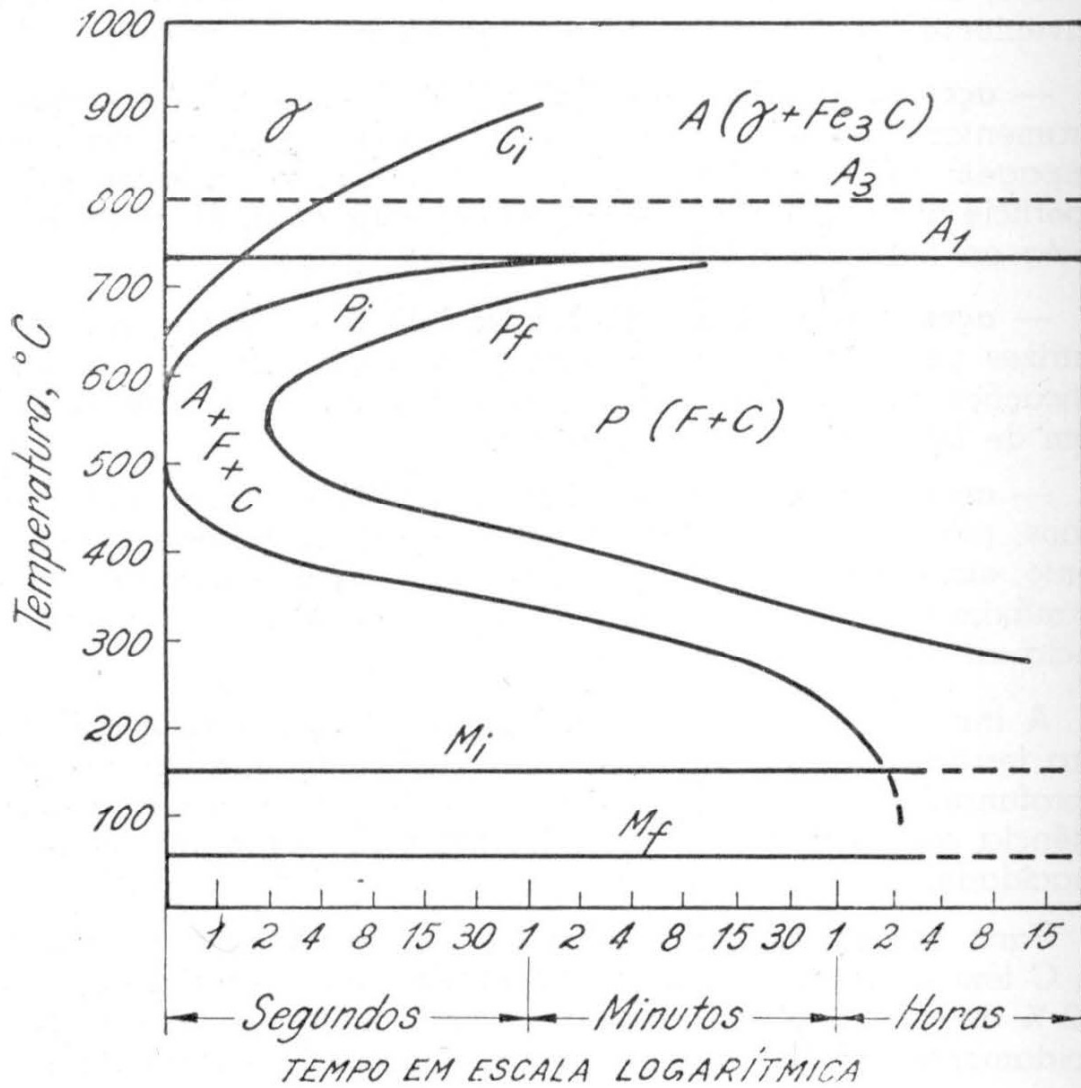


FIG. 50 — Curva em C para aço com 1,12 % de carbono.

de tesoura, ferramentas para corte de madeira, calibres, e certas peças de máquinas-ferramenta. A profundidade de endurecimento desses aços é geralmente grande. Quanto à sua resistência ao desgaste, verifica-se que ela varia de boa a excelente, os melhores tipos nesse sentido sendo os que apresentam maior quantidade de carbonetos, por exemplo II C1 e II D3 onde não só o carbono é elevado, como também o teor de elementos de liga é apreciável. A usinabilidade varia com o teor de ligas

TABELA XXIV
Aços Indeformáveis

TIPO	COMPOSIÇÃO, %							TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS				
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de In- deformabi- lidade	Tenaci- dade	Resis- tência ao des- gaste	Resis- tência ao amo- lecimen- to pelo calor	Usina- bilidade
II A1	0,90	1,20	0,25	0,50	0,20 *	0,50	—	—	—	790 — 815	Óleo	Média	Muito bóia	Regu- lar	Bóia	Peque- na	Bóia
A2	0,90	1,60	0,25	0,35 *	0,20 *	—	0,30 *	—	—	760 — 805	—	—	—	—	—	—	—
A3	1,20	0,25	0,25	0,50	0,25	1,75	0,25 *	—	—	855 — 885	—	—	—	—	—	—	—
II B1	0,90	2,50	0,30	1,50	—	—	1,00	—	—	790 — 870	Ar	Gran- de	Exce- lente	Regu- lar	Peque- na	Regu- lar	Regu- lar
B2	1,00	0,50	0,25	5,00	0,50 *	—	1,00	—	—	925 — 985	—	—	—	—	—	—	—
II C1	2,15	0,35	0,35	12,00	1,00 *	1,00 *	—	—	0,50 *	955 — 995	Óleo	Gran- de	Muito bóia	Regu- lar	Exce- lente	Peque- na	Peque- na
II D1	1,00	0,35	0,35	12,00	0,50 *	—	0,89	—	1,00 *	970 — 1010	Ar	Gran- de	Exce- lente	Peque- na	Exce- lente	Regu- lar	Peque- na
D2	1,50	0,35	0,35	12,00	0,50 *	—	0,80	3,50 *	—	985 — 1040	—	—	—	—	—	—	—
D3	2,15	0,35	0,35	12,00	0,50 *	—	0,80	—	—	985 — 1025	—	—	—	—	—	—	—

* Elemento opcional. Os aços têm propriedades satisfatórias com ou sem esses elementos.

presentes: os mais usináveis, aqueles cuja usinabilidade pode ser comparada à dos aços-carbono para ferramentas são os que possuem pequena quantidade de elementos de liga. A seleção do tipo mais adequado dependerá principalmente da resistência ao desgaste desejada e da alteração de forma e dimensões esperadas na têmpera. A tenacidade e a usinabilidade, além da resistência ao desgaste, podem também constituir fatores ponderáveis, assim como o custo e a facilidade de fabricação. No caso, por exemplo, dos aços II D, de alto cromo, na escolha dentre eles, a usinabilidade e a tenacidade devem ser levadas em conta, pois ao passo que o tipo II D3 tem maior resistência ao desgaste, os tipos II D1 e II D2 são mais tenazes e possuem melhor usinabilidade.

A curva TTT de um aço indeformável pertencente ao grupo de alto teor em manganês é a mostrada na Figura 22 (pág. 35).

Pode-se notar a influência desse elemento sobre a posição das curvas em C, permitindo endurecimento uniforme em grande secções, o que é particularmente vantajoso no caso de matrizes de dimensões apreciáveis.

Os aços de alto carbono e alto cromo, principalmente os tipos II C1, II D2 e II D3, além do tipo II B2 (alto cromo e temperável ao ar) são suscetíveis de apresentarem retenção da austenita, se a têmpera for realizada de temperaturas acima das recomendadas na Tabela XXIV. A dureza resultante poderá apresentar valores baixos e, além disso, no revenido subsequente em torno de 540° C, poderá surgir o fenômeno da «dureza secundária», o qual será abordado com maiores pormenores no estudo dos aços rápidos, onde aquele fenômeno é usual.

O revenido dos aços indeformáveis deve ser levado a efeito mediante um aquecimento lento até a temperatura especificada, a qual varia de 160° a 260° para os tipos II A1, II A2 e II B1, de 175° a 290° C para o tipo II A3 e de 175° a 540° C para os tipos restantes, devendo, entretanto, ser chamada a atenção para o fato de que a temperatura de 540° C só é utilizada quando a temperatura de têmpera é elevada.

5 — Aços resistentes ao choque para ferramentas (Tabela XXV) — São esses, aços de médio carbono e podem apresentar alto silício, alto manganês, cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio em baixos teores. São aços tenazes, duros, com boa resistência à fadiga, conjunto de característicos que os torna indicados em aplicações para suportar choques, como punções, cinzeis, ferramentas pneumáticas, talhadeiras, matrizes e punções para corte, cunhagem, etc...

As temperaturas de têmpera e os meios de esfriamento são dados na Tabela XXV. As temperaturas de revenido variam de 150° a 425° C para os tipos III A, III B e III C e 205° a 540° C para os tipos III D e III E.

6 — **Aços para trabalho a quente** (Tabela XXXVI) — Todos êsses aços apresentam cromo como elemento de liga. No caso do teor dêsse elemento ser relativamente elevado, como os tipos A1, A2, B, C1 e C2, é conveniente temperar-se ao ar, sobretudo sendo também alto o carbono, pois em óleo poderão fissurar. A introdução de molibdênio melhora apreciavelmente as características de endurecibilidade ao ar a tal ponto que, em muitos casos, é preciso usar-se uma temperatura de revenido muito mais elevada que a usada para as outras composições.

Os aços para trabalho a quente em que o cromo é o principal elemento de liga (como A1, A2 e B) apresentam resistência mecânica e ao desgaste médias. Sua indeformabilidade é satisfatória até temperaturas da ordem de 315° C.

Quando se introduz tungstênio, desde 3 % até 19 % mantendo-se o cromo médio e o carbono relativamente baixo, além de vanádio sempre presente, (tipos E1 a E4) as temperaturas de utilização no trabalho a quente podem subir a cêrca de 600° C. Nesses aços, quanto maior o carbono, menor a ductilidade e quanto maior o tungstênio tanto maior a dureza a quente: nessas condições êsses aços só são recomendáveis para temperaturas acima de 540° C quando o tungstênio fôr superior a 12 %. O vanádio aparentemente melhora a resistência à fadiga e contribue para aumentar a resistência ao amolecimento a altas temperaturas.

Os aços contendo teores idênticos de cromo e tungstênio (tipos C1 e C2) são usados para aplicações em que as temperaturas de trabalho não devam ultrapassar 370° C. O Cr e o W nos teores mais elevados (6,5 a 7,5 %) conferem maior dureza sobretudo a quente. Os aços com êsses elementos nos teores mais baixos (5 a 6 %) apresentam melhor resistência ao choque. O vanádio, elemento opcional, melhora a resistência à fadiga.

Devido aos característicos acima expostos, os aços do grupo IV, para trabalho a quente, são empregados nas seguintes aplicações:

— aplicações gerais de trabalho a quente onde as temperaturas de operação não são excessivamente altas, como em certas ferramentas e matrizes utilizadas no forjamento a quente — tipos A, B e C (C1);

— para operação em alta temperatura onde se requer máxima dureza a quente e máxima resistência ao amolecimento, como blocos e dispositivos para matrizes a quente (forjamento, prensagem, fundição por gravidade ou sob pressão, moldes para materiais plásticos, etc.) — tipos E — E1, E2 e E3 — para blocos de matrizes, punções e punções de tirar rebarbas a quente, lâminas de tesoura para corte a quente e E4 para moldes de materiais plásticos; o tipo C1, com Cr e W mais baixos, também é utilizado em matrizes e em punções para tirar rebarbas a quente.

TABELA XXV
Aços para Ferramentas resistentes ao Choque

TIPO	COMPOSIÇÃO, %								TEMPERA				CARACTERÍSTICOS GERAIS				
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de in- deformabi- lidade	Tenaci- dade	Resis- tência ao des- gaste	Resis- tência amo- lecimen- to ao calor	Usina- bilidade
III A	0,50	0,60	0,25	1,00	0,20	—	—	—	—	} 815 a 843 870 a 927	Água ou óleo	Média	Pobre a Regu- lar	Muito bôa	Regu- lar	Regu- Peque- na	Bôa
B	0,55	0,40	1,00	—	0,25 *	—	0,50	—	—		843 a 900	Água ou óleo	Média	Pobre	Exce- lente	Regu- lar	Regu- lar
D	0,55	0,80	2,00	0,30 *	0,25 *	—	0,40 *	—	—	870 a 927	—	Média	Regu- lar	Exce- lente	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
C	0,55	0,25	0,25	1,25	0,25 *	2,50	0,50 *	—	—	} 900 a 982 900 — 927	Óleo	Média	Regu- lar	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
E	0,55	0,25	1,00	1,25	0,25 *	2,50	0,50 *	—	—		Óleo	Média	Regu- lar	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar

* Elemento opcional. Os aços têm propriedades satisfatórias com ou sem esses elementos.

TABELA XXVI

Aços para Trabalho a Quente

TIPO	COMPOSIÇÃO, %								TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS											
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de In- deformabi- lidade	Tenaci- dade	Resis- tência ao des- gaste	Resis- tência amo- lecimen- to ao calor	Usina- bilidade								
IV A1	0,65	0,30	0,30	4,00	0,75	—	0,50	—	—	955 a 1010	Ar	Gran- de	Bóa	Bóa	Regu- lar	Bóa	Regu- lar								
	0,90	0,30	0,30	4,00	0,75*	—	0,50*	—	—																
B	0,35	0,30	1,00	5,00	0,40*	1,25*	1,50	—	—	985 a 1040	Ar	Gran- de	Bóa	Bóa	Regu- lar	Bóa	Regu- lar								
																		0,60	0,30	0,40*	5,00	0,40*	5,00	—	—
C1	0,40	0,30	1,00	5,00	0,40*	7,50	—	—	—	985 a 1040	Ar	Gran- de	Bóa	Bóa	Regu- lar	Bóa	Regu- lar								
																		0,45	0,60	1,50	7,50	0,40*	7,50	—	—
D1	0,40	0,25	0,50	3,75	0,75	1,00	5,75	—	—	1065 a 1230	Ar ou Óleo	Gran- de	Bóa	Bóa	Regu- lar	Bóa	Regu- lar								
																		0,60	0,25	0,25	3,75	1,10	1,50	8,50	—
E1	0,30	3,50	0,25	0,25	0,50*	9,00	—	—	—	1090 a 1175	Ar	Gran- de	Bóa	Bóa	Regu- lar	Bóa	Regu- lar								
																		0,40	0,25	0,25	2,50	0,50	12,00	—	—
																		0,40	0,25	0,25	3,00	0,50	15,00	—	2,00*
																		0,50	0,25	0,25	4,00	1,00	18,00	—	—

* Elemento opcional. Os aços têm propriedades satisfatórias com ou sem esses elementos.

ou em outros tipos de ferramentas para forjamento a quente, porque é o mais resistente ao choque;

— para moldes para fundição — tipo E1 para moldes para fundição por gravidade e tipo B para moldes para fundição sob pressão de ligas a base de cobre, alumínio ou magnésio.

7 — **Aços rápidos** (Tabela XXVII) — Os aços rápidos mais famosos e populares são os pertencentes aos grupos VC e VD, em que o tungstênio aparece como principal elemento de liga, em teores de 14 a 20 %. O grupo VC compreende os tipos 18-4-1, 18-4-2 e 18-4-3, números representativos dos teores respectivamente de W, Cr e V. O carbono nesses aços é mantido entre os limites 0,70 e 1,0 %. O tipo VC1 (18-4-1) é utilizado para aplicações gerais de corte; o maior teor de vanádio dos tipos VC2 e VC3 torna-os mais resistentes ao desgaste, melhorando o rendimento de corte.

A introdução do cobalto (tipos VD) melhora ainda mais a eficiência de corte, sobretudo na usinagem de materiais muito duros. Esses aços apresentam alta dureza a quente e excelente resistência à abrasão; são, entretanto, mais frágeis que os aços rápidos sem cobalto, de modo que não são recomendados para ferramentas com gume cortante muito fino ou para corte de acabamento. Sua utilização principal faz-se em ferramentas para operações de corte pesadas. Os aços rápidos ao cobalto são também mais suscetíveis à descarbonetação, mesmo durante o pré-aquecimento para a têmpera, de modo que as precauções no tratamento térmico devem ser maiores nesses aços.

Nos aços rápidos usuais pode-se substituir grande parte do tungstênio por molibdênio em teores de 4,5 a 8,5 % originando-se assim os tipos VA e VB. A substituição é feita com objetivo econômico pois o Mo é de menor preço que o W e, além disso, seu teor, para os mesmos efeitos, pode ser cerca da metade do teor de tungstênio. No grupo VA, os três primeiros tipos, VA1, VA2 e VA3 são utilizados em aplicações gerais de corte; o tipo VA4 apresenta resistência à abrasão muito elevada, de modo que é particularmente indicado para operações leves de usinagem ou para usinagem de materiais abrasivos.

Os aços do grupo VB são utilizados em aplicações especiais onde se exige uma dureza a quente excepcional a altas temperaturas, como, por exemplo, na usinagem de ligas fundidas duras e aços temperados.

Esses aços caracterizam-se, como seria de esperar, por serem muito difíceis de tratar termicamente e exigirem ainda maior controle e cuidados nas operações de têmpera e revenido.

O principal característico dos aços rápidos, de qualquer dos grupos acima, é a capacidade de retenção da dureza às temperaturas elevadas que se desenvolvem em serviço.

TABELA XXVII

Aços Rápidos

TIPO	COMPOSIÇÃO, %								TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS			
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de In- deformabi- lidade	Tenaci- dade	Resis- tência ao des- gaste	Resis- tência amo- lecimento ao calor	Usina- bilidade
V A1	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	—	8,00	—	—	1175 α 1218	Óleo,	Gran-	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
A2	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,50	—	—	1175 α 1218	Ar e	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
A3	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,25	5,00	—	—	1205 α 1250	Banho	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
A4	1,20	0,30	0,25	4,00	4,00	6,00	4,50	—	—	1205 α 1230	de Sal		Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
B1	0,85	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,50	5,00	—	1205 α 1230	Óleo,	Gran-	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
B2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	1,50	8,50	8,00	—	1205 α 1230	Ar e	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
B3	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,25	5,00	5,00	—	1205 α 1230	Banho	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
B4	0,84	0,30	0,25	4,00	2,00	6,25	5,00	8,00	—	1205 α 1250	de Sal		Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
C1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	—	—	—	1260 α 1300	Óleo,	Gran-	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
C2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	0,75	—	—	1275 α 1300	Ar e	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
C3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	—	—	—	1230 α 1275	Banho	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
D1	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	0,75	5,00	—	1275 α 1300	Óleo,	Gran-	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
D2	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	0,75	5,00	—	1287 α 1315	Ar e	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
D3	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	0,75	9,00	—	1287 α 1315	Banho	de	Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-
D4	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	20,00	0,75	12,00	—	1287 α 1315	de Sal		Bôa	Baixa	Muito	Muito	Regu-

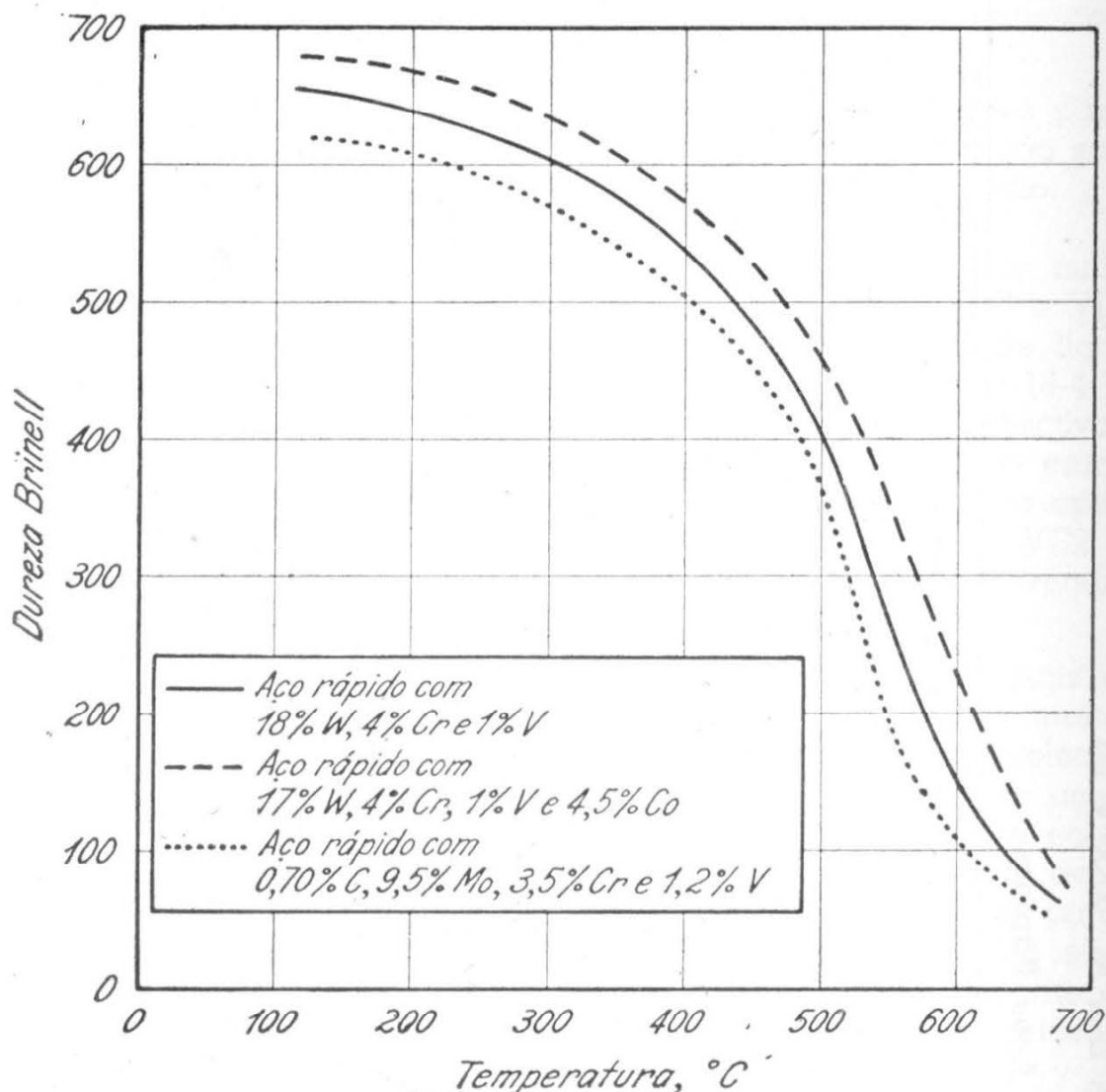


FIG. 51 — Dureza a quente de três tipos de aço rápido.

O gráfico da Figura 51 mostra o comportamento dos aços rápidos ao tungstênio, ao tungstênio-cobalto e ao molibdênio às diferentes temperaturas de serviço.

A alta dureza a quente dos aços rápidos evita o rápido amolecimento do gume cortante da ferramenta pelo calor desenvolvido durante as operações de corte, as quais podem apresentar tais velocidades e profundidades de corte a ponto de aquecer a ferramenta quase que ao rubro.

Nos aços rápidos é indispensável a presença de partículas de carbonetos livres, os quais, por outro lado, devem permanecer estáveis a altas temperaturas. Os carbonetos nesses aços são carbonetos duplos, dos tipos $(Fe_3W_3)C$ ou $(Fe_3Mo_3)C$. A fórmula geral pode ser escrita $(Fe, W, Mo, Cr)_6C$. Quando 6 átomos de tais metais se combinam com um átomo de carbono, o carboneto duplo formado é muito mais resistente ao calor do que o cimento com outros elementos formadores de carbonetos além do Fe. Em outras palavras, a fórmula $(Fe, W, Mo, Cr)_6C$ é muito mais desejável do que a fórmula $(Fe, Cr, Mn, Mo)_3C$.

— **Curvas TTT dos aços rápidos** — A Figura 52 mostra como se apresentam as curvas em C para um aço rápido. Verifica-se notável deslocamento do cotovelo das curvas, na zona correspondente à formação da perlita fina, para cima (a cerca de 780° C) e para a direita (600 segundos aproximadamente). Além disso, nota-se um intervalo de temperatura de cerca de 600° C a cerca de 350° C, no qual não há indícios de transformação da austenita metaestável, mesmo quando mantida nessa faixa de temperaturas por um período de semanas. Entretanto, pode ocorrer precipitação de carbonetos (linha C_i) se a austenita fôr mantida nessas temperaturas e tal fato pode afetar as temperaturas M_i e M_f e

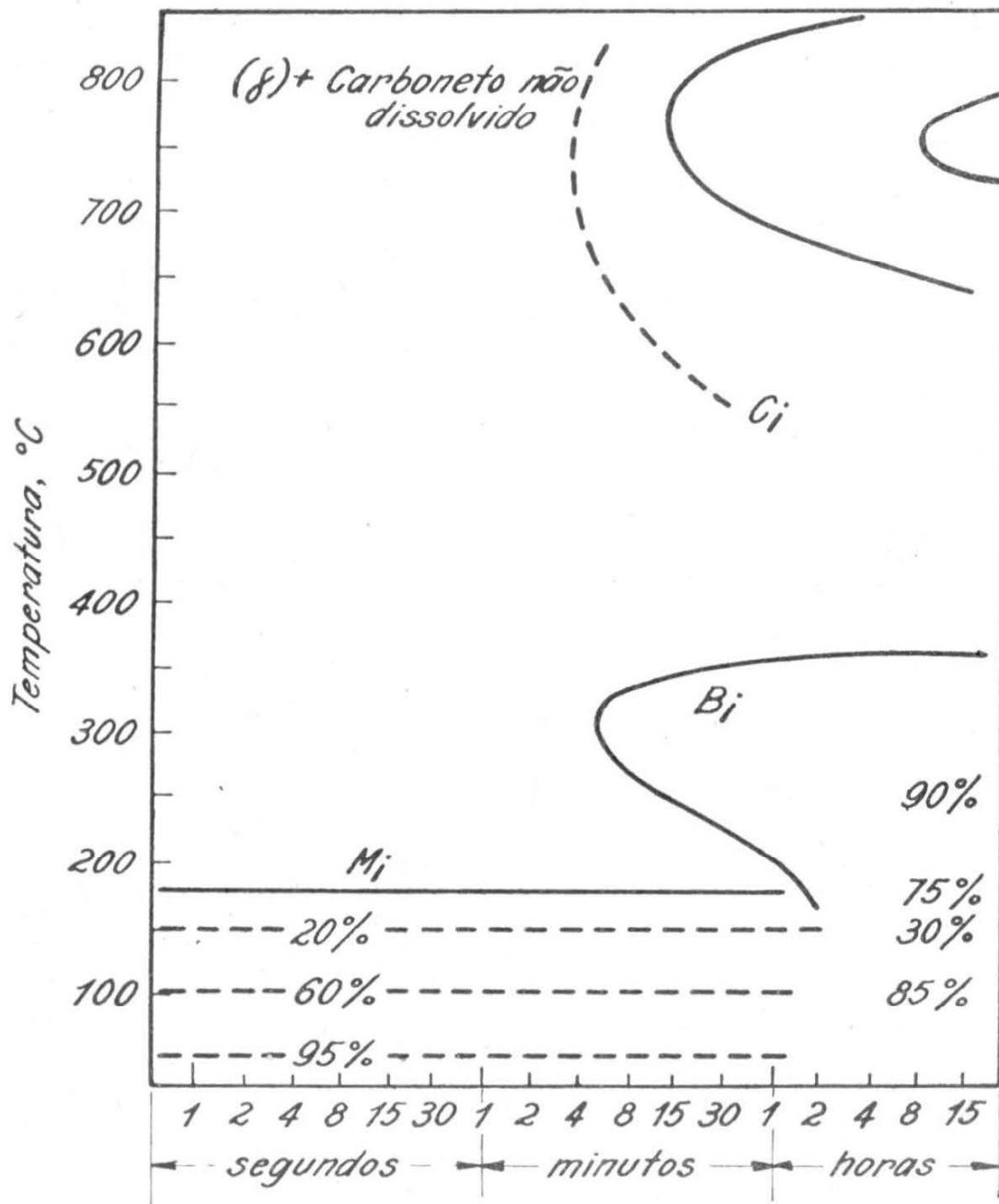


FIG. 52 — Diagrama de transformação isotérmica para aço rápido 18-4-1 austenitizado a 1200° C.

as propriedades do aço. Diagramas desse tipo permitem a chamada «têmpera a quente» (tratamento semelhante à martêmpera): isto é, o aço depois de austenitizado e esfriado num banho de sal a cerca de 550-500° C é aí mantido até que a temperatura se uniformize, esfriando-se em seguida em óleo, o que diminue as probabilidades de empenamento e de choque térmico, em relação à têmpera em óleo, além de apresentar certas vantagens econômicas, sobre a têmpera ao ar, pois neste último caso é preciso esperar que o aço esfrie até quase a temperatura ambiente para que se possa realizar o revenido.

— **Tratamentos térmicos dos aços rápidos** — A Tabela XXVII mostra as temperaturas e os meios de têmpera dos aços rápidos. Todos os tipos de aço rápido exigem um aquecimento para a têmpera muito controlado, principalmente tendo em vista a necessidade de se evitar qualquer descarbonetação. Para isso, o forno ideal é o banho de sal; êstes banhos, entretanto, exigem tratamento contínuo. Para tratamento intermitente, resultados satisfatórios são obtidos com fornos de atmosfera controlada.

O aquecimento é dividido em dois estágios: um pré-aquecimento e o aquecimento a alta temperatura. Muitas vezes, para ferramentas de grandes dimensões, pode ser conveniente um duplo pré-aquecimento.

As temperaturas de pré-aquecimento são as seguintes:

— 730 a 825° C, quando o forno é do tipo de atmosfera controlada, ou entre 825 e 843° C, quando o forno é do tipo de banho de sal — para os aços VA e VB.

Se se usar duplo pré-aquecimento, nesses dois grupos de aços, aquece-se num 1º forno mantido entre 540 e 593° C e em seguida num outro à temperatura entre 825 e 843° C.

— 825° a 870° C, para os aços VC e VD. Também neste caso pode ser necessário um pré-aquecimento duplo, levado a efeito nas faixas de temperaturas 593 a 650° C e 825 a 870° C respectivamente.

Os aços rápidos, depois de cuidadosamente pré-aquecidos, são rapidamente colocados nos fornos para o aquecimento final, cujas temperaturas estão indicadas na Tabela XXVII. O tempo à temperatura final deve ser o mais curto possível de modo a restringir o crescimento de grão.

O resfriamento é feito em óleo, banho de sal ou ao ar. Os dois primeiros meios são mais usuais. No caso do banho de sal, as ferramentas, depois de terem a sua temperatura uniformizada no referido banho, são esfriadas ao ar. Usa-se também, em ferramentas grandes, para diminuir as tensões e prevenir fissuração, um resfriamento em óleo interrompido: a ferramenta

é esfriada em óleo até perder a côr (cêrca de 540° C) e em seguida ao ar.

Quando é necessário proceder-se ao endireitamento da ferramenta, o mesmo deve ser executado logo após a têmpera, entre as temperaturas de 425° e 205° C. Logo em seguida, o material é revenido.

As temperaturas de revenido são as seguintes :

- 540° C a 620° C para os grupos VA e VB;
- 540° C a 590° C para os grupos VC e VD.

A permanência a essas temperaturas deve ser de duas horas no mínimo. O esfriamento subsequente é feito ao ar.

Para máxima tenacidade, recomenda-se a repetição dêsse revenido.

— **Dureza secundária** — Os aços rápidos ao serem revenidos mostram uma variação de dureza de acôrdo com as curvas da Figura 53. Verifica-se um aumento de dureza e aproximadamente 500-550° C, fato êsse que deve atribuir à formação de nova martensita a partir da austenita retida. De fato, como se pode verificar pela curva TTT do aço rápido (Figura 52), há uma queda pronunciada nas temperaturas M_i e M_f correspondentes à formação da martensita. Nessas condições, os aços dos tipos do rápido apresentam, no estado temperado, uma certa quantidade de austenita retida, a não ser que tenham sido submetidos ao «tratamento sub-zero», como se verá mais adiante.

Além da austenita retida, os aços rápidos temperados apresentam evidentemente martensita com elementos de liga e certa proporção de carbonetos de natureza complexa. Êstes carbonetos não são afetados pelo revenido a qualquer temperatura. A martensita como se sabe, passa, pelo revenido, do reticulado tetragonal a uma estrutura cúbica e, apesar dela ser altamente ligada nos aços rápidos — tornando mais complexas as transformações que se verificam durante o revenido — ocorre um abaixamento da dureza do aço por ocasião dêsse reaquecimento. Com a austenita retida, por sua vez, verifica-se uma precipitação de certos carbonetos a temperaturas da ordem de 500° C o que a torna menos estável e eleva as temperaturas M_i e M_f ; dêsse modo, no resfriamento logo após o revenido, a austenita passa a martensita, donde o aumento de dureza entre 500 e 550° C. A formação de nova martensita cria microtensões que podem prejudicar o aço, donde a prática comum de revenir-se uma segunda vez, o que garante também o alívio de micro ou macro-tensões de outras origens.

— **Tratamento sub-zero** — Às vezes a quantidade de austenita retida é acima do normal, quer devido a uma temperatura de austenitização muito elevada para o tratamento de têmpera, quer devido a um resfriamento inadequado até a temperatura

ambiente. Esse excesso de austenita retida, além de levar a uma dureza secundária excessiva, pode causar maior mudança de dimensões durante o revenido, assim como a uma estrutura mais frágil e à maior probabilidade de fissuração por ocasião do resfriamento após a têmpera.

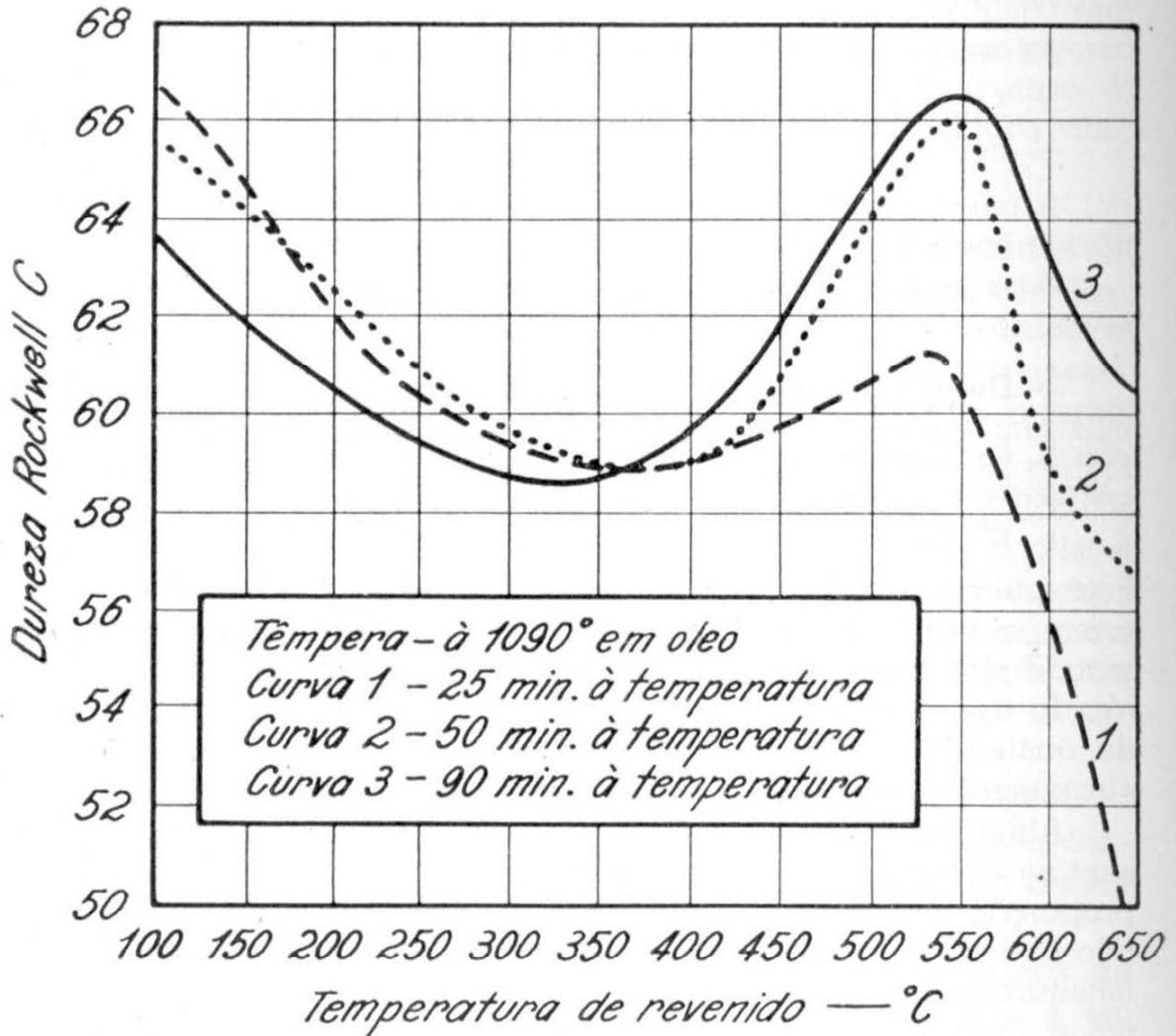


FIG. 53 — Curvas de revenido para um aço rápido 18-4-1, mostrando a relação entre a dureza e a temperatura do revenido (adaptada da publicação «Tool Steels» da Vanadium Alloy Steels Company).

Um dos meios de se evitar excesso de austenita retida consiste em se resfriar o aço na têmpera, a uma temperatura abaixo de zero, por exemplo — 80° C, de modo a se garantir o cruzamento da linha M_f . Tal é o chamado «tratamento sub-zero».

8 — **Aços para ferramentas e matrizes miscelâneos** — Nesta categoria (Tabela XXVIII) estão incluídos os aços utilizados em blocos de matrizes e outros dispositivos para martelos de forja e prensas (tipos VID e VIE), para lâminas de tesoura para corte a frio (tipos VID1, e VID3) e para corte a quente (tipo VID2), para moldes permanentes para fundição por gravidade de ligas de baixo ponto de fusão (tipo VID1, empregado no estado normalizado e revenido com uma dureza Brinell de cerca de 300), para

TABELA XXVII
Aços para Ferramentas e Matrizes Miscelâneos

TIPO	COMPOSIÇÃO, %							TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS				
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni	Temperatura °C	Profundidade de endurec.	Meio	Propriedade de In- deformabi- lidade	Tena- cidade	Resis- tência ao des- gaste	Resis- tência amo- leci- mento ao calor	Usina- bilida- de
VI A	0,05	0,10	0,03	—	—	—	—	—	—	cementação 900 — 927	Água	Peque- na	Regu- lar	Bôa	Bôa	Peque- na	Baixa
B1	0,10	0,45	0,25	0,60	—	—	—	—	1,25	cementação 900 — 927	Água	Peque- na	Regu- lar	Bôa	Bôa	Peque- na	Regu- lar
B2	0,12	0,45	0,25	1,50	—	—	—	—	3,50	idem	Óleo	Peque- na	Bôa	"	"	"	"
B3	0,75	0,60	0,20	1,00	0,10 *	—	—	—	1,75	têmpera 815 a 925	Óleo	Média	"	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	"
C	0,35	0,35	0,20	12,00	—	—	—	—	—	têmpera 955 a 1040	Óleo	Média	Bôa	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Baixa
D1	0,70	0,70	0,20	0,80	0,10 *	—	0,30	—	1,60	têmpera	Óleo	Média	Bôa	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
D2	0,50	0,65	0,25	1,00	0,10 *	—	0,30	—	1,60	815 — 925	Óleo	Média	Bôa	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
D3	0,55	0,60	0,85	1,00	0,10 *	—	0,75	—	2,00	têmpera	Óleo	Média	Bôa	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
E	0,55	0,80	0,25	1,00	0,10	—	0,45	—	—	têmpera 830 — 857	Óleo	Média	Bôa	Muito bôa	Regu- lar	Regu- lar	Regu- lar
F	1,25	0,60	0,20	0,50	—	—	—	—	—	têmpera 790 — 830	Óleo	Peque- na	Regu- lar	Regu- lar	Bôa	Peque- na	Bôa
G	1,25	0,85	0,20	0,50	—	—	0,50	—	—	têmpera 790 — 830	Óleo	Peque- na	Regu- lar	Regu- lar	Bôa	Peque- na	Bôa

* Elemento opcional. Os aços têm propriedades satisfatórias com ou sem esses elementos.

TABELA XXIX

Aços Grafiticos

TIPO	COMPOSIÇÃO, %						TEMPERA					CARACTERÍSTICOS GERAIS			
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Outros	Temperatura °C	Meio	Profundidade de endurec.	Propriedade de deformabilidade	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Resistência ao lecimento ao calor	Usabilidade
A	1,50	1,25	0,90	—	—	—	—	790 a 845	Água ou salmoura						
B	1,50	0,50	1,00	0,50	—	0,50	Ni 1,75	843	Ar						
C	1,50	0,30	0,20	—	—	—	Al 0,16	790 a 815	Salmoura	Grande			Bôa	—	Exce-lente
D	1,50	0,50	0,80	—	—	0,25	—	790 a 845	Óleo						
E	1,50	0,50	0,65	—	2,80	0,50	—	790 a 815	Água						

Esta tabela foi adaptada da publicação «Tool Steel — Types and Treatment» de R. S. Burpo, Jr., do «Engineering Materials Manual» publicado pela Reinhold Publishing Corp., New York, U.S.A. — 1951 e do livro «Engineering Metals and Their Alloys» de C. H. Samans, editado pela «The MacMillan Company Inc.» de New York, U.S.A. — 1949.

matrizes de fundição sob pressão de ligas à base de zinco, estanho e chumbo (tipo VIE modificado com 0,55 % de C, 0,80 % de Mn, 0,25 % de Si, 1,00 % de Cr e 0,45 % de Mo) para moldes e outros dispositivos empregados na indústria de plásticos (tipos VIA, VIB1 e VIB2, no estado cementado, tipo VIC, empregado quando se deseja certa resistência à corrosão e tipos VIE e VID3).

9 — **Aços grafíticos** (Tabela XXIX) — Estes aços contêm grafita livre, a qual produz ferramentas de boa resistência ao desgaste que são facilmente usináveis e tratáveis termicamente. As aplicações mais importantes desses aços são: calibres, punções, matrizes para conformação, corte, etc... suporte para ferramentas de carboneto de tungstênio, peças para máquinas ferramentas etc.

10 — **Conclusões** — O problema da escolha de um aço para ferramenta ou matriz não é simples, pois, se é evidente que os fatores que devem ser inicialmente considerados são os característicos físicos, tais como dureza, resistência, tenacidade, resistência ao amolecimento pelo calor, resistência ao desgaste e usinabilidade, não se pode deixar de considerar também os fatores relativos ao custo e ao comportamento do material durante o seu processamento (empenamento durante o tratamento térmico, descarbonetação superficial, etc.). Tendo em vista o que foi discutido no presente capítulo, as ferramentas podem ser agrupadas da seguinte maneira: ferramentas de usinagem (brocas, brochas, ferramentas para tornos, plainas, frezas, etc.); ferramentas de corte (tesouras, matrizes para tirar rebarbas, punções, etc.); ferramentas para conformação (matrizes para forjamento, prensagem, estampagem, fundição sob pressão, fabricação de plásticos, etc.) e ferramentas para aplicação de golpes (talhadeiras, cinzeis e similares). As ferramentas para usinagem e para corte devem apresentar altas dureza e resistência ao desgaste, além de elevada resistência ao amolecimento pelo calor; as ferramentas para conformação devem apresentar também elevada tenacidade, característico este também o mais importante de todos nas ferramentas que, em serviço, estão sujeitas a golpes (talhadeiras, cinzeis, etc.).

Assim sendo, a escolha do aço apropriado para a aplicação desejada da ferramenta consistirá em se determinar não só as propriedades realmente imprescindíveis para o caso, como também o comportamento do material durante as operações de fabricação, o custo da ferramenta acabada e a sua relação com a sua vida esperada e, finalmente, essa escolha poderá depender da própria forma da ferramenta, a qual poderá determinar a adoção de um meio de esfriamento para a têmpera mais dispêndios).