

### 2.2.4.1 - CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA ABNT (ou AISI)

Esta norma classifica os aços em dois grandes grupos de forma distinta:

- Aços-ao-carbono e os aços de baixa-liga; e
- Aços de alta-liga.

#### i) Aços-ao-carbono e Aços de baixa-liga

Estes aços são classificados por meio de 4 números precedidos por uma letra maiúscula que especifica o processo de fusão. Eventualmente a especificação pode apresentar ainda, de forma complementar, letras após o quarto número. A norma estabelece as seguintes considerações:

- O primeiro número representa o(s) elemento(s) de liga(s) presentes no aço;
- O segundo número representa o teor desses elementos de liga (deve-se consultar as tabelas, junto à norma);
- Os terceiro e quarto números representam o teor de carbono multiplicado por 100.

Como exemplos de letras que antecedem os números, destacam-se, dentre outros, E = aço produzido pelo processo elétrico básico (cujos teores de P e S são inferiores a 0,025%); B = processo Bessemer básico; C = processo Siemens-Martin básico; D = processo Siemens-Martin ácido. Como exemplos de letras após o quarto número, pode-se citar: H = aço fornecido como temperado; L = aço com teor de C inferior ao indicado; F = aços de fácil usinagem. Na Tabela 6 é apresentada a classificação de aços-ao-carbono e aços de baixa-liga pela norma ABNT.

Tabela 6 – Classificação de aços ao carbono e aços baixa-liga pela norma ABNT.

ABNT ou AISI	TIPO DE AÇO
C10XX	Aços-ao-carbono
C11XX	Aços de usinagem fácil (com alto teor de S)
C12XX	Aços de usinagem fácil (com altos teores de P e S)
13XX	Aços ao Mn (de 1,5 a 2,0% Mn)
23XX	Aços ao Ni (de 3,25 a 3,75% Ni)
25XX	Aços ao Ni (de 4,75 a 5,25% Ni)
31XX	Aços ao Ni-Cr (1,10-1,40% Ni e 0,55-0,90% Cr)
E33XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 1,40-1,75% Cr)
40XX	Aços ao Mo (0,20-0,30% Mo)
41XX	Aços ao Cr-Mo (0,40-1,20% Cr e 0,08-0,25% Mo)
43XX	Aços ao Ni-Cr-Mo (1,6-2,0% Ni; 0,4-0,9% Cr; 0,2-0,3% Mo)
46XX	Aços ao Ni-Mo (1,40-2,00% Ni e 0,15-0,30% Mo)
48XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 0,20-0,30% Mo)
50XX	Aços ao Cr (0,27-0,50% Cr)
51XX	Aços ao Cr (0,70-1,20% Cr)
61XX	Aços ao Cr-V (0,70-1,10% Cr e 0,10% V)
86XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,2-0,4% Ni; 0,3-0,5% Cr; 0,08-0,15% Mo)
87XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,4-0,7% Ni; 0,4-0,6% Cr; 0,2-0,3 % Mo)
92XX	Aços ao Mn-Si (1,4-2,0 % Si e 0,60-0,90% Mn e 0-0,7% Cr)
XXBXX	Aços ao B contendo 0,0005-0,003% B (Ex.: aço 10BXX = aço-ao-carbono com B; aço 50BXX = aço ao Cr com B)

A título de exemplo, um aço ABNT 1020 é um aço-ao-carbono contendo cerca de 0,20% C; um aço ABNT 5160 é um aço ao Cr apresentando cerca de 1,0 %Cr e 0,60 % C (os teores dos elementos P, S, Mn, Si ou Al, conforme visto, não precisam ser apresentados). Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados respectivamente alguns exemplos de aços-ao-carbono e aços de baixa-liga, bem como suas respectivas composições.

Tabela 7 – Exemplos de aços-ao-carbono e suas respectivas composições (à exceção dos teores normais de P: máx. 0,035%; S: máx. 0,040%; Mn: máx. 1,05%; e Si: máx. 0,35%), segundo a norma ABNT (os valores indicados são os teores médios da norma).

Aço	%C, em peso
ABNT 1008	0,08
ABNT 1010	0,10
ABNT 1015	0,15
ABNT 1020	0,20
ABNT 1025	0,25
ABNT 1035	0,35
ABNT 1045	0,45
ABNT 1060	0,60
ABNT 1084	0,84
ABNT 1095	0,95

## ii) Aços de alta-liga

A norma ABNT classifica os aços de alta-liga em duas classes distintas:

- Aços resistentes a corrosão e a altas temperaturas; e
- Aços ferramentas.

Os aços resistentes a corrosão e a altas temperaturas são classificados com três números. Como exemplo, pode-se citar:

- Aço ABNT 430 (aço inoxidável ferrítico);
- Aço ABNT 403 (aço inoxidável martensítico);
- Aço ABNT 304 (aço inoxidável austenítico);
- Aço ABNT 304L (aço inoxidável austenítico com teor de C abaixo do especificado);

É interessante destacar que os aços inoxidáveis da classe 300 são todos austeníticos, assim como os aços da classe 400 podem ser ferríticos ou martensíticos. A Tabela 9 apresenta exemplos de aços de alta-liga resistentes a corrosão e a altas temperaturas, detalhando-se a microestrutura de

equilíbrio bem como suas respectivas composições.

Tabela 8 – Exemplos de aços de baixa-liga e respectivas faixas de composições indicando os valores máximos e mínimos para cada elemento (à exceção dos teores normais de P: máx. 0,035%; S: máx. 0,040%; Mn: máx. 1,05%; e Si: máx. 0,35%), segundo a norma ABNT (Villares).

Aço	Composição (% em peso)					
	C	Cr	Ni	Mo	V	Si
ABNT 4340	0,38	0,70	1,65	0,20	-	-
	0,43	0,90	2,00	0,30	-	-
ABNT 4140	0,38	0,80	-	0,15	-	-
	0,43	1,10	-	0,25	-	-
ABNT 4130	0,28	0,80	-	0,15	-	-
	0,33	1,10	-	0,25	-	-
ABNT 8660	0,56	0,40	0,40	0,15	-	-
	0,64	0,60	0,70	0,25	-	-
ABNT 8650	0,48	0,40	0,40	0,15	-	-
	0,53	0,60	0,70	0,25	-	-
ABNT 8640	0,38	0,40	0,40	0,15	-	-
	0,43	0,60	0,70	0,25	-	-
ABNT 8630	0,28	0,40	0,40	0,15	-	-
	0,33	0,60	0,70	0,25	-	-
ABNT 5160	0,56	0,70	-	-	-	-
	0,64	0,90	-	-	-	-
ABNT 5150	0,48	0,70	-	-	-	-
	0,53	0,90	-	-	-	-
ABNT 5140	0,38	0,70	-	-	-	-
	0,43	0,90	-	-	-	-
ABNT 52100	0,98	1,30	-	-	-	-
	1,10	1,60	-	-	-	-
ABNT 6150	0,48	0,80	-	-	mín.	-
	0,53	1,10	-	-	0,15	-
ABNT 9260	0,56	-	-	-	-	1,80
	0,64	-	-	-	-	2,20

Tabela 9 – Exemplos de aços de alta-liga resistentes a corrosão e a altas temperaturas, detalhando-se a microestrutura de equilíbrio bem como suas respectivas composições (à exceção dos teores de P: máx. 0,035%; S: máx. 0,04; Mn: máx. 2,00%; e Si: máx. 1,50%), segundo a norma ABNT (Villares).

Aço (tipo)	Composição (% em peso)					Microestrutura (estado de tratamento)
	C	Cr	Ni	Mo	Outros	
ABNT 410 (inoxidável martensítico)	0,10	12,00	-	-	-	ferrítica (recozido) martensítica (temperado)
ABNT 420 (inoxidável martensítico)	0,35	13,00	-	-	-	ferrítica (recozido) martensítica (temperado)
ABNT 416 (inoxidável martensítico)	0,15 máx.	13,00	-	-	S 0,15 mín.	ferrítica (recozido) martensítica (temperado)
ABNT 302 (inoxidável austenítico)	0,15 máx.	17,50	8,30	-	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)
ABNT 304 (inoxidável austenítico)	0,08 máx.	18,30	8,50	-	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)
ABNT 304L (inoxidável austenítico)	0,03 máx.	19,00	10,00	-	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)
ABNT 310 (inoxidável austenítico)	0,25 máx.	25,00	20,00	-	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)
ABNT 316 (inoxidável austenítico)	0,08 máx.	16,50	11,00	2,20	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)
ABNT 316L (inoxidável austenítico)	0,03 máx.	17,00	12,00	2,20	-	parcialmente martensítica (deformado a frio)

\* teores de enxôfre elevados: melhoria da usinabilidade.

\*\* os inoxidáveis austeníticos são não-temperáveis.

Por sua vez, os aços ferramentas são classificados segundo uma letra que retrata de alguma forma o material, seguida de um ou dois números. Destacam-se as seguintes categorias de aços de acordo com as respectivas letras:

- W: aços temperáveis em água;
- O: aços temperáveis em óleo;
- A: aços temperáveis ao ar;
- S: aços resistentes ao impacto;
- T: aço rápido ao W;
- M: aço rápido ao Mo;

- H: aço indeformável para trabalho a quente;
- D: aço indeformável para trabalho a frio;
- L: aço para uso especial em baixa-liga;
- F: aço para uso especial contendo C e W.

A título de exemplo tem-se o aço ABNT D6, apresentando 2,1% C, 11,5% Cr, 0,7% W, 0,2% V. Este aço, usado na fabricação de ferramentas como punções e matrizes, é normalmente classificado como um aço indeformável para trabalho a frio. A Tabela 10 apresenta exemplos de aços de alta-liga ferramentas, detalhando-se suas respectivas composições.

Tabela 10 – Exemplos de aços ferramentas e respectivas composições (à exceção dos teores normais de P: máx. 0,035%; S: máx. 0,040%; Mn: máx. 1,05%; e Si: máx. 0,35%), segundo a norma ABNT (Villares).

Aço	Composição (% em peso)								
	C	Cr	W	Mo	V	Si	Mn	Ni	Co
ABNT D3	2,0	11,5	-	-	0,2	-	-	-	-
ABNT D2	1,5	12,0	-	0,95	0,9	0,3	-	-	-
ABNT S1 *	0,45	1,4	2,0	0,2	0,2	1,0	-	-	-
ABNT O1 *	0,95	0,5	0,5	-	0,12	-	1,25	-	-
ABNT W2 *	1,00	-	-	-	0,25	-	-	-	-
ABNT W1 *	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-
ABNT H21	0,30	2,65	8,5	-	0,35	-	-	-	-
ABNT H12	0,35	5,0	1,35	1,5	0,25	1,0	-	-	-
ABNT H13	0,40	5,0	-	1,5	1,0	1,0	-	-	-
ABNT H11	0,38	5,0	-	1,35	0,4	1,0	-	-	-
ABNT P20 * **	0,36	1,8	-	0,2	-	-	0,6	1,0	-
ABNT M35	0,92	4,15	6,3	4,8	1,85	-	-	-	4,8
ABNT M2	0,85	4,25	6,1	5,0	1,9	-	-	-	-
ABNT M7	1,0	3,8	1,8	8,7	2,0	-	-	-	-
ABNT T1	0,75	4,25	18,0	-	1,1	-	-	-	-

\* aços de baixa-liga  
\*\* aços classe P: aplicações em moldes para plásticos

#### 2.2.4.2 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA DIN

A norma DIN classifica os materiais de três modos distintos, podendo ser pela composição química, pela resistência mecânica (utilizando-se ou da tensão de ruptura ou da tensão de

escoamento) ou, ainda, por meio de números.

### i) Classificação segundo a composição química

A classificação segundo a composição química apresenta três categorias diferentes, a saber:

#### a) Aços-ao-carbono, aços fundidos e ferros fundidos não-ligados:

Estes materiais, apresentando teores básicos de elementos decorrentes do processo de fabricação (Si < 0,5%, Mn < 0,8%, Cu < 0,25% e Al < 0,1%, em peso), são classificados por uma letra C que indica se tratar de aço-ao-carbono e dois números que indicam o teor de carbono multiplicado por 100. Letras adicionais podem completar a especificação (ex.: k = pequenos teores de P e S; G = recozido; N = normalizado; V = temperado e revenido; E = temperado e cementado; GS = aço fundido; ...). Exemplificando, o aço DIN C15 é um aço ao carbono contendo 0,15% C. Um segundo exemplo pode ser o aço DIN Ck45N, ou seja, um aço ao carbono com pequenos teores de P e S, apresentando 0,45% C, sendo fornecido no estado normalizado. A Tabela 11 apresenta os equivalentes dos aços da Tabela 7 segundo a norma DIN.

Tabela 11 – Equivalentes dos aços da Tabela 7 segundo a norma DIN.

Aço	Equivalente
ABNT 1008	DIN C8
ABNT 1010	DIN C10
ABNT 1015	DIN C15
ABNT 1020	DIN C20
ABNT 1025	DIN C25
ABNT 1035	DIN C35
ABNT 1045	DIN C45
ABNT 1060	DIN C60
ABNT 1084	DIN C84
ABNT 1095	DIN C95

#### b) Aços e ferros fundidos de baixa-liga ( $\sum_{\text{elem. de liga}} \leq 5\%$ )

Estes materiais são classificados pelo teor de carbono multiplicado por 100, seguido dos elementos de liga presentes e seus respectivos teores multiplicados por um fator de multiplicação. Alguns valores típicos de fatores de multiplicação: Mn = 4; Cr = 4; Ni = 4; Mo = 10; .... Os exemplos abaixo são representativos de especificações deste grupo de aços:

- Aço DIN 16 MnCr 5: aço com 0,16% C, 1,25% Mn e traços de Cr;

- Aço DIN 26 CrMo 4: aço com 0,26% C, 1,00% Cr e traços de Mo;
- Aço DIN 34 NiCrMo 5 5 4: aço com 0,34% C, 1,25% Ni, 1,25% Cr e 0,40% Mo.

A Tabela 12 apresenta os equivalentes dos aços da Tabela 8 segundo a norma DIN.

Tabela 12 – Equivalentes dos aços da Tabela 8 segundo a norma DIN (Villares).

Aço	Equivalente
ABNT 4140	DIN 42 Cr Mo 4
ABNT 4130	DIN 25 Cr Mo 4
ABNT 8660	DIN 60 Ni Cr Mo 2
ABNT 5140	DIN 41 Cr 4
ABNT 52100	DIN 100 Cr 6
ABNT 6150	DIN 50 Cr V 4
ABNT 9260	DIN 60 Si 7

c) Aços e ferros fundidos de alta-liga ( $\sum_{\text{elem. de liga}} > 5\%$ )

Idêntico ao caso anterior, porém apresentando necessariamente um X na frente da especificação, que é o indicador de o material se tratar de alta-liga. A presença do X na especificação anula os fatores de multiplicação considerados no caso de aços de baixa-liga. A título de exemplo, são consideradas as seguintes especificações de aços:

- Aço DIN X 7 Cr 13: aço inoxidável ferrítico com 0,07% C e 13% Cr;
- Aço DIN X 15 CrNiSi 25 20: aço inoxidável austenítico com 0,15% C, 25% Cr, 20% Ni e traços de Si;
- Aço DIN X 165 CrMoV 12: aço indeformável com 1,65% C, 12% Cr e traços de Mo e V.

As Tabelas 13 e 14 apresentam, respectivamente, os equivalentes dos aços das Tabelas 9 e 10 segundo a norma DIN.

**ii) Classificação segundo a resistência**

Esta classificação especifica o aço através do seu limite de resistência a tração (tensão de ruptura) ou do seu limite de escoamento, dados em  $N/mm^2$  (ou MPa). Algumas letras usadas na especificação desta norma são: R = aço acalmado; Ro = aço no estado bruto de fusão; RR = aço super-acalmado; U = aço não acalmado; St = tensão de ruptura; Ste = tensão de escoamento,.... A título de exemplo são apresentados dois casos ilustrativos:

- Aço DIN RSt 37: aço acalmado, com  $\sigma_{rup} = 370$  MPa;
- Aço DIN RoSt 33: aço no estado bruto de fusão, com  $\sigma_{rup} = 330$  MPa.

Tabela 13 – Equivalentes dos aços de alta-liga resistentes a corrosão e a altas temperaturas da Tabela 9 segundo a norma DIN (Villares).

Aço (tipo)	Equivalente
ABNT 410 (inoxidável martensítico)	DIN X 10 Cr 13 (similar)
ABNT 420 (inoxidável martensítico)	DIN X 30 Cr 14 (similar)
ABNT 416 (inoxidável martensítico)	DIN X 12 Cr S 13 (similar)
ABNT 302 (inoxidável austenítico)	DIN X 12 Cr Ni 18 8
ABNT 304 (inoxidável austenítico)	DIN X 5 Cr Ni 18 8 (similar)
ABNT 304L (inoxidável austenítico)	DIN X 2 Cr Ni 18 9 (similar)
ABNT 310 (inoxidável austenítico)	DIN X 15 Cr Ni Si 25 20 (similar)
ABNT 316 (inoxidável austenítico)	DIN X 5 Cr Ni Mo 18 10 (similar)
ABNT 316L (inoxidável austenítico)	DIN X 2 Cr Ni Mo 18 10 (similar)

Tabela 14 – Equivalentes dos aços ferramentas da Tabela 10 segundo a norma DIN (Villares).

Aço (tipo)	Equivalentes
ABNT D6 (indeformável para trabalho a frio)	DIN X 210 Cr W 12
ABNT D3 (indeformável para trabalho a frio)	DIN X 210 Cr 12
ABNT D2 (indeformável para trabalho a frio)	DIN X 155 Cr V Mo 12 1 (similar)
ABNT S1 (resistente ao impacto) *	DIN 45 W Cr V 7 (similar)
ABNT O1 (temperável em óleo) *	DIN 100 Mn Cr W 4 (similar)
ABNT W2 (temperável em água) *	DIN 100 V 1 ou DIN C 100 W1 (similares)
ABNT W1(temperável em água) *	DIN C 70 W1 (similar)
ABNT H21 (indeformável para trabalho a quente)	DIN X 30 W Cr V 9 3
ABNT H12 (indeformável para trabalho a quente)	DIN X 37 Cr Mo W 5 1 (similar)
ABNT H13 (indeformável para trabalho a quente)	DIN X 40 Cr Mo V 5 1 (similar)
ABNT H11 (indeformável para trabalho a quente)	DIN X 38 Cr Mo V 5 1 (similar)
ABNT P20 (para moldes plásticos) *	DIN 35 Cr Mo 4 (similar)
ABNT M35 (rápido ao Mo)	
ABNT M2 (rápido ao Mo)	
ABNT M7 (rápido ao Mo)	
ABNT T1 (rápido ao W)	

\* os aços de baixa-liga



### iii) Classificação por números

Esta classificação utiliza 7 números, sendo o primeiro referente ao tipo de material, os quatro números seguintes indicando o tipo de aço e a composição química e os dois últimos números sendo utilizados para dados complementares. Esta forma de especificação torna-se mais complicada uma vez que necessita de tabela para consulta, não sendo auto-explicativa como nos casos anteriores. Como exemplo: aço DIN 1.7035 = aço DIN 41Cr 4 (aço com 0,40% C e 1,00% Cr). De forma genérica: aço DIN X.XXXX.XX

## 2.3 – INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

Basicamente, pode-se dizer que a realização de tratamento térmico nos aços possibilita a obtenção de microestruturas especiais, as quais conferem ao material um conjunto de determinadas propriedades mecânicas o qual é indicado para uma gama de aplicações específicas.

Todo tratamento térmico abrange três etapas distintas e igualmente importantes: a) aquecimento; b) permanência na temperatura especificada; e c) resfriamento. A nível introdutório, especial atenção é normalmente dada somente à etapa de resfriamento, pois uma vez austenitizado de forma adequada o aço, a transformação da austenita poderá ocorrer para diferentes constituintes, o que é uma função do tipo (se contínuo ou isotérmico) e da forma (rápida, intermediária ou lenta) em que o resfriamento ocorrer.

Por outro lado, regras práticas normalmente indicadas pelo próprio fabricante do aço garantem uma boa condição de aquecimento, quando da austenitização da liga, onde se procura evitar basicamente o crescimento de grão excessivo bem como a “queima” do material.

Define-se:

*Queima*: fenômeno que se caracteriza pelo superaquecimento do aço à temperaturas vizinhas da linha “sólidus”, tornando o aço quebradiço e resultando normalmente na oxidação (precipitação de fases óxidas) junto aos contornos de grão do material. O aço, neste caso, é chamado de queimado e sua regeneração não se torna mais possível (Colpaert, 1974).

Quanto ao tempo de permanência na temperatura especificada de tratamento, este é uma função diretamente relacionada à transferência de calor do forno (aquecimento por resistências, por radiação, por indução magnética ou por plasma), bem como do meio (sólido, líquido ou gasoso) usado para o aquecimento da carga ou da peça. Normalmente nos fornos convencionais (aquecimento por resistência) costuma-se deixar cerca de 1 a 1,5 minuto por milímetro de seção transversal.

Dentre os diversos tratamentos térmicos existentes para os aços, merecem destaque: a) o recozimento pleno; b) a normalização; c) a têmpera; d) o revenimento; e) a austêmpera; e f) a martêmpera. Estes tratamentos são definidos à frente com o auxílio dos diagramas TTT (tempo, temperatura, transformação) e dos diagramas TRC (de transformação sob resfriamento contínuo).

### 2.3.1 – DIAGRAMAS TTT (TEMPO, TEMPERATURA E TRANSFORMAÇÃO)

Os diagramas TTT (tempo, temperatura, transformação) são conhecidos também por Diagramas de Transformação Isotérmica, pelo fato de que nele são apresentados os produtos de transformação da austenita quando esta se transforma isotermicamente, ou seja, a uma determinada temperatura constante. Estes diagramas, por apresentarem em um dos eixos a variável tempo (eixo das abscissas), relacionam-se diretamente com a cinética de transformação e, portanto, com a velocidade com que a austenita se transforma a uma determinada temperatura (eixo das ordenadas), diferentemente dos diagramas de equilíbrio, os quais relacionam-se exclusivamente com os aspectos termodinâmicos, ou seja, com as fases de equilíbrio previstas para cada liga do sistema em função da temperatura, conforme já visto. As curvas presentes nos diagramas TTT indicam os tempos de início e fim de transformação da austenita na temperatura considerada. Estas curvas são chamadas de curva de início ( $C_i$ ) e curva de fim ( $C_f$ ) de transformação da austenita e, para os aços-ao-carbono apresentam o formato característico de um C.

A Figura 42 mostra um diagrama TTT esquemático para o aço eutetóide. Cabe ressaltar que cada aço apresenta um diagrama TTT próprio, valendo exclusivamente para o aço considerado. Devido a enorme quantidade de aços diferentes, existe uma infindável quantidade de diagramas TTT, o que torna fundamental o bom entendimento dos mesmos. Esta observação decorre do fato de que estes diagramas, associados aos diagramas TRC (transformação sob resfriamento contínuo) tornam-se ferramentas poderosas na prática dos tratamentos térmicos.

Voltando à Figura 42, a análise detalhada do diagrama indica a presença de dois campos distintos para a fase austenita, podendo-se observar:

- a) o campo da austenita estável, o qual ocorre para temperaturas acima da temperatura  $A_1$  ( $727^\circ\text{C}$ ), de acordo com o diagrama de equilíbrio Fe-C;
- b) o campo da austenita meta-estável, o qual está situado entre as temperaturas  $A_1$  ( $727^\circ\text{C}$ ) e  $M_i$  ( $M_i$  = temperatura de início de transformação martensítica), bem como à esquerda da curva de início de transformação da austenita, ou seja, para tempos menores do que aqueles nos quais a austenita meta-estável começa a se transformar isotermicamente em um produto determinado.

Pode-se observar também (Figura 42), um campo específico para a fase/constituente martensita, situado para temperaturas abaixo da temperatura  $M_i$ . Cabe explicar que, quando a austenita é resfriada bruscamente para temperaturas abaixo de  $M_i$ , a transformação isotérmica deixa de ocorrer, dando lugar a uma transformação dita atérmica, não-difusional e independente do tempo, chamada de transformação martensítica, a qual ocorre por meio de cisalhamento de planos cristalográficos da estrutura do ferro, dando origem à fase de não-equilíbrio conhecida por martensita (definida no item 2.1.1). A transformação martensítica é dita uma transformação militar, pois porções de martensita são formadas, à velocidades próximas da do som, para cada gradiente de temperatura abaixo de  $M_i$ , prosseguindo de forma régia com a queda de temperatura e interrompendo-se caso a temperatura for mantida constante. Pelo fato da temperatura  $M_i$  ser muito baixa, a difusividade atômica torna-se muito baixa, mesmo para elementos intersticiais como o carbono. Com a queda brusca da temperatura, o carbono fica obrigado a se manter em solução sólida no Ferro, dando origem à estrutura TCC (tetragonal de corpo centrado), não prevista no diagrama de equilíbrio. O tratamento térmico de têmpera, responsável pela obtenção da estrutura martensítica nos aços, é apresentado à frente, com o recurso dos diagramas TRC, uma vez que o

resfriamento brusco é um resfriamento tipicamente contínuo.

À direita da curva de fim de transformação da austenita (Figura 42), ou seja, para tempos maiores do que aqueles nos quais a austenita meta-estável termina a sua transformação isotérmica, pode-se verificar a formação de diferentes produtos, dependendo da temperatura em que a transformação ocorreu. Para o caso em estudo, pode-se observar no diagrama TTT, a obtenção de dois tipos distintos de perlita, apresentando morfologias diferenciadas, as quais são denominadas de perlita grosseira e de perlita fina, em função da temperatura em que a transformação ocorre. A obtenção de perlita, para o aço considerado, é verificada para uma faixa de temperaturas aproximada variando entre A1 e 550 °C. Pode-se observar que quanto menor a temperatura em que a transformação ocorre, mais refinada é a microestrutura resultante e, conseqüentemente, maior a dureza do constituinte e do material obtido, o que é explicado pelo mecanismo de aumento de resistência por refino de grão, conforme visto no ítem 2.1. Além da perlita, já definida no ítem 1.4.3, o diagrama TTT do aço eutetóide apresenta um outro produto de transformação da austenita, o qual é chamado de bainita. Ambos os produtos, perlita e bainita, são obtidos através de transformação envolvendo difusão atômica, caracterizando-se portanto por uma transformação termicamente ativada e dependente do tempo, conforme esperado.

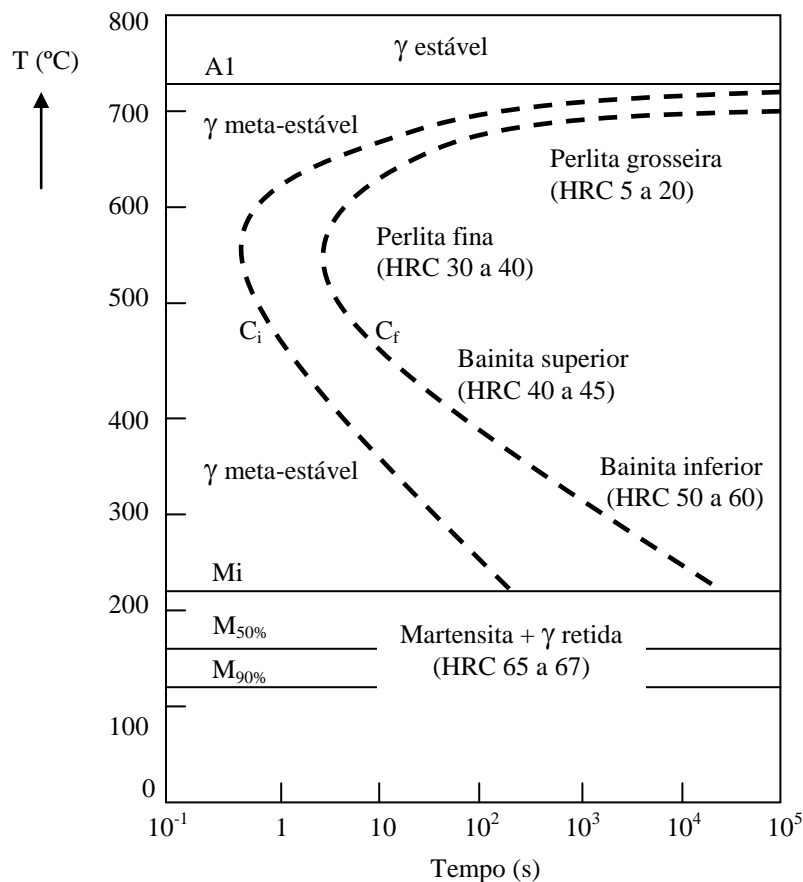


Figura 42 – Diagrama TTT esquemático para o aço eutetóide.

Define-se:

*Bainita*: constituinte bifásico formado por agregados de ferrita em forma de pena (bainita superior, obtida para temperaturas da ordem de 450 °C) ou por ferrita acicular em forma de agulhas (bainita inferior, obtida para temperaturas da ordem de 200 °C) apresentando uma dispersão extremamente refinada de carboneto de ferro (cementita) ao longo da ferrita. Sua dureza pode variar de HRC 40 a 60. Caracteriza-se por conferir aos aços uma excelente relação entre resistência mecânica e ductilidade, ou seja, excelente tenacidade, sendo especialmente indicado para a fabricação de cabos de elevadores, cordas de instrumentos musicais, entre outras aplicações.

Na Figura 43 é apresentado o aspecto típico do constituinte bainita nos aços. Pelo fato da fase cementita ser extremamente refinada na estrutura bainítica, normalmente não se consegue distinguir a fase carboneto distribuída na ferrita. Neste caso específico, seria necessário o recurso da microscopia eletrônica, usando-se aumentos da ordem de 15.000X, inviáveis por microscopia ótica.

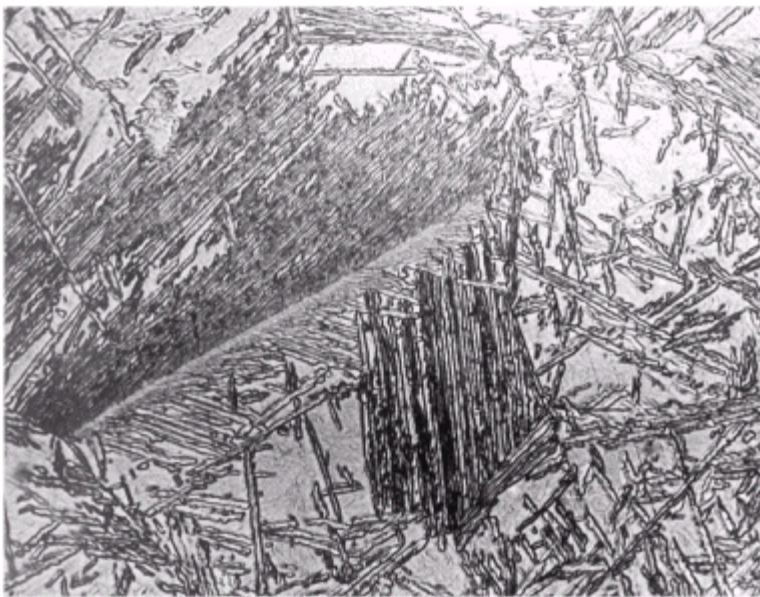


Figura 43 – Aspecto da bainita obtida em aço tratado isotermicamente. Ataque químico Nital-3%. (Metallographic supplies – P.F. Dujardin & CO, 1958).

Cabe ressaltar que a obtenção de uma microestrutura bainítica nos aços somente é garantida quando da transformação isotérmica da austenita, o que é conseguido a partir do tratamento conhecido por austêmpera, conforme evidenciado na Figura 44.

Voltando à Figura 42, resta ainda explicar a ocorrência de austenita retida ( $\gamma$  retida), evidenciada no campo martensítico, definido para temperaturas abaixo de  $M_i$ . Sua presença, evidenciada em aços contendo teores acima de 0,4% C, em peso, é explicada pelo fato de que a transformação

martensítica ocorre com um aumento de volume da ordem de 4% (1,33% de aumento linear). Como a formação da martensita ocorre a partir dos contornos de grãos da austenita para a o seu interior, ou seja, no sentido da fronteira para o centro do grão, o aumento de volume, evidenciado à medida em que a transformação ocorre, tende a impossibilitar para determinadas condições a continuidade da transformação, sendo a falta de espaço para a expansão volumétrica ocorrer a principal causa da presença de austenita retida junto aos cristais de martensita. Para o caso em estudo, ou seja, em um aço eutetóide, a quantidade de austenita retida distribuída entre as placas de martensita é da ordem de 8%, em área (Figura 39: a austenita retida é a fase branca).

### 2.3.1.1 – TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA

Na Figura 44 é apresentado o diagrama TTT esquemático do aço eutetóide, estando indicado (em vermelho) a simulação de um percurso típico de resfriamento e de transformação da liga austenitizada para a obtenção de uma microestrutura bainítica (comparar com a Figura 42). Deve-se ressaltar que, uma vez cruzada a curva em C de fim de transformação da austenita, nenhuma

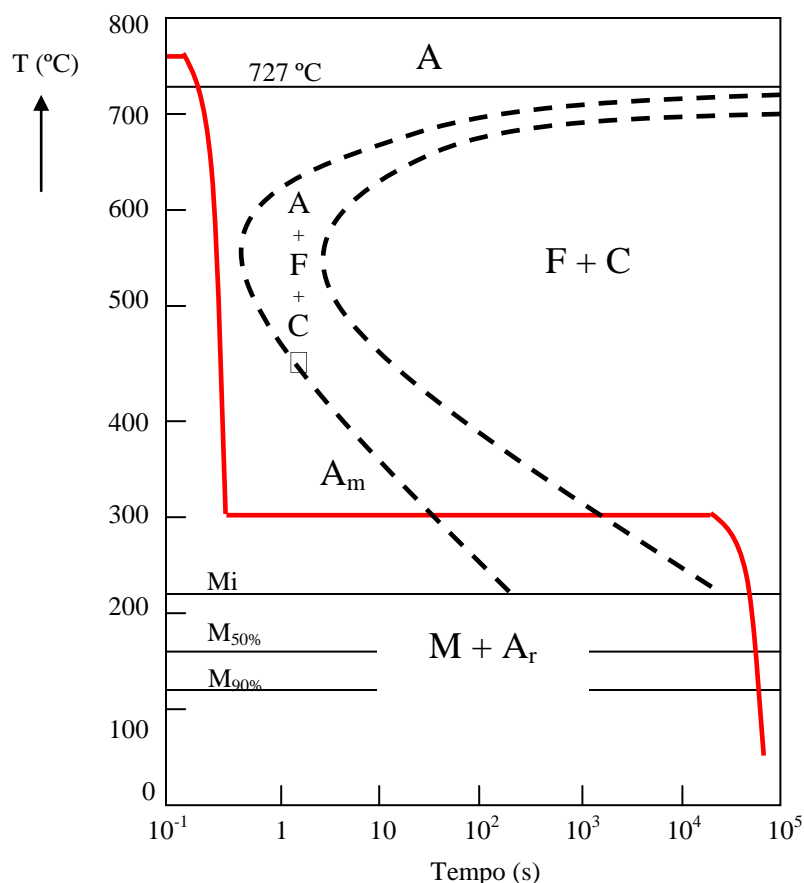


Figura 44 – Diagrama TTT esquemático do aço eutetóide apresentando um percurso típico de resfriamento e de transformação da liga austenitizada para a obtenção de bainita (as letras A, F, C e M indicam as fases austenita, ferrita, cementita e martensita, respectivamente).

transformação adicional ocorre no aço, sendo que a estrutura obtida permanece estável até a temperatura ambiente. No caso em estudo, a transformação é concluída com a obtenção da estrutura bainítica. A reprodução da condição de resfriamento e de transformação, acima considerada, é normalmente realizada, na prática, através do tratamento térmico conhecido por austêmpera.

Define-se:

*Austêmpera*: tratamento que provoca uma transformação isotérmica da austenita em temperatura inferior à do cotovelo da curva em C, de início de transformação, de modo a dar como produto uma microestrutura bainítica. A transformação isotérmica da austenita é normalmente garantida a partir da utilização de banhos de sais fundidos em temperaturas de até 450 °C e de chumbo na fase líquida, acima de 327 °C.

Apenas a título de curiosidade, define-se:

*Recozimento isotérmico*: tratamento que provoca uma transformação isotérmica da austenita em temperatura superior à do cotovelo da curva em C, de início de transformação, de modo a dar como produto uma microestrutura perlítica.

### 2.3.2 – DIAGRAMAS TRC (TRANSFORMAÇÃO SOB RESFRIAMENTO CONTÍNUO)

A Figura 45 apresenta o diagrama TRC (diagrama de transformação sob resfriamento contínuo) esquemático para o aço eutetóide. Neste diagrama estão representadas também, a título de comparação, em linhas tracejadas, as curvas típicas em C de início e fim de transformação isotérmica da austenita (do diagrama TTT do aço eutetóide), além de uma curva representativa da taxa crítica de resfriamento (em vermelho), conforme indicada na figura.

Os diagramas TRC são assim chamados pelo fato de que nele são apresentados os produtos de transformação da austenita quando esta se transforma sob condições de resfriamento contínuo. Estes diagramas apresentam no eixo das abscissas a variável tempo e no eixo das ordenadas a variável temperatura e relacionam-se diretamente com a cinética de transformação, neste caso, definida pela velocidade com que a austenita se transforma a uma determinada taxa de resfriamento. As curvas presentes nos diagramas TRC indicam também os tempos de início e fim de transformação da austenita nas diferentes taxas de resfriamento consideradas. Estas curvas são igualmente chamadas de curva de início ( $C_i$ ) e curva de fim ( $C_f$ ) de transformação da austenita. Em relação ao diagrama TTT, as transformações obtidas sob condições de resfriamento contínuo normalmente sofrem um pequeno retardo tanto em termos de temperaturas como de tempos, ou seja, ocorrem para temperaturas ligeiramente menores e para tempos ligeiramente maiores. Resulta disso que as curvas TRC sempre apresentam-se ligeiramente deslocadas para baixo e para a direita em relação às respectivas curvas do diagrama TTT do mesmo aço considerado. A Figura 45 ilustra adequadamente este fato. Deve-se ressaltar também que cada aço apresenta um diagrama TRC próprio, valendo exclusivamente para o aço considerado, existindo, portanto, uma infindável quantidade de diagramas TRC.

A análise do diagrama TRC do aço eutetóide permite evidenciar que através de resfriamento

contínuo não é possível a obtenção da microestrutura bainítica, o que se repete para os demais aços-ao-carbono. Note-se que a parte inferior das curvas em C do diagrama isotérmico desaparece no diagrama TRC, indicando apenas a possibilidade de obtenção de perlita, grosseira ou refinada, dependendo da taxa de resfriamento utilizada, além da possibilidade de obtenção de uma microestrutura martensítica, para o caso de se utilizar uma taxa de resfriamento mais rápida que a taxa crítica de resfriamento, indicada na Figura 45. A taxa crítica é aquela que tangencia a curva de início de transformação da austenita ( $C_i$ ) no seu ponto mais extremo à esquerda. Caso a taxa de resfriamento utilizada em um determinado tratamento cruze a curva de início de transformação ( $C_i$ ), porém não cruze com a curva de fim de transformação da austenita ( $C_f$ ), a liga apresentará à temperatura ambiente uma mistura de perlita e martensita, além de um pouco de austenita retida.

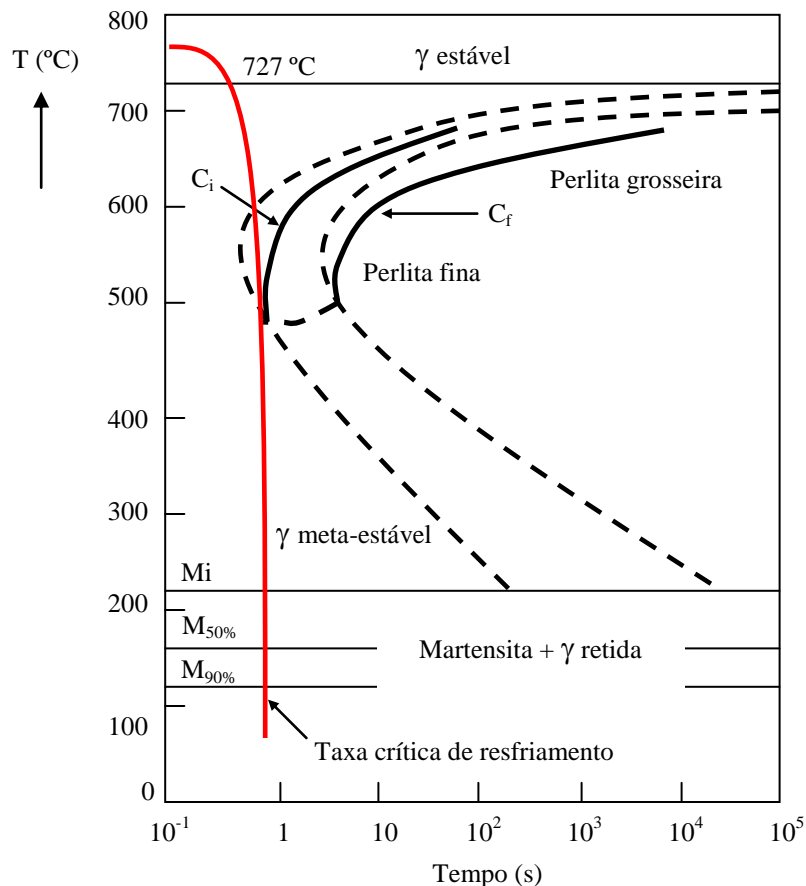


Figura 45 – Diagrama TRC esquemático para o aço eutetóide.

Na prática, a aplicabilidade do diagrama TRC é bem mais ampla do que a do diagrama TTT, pois a maioria dos tratamentos térmicos de interesse na engenharia são realizados utilizando-se resfriamentos contínuos. Na Figura 46 é apresentado o diagrama TRC esquemático do aço eutetóide, com a superposição de curvas de resfriamento contínuo típicas dos tratamentos térmicos de têmpera em água, têmpera em óleo, normalização e de recozimento pleno, estando indicados, ainda, os respectivos constituintes obtidos para cada tratamento.

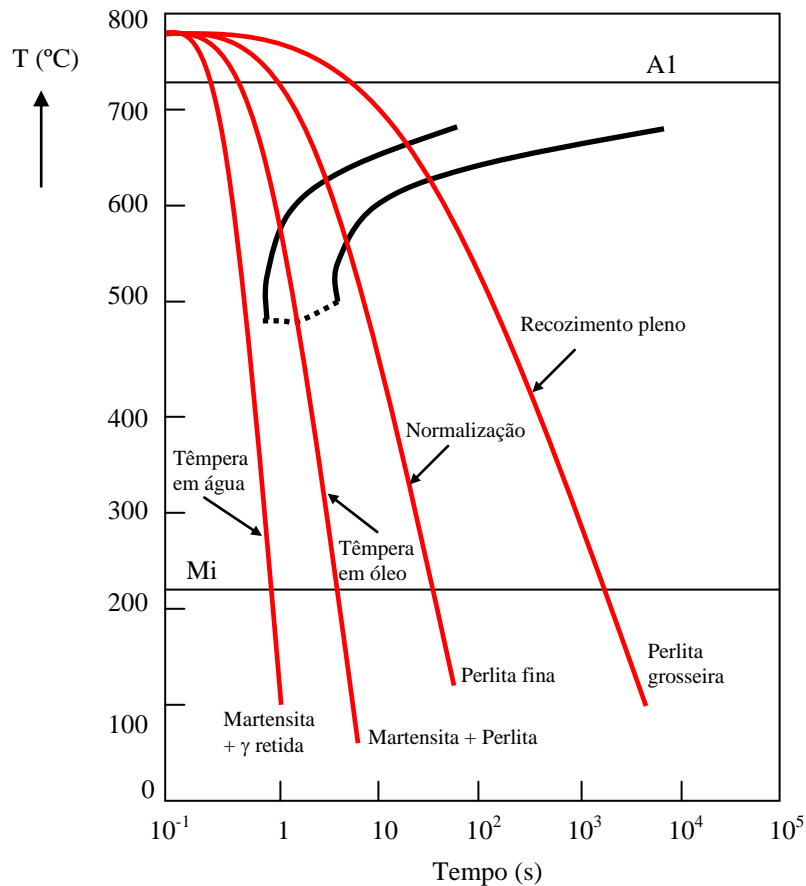


Figura 46 – Diagrama TRC esquemático do aço eutetóide, com a superposição de curvas de resfriamento contínuo típicas dos tratamentos térmicos de têmpera em água, têmpera em óleo, normalização e de recozimento pleno, com a indicação dos respectivos produtos de transformação.

### 2.3.2.1 – TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO

Define-se:

*Têmpera*: tratamento que consiste no aquecimento da liga acima da zona crítica (linhas  $A_3$  e  $A_1$  do diagrama Fe-C, respectivamente para os aços hipoeutetóides e para os aços hipereutetóides), seguido de um resfriamento rápido (contínuo), o qual pode ser feito em água, óleo, ou mesmo ao ar, dependendo da temperabilidade do aço, a qual é responsável por definir a taxa de resfriamento mais adequada para a liga considerada (ver Figura 45), promovendo a transformação da austenita em martensita, em temperaturas abaixo da temperatura  $M_i$ . Quando a temperatura final do tratamento de têmpera é superior à temperatura  $M_f$  (temperatura de fim de transformação martensítica da liga considerada), parte da austenita permanece associada à martensita, não sofrendo a transformação e ficando retida entre as agulhas de martensita, recebendo assim o nome de austenita retida (ver item 2.3.1). O tratamento de têmpera, em geral, tem por objetivo o aumento da dureza, do limite de escoamento, da resistência a tração, à compressão e ao desgaste,



às custas da diminuição da resistência ao choque, do alongamento, da estrição e da ductilidade do aço.

A quantidade de austenita retida é uma função da quantidade de carbono da liga, tornando-se importante nos aços a partir de 0,4% C, em peso. A Figura 47 apresenta a evolução da quantidade de martensita do tipo massiva ou na forma de agulhas (“lath martensite”) e de austenita retida em função do teor de carbono do aço. Nesta figura é também apresentada a evolução da temperatura de início de transformação martensítica ( $M_i$ ) também em função do teor de carbono do material.

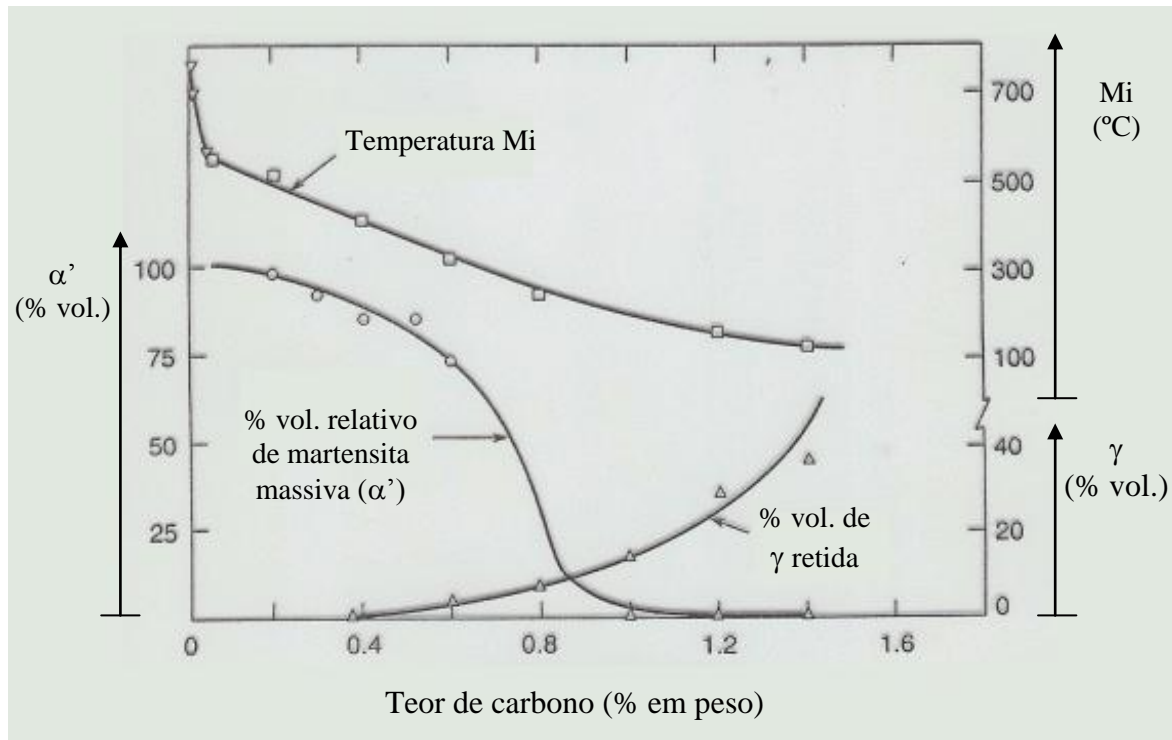


Figura 47 - Evolução da quantidade de martensita do tipo massiva (“lath martensite”), da temperatura de início de transformação martensítica ( $M_i$ ) e da quantidade de austenita retida em função do teor de carbono do aço, em peso (adaptado de Reed-Hill, 1991).

A análise da Figura 47 possibilita a obtenção de algumas informações extremamente importantes:

- com relação ao tipo da martensita: verifica-se que o tipo da martensita é uma função direta do teor de carbono da liga. Para aços contendo teores acima de 1,0% C, a martensita é praticamente, na sua totalidade, do tipo acicular ou “plate martensite” (ver item 2.1.1);
- com relação à temperatura de início de transformação martensítica  $M_i$ : fica evidenciado que quanto maior o teor de carbono da liga, menor é a temperatura  $M_i$ . Note-se que  $M_i$  diminui de cerca de 500  $^{\circ}\text{C}$  para um aço com 0,2% C, para cerca de 150  $^{\circ}\text{C}$  para um aço com 1,2% C. Deve-se ressaltar que à medida em que  $M_i$  diminui, o mesmo ocorre com  $M_f$  (temperatura de fim de transformação martensítica). Consequentemente, para aços apresentando teores superiores a 0,4% C,  $M_f$  encontra-se abaixo da temperatura ambiente, resultando na ocorrência

- de austenita retida, no material tratado;
- c) com relação à quantidade de austenita retida: esta aumenta com o teor de carbono da liga. Pode-se observar que aços apresentando teores inferiores a 0,4% C praticamente não apresentam austenita retida após o tratamento de têmpera. A quantidade de austenita retida cresce a partir de 0,4% C para cerca de 40% em volume, em aços apresentando teores superiores a 1,4% C, em peso.

Por fim, deve-se especificar de forma correta o tempo de manutenção na temperatura especificada, precedendo-se à etapa de resfriamento no tratamento de têmpera. O tempo de permanência na temperatura especificada de tratamento, para uma adequada homogeneização da temperatura na peça, ou completa austenitização do material, é via de regra, da ordem de 20 minutos para cada centímetro de espessura da peça, ou seja, cerca de 2 min/mm de seção transversal. Esta regra, para definição do tempo de permanência, é válida também para os demais tipos de tratamentos.

Por outro lado, é fundamental ressaltar que sempre e de forma imprescindível, imediatamente após a têmpera, faz-se necessário a realização do tratamento térmico de revenido, visando o alívio de tensões. Isto se deve à condição de extrema fragilidade conferida ao aço, pelo tratamento de têmpera, quando da transformação martensítica (ver item 2.1.1), decorrente da elevada dureza da martensita formada e das tensões internas e residuais inerentes à esta transformação.

Como no resfriamento rápido necessário para a realização da têmpera, a velocidade de resfriamento da superfície é sempre maior que a do núcleo ou centro do material ou da peça (ver Figura 48), aquela se transforma primeiro em martensita e, na sequência, o mesmo ocorre com o núcleo. Lembrando-se que a transformação martensítica ocorre com aumento de volume (conforme visto no item 2.3.1) e considerando-se que o núcleo é a última parte do material a se transformar, é comum o surgimento de tensões de tração na superfície, as quais podem dar origem a fissuras, podendo resultar, ainda, no trincamento das peças. Se haverá ou não uma resultante de tensões de tração e, portanto, o risco de formação de trincas na superfície da peça, isso dependerá da resultante de dois esforços concorrentes: a) dos esforços originados a partir da contração térmica devido ao resfriamento brusco; e b) dos esforços originados a partir da expansão volumétrica devido a transformação martensítica no material. A escolha adequada do aço associada à elevada temperabilidade do material ajudam a reduzir esse risco.

Define-se:

*Revenido*: tratamento que consiste em reaquecer a peça ou o material temperado até uma temperatura conveniente, abaixo da zona crítica (linha  $A_1$  do diagrama Fe-C), e resfriá-la novamente até a temperatura ambiente. São usuais tempos de permanência da ordem de 1, 2 ou até 4 horas, na temperatura adotada, a qual é escolhida normalmente para valores variando entre 150 e 650 °C (a faixa de temperatura entre aproximadamente 200 e 300 °C não é recomendada por apresentar o problema associado à fragilidade ao revenido, que se caracteriza pela diminuição da resistência ao choque do aço). A escolha da temperatura de revenido é uma função direta do conjunto de propriedades mecânicas que se deseja obter no aço, após a realização dos ciclos térmicos de têmpera e revenido, informações, essas, disponíveis nos diagramas de revenimento, os quais são fornecidos normalmente pelo fabricante do aço, conforme visto à frente. O revenido tem por objetivo o alívio de tensões internas perigosas e a diminuição da dureza e da fragilidade

excessivas, as quais são típicas do material temperado. Com o revenido diminui-se progressivamente, com o aumento da temperatura de tratamento, a dureza, o limite de resistência a tração e o limite de escoamento, aumentando-se, em contrapartida, o alongamento, a estricção e a resistência ao choque.

A nível metalúrgico, no material, o aquecimento da martensita, durante o revenido, possibilita a reversão do reticulado TCC (tetragonal de corpo centrado), meta-estável, para o reticulado estável CCC (cúbico de corpo centrado), produz ainda reajustes internos que produzem alívio de tensões e, por fim, produz uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram, de acordo com a temperatura e tempo especificados. As seguintes transformações podem ser observadas em função da temperatura de revenido:

- a) entre 25 e 100 °C: ocorre uma segregação ou uma redistribuição de átomos de carbono junto às discordâncias, afetando pouco a dureza do material;
- b) entre 100 e 250 °C (também chamado de 1º estágio do revenido): ocorre a precipitação do carboneto de ferro do tipo  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{C}$ ), de reticulado hexagonal, iniciando-se a diminuição da dureza do material;
- c) entre 200 e 300 °C (também chamado de 2º estágio do revenido): ocorre a transformação de austenita retida em bainita, sendo que a dureza do material continua a cair;
- d) entre 250 e 350 °C (também chamado de 3º estágio do revenido): forma-se um carboneto de ferro metaestável do tipo  $\text{Fe}_5\text{C}_2$ , podendo evoluir para a cementita, sendo que a dureza do material continua a cair;
- e) entre 400 e 600 °C: ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância, sendo que os aglomerados de cementita passam para uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular, sendo que a dureza do material cai rapidamente nesta faixa de temperatura;
- f) entre 500 e 600 °C (também chamado de 4º estágio do revenido): somente nos aços contendo W, Mo e V (normalmente nos aços de alta-liga, do tipo rápidos) ocorre a precipitação de carbonetos de liga nesta faixa de temperatura, resultando no efeito conhecido por endurecimento secundário, que se caracteriza por um ganho adicional de dureza e resistência mecânica, otimizando-se as propriedades do material quando revenido nessas temperaturas; e
- g) entre 600 e 700 °C: ocorre recristalização e crescimento de grão, a cementita precipitada apresenta-se de forma esferoidal, a ferrita apresenta-se de forma equi-axial, resultando numa estrutura frequentemente chamada de esferoidita, a qual se caracteriza por ser muito dúctil e de baixa dureza. A microestrutura obtida no revenido realizado nesta faixa de temperaturas é similar à apresentada na Figura 23, guardando-se as devidas proporções das dimensões dos precipitados de cementita e dos grãos de ferrita, uma vez que a estrutura obtida no revenido é significativamente mais refinada do que a obtida através da esferoidização da perlita.

Deve-se enfatizar que em todas as etapas do revenido onde se verifica a redistribuição de átomos de carbono ou a precipitação de fases carbonetos, estes eventos ocorrem simultaneamente à saída do carbono de solução sólida da martensita, por meio de difusão atômica, resultando na transformação progressiva da estrutura TCC (martensítica) para a estrutura CCC (ferrítica). Daí se explica o termo típico usado para a martensita revenida, a qual é chamada de martensita cúbica.

### 2.3.2.2 – TRATAMENTO TÉRMICO DE MARTÊMPERA

A Figura 48 apresenta o procedimento tipicamente usado no tratamento térmico de martêmpera do aço, o qual consiste em resfriá-lo de forma contínua até a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura  $M_i$ , de modo que, após a manutenção em um pequeno intervalo de tempo nesta temperatura, tempo este suficiente apenas para ocorrer a equalização das temperaturas tanto da superfície quanto do núcleo, garante-se que a evolução da transformação martensítica ocorrerá simultaneamente em ambas as partes do material, núcleo e superfície, com a continuidade da queda da temperatura para valores inferiores a  $M_i$ . Este procedimento diminui os riscos de surgimento de tensões de tração na superfície do material e, conseqüentemente, de fissuras nas peças tratadas, quando comparadas às peças temperadas.

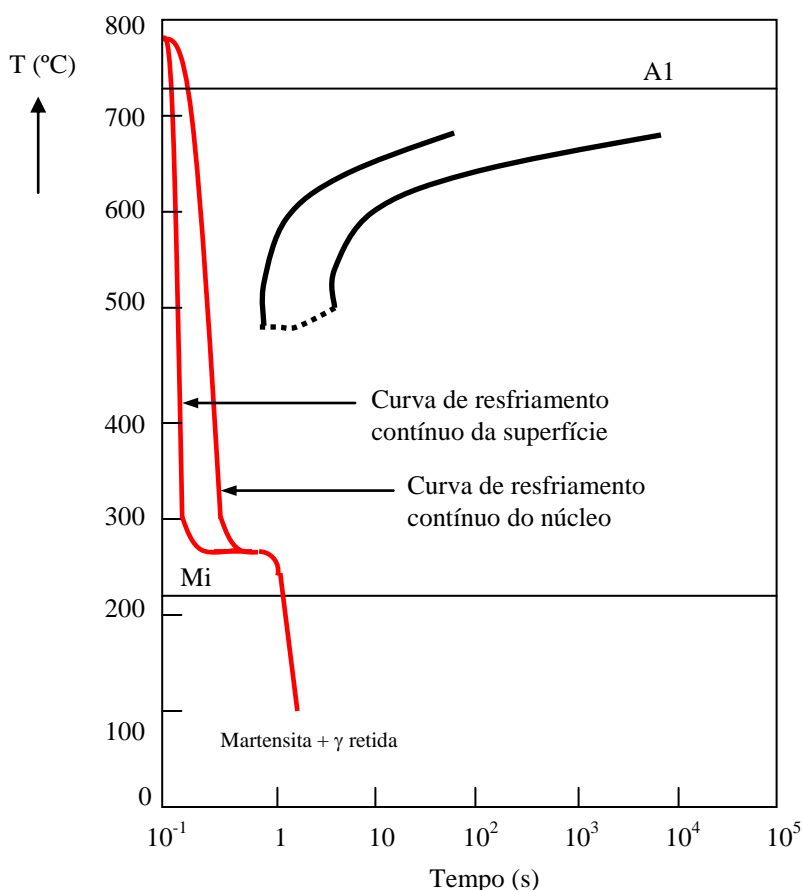


Figura 48 – Procedimento de resfriamento contínuo tipicamente usado no tratamento térmico de martêmpera do aço.

### 2.3.2.3 – TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO PLENO

Define-se:

*Recozimento Pleno:* é o tratamento por resfriamento contínuo que provoca a transformação da austenita num produto constituído por perlita, a qual pode estar associada à ferrita (ferrita proeutetóide), no caso dos aços hipoeutetóides e à cementita (cementita proeutetóide), no caso dos aços hipereutetóides. Na prática, este tratamento consiste no aquecimento do aço até acima da zona crítica (linhas  $A_3$  e  $A_1$  do diagrama Fe-C, respectivamente para os aços hipoeutetóides e para os aços hipereutetóides), seguido de um resfriamento bastante lento, o que é normalmente conseguido resfriando-se o material dentro do forno com a porta mantida fechada, após a completa austenização do material. O recozimento pleno tem por objetivo restituir ao material suas propriedades normais que foram alteradas por um tratamento mecânico ou térmico anterior ou ainda refinar texturas brutas de fusão. Este tratamento “apaga” todas as texturas obtidas pelos tratamentos anteriores, porque, ao passar pela zona crítica, no aquecimento, este se recristaliza sempre sob a forma de grãos normais de austenita (chamados de equiaxiais), independente da textura (textura inicial) que apresente antes de se atingir a referida zona. A temperatura de recozimento varia em função do teor de carbono do aço, sendo indicado 50 °C acima do limite superior da zona crítica (acompanhando as linhas  $A_3$  e  $A_1$ ).

#### **2.3.2.4 – TRATAMENTO TÉRMICO DE NORMALIZAÇÃO**

Define-se:

*Normalização:* consiste num tipo de recozimento com o resfriamento contínuo do material sendo realizado ao ar e não dentro do forno. A normalização tem por objetivo refinar a microestrutura, quando comparada àquela obtida no recozimento pleno, o que é conseguido pela maior taxa de resfriamento imposta ao material quando este é resfriado ao ar, resultando na passagem da temperatura pela zona crítica a uma velocidade maior e, conseqüentemente, na obtenção de um super-resfriamento mais elevado.

*Super-resfriamento:* no presente contexto, é representado pelo gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ), para o qual a austenita é resfriada para uma condição de metaestabilidade, abaixo da zona crítica, resultando numa condição de fora de equilíbrio. Quanto maior o super-resfriamento, mais fora do equilíbrio a austenita se encontra, podendo-se esperar, neste caso, uma taxa de nucleação de cristais da fase ferrita muito mais elevada (transformação  $\gamma/\alpha$ , no resfriamento), o que resulta na obtenção de uma maior quantidade de grãos da nova fase e, deste modo, no refinamento da microestrutura obtida. Em outras palavras, o super-resfriamento atua como força motora para a nucleação da fase em transformação, exercendo influência direta na taxa de formação de núcleos estáveis da nova fase.

A temperatura de normalização varia em função do teor de carbono do aço, sendo indicado 50 °C acima das linhas  $A_3$ , para os aços hipoeutetóides e  $A_{cm}$ , para os aços hipereutetóides, as quais delimitam o campo austenítico no diagrama Fe-C.