

III

FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS DO DIAGRAMA TTT. ENDURECIBILIDADE OU TEMPERABILIDADE

1 — **Fatores que influem na posição das curvas TTT** — Viu-se que o teor de carbono pode modificar sensivelmente a posição das linhas de início e de fim de transformação das curvas em C. Além do carbono, os outros elementos de liga que podem ser adicionados nos aços afetam grandemente a posição das curvas em C. Outro fator de influência é também o tamanho de grão da austenita. Portanto, os principais fatores que podem modificar a posição da curva em C são :

- composição química;
- tamanho de grão da austenita.

No que se refere à **composição química**, todos os elementos de liga que são adicionados aos aços, com exceção do cobalto, deslocam as curvas de início e de fim de transformação para a direita ou, seja, retardam a transformação. A explicação para esse fato é a seguinte :

— praticamente todos os elementos de liga se dissolvem na austenita, isto é, quando o aço se encontra a temperaturas em que são constituídos unicamente de austenita, os seus elementos de liga se encontram inteiramente dissolvidos no ferro gama;

— os elementos de liga apresentam, entretanto, tendência diferente quando, no esfriamento, se acham na zona crítica; em outras palavras, há uns elementos que tendem a ficar dissolvidos no ferro sob a forma alotrópica alfa e há outros elementos que tendem a formar carbonetos, da mesma maneira que o ferro (ver Tabela II). Entre os primeiros, contam-se o alumínio, o silício e o níquel; entre os segundos, os que apresentam a tendência mais forte de formação de carbonetos são o titânio, o vanádio e o colômbio; o tungstênio e o molibdênio apresentam também tendência forte, se bem que menor que os anteriores, finalmente o cromo tem tendência moderada para formar carbonetos e o manganês apresenta tendência fraca, a maior parte dele se dissolvendo na ferrita.

De qualquer modo, os elementos de liga, no esfriamento, ao entrarem na zona crítica procuram se dispôr, de acôrdo com suas tendências, quer se dissolvendo na ferrita, quer formando carbonetos. Essas reações, tanto mais numerosas e complexas quanto maior o número de elementos de liga presentes, levam, assim, maior tempo para se iniciar e também para se completar, fato esse que ocasionará o deslocamento das curvas de início e de fim de transformação para a direita.

A consequência mais importante dêsse deslocamento e, portanto, do retardamento nas transformações, é na maior facilidade

TABELA II

Distribuição dos elementos de liga nos aços recozidos (Bain)

Na Ferrita	Em Carboneto	Como Inclusões
Cu		
P		
Ni		
Si		SiO ₂
Al		Al ₂ O ₃
Zr		ZrO
Mn (forte)	Mn (fraca)	MnO, MnS
Cr (moderada)	Cr (moderada)	Cr _x O _y
W (fraca)	W (moderada a forte)	
Mo (fraca)	Mo (forte)	
V (muito fraca)	V (muito forte)	V _x O _y
Ti (muito fraca)	Ti (muito forte)	Ti _x O _y

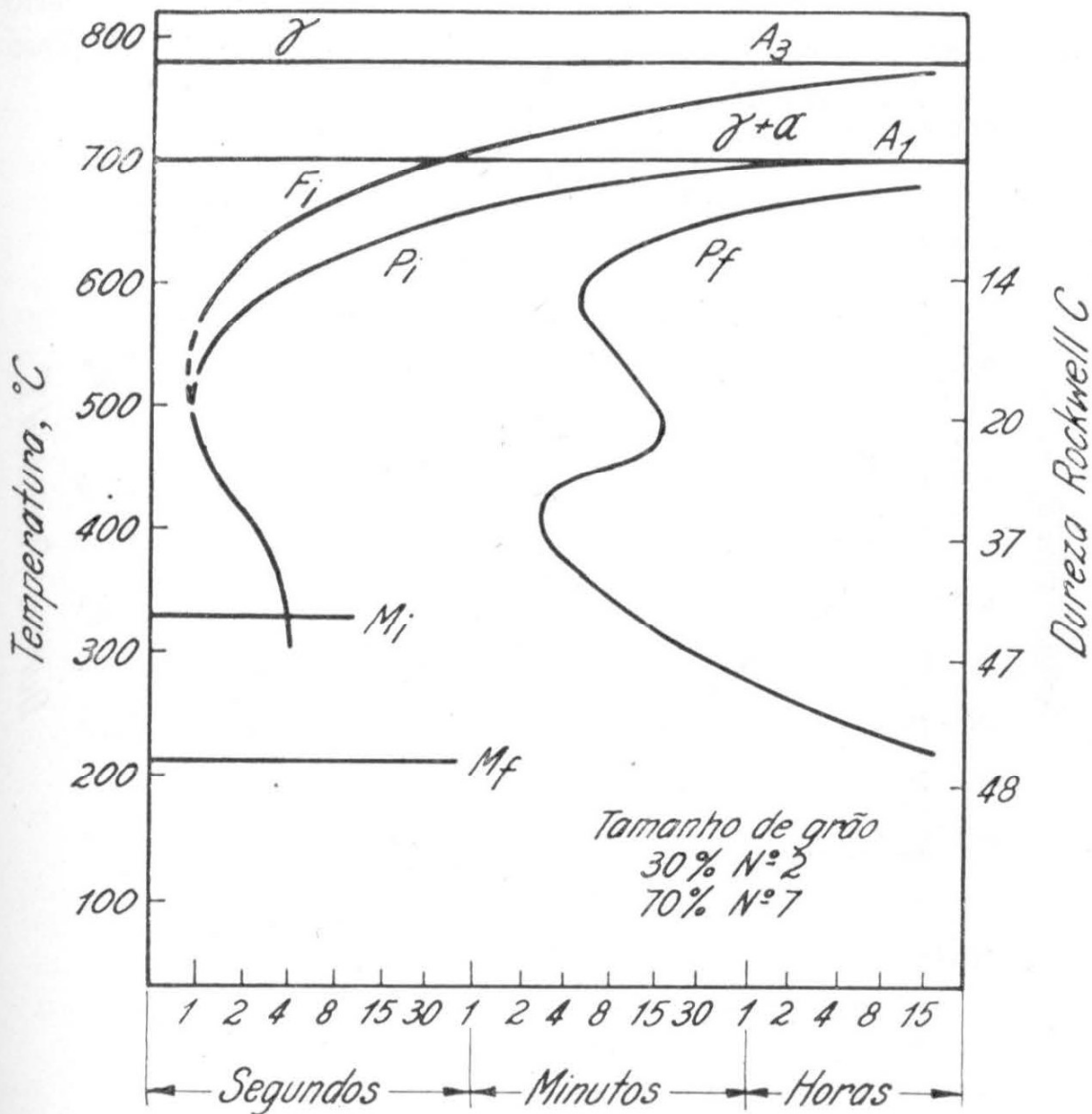


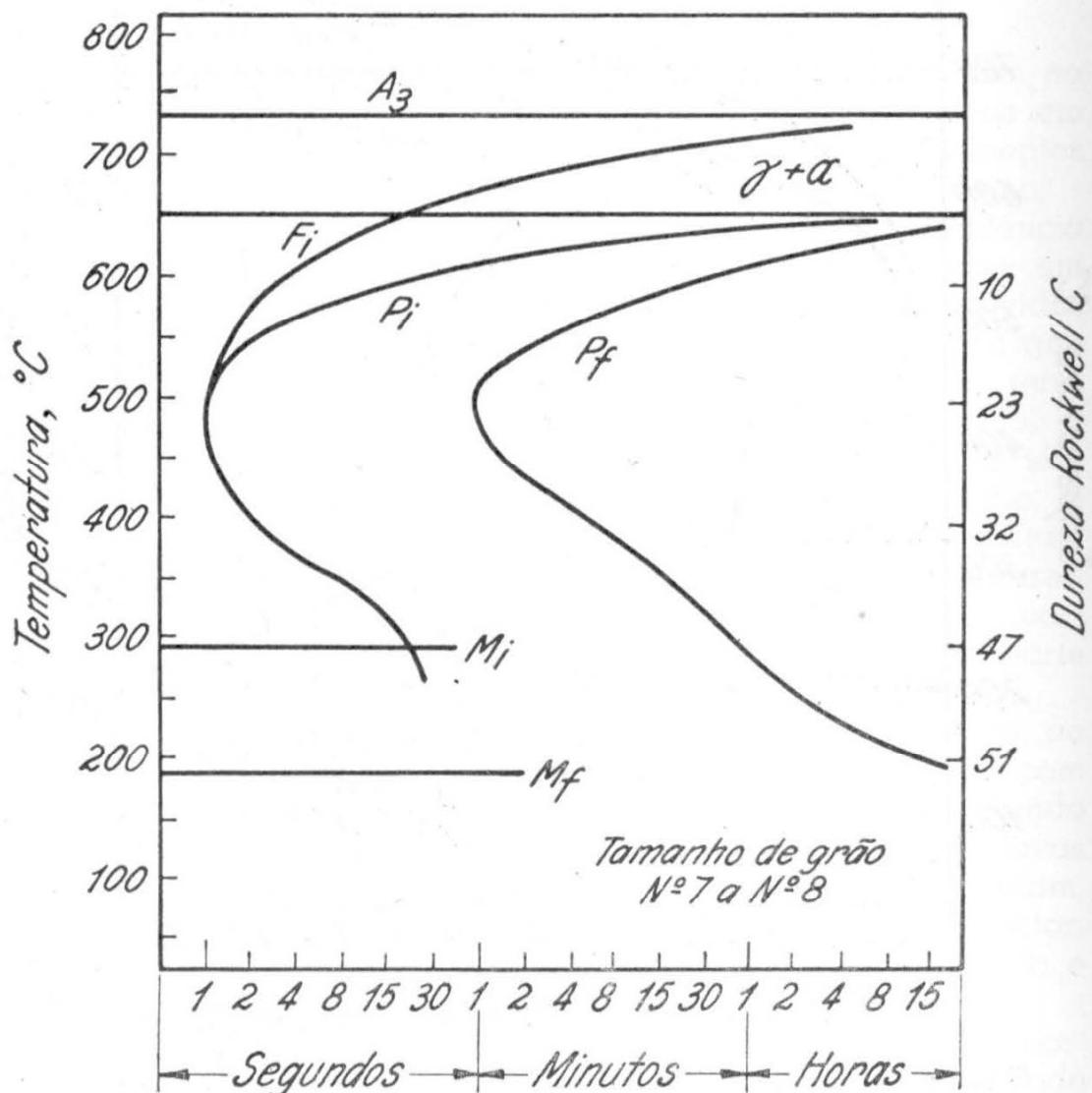
FIG. 18 — Curva TTT para aço com 0,35% C e 1,85% Mn.

de obter, pelo esfriamento, a estrutura martensítica. Na realidade, conforme os elementos de liga presentes, pode-se ter formação quasi que somente de martensita mesmo com esfriamento lento.

As figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as curvas TTT para quatro tipos de aço com elementos de liga e comprovam claramente os fatos que acabaram de ser expostos. A fig. 21 mostra um tipo de aço para o qual é possível a formação de bainita por resfriamento contínuo.

Os elementos de liga, além do carbono, afetam não somente a parte isotérmica dos diagramas de transformação, como também a reação de formação da martensita. A fig. 22 permite ver que as linhas M_i e M_f podem ser sensivelmente abaixadas, a ponto de, em certos casos, como em aços cementados com alto teor de carbono e níquel ou cromo em teores variáveis, não se ter formação de martensita à temperatura ambiente pelo resfriamento comum, em virtude da linha M_f ficar localizada abaixo da temperatura ambiente.

Nessas condições, tem-se à temperatura ambiente uma certa quantidade de «austenita retida» ou «austenita residual». Essa



austenita residual deve ser levada em conta nos tipos de aços que a podem apresentar. De fato, quando um aço apresentando essa condição é reaçoado em serviço (ou revenido acima de M_f) e em seguida resfriado novamente na faixa M_1 - M_f , parte da austenita residual pode transformar-se em martensita como ocorrera com a austenita original. Como a martensita é frágil, o aço apresentará inesperadamente e desvantajosamente um constituinte frágil. Ver-se-á que um segundo revenido ou um tratamento térmico especial eliminam êsse inconveniente.

Em relação ao **tamanho de grão da austenita**, verifica-se que, quanto maior êsse tamanho de grão tanto mais para a direita são deslocadas as curvas de início e de fim da transformação do aço. De fato, o produto da transformação — perlita — começa a se formar nos contornos dos grãos da austenita. E' então evidente (fig. 23) que se a austenita apresenta tamanho de grão grande sua total transformação levará mais tempo do que se apresentar grãos menores, visto que neste último caso a quantidade total de contornos de grãos é maior e, conseqüentemente,

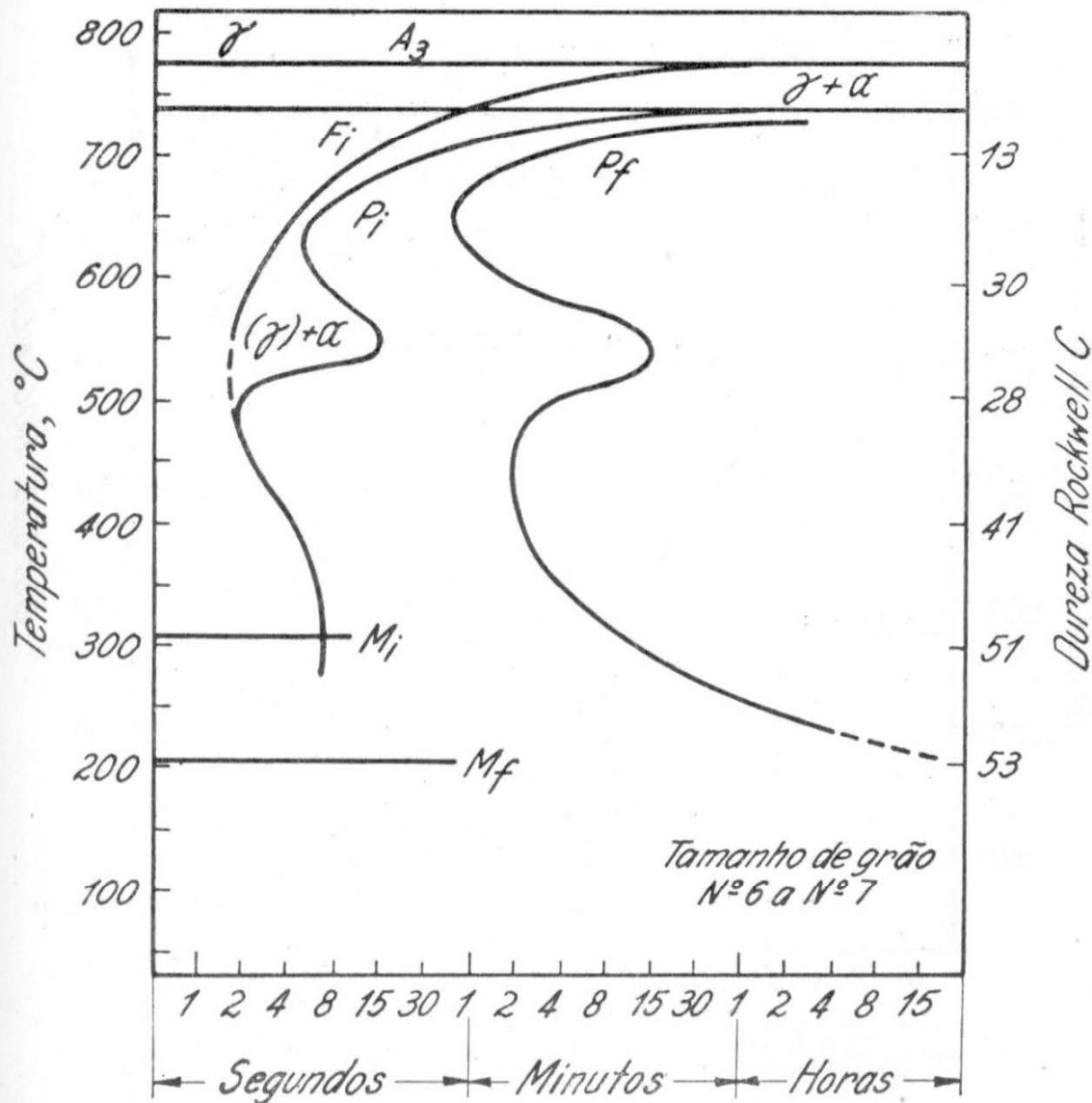


FIG. 20 — Curva TTT para aço com 0,42% C, 0,68% Mn e 0,93% Cr.

a transformação é iniciada simultaneamente em maior número de pontos e progride mais rapidamente. Portanto os aços com tamanho de grão de austenita grande tendem a apresentar, pelo esfriamento, estrutura martensítica mais facilmente do que aços com tamanho de grão de austenita menor.

Por essa razão o conhecimento do tamanho de grão austenítico do aço apresenta considerável importância. O fato de um tamanho de grão grande facilitar a obtenção da estrutura martensítica, pelo deslocamento das curvas em C para a direita, poderá levar à conclusão de que será preferível um aço de granulação grosseira. Essa conclusão é, entretanto, errônea, visto que os prejuízos de uma granulação grosseira são maiores que as vantagens, o que pode ser facilmente comprovado pelo exame da Tabela III.

Devido à influência do tamanho de grão austenítico sobre as curvas em C, que resulta, à medida que ele cresce, numa

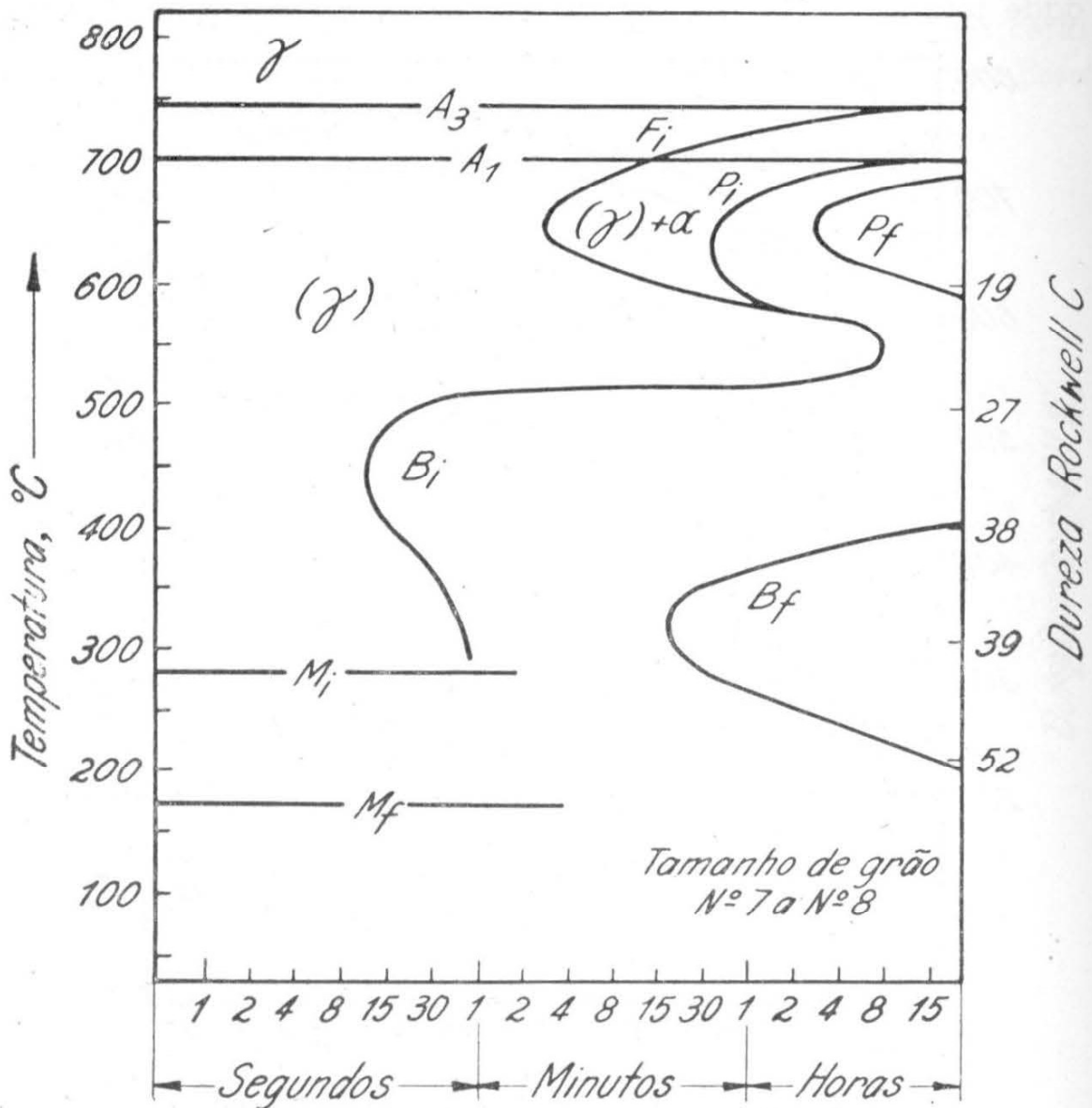


FIG. 21 — Curva TTT para aço com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.

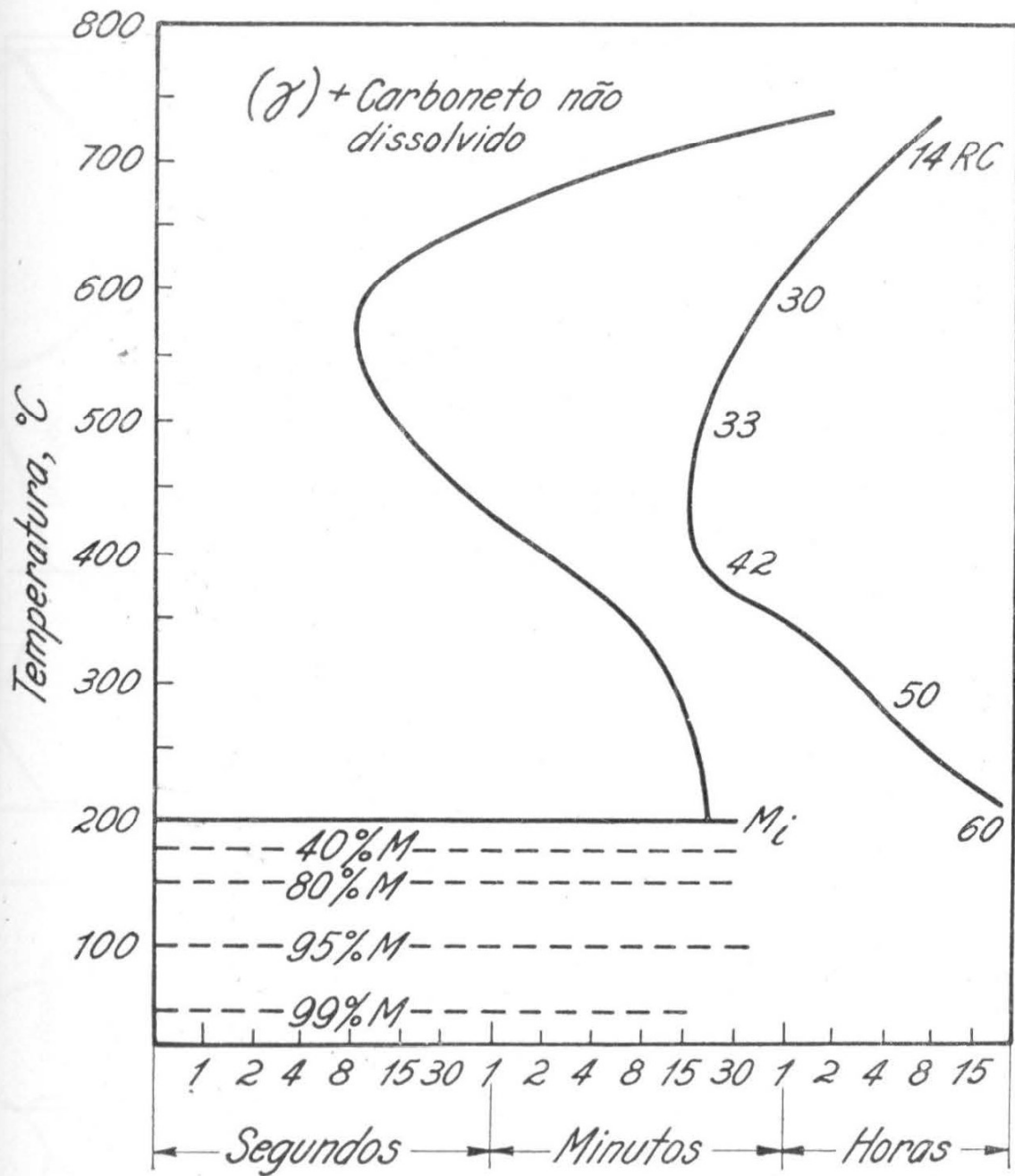


FIG. 22 — Curva TTT para aço com 0,85% C, 1,18% Mn, 0,50% Cr e 0,44% W (aço indeformável para matriz); austenizado a 790° C (Figura extraída do livro «Structure and properties of alloys» de R. M. Brick e A. Phillips).

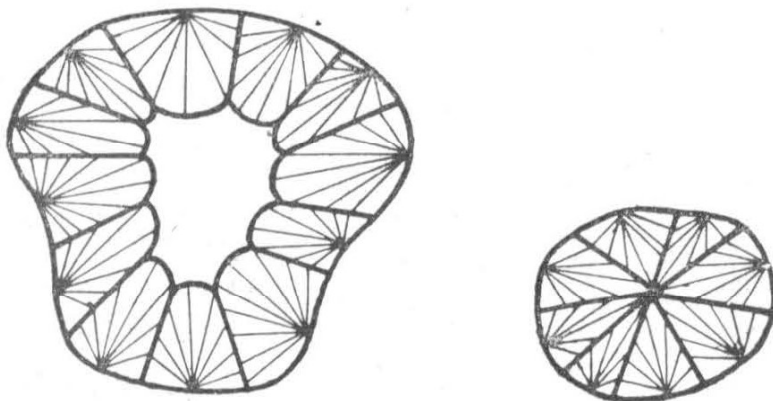


FIG. 23 — Efeito do tamanho de grão sobre a transformação da austenita

T A B E L A III
Efeito do tamanho de grão austenítico (Metals Handbook)

PROPRIEDADE	TENDÊNCIAS NOS PRODUTOS DE AÇO TRATADOS TERMICAMENTE	
	Aços de Austenita Grosseira (nº 5 e acima)	Aços de Austenita Fina (mais fina do que nº 5, de 5 a 8)
Endurecibilidade	Endurecimento mais profundo	Endurecimento menos profundo
Tenacidade à mesma dureza	Menos tenaz	Mais tenaz
Empenamento	Maior	Menor
Fissuras de têmpera	Mais prováveis	Geralmente ausentes
Fissuras de esmerilhamento	Mais suscetíveis	Menos suscetíveis
Tensões residuais	Maiores	Menores
Austenita residual	Mais	Menos
NOS PRODUTOS RECOZIDOS E NORMALIZADOS		
Usinabilidade	(Grosseira) melhor	(Grosseira) inferior
Usinabilidade (casos especiais)	(Acabamento fino) inferior	(Acabamento fino) superior
Trabalhabilidade (casos especiais)	Superior	Inferior

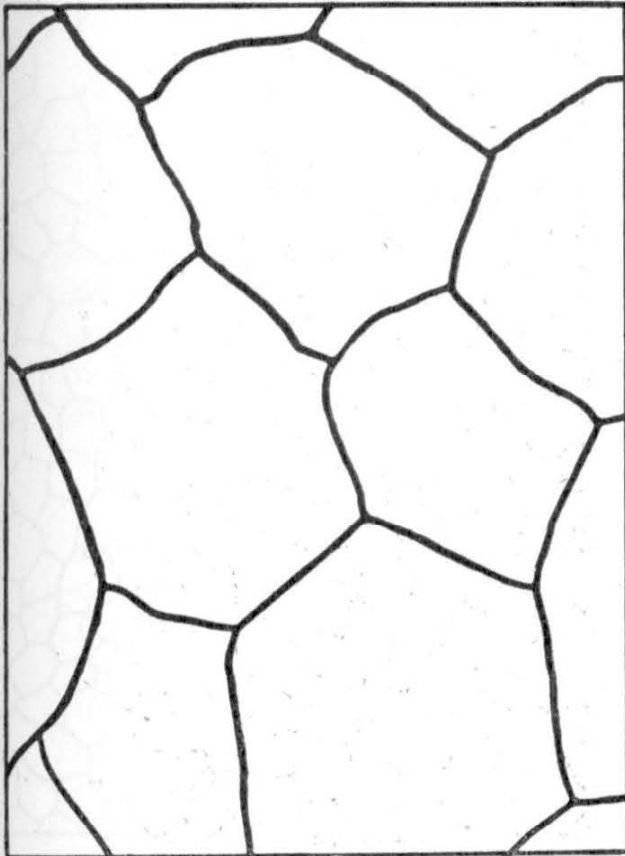
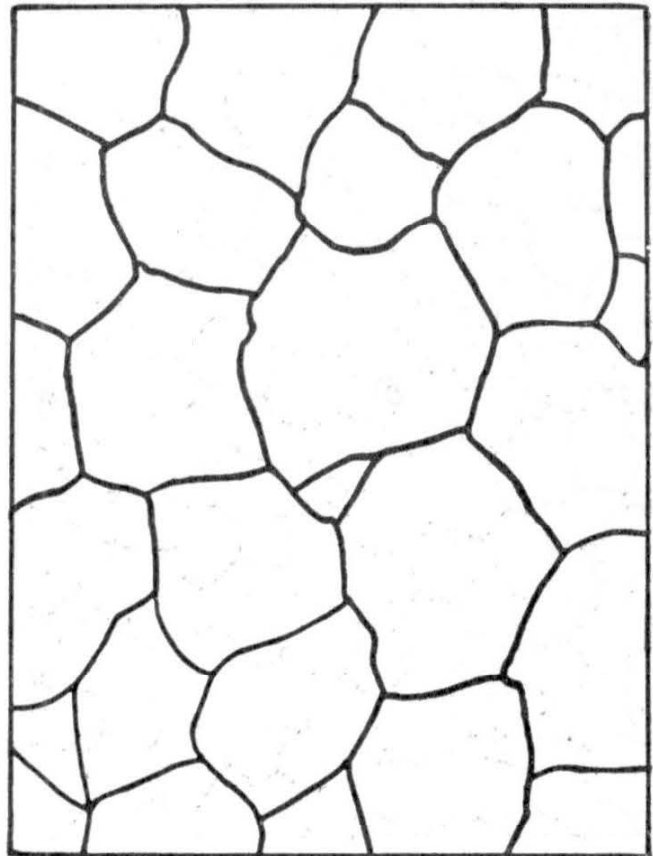
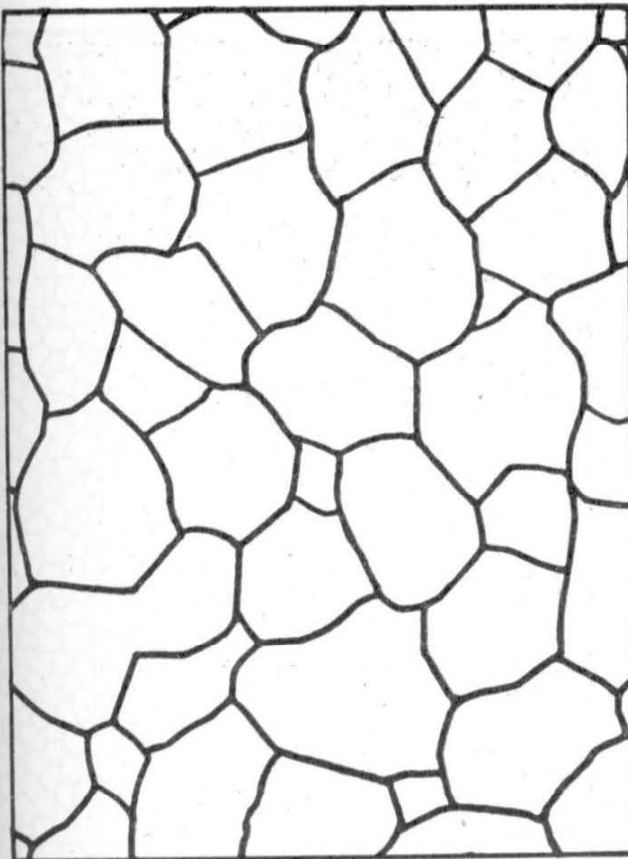
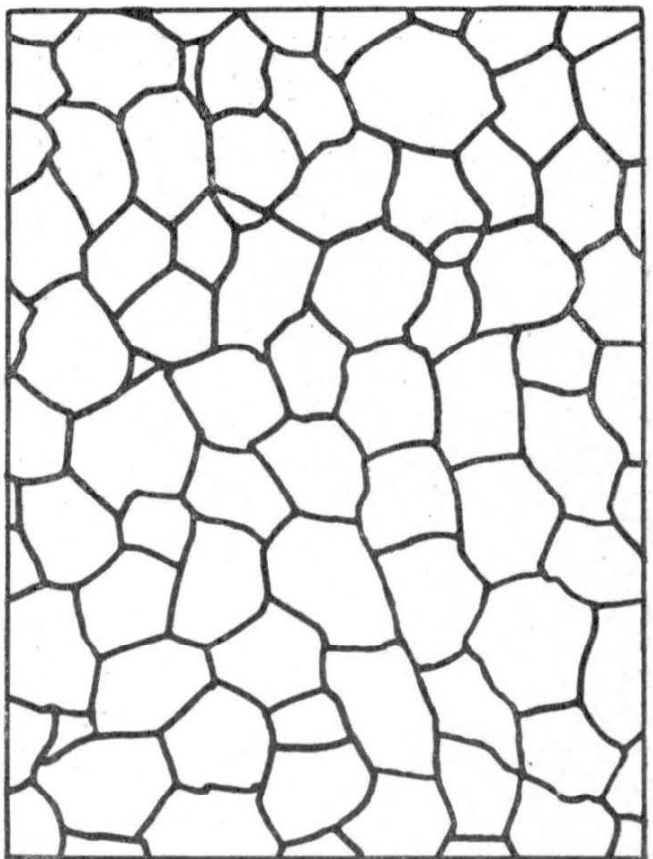
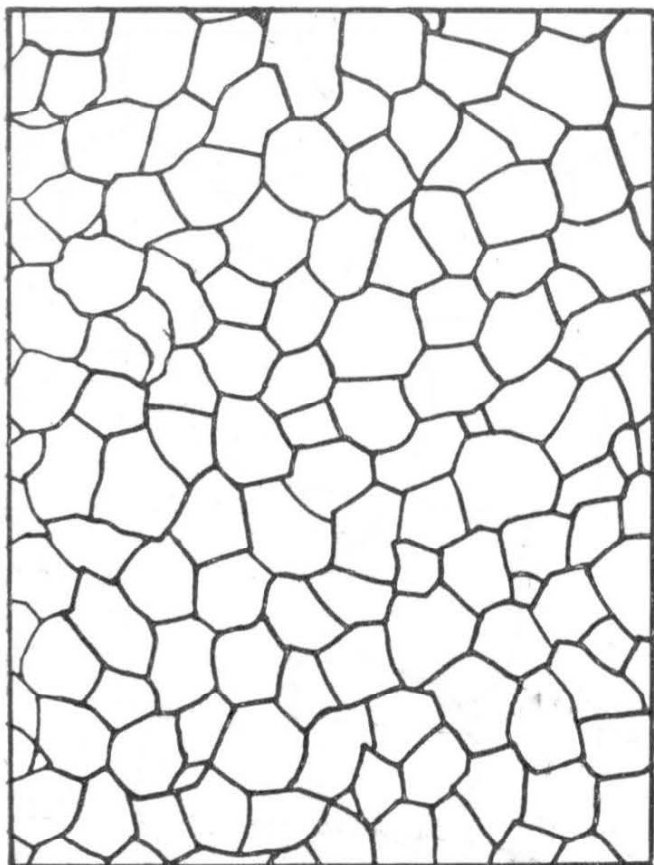
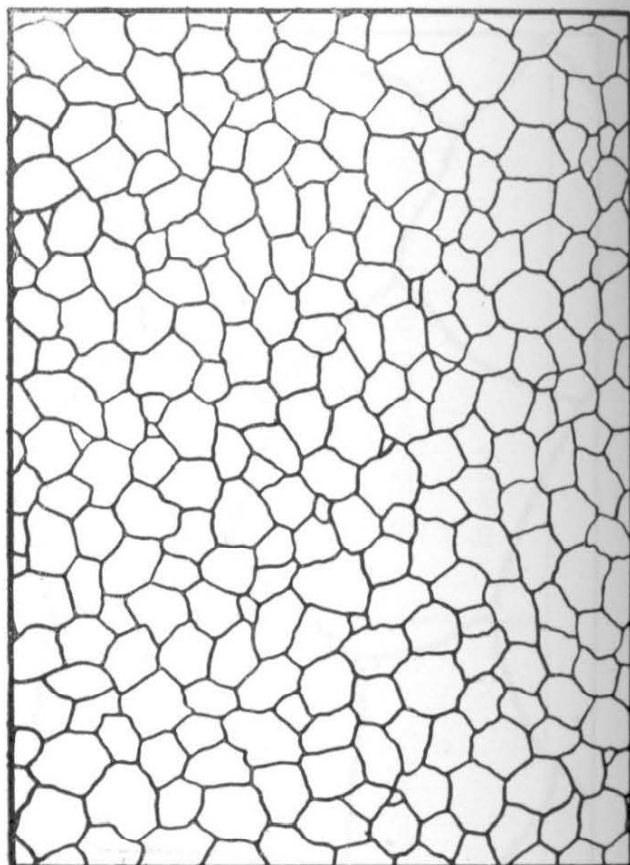
*n° 1**n° 2**n° 3**n° 4*

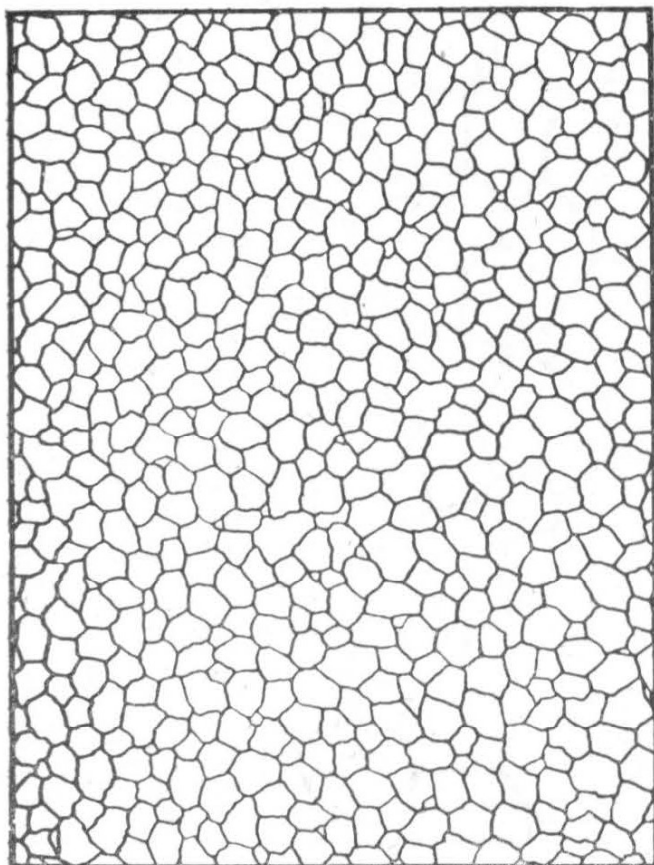
FIG. 24 — Padrões estabelecidos pela A.S.T.M. para tamanho de grãos dos aços.



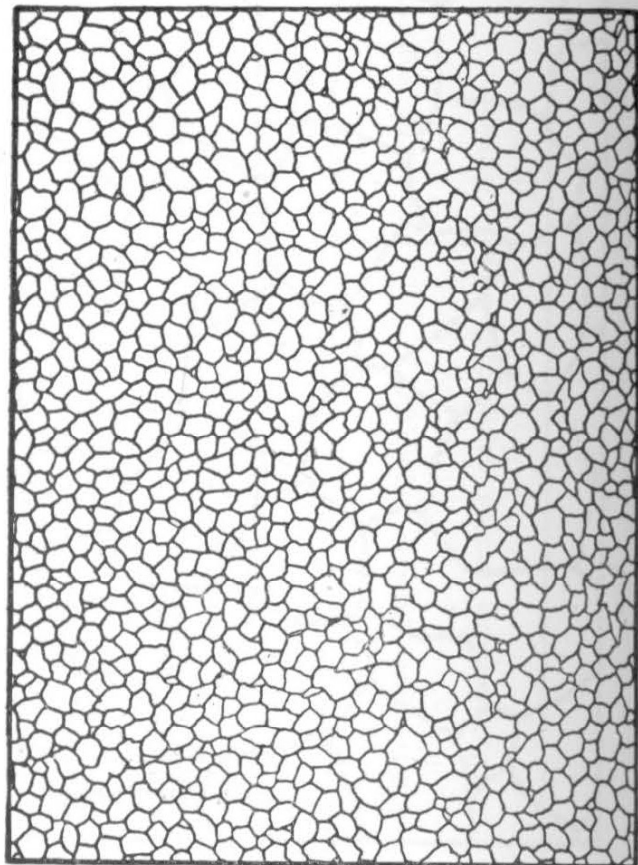
n° 5



n° 6



n° 7



n° 8

FIG. 24 — Padrões estabelecidos pela A.S.T.M. para tamanho de grãos dos aços.

maior facilidade em se obter pelo esfriamento estrutura inteiramente martensítica, (fato êsse que pode ser expresso, como se verá mais adiante, também por «endurecibilidade» ou maior tendência a produzir endurecimento mais profundo), é conveniente especificar-se sempre êsse tamanho de grão, ao referir-se ao diagrama TTT para um determinado aço, como aliás está indicado em várias das curvas em C já apresentadas. O «tamanho de grão» pode ser determinado e medido por vários métodos que, entretanto, não serão aqui abordados. Uma vez determinado é êle comparado com os «padrões» estabelecidos pela A.S.T.M. (American Society for Testing Materials) que os classificou em 8 grupos conforme indica a Fig. 24.

O controle do tamanho de grão é realizado de modo relativamente fácil pela adição, em teores baixos, de certos elementos de liga, entre os quais os mais usuais são alumínio e vanádio. Parece que a ação do alumínio no sentido de prevenir o crescimento excessivo da austenita é mecânica, isto é, através da formação de Al_2O_3 em partículas insolúveis as quais, localizadas nos contornos do grãos da austenita, atuam como verdadeiros obstáculos mecânicos impedindo seu crescimento. No caso do vanádio, admite-se que a cementita apresentando vanádio é mais dificilmente solúvel e que não ocorre crescimento da austenita enquanto esta não tenha dissolvido a cementita e não apresente completa homogeneidade em carbono.

2 — **Endurecibilidade ou temperabilidade** — Em vista do que foi exposto até agora, principalmente em relação às curvas TTT e à velocidade de esfriamento, é evidente que para se ter nos aços um endurecimento bem sucedido, isto é, formação da estrutura martensítica, é necessário um esfriamento com velocidade tal que evite a formação da perlita fina (fig. 13), principalmente entre 723 e 550° C. Ora o meio de esfriamento (água, óleo etc.) retira o calor diretamente só da superfície do aço, de modo que o que vai determinar a profundidade na qual se forma uma estrutura completamente martensítica é a velocidade de esfriamento a várias profundidades sob a superfície juntamente com a posição das curvas nos diagramas TTT. Isso já foi, aliás, ligeiramente abordado anteriormente (fig. 14 e 15). Chama-se «**endurecibilidade**» à profundidade de endurecimento. Define-se também endurecibilidade como a capacidade do aço de endurecer.

O conhecimento da endurecibilidade é importante, pois um dos objetivos mais procurados no tratamento térmico de um aço é endurecê-lo em condições controladas a uma profundidade determinada ou mesmo através de toda a sua secção e de modo a se produzirem mínimas tensões de esfriamento. Entre os métodos usados para a medida da endurecibilidade, os dois mais aceitos são :

— **método de Grossmann**, em que se resfria a partir do estado austenítico uma série de barras cilíndricas de diâmetros crescentes, em condições controladas de esfriamento. As barras são em seguida quebradas, medindo-se a dureza através de toda a secção transversal. Esse ensaio permite, pois, determinar a profundidade a que o aço endurece, não só pela medida de dureza como também pela observação das estruturas resultantes. Se se representar num gráfico, em abcisas, a secção transversal de uma barra cilíndrica ou seja, a distância do seu centro às extremidades e, em ordenadas, a dureza na escala Rockwell C, por exemplo, poder-se-ia ter os aspectos das figuras 25 e 26, em

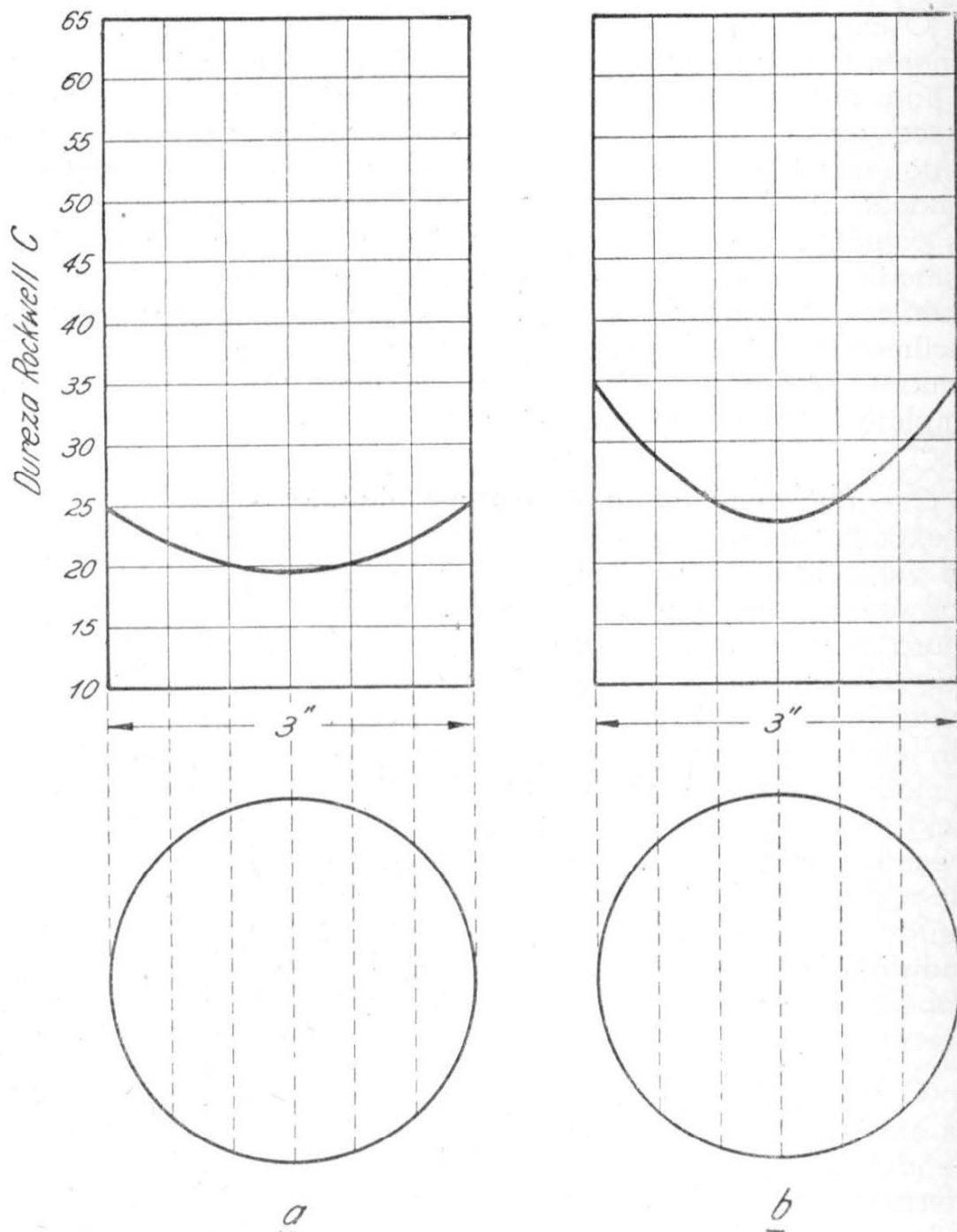


FIG. 25 — Curvas de resfriamento para aço-carbono (SAE 1040).
a) resfriamento em óleo; b) resfriamento em água.

que se pode verificar também a influência do meio de esfriamento e da composição do aço sobre a endurecibilidade.

No método de Grossmann costuma-se definir o **diâmetro crítico D_c** , que corresponde ao diâmetro da barra que, esfriada da temperatura austenítica, mostrará no centro 50 % de martensita. Portanto, uma barra cujo diâmetro corresponde ao diâmetro crítico terá o seu núcleo central com 50 % de martensita; qualquer diâmetro superior apresentará naturalmente um centro com menor quantidade de martensita ou seja incompletamente endurecido e qualquer diâmetro inferior apresentará o centro completamente martensítico ou endurecido. A separação da zona em que pre-

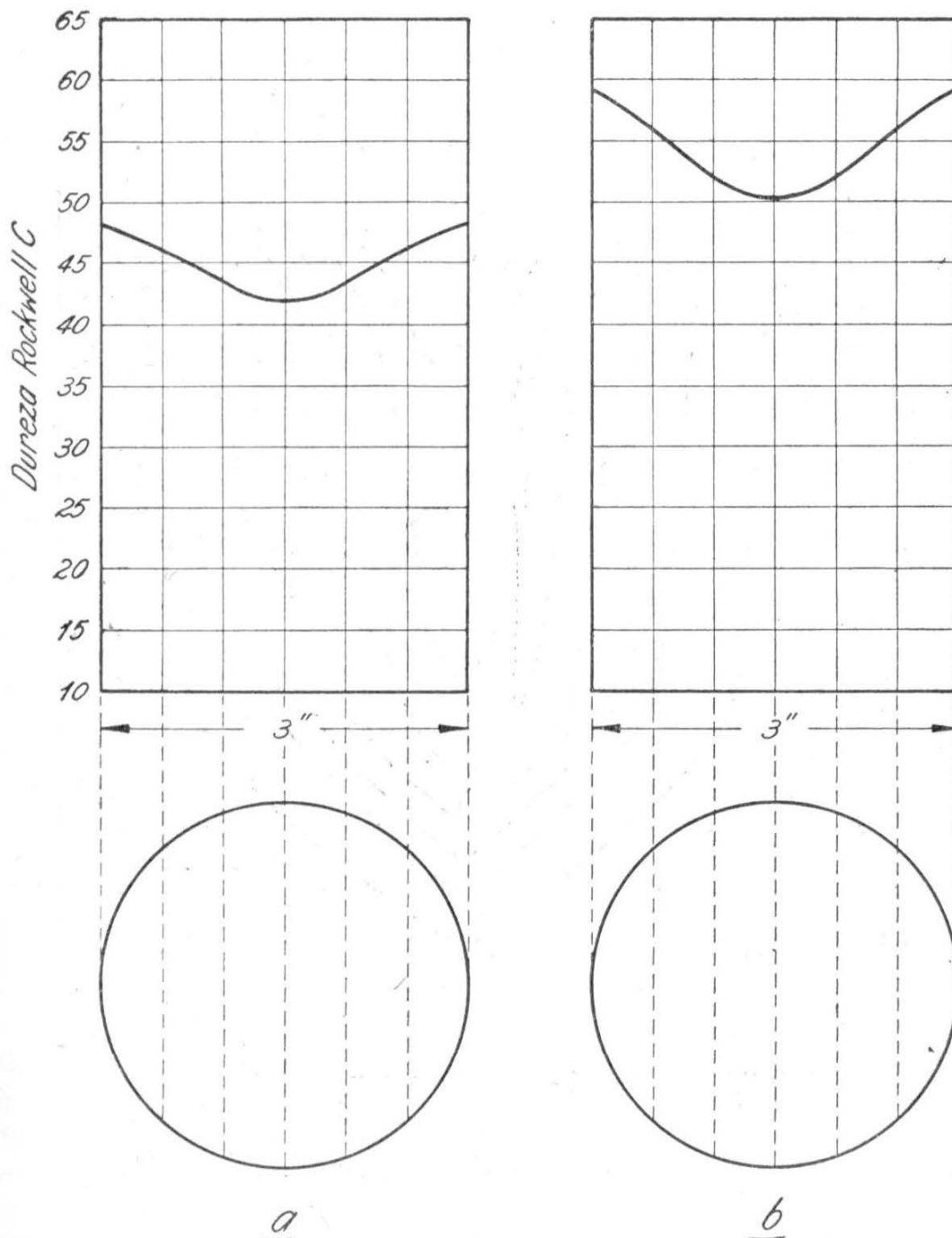


FIG. 26 — Curvas de dureza para aço-liga (SAE 4410).
a) resfriamento em óleo; b) resfriamento em água.

domina a estrutura martensítica da zona em que predomina a estrutura perlítica é percebida por uma queda brusca na dureza; pode-se, assim, facilmente determinar o diâmetro crítico para um determinado aço. Suponha-se, por exemplo, um aço com composição próxima da do eutetoide cujo diâmetro crítico se queira conhecer. Uma série de diâmetros diferentes são analisados pelo

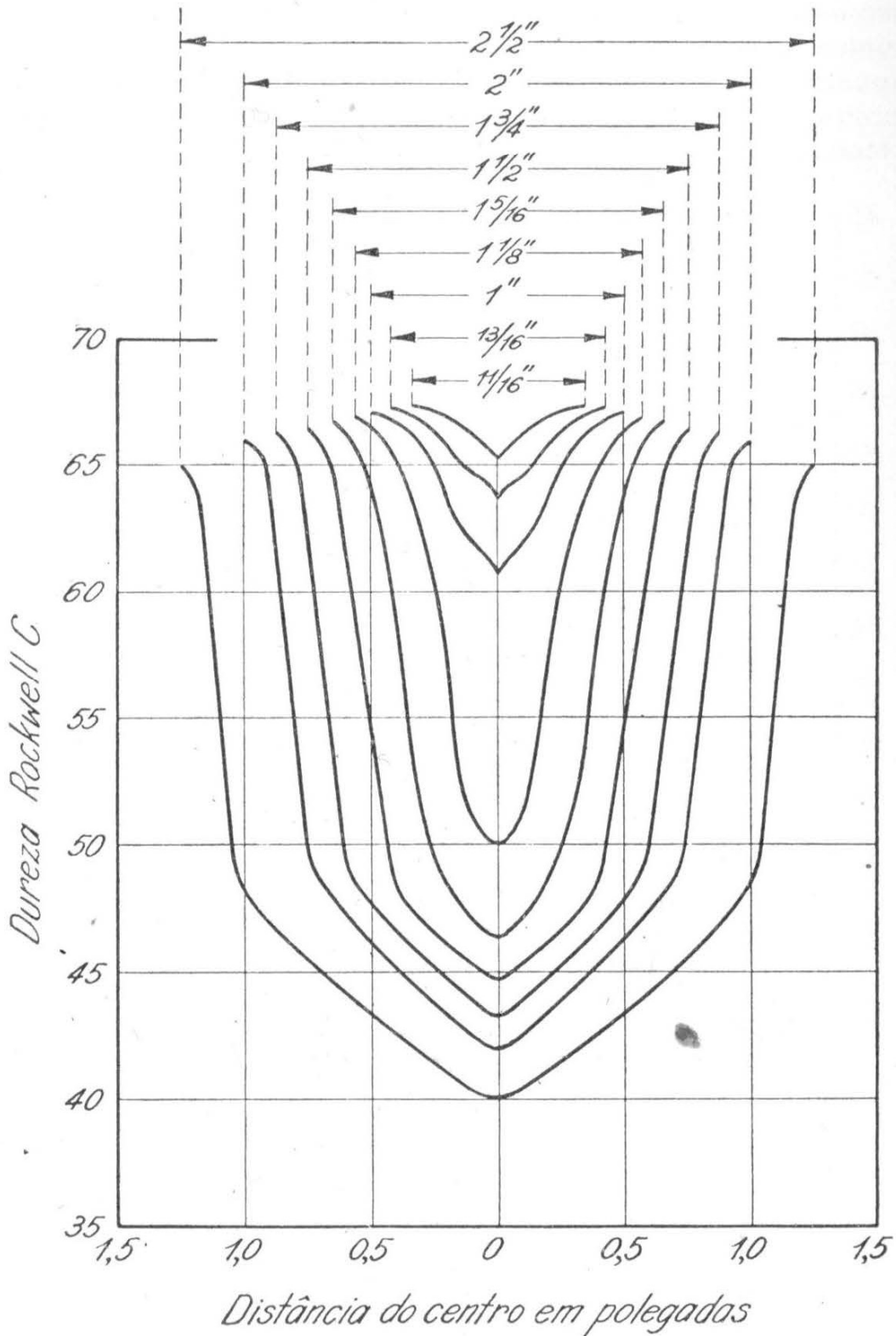


FIG. 27 — Curvas de dureza para um aço com 0,89 % de carbono, em uma série de barras redondas; esfriamento em água. (Figura extraída do livro «Principles of Heat Treatment» de M. A. Grossmann).

método Grossmann, com esfriamento em água, resultando uma série de curvas de dureza como a figura 27 indica. Os diâmetros das barras no exemplo considerado variam de 11/16 a 2-1/2". Para achar o diâmetro crítico, faz-se um gráfico em que em abcissas são representados os diâmetros das barras e em ordenadas a dureza Rockwell C dos centros das barras (fig. 28). Verifica-se que a mais brusca queda de dureza no centro tem-se para a barra em que o diâmetro fica entre 1" e 1-1/8" ou aproximadamente 1,05" que, assim, corresponde ao diâmetro crítico. Tal fato poderia ser perfeitamente comprovado pelo exame das texturas. A dureza crítica é a dureza do centro da barra de diâmetro crítico.

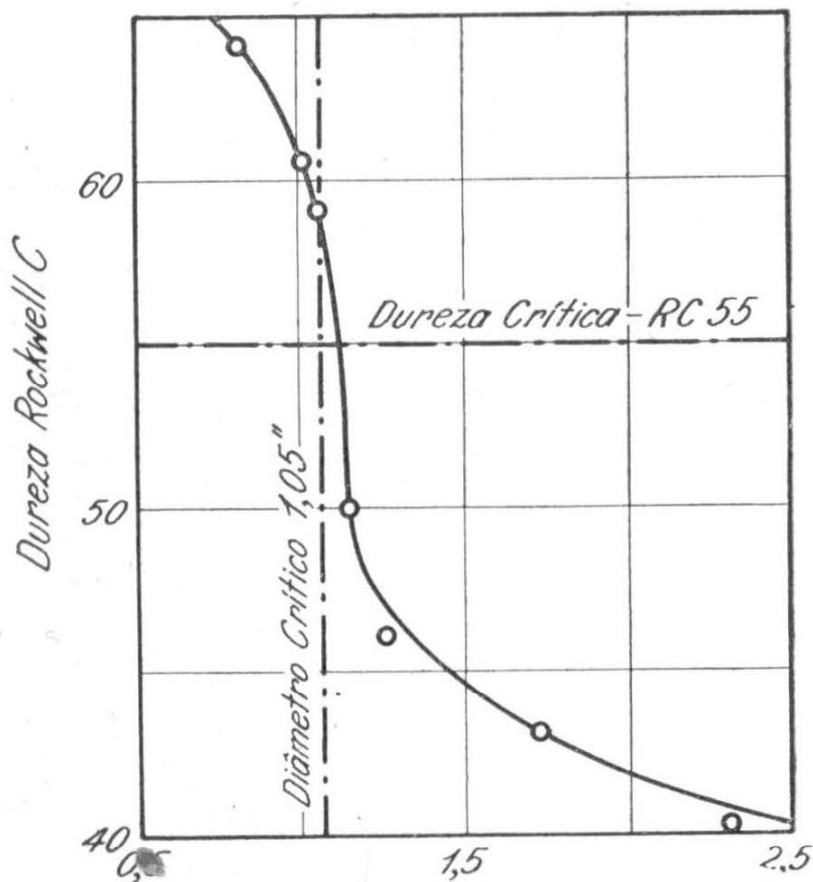


FIG. 28 — Curva representativa da dureza do centro de barras de aço com 0,89% C esfriadas em água (Figura extraída do livro «Principles of Heat Treatment» de M. A. Grossmann).

— **método de Jominy**, em que se produz um esfriamento diferencial. De acôrdo com êsse método uma barra cilíndrica com 1" de diâmetro e 4" de comprimento é aquecida à temperatura austenítica. A seguir, por meio de um dispositivo adequado, faz-se com que um jato de água, em certa quantidade e em determinadas condições de pressão e temperatura, seja dirigido contra uma das suas extremidades. Após esfriamento da barra, mede-se a dureza de uma sua secção longitudinal, a diferentes distâncias da extremidade que recebeu o jato de água.

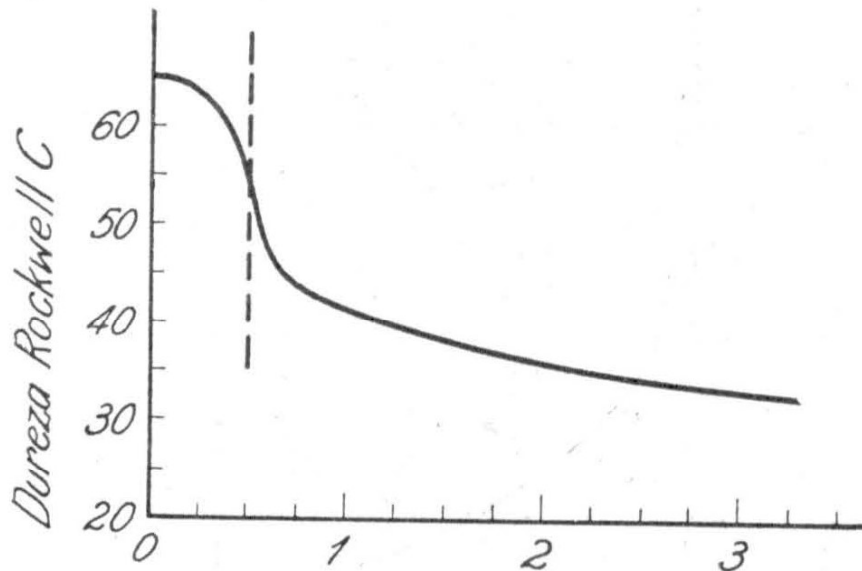
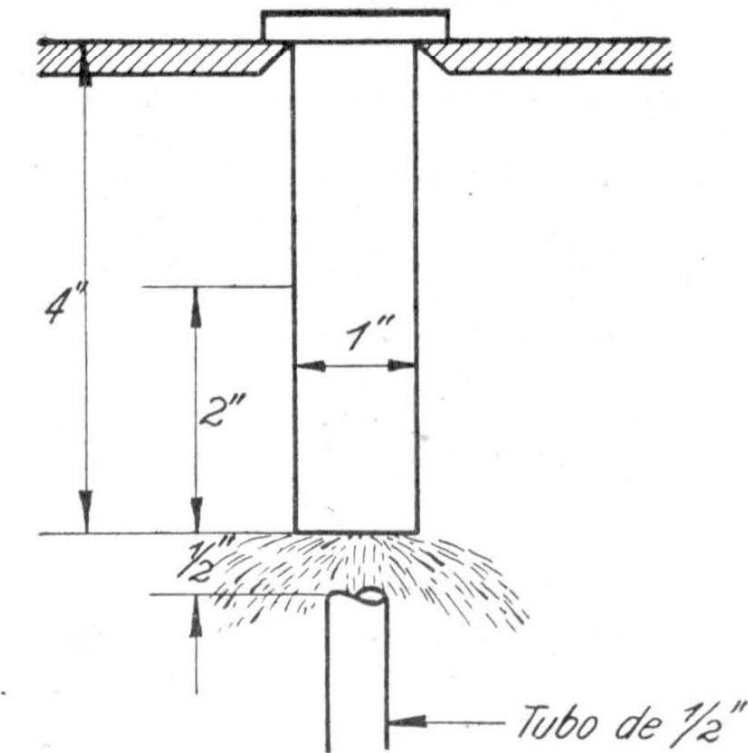


FIG. 29 — Dados de endurecibilidade de Jominy.

Os resultados são representados num gráfico (fig. 29), o qual possibilita a determinação da zona de meia-dureza (ou 50 % de martensita). O método de Jominy é o mais popular na atualidade, existindo curvas de endurecibilidade Jominy para a maioria dos aços estruturais ou utilizados em máquinas.

3 — **Fatores que afetam a endurecibilidade** — São, evidentemente, os mesmos que afetam a posição das curvas nos diagramas isotérmicos, isto é:

— **Tamanho de grão austenítico** — os aços com tamanho de grão da austenita fino tendem a endurecer a uma profundidade menor do que os de tamanho de grão da austenita grosseiro;

— **Composição química** — aços-liga tendem a endurecer a uma profundidade maior do que aços-carbono (figs. 25 e 26), do mesmo modo que para a mesma profundidade de endurecimento podem ser esfriados em meios mais brandos, como óleo ou mesmo ar.