

M E C

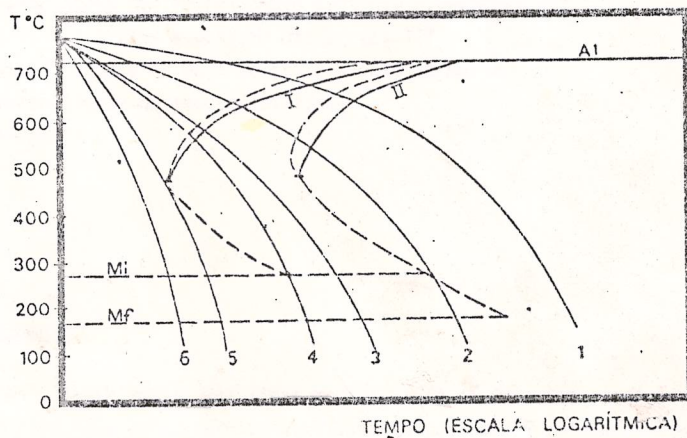


S E S G

ESCOLA TÉCNICA FEDERAL DE OURO PRETO

TRABALHO METALÚRGICO

Transformações fora do equilíbrio
para os aços



Elaboração:

Prof. Carlos Roberto Matias

Prof. João Bosco de O. Perdigão

Prof. Genilton José Nunes

TRABALHO METALÚRGICO

ELABORADA POR: CARLOS ROBERTO MATIAS & JOÃO BOSCO DE OLIVEIRA PERDIGÃO
ASSUNTO: TRANSFORMAÇÕES FORA DO EQUILÍBRIO PARA OS AÇOS.

ÍNDICE:

01. Introdução
02. Austenitização
03. Reação martensítica e velocidade crítica de têmpera
04. Transformações isotérmicas - "Curvas TTT"
- 05: Curvas TTT para os aços hipo e hipereutetóides
06. Constituintes dos aços obtidos fora do equilíbrio
07. Transformações com resfriamento contínuo - "Curvas TRC"
08. Fatores que afetam a posição das curvas TTT
09. Efeito da seção da peça no resfriamento da mesma
10. Temperabilidade ou endurecibilidade
11. Bibliografia

01. INTRODUÇÃO

Quando o resfriamento das ligas metálicas se dá fora das condições de equilíbrio, ou seja, com velocidade de resfriamento superior à de equilíbrio, as transformações correspondentes são ditas fora do equilíbrio.

No presente trabalho, nos atermos às transformações fora do equilíbrio, para as ligas Fe-C, no campo correspondente aos aços.

02. AUSTENITIZAÇÃO

Entende-se por austenitização (austenitização total) a completa transformação do aço em austenita, ou seja, o único constituinte presente no aço passa a ser

do em miúdos, a grosso modo podemos dizer que a martensita é uma solução sólida saturada de cémentita em ferro alfa (partículas submicroscópicas de cémentita, em grande quantidade, dissolvidas em ferro no estado alotrópico alfa).

Apresentaremos, oportunamente, as características metalográficas e mecânicas da martensita.

A fig. 1-a ilustra a transformação da austenita em perlita.

04. TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS - "CURVAS TTT"

Vamos agora passar, mais detalhadamente, ao estudo do efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita.

4.1. GENERALIDADES

Os fenômenos que ocorrem quando o aço é resfriado a diferentes velocidades de resfriamento são melhor compreendidos pelo estudo das transformações isotérmicas da austenita em perlita, em diversas temperaturas abaixo de 727°C.

Ou seja, pelo resfriamento rápido de um aço eutetóide até uma temperatura abaixo de 727°C, mantendo-se, a seguir, essa temperatura constante, até que toda a transformação da austenita se processe.

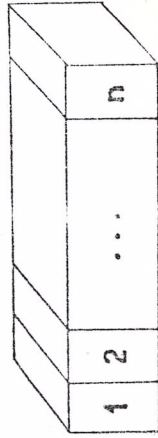
Este tipo de transformação da austenita, a temperatura constante, dá origem às curvas temperatura - tempo - transformação, ou mais simplificada, curvas TTT.

4.2. MONTAGEM DAS CURVAS TTT PARA UM AÇO EUTETÓIDE

A montagem das curvas TTT é feita através das curvas em "S", a partir das quais retiramos o tempo de início e de fim de transformação da austenita em dada temperatura.

Para montagem da curva em "S", adotamos o procedimento seguinte:

1. De uma mesma barra de aço eutetóide, tiramos vários c.p., cujas dimensões são relativamente pequenas, a fim de que o resfriamento se processe ao mesmo tempo em toda a sua secção.
2. Os c.p. são aquecidos para austenitização total.



3. Os c.p. são retirados do forno de austenitização e mergulhados imediatamente em um meio (banho de óleo ou sal fundido) a uma temperatura fixa T_f .

abaixo da linha inferior da Zona crítica (A_1) e ali mantidos por determinado intervalo de tempo.

4. A cada intervalo de tempo retiramos um c.p. deste meio de temperatura fixa e o resfriamos imediatamente até a temperatura ambiente. Desta forma, a austenita que não se transformou à temperatura T_1 , transforma-se em "martensita", (devido ao resfriamento brusco).

Após resfriado, cada c.p. é analisado metalograficamente. Assim determinamos a percentagem de produto de transformação à temperatura T_1 (temp. fixa) e de martensita (devido ao resfriamento brusco) em cada c.p.

Podemos esquentar o procedimento anterior na Fig. 1-b.

Para cada intervalo de tempo de permanência, a temperatura T_1 (temp. fixa), nós teremos levantada a percentagem de transformação isotérmica e construiremos um gráfico: % de transformação X tempo (em escala logarítmica).

OBS.: tomamos tempo em escala logarítmica para tornar viável a construção do gráfico, pois, existem transformações que se iniciam com tempos inferiores a um segundo e se completam depois de horas de permanência à temperatura considerada.

A fig. 2 representa tal gráfico para diferentes valores de temperatura (T_1, T_2, \dots, T_n), inferiores a 727°C.

t_i - indica tempo de permanência necessária para que haja início de transformação a dada temperatura;

t_f - indica tempo de permanência para que haja término de transformação a dada temperatura.

NOTA: na prática, t_i indica tempo para que haja 0,5% de transformação isotérmica da austenita e t_f , tempo para que haja 99,5% de transformação isotérmica da austenita.

A partir das curvas em "S", montam-se as curvas TTT. Para construção destas curvas, em ordenada lançamos temperatura e em abcissa, tempo (escala logarítmica). Para cada temperatura lança-se o tempo de início e de fim de transformação. Unindo-se todos os tempos correspondentes à início de transformação (t_i) obtemos a curva I; idem para os pontos de fim de transformação (t_f), obtemos a curva II.

4.3. ANÁLISE DA CURVA TTT PARA O AÇO EUTETÓIDE

A fig. 3 representa, esquematicamente, a curva TTT para o aço eutetóide. Vamos agora, fazer uma análise desta curva.

a) A linha horizontal, na parte superior do diagrama, representa a linha inferior da zona crítica ($A_1 \approx 727^\circ\text{C}$).

b) A linha em forma de C, marcada I, define o tempo necessário para que a transformação da austenita se inicie.

c) A linha em forma de C, marcada II, define o tempo necessário para que

a transformação da austenita se complete.

d) A transformação demora a se iniciar e a se completar, a temperatura logo abaixo da zona crítica, em outras palavras, a velocidade de transformação é baixa inicialmente.

e) A demora para a transformação se iniciar e se completar é cada vez menor à medida que decresce a temperatura, até que, a cerca de 550°C, tem-se o mais rápido início de transformação.

f) Abaixo de 550°, aumenta-se novamente o tempo para que a transformação se inicie, ao mesmo tempo que a velocidade de transformação decresce.

g) Finalmente, a temperatura de cerca de 200°C, a linha M_i e, mais abaixo, a linha M_f, indicam o aparecimento de outro tipo de transformação, a qual tem lugar instantaneamente, independente, portanto, do tempo. A faixa de temperatura entre as quais ocorre essa transformação, totalmente diferente da indicada pelas curvas C_i e de M_i a M_f. Assim, a cerca de 200°C, um novo constituinte, chamado martensita, aparece instantaneamente, em percentagens crescentes, a partir de M_i, até constituir a temperatura correspondentes a M_f, a totalidade do produto de transformação (*).

* A rigor, a formação da martensita não deveria ser representada no diagrama de transformação isotérmica, pois independe do tempo. Isto é, essa formação se dá com a queda da temperatura, prossegue a medida que esta cai, mas se estaciona se a mesma é mantida constante.

A fig. 1-c ilustra, metalograficamente, uma transformação isotérmica.

05. CURVAS TTT PARA OS AÇOS HIPO E HIPERUTETÓIDES

As figuras 4-a; 4-b; 4-c indicam, esquematicamente, as curvas TTT para os aços eutetóide; hiper e hipoeutetóide respectivamente.

Para o aço hipoeutetóide (Fig. 4-c) vai aparecer a linha A₃, acima da linha A₁, que representa a temperatura crítica superior. Surge, ainda, a linha F_i que indica a formação da ferrita proeutetóide, quando o aço entra, durante o resfriamento lento, na zona crítica.)

Para o aço hiperutetóide (Fig. 4-b), aparecerá a linha A_{cm}, acima da linha A₁, que representa a temperatura crítica superior. Surgirá, ainda, a linha C_i que indica a formação inicial da cementita. Esta linha C_i indicará a formação da cementita proeutetóide, quando o aço entra, durante o resfriamento lento, na zona crítica.)

NOTA: devemos ressaltar que as figuras aqui apresentadas são apenas esquemáticas, uma vez que, para cada composição química, tem-se uma curva TTT.

Aumentando-se o teor de carbono dos aços, as linhas M_s e M_f tendem a se abaixar; as linhas I e II, a se deslocarem para a direita. Isto porque o carbono é um elemento que aumenta o campo de existência da austenita (elemento gama-gênico).

to pode ser observado na fig. 4.

OBS.: No caso dos aços hipereutetóides, as linhas I e II tendem a se deslocarem para a esquerda à medida que o teor de carbono cresce. Esta anomalia é explicada pelo fato de que o aço sendo hipereutetóide, forma-se a cementita livre, provocando heterogeneidade na austenita próxima a ela. Porém, sabe-se que a heterogeneidade da austenita favorece a reação de formação da perlita. Assim as curvas I e II tendem a se deslocarem para a esquerda.

06. CONSTITUINTES DOS AÇOS OBTIDOS FORA DO EQUILÍBRIO

Estes constituintes são:

- Perlita
 - grossa
 - normal
 - fina
- Bainita
 - superior
 - inferior
- Martensita
- Sorbita

6.1. PERLITA

Este constituinte já foi descrito na apostila de "Transformação no equilíbrio para as ligas Fe-C" (pág. 06). Sua formação se dá com difusão de carbono a longa distância. Porém a perlita apresenta-se com lamelas de espessura cada vez mais finas, à medida que se aumenta a velocidade de resfriamento.

Assim, temos:

- a) Perlita Grossa (P.G.): distância interlamelar em torno de 400 m μ . A sua dureza é cerca de 200 HB.
- b) Perlita Normal: distância interlamelar em torno de 350 m μ . A sua dureza é cerca de 220 HB.
- c) Perlita Fina (P.F.): distância interlamelar em torno de 250 m μ . A sua dureza é cerca de 300 HB.

A medida que diminui a distância interlamelar, aumenta-se a resistência mecânica, porém cai a ductilidade. O exposto se explica pelo fato de que, quanto mais fina a perlita, menos espaço existe para a deformação plástica da ferrita que a compõe, ou ainda, a deformação da ferrita é mais facilmente freada pelas lamelas de cementita.

OBS.: a perlita muito fina, com distância interlamelar da ordem de 100m μ , recebe a denominação de "Troostita". É o constituinte que aparece associado à martensita e austenita nas estruturas de têmpera. Aparece com aspecto nodular nos contornos de grão de martensita e austenita. É o constituinte que mais se escurece-

ce após ataque pelo nital e picral. Suas características mecânicas são:

LR: em torno de 160 Kgf/mm²;

Dureza: cerca de 400 HB;

Alongamento: cerca de 10%

6.2. BAINITA (B)

Decorre das transformações isotérmicas (à temperatura constante) da austenita, na faixa de 200°C a 550°C. Pode surgir, mas raramente aparece, como produto de têmpera. Sua formação se dá com difusão de carbono a curta distância.

Divide-se em bainita superior e inferior.

a) Bainita Superior (B.S.): matriz ferrítica, contendo carbonetos (Fe₃C) sob a forma de placas descontínuas, paralelas à ferrita. Forma-se na faixa de 400°C a 550°C.

b) Bainita Inferior (B.I.): constituída de agulhas de ferrita e placas de carboneto (Fe₃C) que fazem um ângulo de aproximadamente 60° com o eixo das agulhas de ferrita. Forma-se na faixa de 200°C a 400°C.

dureza da bainita está na faixa de 40 a 60 HR_C.

6.3. MARTENSITA (M)

Como já tivemos oportunidade de dizer, a martensita é uma solução sólida do ferro alfa supersaturada em partículas submicroscópicas de cementita. Seu reticulado cristalográfico é o tetragonal. Não há difusão de carbono na sua formação.

Seu aspecto metalográfico é de agulhas em zig-zag, em ângulos de 60°. A "martensita de têmpera" apresenta-se com coloração clara, enquanto a "martensita revenida" (com revenido na faixa de 50°C a 250°C) aparece com coloração mais escura, quando atacada pelo nital e picral.

E o constituinte mais duro dos aços, depois dos carbonetos. Sua dureza está na faixa de 50 a 67 HR_C. Esta alta dureza pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção destas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do ferro alfa (formação no resfriamento), onde atuam com espécie de "chavetas", impedindo o escorregamento;

- distorção do reticulado;

- tensões internas;

- tamanho de grão muito pequeno.

Sua resistência mecânica se eleva com o aumento do teor de carbono do aço.

Suas características mecânicas são:

LR: na faixa de 170 a 250 Kgf/mm²;

Dureza: na faixa de 50 a 67 HR_C;

Alongamento: na faixa de 2,5 a 0,5%.

6.4. SORBITA (S)

E constituída por nódulos extremamente pequenos de cementita em uma matriz ferrítica. Sua formação se dá pela difusão dos átomos de carbono.

Pode ser obtida, ou a partir da austenita com velocidade de resfriamento bastante inferior à velocidade crítica de têmpera, ou no tratamento térmico de revenido na faixa de 400°C a 550°C. Suas características mecânicas são as seguintes:

LR: na faixa de 90 a 140 Kgf/mm²;

Dureza: na faixa de 250 a 400 HB;

Alongamento: cerca de 10%

07. TRANSFORMAÇÕES COM RESFRIAMENTO CONTÍNUO - "CURVAS TRC"

A maior parte dos tratamentos térmicos não são feitos à temperatura constante, mas sim com resfriamento contínuo, ou seja, com a temperatura diminuindo a todo instante, como por exemplo ao ar, desligando-se o forno, etc.

Assim sendo, os diagramas TRC, a rigor, não podem ser utilizados com o objetivo de se verificar as estruturas resultantes do resfriamento contínuo a determinadas velocidades.

Seguindo o mesmo raciocínio das curvas TRT, podemos construir as curvas de transformação com resfriamento contínuo - curvas TRC - lançando mão do método dilatométrico. A fig. 5 representa, esquematicamente, a curva TRC para um aço eutóide. As linhas tracejadas representam a curva TRT; as linhas contínuas, a curva TRC.

Observando-se a fig. 5 podemos ver que as curvas TRC estão deslocadas um pouco mais abaixo e à direita das curvas TRT, devido à inércia de fenômeno de transformação da austenita.

As curvas TRC tornam-se importantes quando colocamos sobre elas as leis de resfriamento de um determinado tratamento térmico. Isto nos possibilita prever qual a estrutura a ser obtida antes da realização do mesmo. A fig. 5 ilustra esta afirmativa.

Consideremos para o nosso estudo seis leis de resfriamento (curvas 1, 2, 3, 4, 5 e 6). Analisemos cada uma delas:

- Curva 1: representa um resfriamento contínuo e muito lento, como ao forno por exemplo, onde obtemos uma perlita grossa (material de baixa dureza - 5 a 20 HR_C).

- Curva 2: já representa um resfriamento mais rápido, como por exemplo ao ar. A estrutura decorrente será uma perlita mais fina (material de dureza mais elevada - 30 a 40 HR_C).

- Curvas 3 e 4: representam um resfriamento mais rápido ainda. Estas curvas cortam a linha I, mas não a II. Assim, a transformação em perlita apenas se inicia e a austenita restante se transforma em martensita. Então teremos a estrutura

resultante composta de perlita e martensita. A curva 3 dará uma estrutura com mais perlita e menos martensita que a curva 4.

- Curva 6: corresponde a um resfriamento brusco, como por exemplo em água. Ela não corta a curva I. Assim, toda a austenita se transforma em martensita (material de alta dureza).

- Curva 5: tangencia a curva I. Corresponde à velocidade crítica de resfriamento ou de temperatura. Para ela a estrutura obtida já é inteiramente martensítica. Vemos assim que os aços resfriados mais rapidamente são mais duros.

OBS.: é impossível obter a bainita com resfriamento contínuo. A mesma só é obtida em tratamento isotérmico, isto é, tratamento em que o resfriamento é interrompido à temperatura correspondente à formação da bainita; logo após a formação desta, prossegue-se o resfriamento até a temperatura ambiente.

Concluindo, podemos dizer que se escolhe o tratamento térmico, e em última análise a velocidade de resfriamento, de acordo com as propriedades desejadas para o aço. Para se obter alta dureza, faz-se resfriamento rápido; quando se deseja dureza baixa, resfriamento lento.

Não se dispondo das curvas TRC de um dado aço, pode-se utilizar as curvas TTT para se prever a estrutura resultante de um resfriamento contínuo, com pequena margem de erro.

08. FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT:

Os fatores que afetam a posição das curvas TTT, agem igualmente sobre as curvas TRC e são os seguintes:

- composição química;
- tamanho de grão da austenita;
- homogeneidade da austenita.

9.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Todos os elementos de liga adicionados propositalmente aos aços, com exceção do cobalto (Co), deslocam as curvas TTT para a direita, retardando a formação da austenita. Podemos então dizer que os elementos de liga aumentam a temperabilidade (que será conceituada em um tópico à parte) e diminuem a velocidade crítica de temperatura, facilitando, assim, a obtenção da estrutura martensítica.

Isto se explica pelo fato de que no resfriamento certos elementos terão tendência a se dissolverem na ferrita que se forma e outros a constituírem carbonetos.

Este fenômeno exige um certo tempo para que os elementos assumam novas disposições. Em outras palavras, aumenta-se a inércia da transformação, deslocando-se as curvas para a direita.

A consequência mais importante deste deslocamento consiste na maior faci-

lidade de se obter a estrutura martensítica, mesmo com resfriamento lento.

OBS.: devemos ressaltar que os aços-carbono, de baixo teor em carbono ($C < 0,20\%$), não são suscetíveis de tempera, ou ainda, não são temperáveis. Isto se explica pelo fato de que as curvas TTT cortam o eixo das ordenadas. Em outras palavras, mesmo com resfriamento super rápido, a partir da temperatura de austenitização, toda a austenita se transforma em ferrita e perlita. A fig. 6 representa, esquematicamente, as curvas TTT para um aço-carbono de baixo teor em carbono.

Podemos, também, obter a estrutura bainítica por um resfriamento contínuo, pois, o Mn, quando adicionado em certa percentagem, provoca uma inflexão (uma barriga) nas curvas I e II. A fig. 7 representa a curva TTT para o aço AISI 4340, cuja composição está indicada no gráfico. Vemos, claramente, que podemos obter a estrutura bainítica para este aço, mesmo com resfriamento contínuo.

Um outro ponto a ser considerado, com relação ao efeito dos elementos de liga, é quanto à sua influência na reação de formação da martensita. Existem certos elementos de liga (elementos gamagêneos) que deslocam as linhas M_s e M_f para baixo, fazendo com que, à temperatura ambiente, ainda exista austenita, que é chamada de austenita residual ou austenita retida. Logo, a estrutura à temperatura ambiente será composta de martensita e austenita. A fig. 8 é um desenho esquemático que ilustra tal situação.

Existem casos em que a composição do aço é tal que toda sua estrutura é inteiramente austenítica, à temperatura ambiente, quando resfriado ao ar. Neste caso não se trata mais de austenita residual. Isto ocorre nos aços austeníticos inoxidáveis. A fig. 9 representa, esquematicamente, a curva TTT para um aço que apresenta estrutura inteiramente austenítica à temperatura ambiente.

Como exemplo, podemos citar os seguintes:

	AISI	ABNT
AÇO-INOX	18 - 8 (18% Cr e 8% Ni)	301
	25 - 20 (25% Cr e 20% Ni)	310
	20 - 12 (20% Cr e 12% Ni)	304

NOTA: a austenita residual deverá ser eliminada para aplicações de grande responsabilidade, pois a mesma é instável e tende a se transformar com o tempo. Porém a sua transformação causa instabilidade dimensional na peça, pois a mesma é acompanhada de aumento de volume. Existe um tratamento térmico, denominado subcrítico ou subzero, que visa a eliminação da austenita residual. Para isto faz-se o resfriamento do aço, que se encontra austenitizado, em nitrogênio líquido (a cerca de -170°C), fazendo com que toda austenita se transforme em martensita.

8.2. TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

A transformação da austenita em perlita se dá da periferia (contorno) dos grãos para o centro. Assim, quanto maior o número de grãos por unidade

área, maior número de contornos de grão e, portanto, mais fácil se torna a transformação da austenita em perlita. E mais, o grão sendo pequeno, sua transformação total se dá em menor intervalo de tempo.

Assim, quanto menor o tamanho do grão da austenita, mais para a esquerda da serão deslocadas as curvas TTT.

Deste modo, tomando-se o raciocínio inverso, quanto maior o tamanho de grão da austenita, mais para a direita estarão deslocadas as curvas TTT. Assim, torna-se mais fácil obter estrutura martensítica a partir de grãos grandes de austenita.

Porém não é vantajoso ter-se um aço com granulação grande de austenita porque isto afeta, prejudicialmente, as propriedades mecânicas do aço resultante. Visando controlar o crescimento de grão da austenita nas operações de austenitização, adiciona-se ao aço, no seu processo de fabricação, Al, Ti, V e Zr.

A fig. 10 nos dá a classificação do tamanho de grão da austenita segundo o padrão ASTM. Nesta classificação, um número grande corresponde um tamanho de grão pequeno, e vice-versa. Assim o nº 8 corresponde ao menor tamanho de grão e o nº 1, maior tamanho de grão.

Para se obter um aço com boa temperabilidade, sem contudo afetar suas propriedades mecânicas com um tamanho excessivo de grão, trabalha-se com grãos de números 5 e 6.

OBS.: quanto maior a temperatura de austenitização, maior o tamanho de grão da austenita resultante.

Assim a temperatura de austenitização dos aços é fixado, em termos práticos, em 50°C acima da zona crítica.

8.3. HOMOGENEIDADE DA AUSTENITA

Quanto menos homogênea a austenita (ou seja, quanto mais heterogênea a austenite), o que equivale a dizer, quanto maior a quantidade de carbonetos residuais ou áreas localizadas ricas em carbono na austenita, mais para a esquerda se deslocam as curvas TTT. Em outras palavras, torna-se mais rápido o início e o fim de transformação da austenita em perlita. Isto porque os carbonetos residuais atuam como núcleos para formação de perlita, de modo que a transformação é acelerada.

OBS.: devido ao exposto anteriormente é que as curvas TTT, para os aços hipereutetóides, tendem a se deslocarem para a esquerda.

09. EFEITO DA SEÇÃO DA PEÇA NO RESFRIAMENTO DA MESMA

A velocidade de resfriamento é afetada pela seção da peça, pois o seu centro vai se resfriar mais lentamente que a sua periferia.

Essa diferença de velocidade de resfriamento é tanto maior, quanto maior a seção da peça. Isto faz com que a estrutura na periferia seja diferente da exis-

tente em seu centro. A fig. 11 ilustra este fato.

10. TEMPERABILIDADE OU ENDURECIBILIDADE

Vamos agora conceituar temperabilidade e descrever o ensaio de temperabilidade de Jominy.

10.1. CONCEITO

Temperabilidade de um aço é a propriedade que regula a profundidade e a distribuição do endurecimento causado pela têmpera. A temperabilidade deve estar também ligada à máxima tenacidade.

Como o resfriamento é feito em uma peça de maneira não uniforme (efeito da seção da peça), a endurecibilidade também não é uniforme. Assim, o que vai determinar a profundidade de endurecimento é a velocidade de resfriamento e a posição das curvas TRC do aço em estudo.

Desta maneira vemos a grande importância do conceito de temperabilidade para todos os engenheiros de projeto, uma vez que a dureza e a resistência à tração, aliadas à tenacidade, são os critérios de base para a maior parte das peças tratadas.

10.2. METODOS PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERABILIDADE

Para se determinar a temperabilidade de um aço pode-se lançar mão de um dos seguintes métodos: método de Grossmann e método de Jominy.

No presente trabalho nos ateremos ao método de Jominy, que é o mais difundido industrialmente.

10.3. METODO DE JOMINY

Descreveremos o ensaio Jominy de forma sucinta.

10.3.1. Descrição do Ensaio

O método Jominy é o mais empregado, atualmente, na determinação da temperabilidade dos aços. O ensaio para a determinação da temperabilidade segundo este método é dito ensaio Jominy.

A fig. 12 ilustra a realização deste ensaio, bem como o utilizado no mesmo.

A seqüência do ensaio consiste em:

- Tratamento de normalização do material a ser ensaiado;
- Austenitização do material a ser ensaiado;
- Realização do ensaio propriamente dito.

O ensaio consiste em se resfriar um c.p. de 1" de diâmetro por 4" de comprimento através de um jato de água, sob condições controladas de vazão, pressão e temperatura dirigida contra uma de suas extremidades. O intervalo de

tempo decorrido entre a retirada do material do forno e o início do resfriamento com o jato de água deve ser o mínimo possível (não deve superar cinco segundos). O material deve permanecer no resfriamento durante dez minutos no mínimo.

Após o ensaio, retificamos o c.p. longitudinalmente, segundo duas geratrizes diametralmente opostas, até a profundidade de 0,5 mm, eliminando-se a camada eventualmente decarbonetada. Em seguida medimos a dureza do material de 1/16" em 1/16", desde a extremidade temperada até 2", usando a escala Rockwell C. Com isto obteremos 32 valores de dureza. Estes valores serão lançados em um gráfico e construiremos uma curva Jominy do material. Neste gráfico, lançamos:

- em ordenada - dureza em HR_C;
 - em abscissa - distância da extremidade temperada em 1/16".
- A fig. 13 é o desenho esquemático da curva Jominy de um aço qualquer.

OBS.: na prática, se encontrarmos o valor de dureza 20 HR_C antes de se atingir as duas polegadas, encerramos a curva no ponto correspondente à dureza citada. Isto porque os valores de dureza Rockwell C só têm precisão acima de 20 HR_C, devido às precisões dimensionais do próprio penetrador.

10.3.2. Interpretação dos Resultados

1. A distância determinada pela mudança na inclinação da curva Jominy corresponde à profundidade crítica.

OBS.: profundidade crítica ≡ diâmetro crítico

Na fig. 13, corresponde ao ponto 7.

2. A dureza crítica é aquela correspondente à profundidade crítica. Na fig. 13, corresponde a 43 HR_C.

3. Quanto mais uniforme a distribuição de endurecimento, menor a inclinação da curva Jominy e, portanto, maior a temperabilidade do aço.

4. A máxima dureza corresponde ao ponto número 1, ou seja, ao ponto mais próximo da extremidade temperada.

OBS.: a dureza máxima não é função da temperabilidade, mas sim do teor do carbono do aço. Assim sendo, um aço A pode apresentar dureza máxima superior ao aço B, mas possuir temperabilidade menor do que este último. A fig. 14 é um desenho esquemático que ilustra esta observação.

Aço A: maior teor de carbono do que o aço B;

Aço B: maior temperabilidade do que o aço A.

NOTA: a norma ABNT que rege o ensaio de temperabilidade, segundo o método Jominy, é a MB - 381/1978.

10.3.3. Fatores que Afetam a Temperabilidade dos Aços

Os fatores que afetam a temperabilidade são os mesmos que influ-

enciam na posição das curvas ITT e TRC, ou seja:

- composição química;
- tamanho de grão da austenita;
- homogeneidade da austenita.

Eles agem sobre a temperabilidade de maneira idêntica à forma como atuam sobre a posição das curvas ITT e TRC (vide tópico 8 desta apostila).

10.3.4. Esquema de Curvas Jominy Para Aços Específicos.

A fig. 15 ilustra, de forma esquemática, as curvas Jominy de quatro aços onde a composição em carbono é fixa, porém o teor em elementos de liga varia. A tabela seguinte dá a composição de cada um destes aços.

	Tipo de Aço	%C	%Mn	%Si	%Cr*	%Mo*	%Ni*
Aço nº 1	SAE-1040	0,40	0,80	0,25	-	-	-
Aço nº 2	SAE-5140	0,40	0,80	0,25	0,80	-	-
Aço nº 3	SAE-4140	0,40	0,80	0,25	0,80	0,20	-
Aço nº 4	SAE-4340	0,40	0,80	0,25	0,80	0,20	1,80

* elementos considerados de liga. Pela análise deste gráfico vemos que a dureza máxima é a mesma para os quatro aços, porém a temperabilidade varia. Podemos ainda observar que o aço nº 4 apresenta a maior temperabilidade e o nº 1, a menor.

A fig. 16 ilustra, de forma esquemática, as curvas Jominy de quatro aços, onde a composição em carbono varia, porém o teor em elementos de liga é fixo. A tabela seguinte dá a composição química de cada um destes aços.

	Tipo de aço	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%Ni
Aço nº 1	SAE-4330	0,30	0,80	0,25	0,80	0,20	1,80
Aço nº 2	SAE-4340	0,40	0,80	0,25	0,80	0,20	1,80
Aço nº 3	SAE-4350	0,50	0,80	0,25	0,80	0,20	1,80
Aço nº 4	SAE-4360	0,60	0,80	0,25	0,80	0,20	1,80

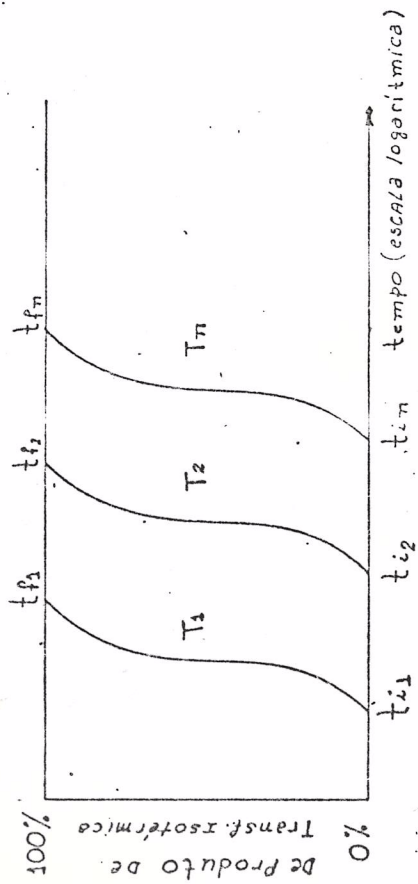


FIG. 2

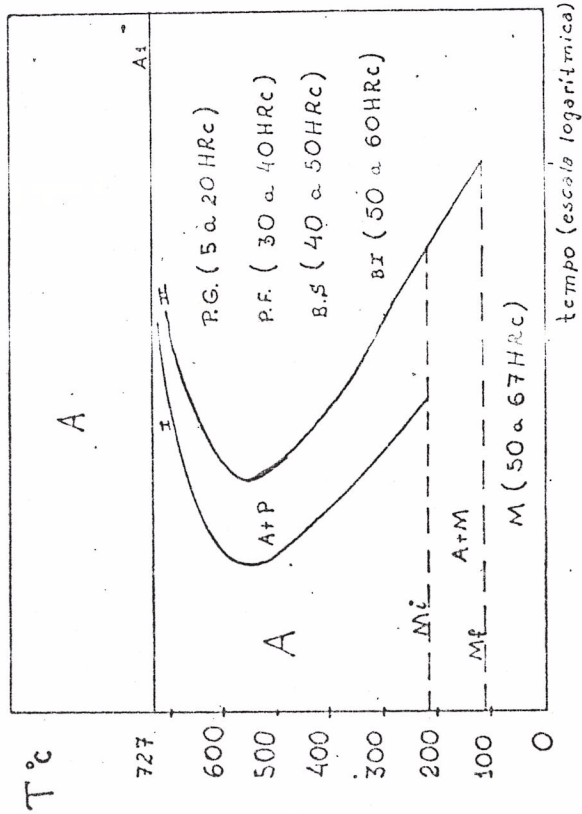


FIG. 3

19

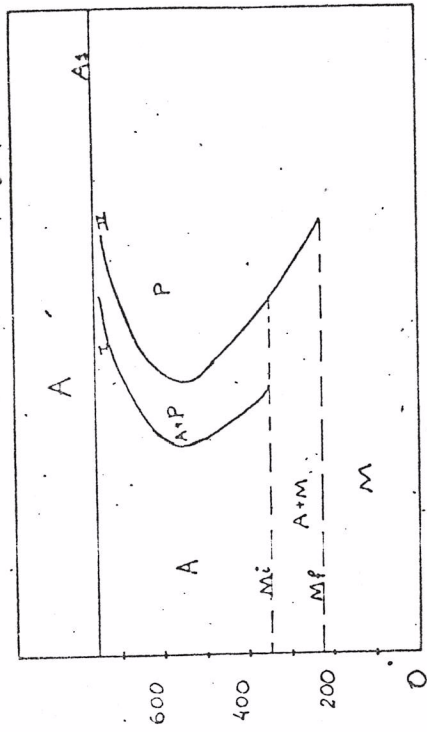


FIG. 4 - a

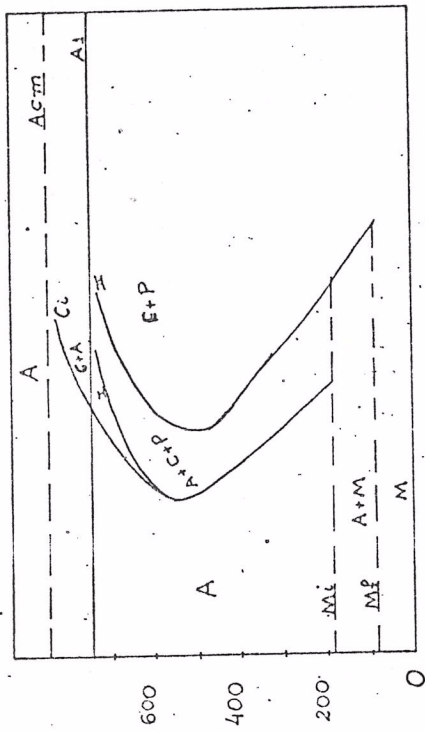


FIG. 4 - b

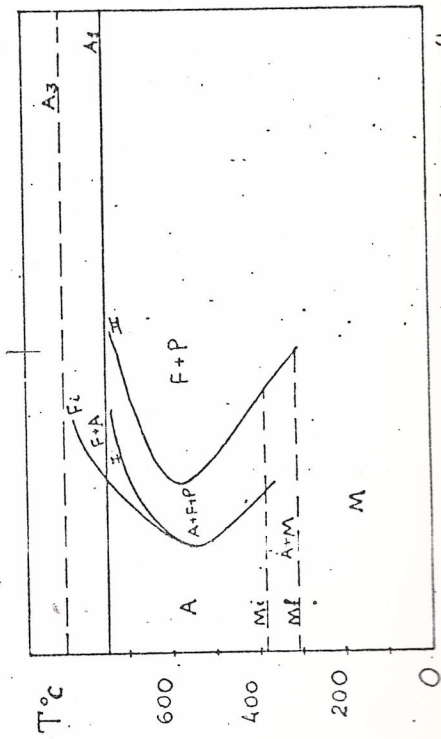


FIG. 4 - c

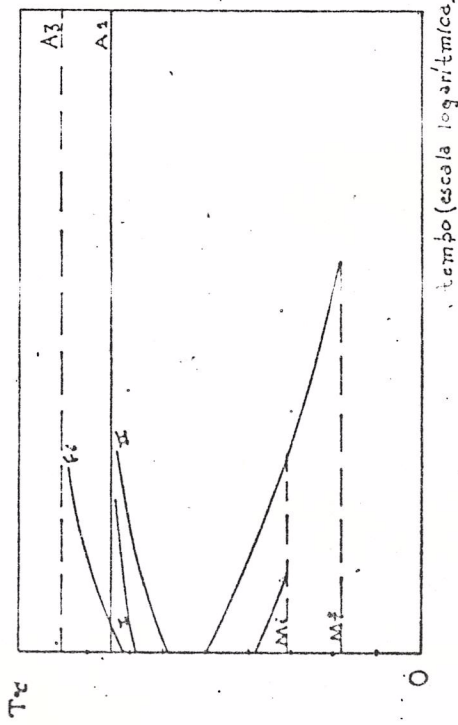


FIG. 6

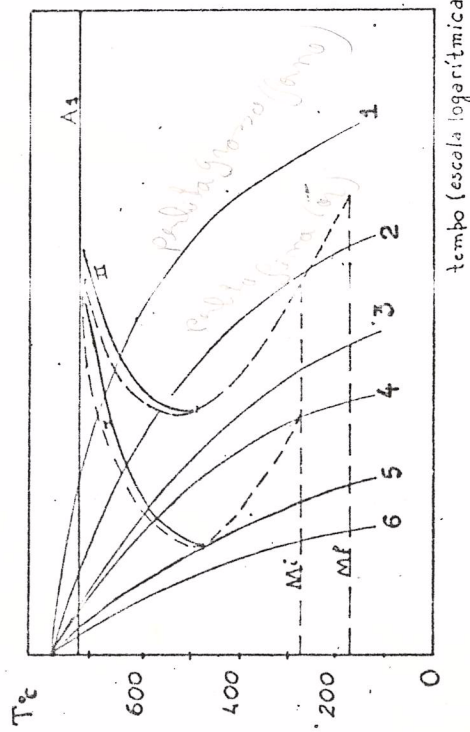


FIG. 5

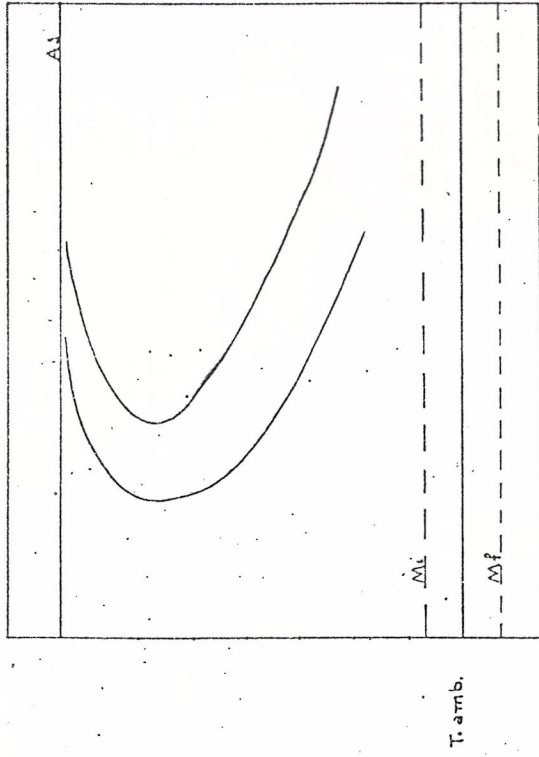


FIG. 8

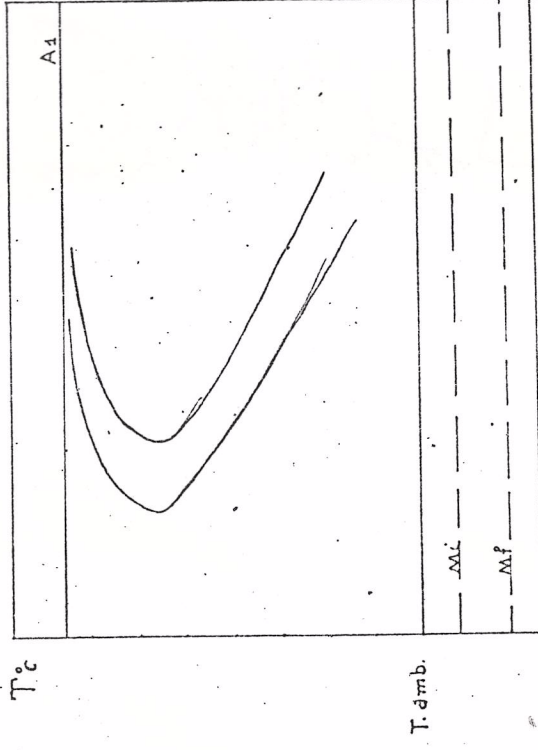


FIG. 9

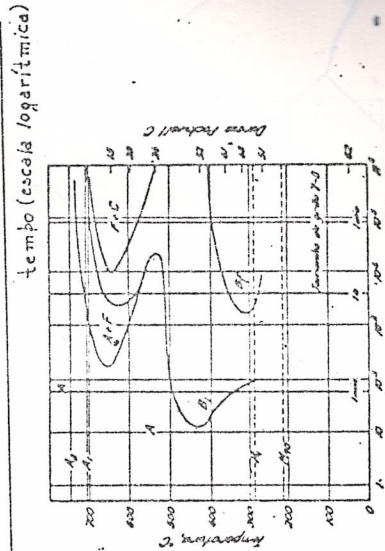


FIG. 7

Tempo, Segundos (Escala Logaritmica)
 Curva TTT para aço AISI 4340 com 0,42% C,
 0,78% Mn, 1,70% Ni, 0,001% Cr e 0,11% Mo.

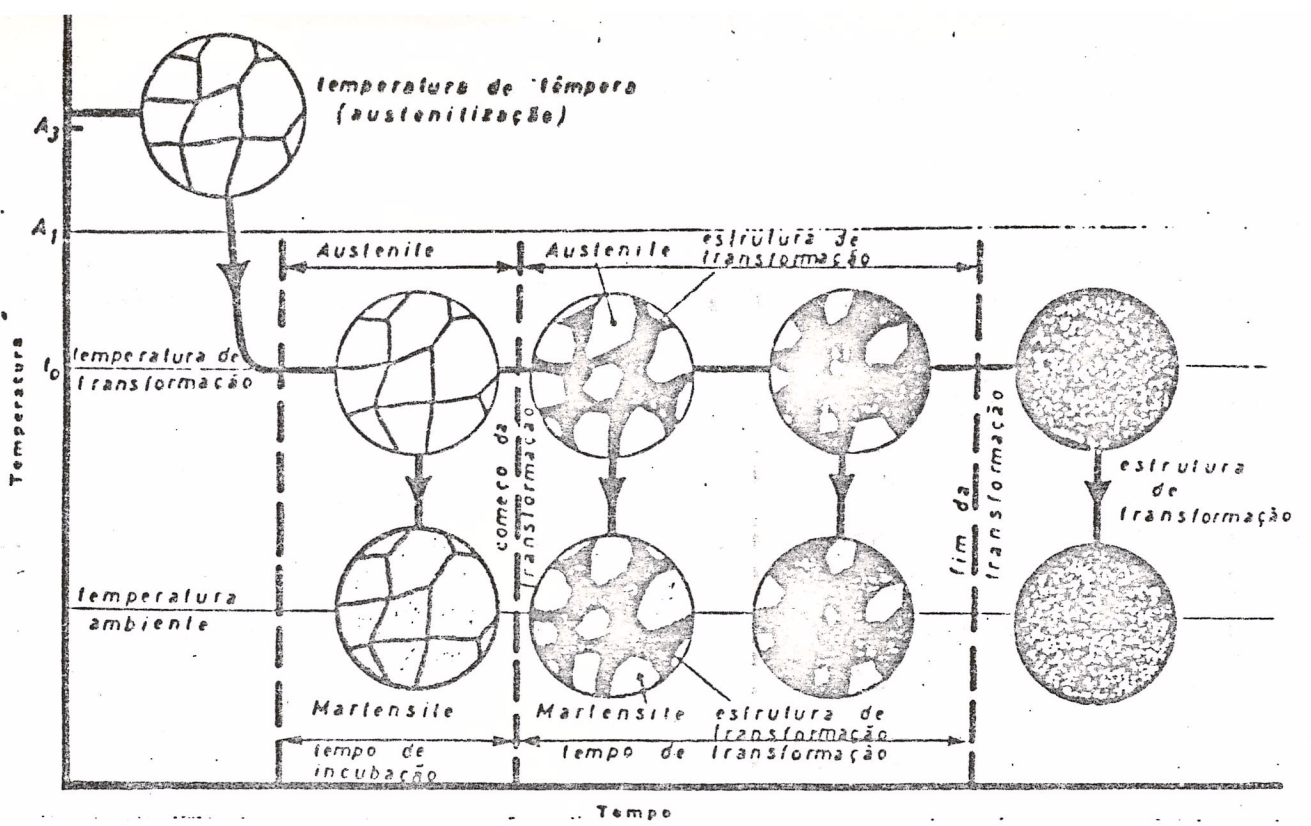


Fig. 20 — Esquema do processo de transformação a temperatura T_0 .

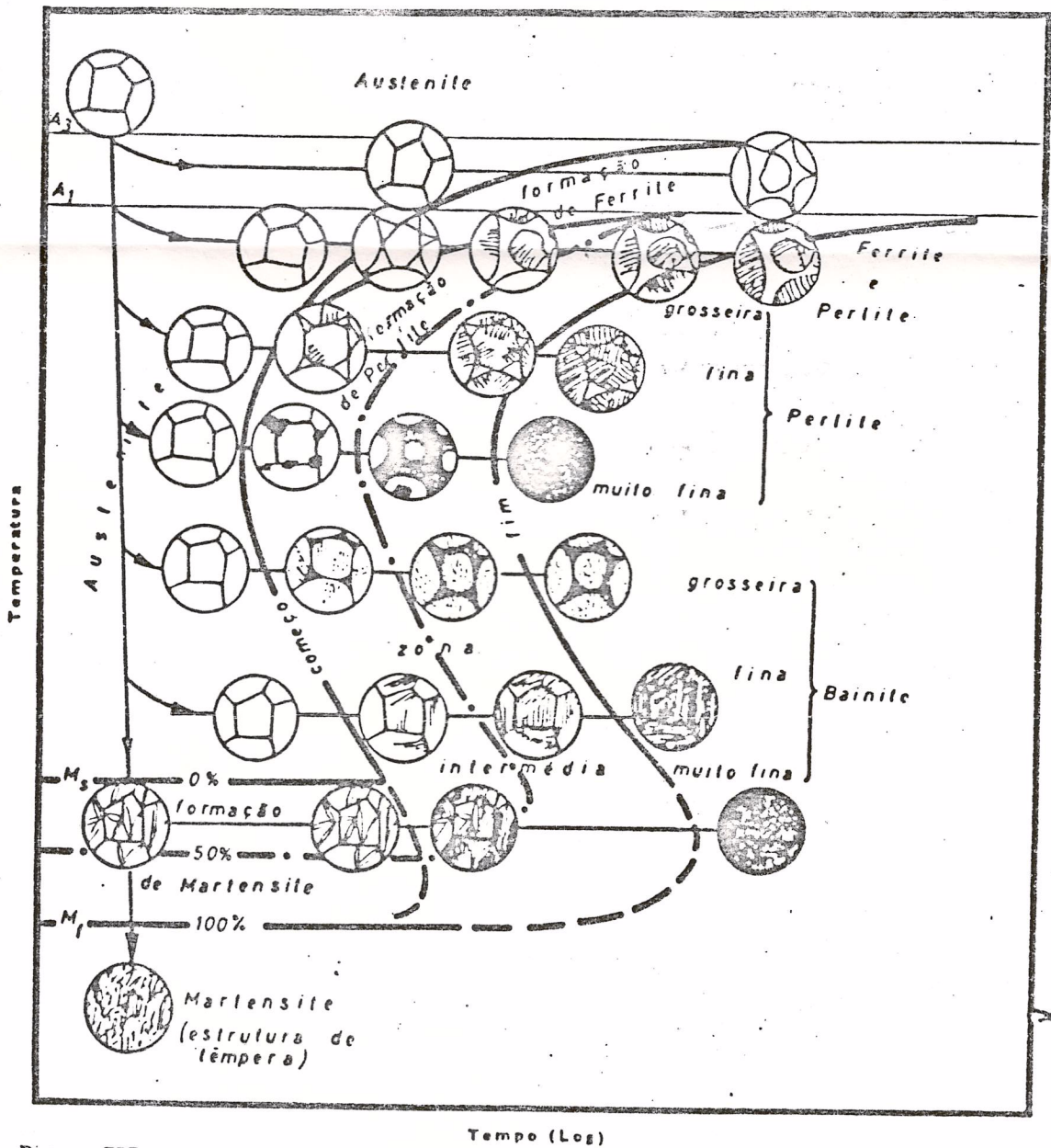


Fig. 22 — Diagrama TTT para um aço sem liga hipoeutectoide. Estão representadas esquematicamente as transformações que se vão processando nas varias zonas do diagrama. A zona intermédia corresponde a zona de formação de Bainite.

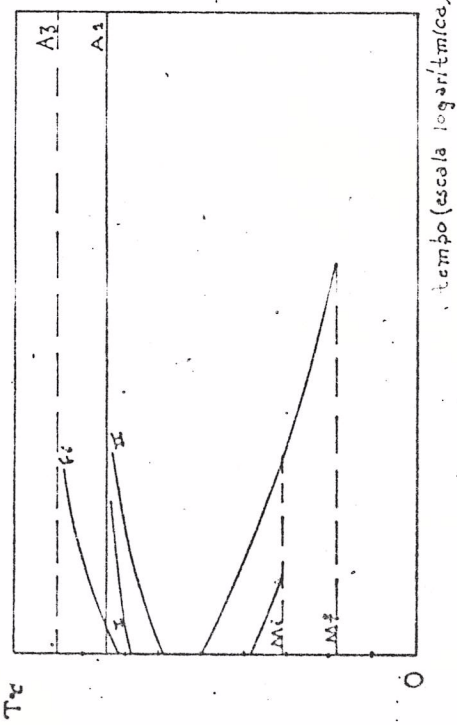


FIG. 6

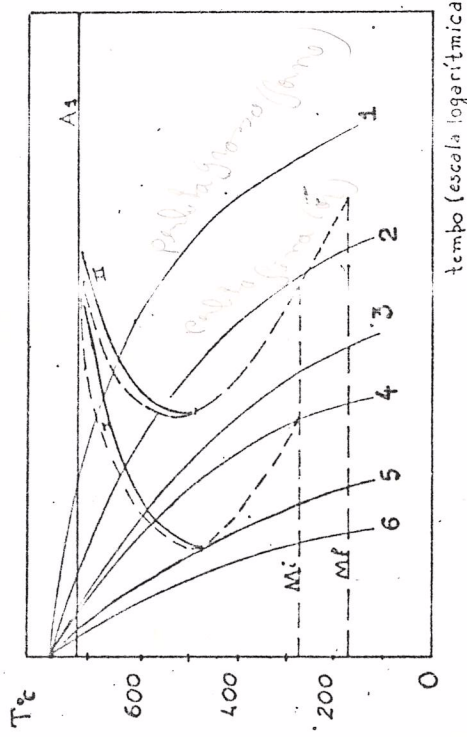


FIG. 5

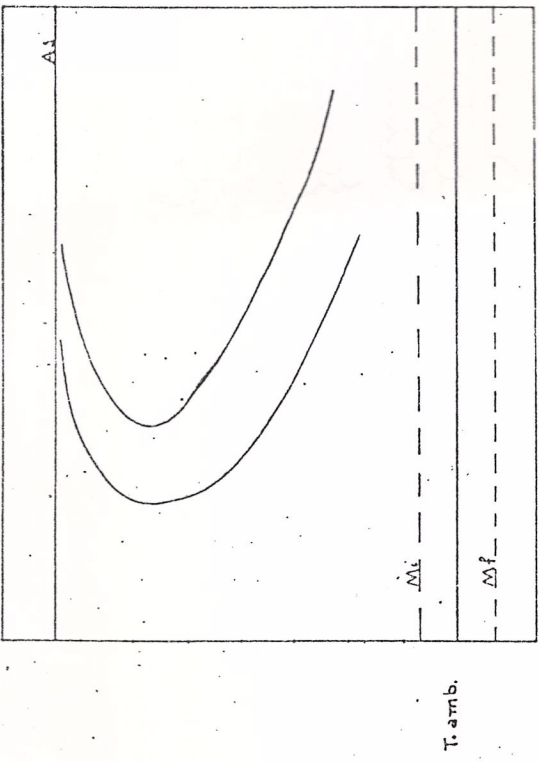


FIG. 8

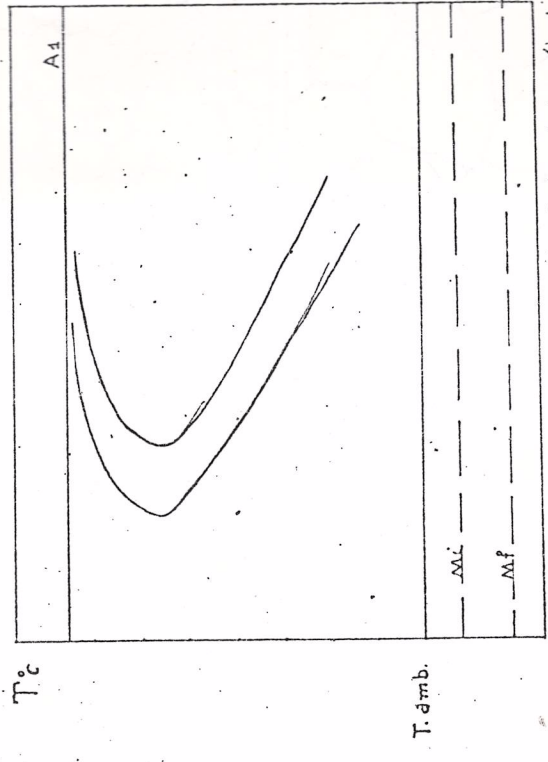


FIG. 9

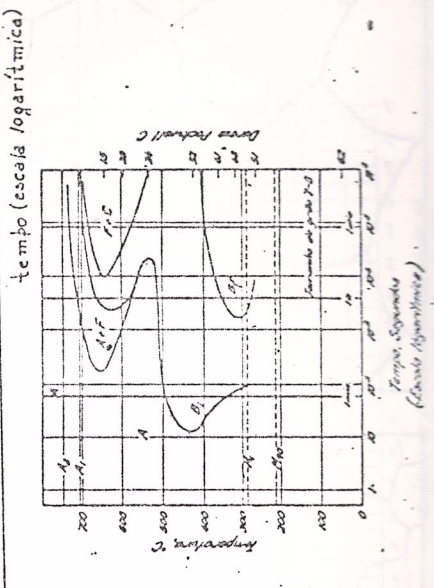
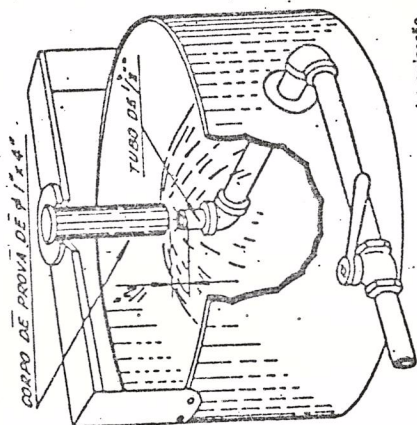
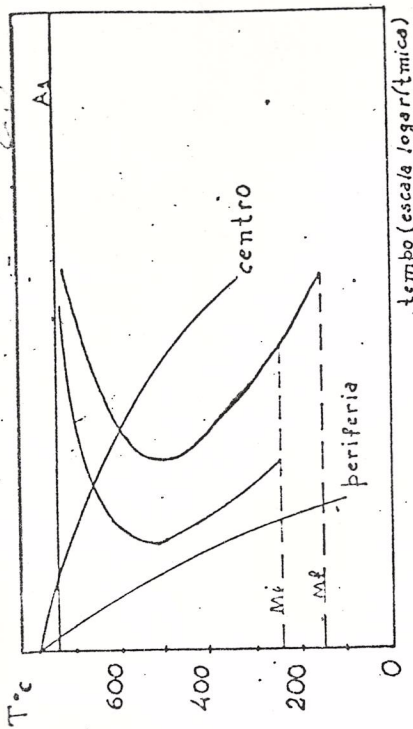


FIG. 7

Curva TTT para aço AISI 4140 com 0,43% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,00% Cr e 0,33% Mo.



Dispositivo Jominy para determinação da endurecibilidade dos aços.

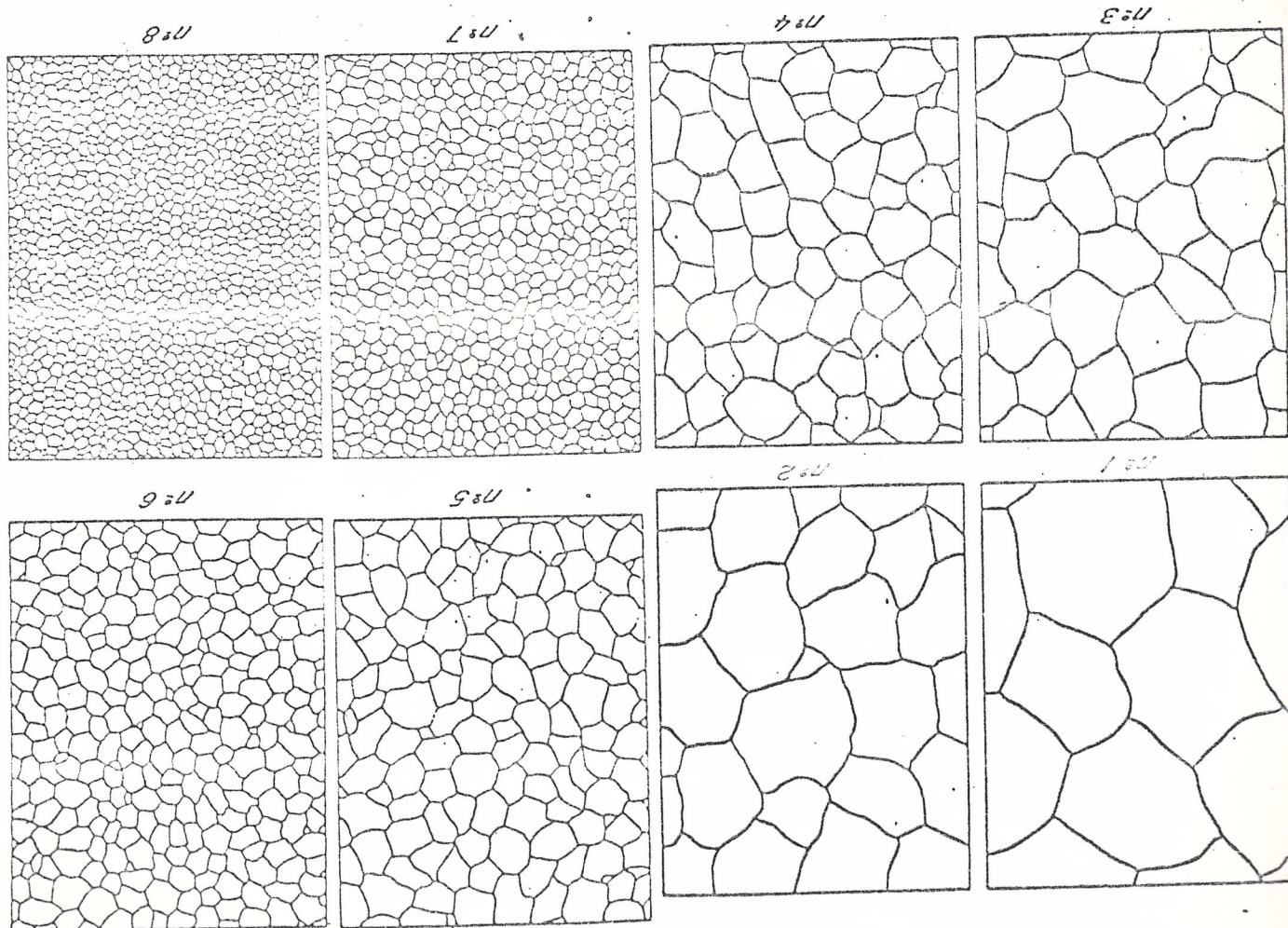
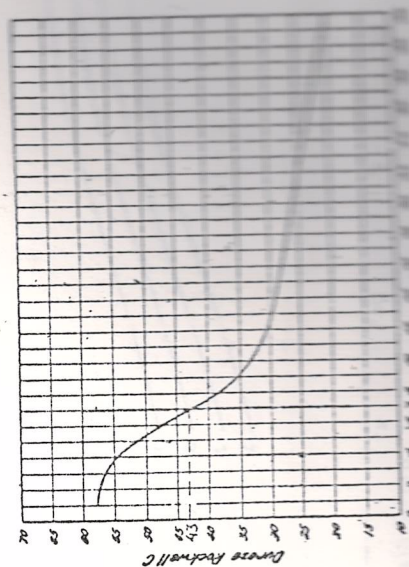


FIG. 10

Análise de estruturas metálicas
 e de aços em função do tempo de tratamento térmico

24

FIG. 14

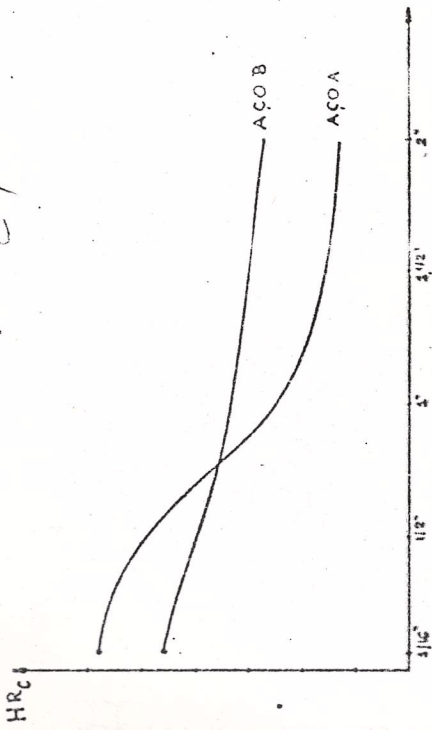


FIG. 15

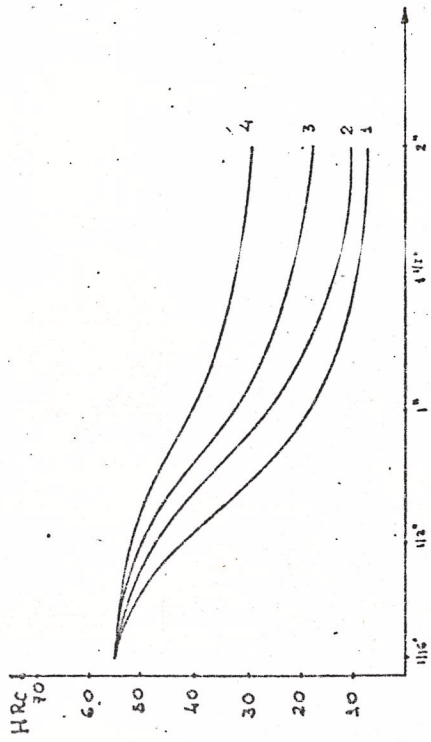


FIG. 16

