

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE REVENIDO NA DUREZA DE UM AÇO TIPO RCC TRATADO A DIVERSAS TEMPERATURAS ⁽¹⁾

ANTONIO FISCHER DOS SANTOS ⁽²⁾

WALDIR GARLIPP ⁽³⁾

RESUMO

Os Autores, em trabalho constante com este tipo de aço, empregado na confecção de matrizes para corte, ante a necessidade de dados mais completos a respeito de tratamento de revenido, resolveram fazer uma série de experiências. Delas apresentam os resultados da primeira.

1. TÉCNICA EXPERIMENTAL E DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

Segundo análise fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Certificado Oficial 177.968) o aço utilizado apresenta a seguinte composição química, em %: Fe — 84,68; C — 2,03; Cr — 12,80; Si — 0,20; Mn — 0,41; P — 0,029; S — 0,053. No preparo dos corpos de prova, de uma mesma barra de 1/2" foram extraídos 144 discos de 5 mm de altura. Foram furados no centro, a fim de enfiá-los num arame para o tratamento térmico de têmpera de uma só vez. As medidas posteriores de dureza revelaram uniformidade no endurecimento das peças.

Para o tratamento térmico de têmpera, operámos em quatro estágios:

Preaquecimento — Os c. de p. foram aquecidos lentamente até 500°C num forno elétrico (fig. 1) com circulação forçada,

-
- (1) Contribuição Técnica n.º 421; a ser apresentada ao XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, julho de 1961.
 - (2) Membro da ABM; Engenheiro Assistente da Cadeira de Metalurgia da Escola de Engenharia de São Carlos da USP; São Carlos, SP.
 - (3) Bacharel em Física; Assistente da Cadeira de Metalurgia da Escola de Engenharia de São Carlos da USP; São Carlos, SP.

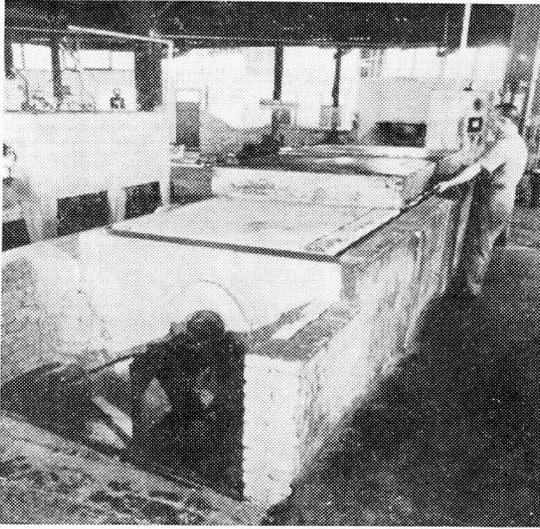


Fig. 1 — Forno elétrico com circulação forçada.

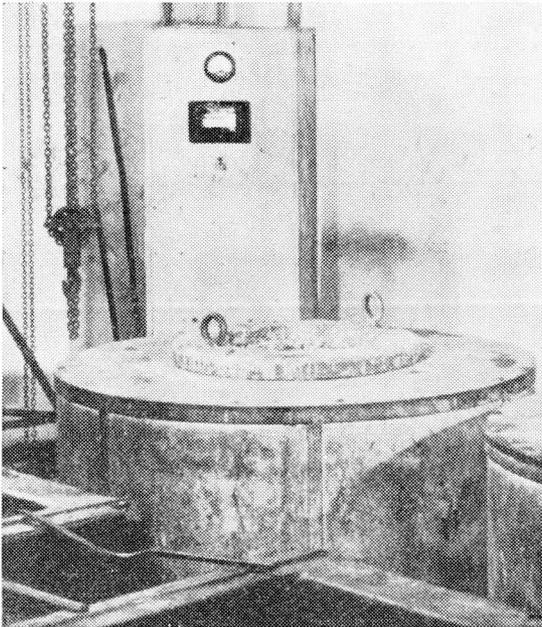


Fig. 2 — Forno elétrico de cadinho.

e nele permaneceram durante 30 minutos. A seguir, os corpos de prova foram transportados para outro forno elétrico (fig. 2) de cadinho com sal fundido a 800°C e nele permaneceram 25 minutos.

Aquecimento — São então os corpos de prova rapidamente transportados a um outro forno de eletrodos (fig. 3, 1.º plano) contendo sais fundidos a uma temperatura de 970°C e ali permanecendo 12 minutos. Tomaram-se todos os cuidados para se evitar uma possível descarbonetação; antes da operação foi feito um levantamento do gradiente térmico do banho, para nos assegurarmos da sua perfeita homogeneidade.

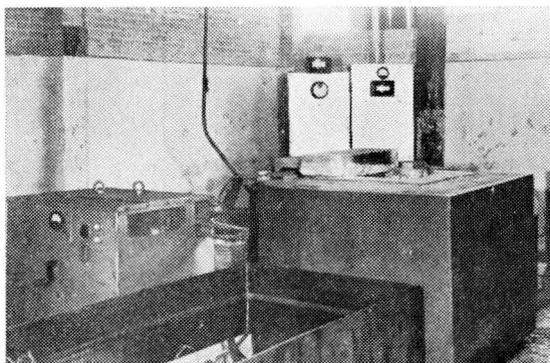


Fig. 3 — Forno de elétrodos no 1.º plano. Forno elétrico no 2.º plano.

Esfriamento — Foram os corpos de prova, em seguida, rapidamente transportados a outro forno elétrico, contendo sais fundidos a 250°C, onde permaneceram 1 minuto (de acordo com a curva TTT de aços semelhantes ao da experiência), sendo a seguir retirados e introduzidos em óleo até atingirem a temperatura ambiente (fig. 3, segundo plano, atrás do forno de eletrodo).

Medida da dureza dos corpos de prova — Em uma máquina de dureza marca TESTOR-OTTO-WOLPERT-WERKE — Tipo Testor 2RC — n.º 3.860 Universal, medimos a dureza na escala Vickers com 20 quilograma força. A máquina foi constantemente controlada em seu funcionamento pelo seu padrão. Acusou perfeito trabalho em todo decorrer destas medidas, mantendo-se

dentro do intervalo de confiança da média, $806,8 < \mu < 821,4$ em Vickers.

Cuidados tomados no tratamento térmico do revenido — Inicialmente encarámos a possibilidade de haver um aquecimento diverso no plano de assento das peças no interior do forno

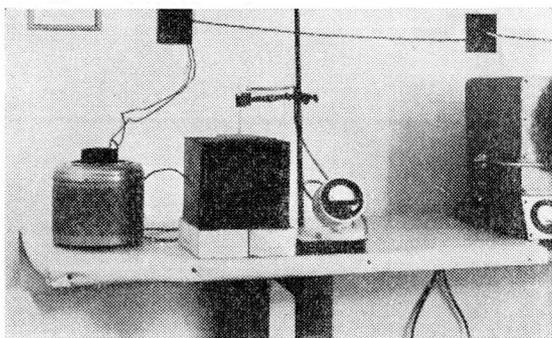
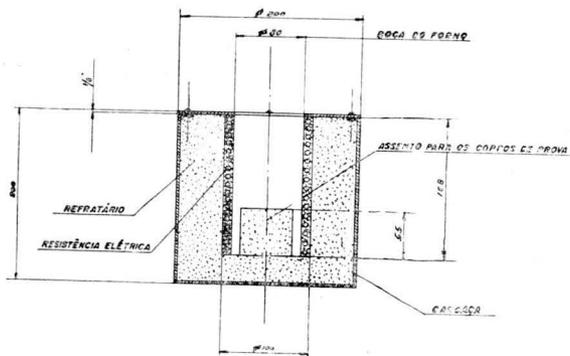


Fig. 4 — Conjunto experimental para o tratamento térmico de revenido: forno elétrico de poço, pirômetro a par termoelétrico e variação.



— FIG-5 —

Fig. 5 — Esquema do forno para o tratamento térmico de revenido.

(figs. 4 e 5). Levámos em conta também a diferença ocasional de dureza inicial dada às peças pela têmpera. Finalmente a possível existência de influências desconhecidas e ainda os erros de experimentação.

Considerando todos êsses cuidados, resolvemos adotar um delineamento estatístico em blocos casualizados conforme a estatística moderna^{1, 2, 3} na realização do nosso trabalho; a Tabela 1 mostra como foi planejada a nossa experiência.

TABELA 1

Planejamento experimental. Os algarismos romanos representam a seqüência de tratamento térmico, em cada bloco

Tempos em minutos	Blocos; temperatura em ° C;							
	0	100	200	300	400	500	600	700
10	VI	VIII	VIII	IV	IX	III	VII	VI
15	VIII	III	IX	VI	II	VI	V	III
20	VII	IX	III	II	VI	IX	VII	I
30	V	IV	VI	IX	I	IV	VI	II
60	III	VII	V	VIII	IV	V	IX	VII
90	II	V	IV	I	V	VII	III	VIII
120	I	I	II	V	VIII	II	IV	IX
180	IX	VI	VII	III	VII	VIII	I	IV
300	IV	II	I	VII	III	I	II	V

Esclarecendo a Tabela 1, diremos que as colunas são os blocos experimentais diários com uma determinada temperatura, conforme o dia da experiência, sorteado. Como se pode notar foram as seguintes as temperaturas escolhidas para cada dia: 0°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C. A primeira se refere à peça sem tratamento térmico de revenido. (As temperaturas foram medidas por meio de um par termoeletrico marca HERAEUS calibrado por meio de um potenciômetro Cambridge tipo L 349.170). Dentro de cada bloco, os tempos de tratamento térmico foram distribuídos ao acaso, como se deve fazer. Os tempos escolhidos para êsse fim foram 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180 e 300 minutos. Cada experimento, em cada bloco, foi realizado com 2 corpos de prova, simultaneamente colocados no forno (fig. 4).

2. MEDIDAS DE DUREZA APÓS O REVENIDO

Cada peça teve sua dureza medida 2 vezes em cada face; foi extraída a média dêsses 4 valores. Como são duas peças para cada caso de tratamento, finalmente se extraiu a média das médias, que formam o conjunto de valores da Tabela 2.

TABELA 2

Conjunto dos valores médios em dureza Vickers

Tempos em minutos	Blocos ; Temperaturas em ° C :							
	0	100	200	300	400	500	600	700
10	923	911	823	766	691	699	615	421
15	915	915	847	742	692	720	598	405
20	918	914	814	746	710	721	562	412
30	920	922	797	731	719	707	545	366
60	931	917	790	717	700	692	483	349
90	927	860	805	732	702	652	474	343
120	908	894	763	730	707	593	472	328
180	893	878	766	736	700	669	425	342
300	925	892	770	710	706	641	420	325

TABELA 3

Análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados	β	Variância	F
Entre linhas	37648	8	4706,0	6,1 ^{***}
Entre blocos	2217939	7	316848,4	410,9 ^{***}
Erro	43183	56	771,1	
Total	2298770	71		

Pode-se concluir pela Tabela 3 que a diferença entre blocos e entre linhas é de altíssima significância (vide 2, pág. 61). Fazendo mais precisamente, isto quer dizer que o erro cometido em supor diferentes os acontecimentos entre blocos (temperaturas) e os acontecimentos entre linhas (tempo) é só de 0,1%.

Análise de regressão^{1, 2, 3} — *Curvas da dureza em função da temperatura de revenido, com parâmetro tempo* — As análises de regressão para cada tempo foram feitas em dados equiespaçados porque a variável temperatura assim o permitia (de 100°C em 100°C). Tôdas as curvas obtidas revelaram ser retas, como se pode notar pelas equações abaixo correspondentes a cada tempo usado na experiência:

Tempo (minutos)	Equação (X em °C e y em dureza Vickers)
10	$y = 753,8 - 0,65 X$
15	$y = 752,6 - 0,67 X$
20	$y = 748,0 - 0,67 X$
30	$y = 738,6 - 0,72 X$
60	$y = 724,7 - 0,78 X$
90	$y = 714,0 - 0,77 X$
120	$y = 702,3 - 0,80 X$
180	$y = 703,0 - 0,77 X$
300	$y = 702,6 - 0,83 X$

O conjunto das retas referentes às equações acima é dado na figura 6.

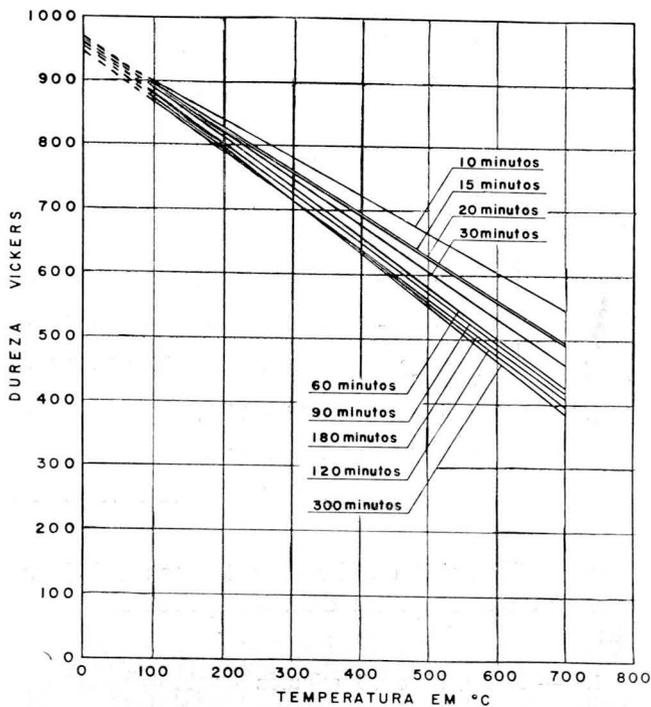


Fig. 6 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centígrados), parâmetro tempo.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Examinando-se a figura 6, dois fatos dela podem ser extraídos:

1.º *Fato* — A variação de dureza entre 10 e 15 ou 20 minutos é mais acentuada que entre 15 ou 20 e 30 minutos e cresce com a temperatura. Entre 30 e 60 minutos a variação de dureza é semelhante àquela entre 15 ou 20 e 30 minutos, nas diversas temperaturas de tratamento térmico.

Procurámos verificar, por exame metalográfico, se o número de grãos precipitados de carboneto de cromo, contados dentro de uma área constante escolhida na ocular, influiu na medida de dureza para os tratamentos citados à temperatura de 500°C. Fizemos 10 contagens de grãos da periferia ao centro em todos os corpos de prova, relativos a 10, 15, 20 e 30 minutos:

Corpos de prova	Tempo em minuto	Quantidade de grãos de carboneto de cromo numa mesma área escolhida na ocular do microscópio
A	10	20 - 16 - 14 - 24 - 18 - 15 - 15 - 14 - 14 - 14
B	10	26 - 17 - 15 - 14 - 12 - 15 - 16 - 18 - 15 - 18
A	15	24 - 19 - 17 - 22 - 26 - 25 - 22 - 20 - 21 - 17
B	15	17 - 16 - 22 - 19 - 22 - 20 - 16 - 26 - 15 - 23
A	20	17 - 20 - 22 - 21 - 17 - 17 - 16 - 12 - 8 - 20
B	20	22 - 23 - 20 - 20 - 19 - 18 - 24 - 23 - 24 - 24
A	30	11 - 16 - 12 - 13 - 11 - 8 - 14 - 13 - 8 - 9
B	30	13 - 16 - 14 - 7 - 14 - 17 - 19 - 13 - 18 - 13

A comparação entre os diversos tempos foi feita utilizando-se o teste *t* de Student em dados emparelhados e da seguinte maneira:

- 1.º — Entre 10 e 15 minutos
- 2.º — Entre 15 e 20 minutos
- 3.º — Entre 20 e 30 minutos
- 4.º — Entre 10 e 30 minutos

Os resultados foram quanto à diferença em número de grãos:

- 1.º — Entre 10 e 15 minutos em 99 % dos casos
- 2.º — Entre 15 e 20 minutos em 80 % dos casos
- 3.º — Entre 20 e 30 minutos em 99,9% dos casos
- 4.º — Entre 30 e 10 minutos em 98 % dos casos

Admitindo-se um erro experimental de 5% (e, portanto, probabilidade de acertar em 95% dos casos) vemos que as 1.ª, 3.ª e 4.ª comparações revelam diferença real entre as quantidades de grãos. Já para o 2.º caso estamos com nenhuma diferença entre as 2 contagens.

Voltando à figura 6, vemos que as diferenças significativas em dureza entre 10 e 15 minutos, entre 20 e 30 minutos e entre 10 e 30 minutos, concordam com as diferenças significativas verificadas para número de grãos entre os mesmos tempos comparados. E para comparação de 15 com 20 minutos, não havendo diferença significativa entre as durezas, também não houve entre o número de grãos.

Tudo isso nos leva a crer, pelo menos na situação estudada (até 30 minutos de tempo e a 500°C) que há uma relação entre a dureza superficial do aço RCC temperado e revenido e a quantidade de grãos de carboneto de cromo precipitada. Tanto a quantidade de grãos por unidade de área como a dureza variam com o tempo de tratamento de revenido à mesma temperatura, com uma estabilização na passagem de 15 a 20 minutos. Ver figuras 7 e 8.

2.º *Fato* — Para os tempos de 120, 180 e 300 minutos, há um ponto de cruzamento nas proximidades de 300°C, permanecendo a reta de 120 minutos entre as outras duas. Uma verificação foi feita para os tempos de 180 a 300 minutos e temperaturas de 0,100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 600°C, usando-se corpos de prova temperados de maneira análoga a já citada no início deste trabalho. Entretanto, esses corpos de prova, pelo fato de terem sido guardados durante 6 meses e tendo sofrido uma variação de temperatura média de inverno para outra média de verão, já apresentavam uma diminuição de dureza em todos os casos. Mais precisamente, passaram do intervalo de confiança da média $909,0 < \mu_1 < 926,6$ para o intervalo de confiança da média $835,6 < \mu_2 < 852,6$ em dureza Vickers. *

As temperaturas de tratamento também foram sorteadas.

(*) Também as peças revenidas e guardadas nas mesmas condições tiveram sua dureza diminuída.

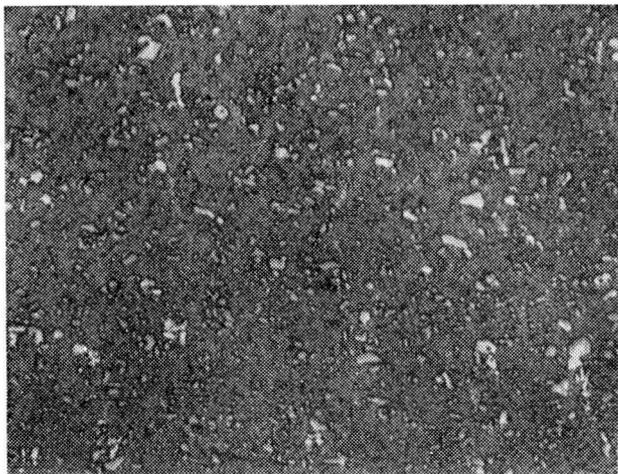


Fig. 7 — Ataque com nital do aço estudado, revenido a 500°C durante 15 minutos. Aumento 200 ×.

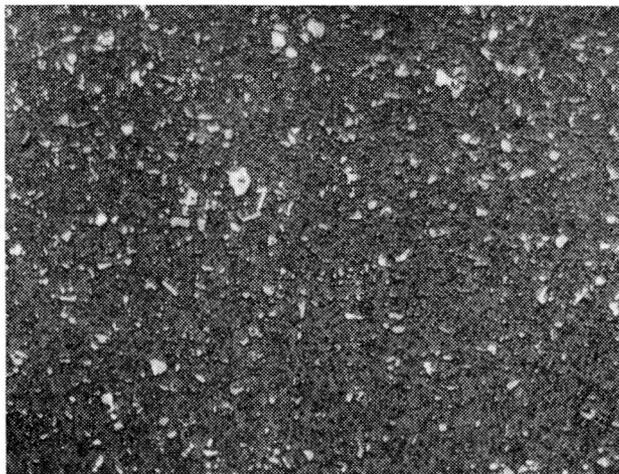


Figura 8 — Ataque com nital do aço em questão, revenido a 500°C durante 60 minutos. Aumento 200 ×.

A análise de regressão revelou para cada tempo:

$$\text{Para 180 minutos: } y = 889,7 - 0,620 X$$

$$\text{Para 300 minutos: } y = 896,7 - 0,733 X$$

y = dureza em Vickers

X = temperatura em °C

As duas retas acima se cortam em 62°C, portanto em temperatura inferior ao do caso anterior (300°C).

A verificação bibliográfica demonstrou que, para aço com a composição aproximada do nosso⁵, aço C fabricado pela Vanadium Alloy Steel Company — Pittsburgh) *, apresentava uma família de curvas de acôrdo com a expressão:

$$D = T (c + \log t) \quad (1)$$

(D = dureza de Rockwell C; constante $c = 14,4$ própria do aço e da temperatura inicial de têmpera; T = temperatura em °F absoluto e $t =$ horas).

*

Os nossos resultados experimentais aplicados nesta expressão exigem, entre outras, a conversão das medidas de dureza Vickers em Rockwell C. Esta operação é delicada se encararmos a precisão dos nossos resultados numéricos e pela falta de tabela adequada ao nosso caso^{6, 7}. Tentativas feitas com a tabela dos Engenheiros Tomio Kitice e Edgard Luiz Dantas de Carvalho⁶ deram resultados muito pouco concordantes com o de G. A. Roberts⁵. É nossa intenção, em próximo trabalho, obter a tabela de conversão apropriada.

As retas em nosso caso e existentes na figura 6 podem servir perfeitamente para a utilização em secções de tratamento térmico. Para facilitar a consulta foram as retas reunidas nas figurs 9, 10, 11, 12 e 13.

*

AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Prof. Engenheiro Rubens Lima Pereira, Catedrático da Cadeira de Metalurgia do Departamento de Mecânica B pelas sugestões e incentivo dados à realização dêste trabalho.

(*) Composição:

Cr = 11,68 %

Mn = 0,32 %

S = 0,009%

C = 2,17 %

Si = 0,38 %

V = 0,78 %

Fe = 84,135%

P = 0,016%

Co = 0,51 %

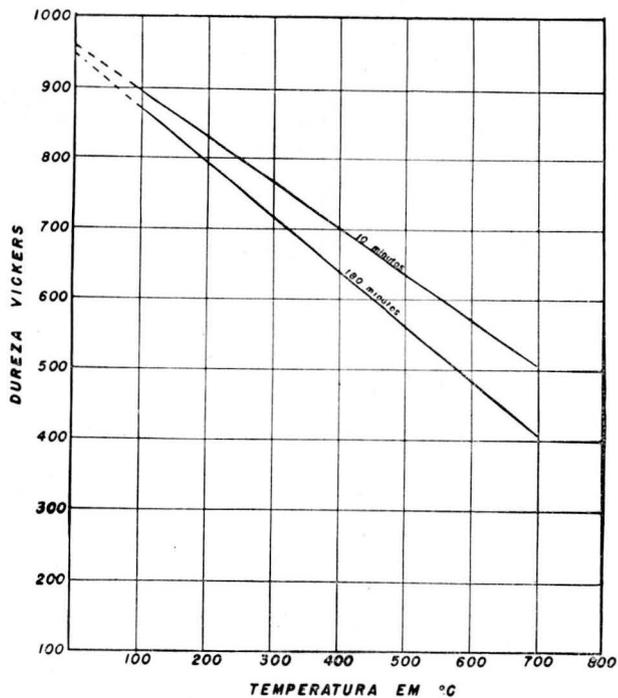


Fig. 9 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centígrados), para 10 e 180 minutos.

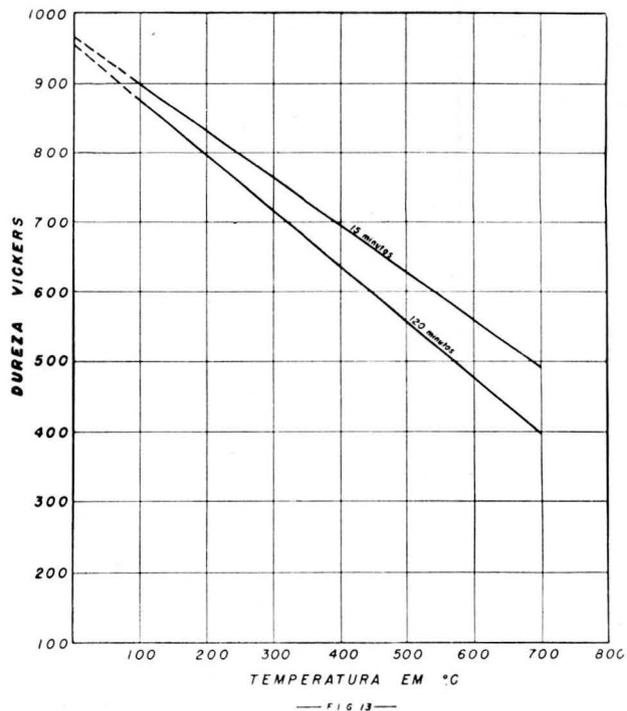
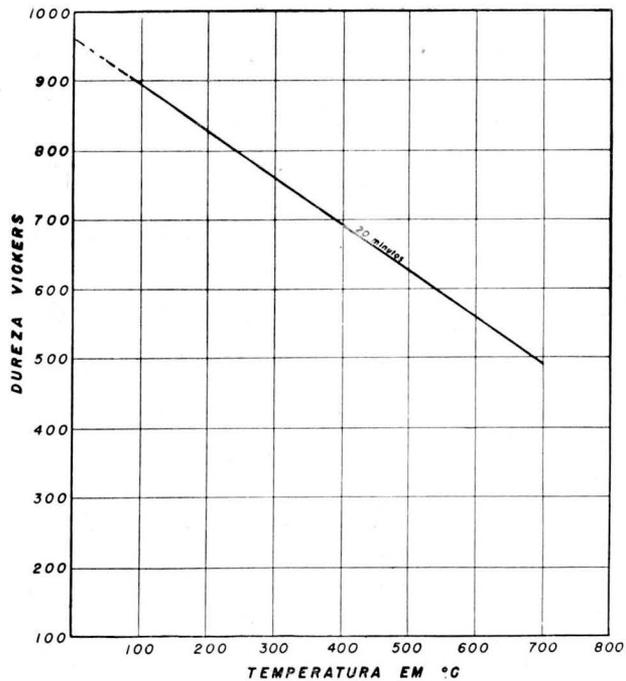
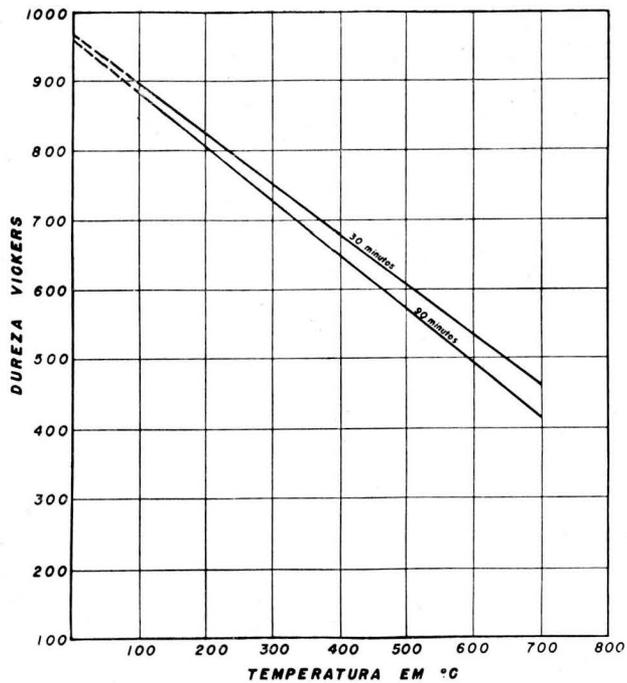


Fig. 10 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centígrados), para 15 e 120 minutos.



— FIG. 14 —

Fig. 11 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centigrados), para 20 minutos.



— FIG. 15 —

Fig. 12 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centigrados), para 30 e 90 minutos.

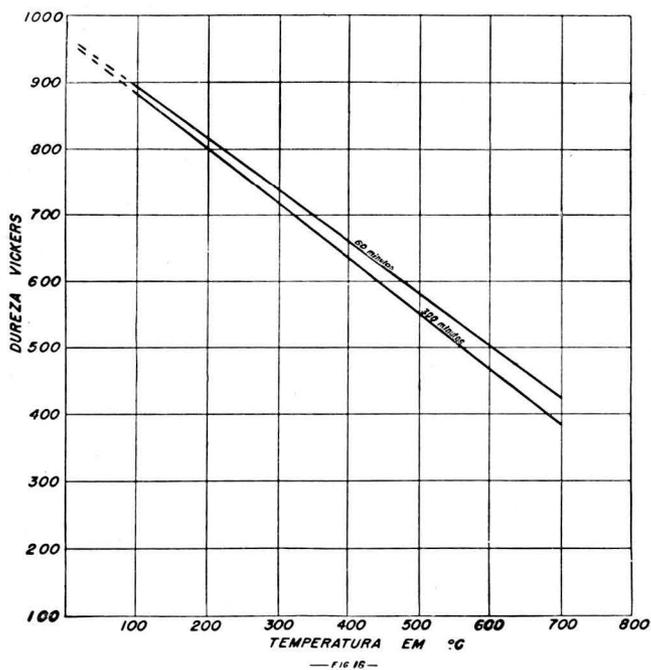


Fig. 13 — Dureza Vickers em função da temperatura de tratamento de revenido (graus centígrados), para 60 e 300 minutos.

BIBLIOGRAFIA

1. RUY AGUIAR DA SILVA LEME — *Curso de Estatística — Cadeira de Economia Política. Estatística Aplicada, Organizações administrativas.* Escola Politécnica — USP.
2. R. A. FISHER e F. YATES — *Tablas estadísticas para Investigadores Científicos.* Editora Aguillar — Copyright, 1954.
3. OWEN L. DAVIES — *Statistical Methods in Research and Production.* Ed. Oliver e Boyd — 3.ª edição.
4. J. H. HOLLOWOMON e L. D. JAFFE — *Time temperature relations in tempering steel.* AIME Transactions, vol. 162, 1945, pg. 223-249.
5. GEORGE A. ROBERTS — *Tempering Tool Steel.* Steel July, 28, 1947 — pg. 72-74, 98, 100; Steel August 4 — 1947 — pg. 96-98-100.
6. TOMIO KITICE e EDGARD LUIZ DANTAS DE CARVALHO — *Tabela de conversão dos números de dureza.* Boletim da Associação Brasileira de Metais, n.º 31, vol. 9, abril 1953, pg. 189.
7. *Discussão de contribuições técnicas.* Boletim da Associação Brasileira de Metais, n.º 33, vol. 9, outubro, 1953, pg. 474.