

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS ESTIMATIVOS DA CURVA JOMINY DO AÇO SAE 8620*.

Stephen Liu K. Chuen⁽¹⁾

Carlos A. Bottrel Coutinho⁽²⁾

(1) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista; M.Sc. Engenheiro da Companhia Aços Especiais Itabira - ACESITA.

(2) Membro da ABM. Engenheiro Mecânico; M.Sc.; Ph.D. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, MG

* Trabalho submetido para apresentação no 1º Simpósio da Comissão Técnica de Metalurgia Física e Tratamentos Térmicos - COMFIT, a realizar-se em 31 de maio de 1980, em Belo Horizonte.

RESUMO

Foi feita uma comparação entre os métodos propostos por Field, Craft-Lamont e Just, para o cálculo estimativo da curva Jominy. Cento e vinte amostras de corridas diferentes do aço SAE 8620 da ACESITA foram coletadas para o levantamento das durezas nos corpos de prova Jominy. A precisão de cada um dos métodos foi determinada avaliando-se os desvios entre as durezas medidas experimentalmente e as calculadas.

ABSTRACT

A comparison was made of the methods proposed by Field, Craft-Lamont e Just for the approximate calculation of Jominy curves. One hundred and twenty Jominy samples, obtained from different melts of SAE 8620 steel produced in ACESITA, had their hardness measured. The precision of each method was then determined by calculating the differences between the measured and the estimated hardnesses.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de cálculo de diâmetros críticos ideais - DCI, fornecem meios rápidos e satisfatórios para avaliar as respostas dos aços aos tratamentos térmicos. Entretanto, eles não fornecem informações quantitativas com relação à estrutura e às propriedades da têmpera. As curvas Jominy, ao contrário, mostram os gradientes de dureza desenvolvidos nas barras Jominy e possibilitam comparações das temperabilidades de corridas diferentes do mesmo tipo de aço. Desta forma, as curvas Jominy servem como medidas de controle de qualidade.

2. CÁLCULO DE CURVAS JOMINY

2.1. Constantes de divisão

O método principal de cálculo dos gradientes de dureza nas curvas Jominy, da composição química e tamanho de grão austenítico, é o proposto por Field¹, baseando-se no diâmetro crítico ideal.

Este método baseou-se em três suposições:

- i . A dureza na extremidade de têmpera, denominada dureza inicial (IH), é uma função exclusiva do teor de carbono.
- ii . Para um dado teor de carbono, a dureza num ponto intermediário (DH) (qualquer distância da extremidade de têmpera) é função do diâmetro crítico ideal.
- iii. A razão entre a dureza inicial e a dureza em um dado ponto, para qualquer teor de carbono, é uma constante (denominada "constante de divisão") para cada diâmetro crítico ideal. Em outras palavras, mudando-se a composição química, porém mantendo-se o diâmetro crítico ideal, as constantes de divisão permanecem as mesmas.

Field¹ mediu, nas barras Jominy de 14 tipos de aços diferentes, as durezas nos pontos 1/4 da polegada, 1/2 da polegada, 1 polegada, 1 1/4 polegada, 1 1/2 polegada, 1 3/4 polegada e 2 polegadas. Os valores obtidos foram graficados em função dos seus respectivos diâmetros críticos ideais. Estes gráficos são mostrados na figura 1. Posteriormente, estes valores foram tabelados. A tabela I é a mais completa tabela de constantes de divisão encontrada na literatura.

Se se dividir a dureza máxima por esta constante, obtêm-se a dureza intermediária ($IH/\frac{IH}{DH}$). Então, para um determinado diâmetro crítico, as durezas intermediárias podem ser determinadas e, conseqüentemente, toda a curva Jominy.

Devido à variação das durezas dos constituintes não martensíticos, o método não tem muita precisão. Entretanto, para os aços com 3 elementos de liga, para os quais foram as razões primeiramente estabelecidas, o método se aplica com bastante exatidão.

2.2. Parâmetros de adição

Craft e Lamont² estabeleceram um algoritmo mais direto na determinação das durezas numa barra Jominy. Esta determinação é feita adicionando unidades de Rockwell C, proporcionais aos teores de carbono, aos teores dos elementos de liga e também ao tamanho de grão austenítico.

O método tem como suposição que ligas Fe-C puras, quando resfriadas a velocidades correspondentes àquelas das barras Jominy, atingem determinadas durezas denominadas "dureza de base carbono". Os elementos de liga contribuem à temperabilidade adicionando unidades de dureza à "dureza de base carbono". Duas outras durezas também são características, a "dureza máxima" e a "dureza de base martensítica".

Na zona martensítica, há um aumento desproporcionado na dureza. Por isso, o excesso da soma das unidades de Rockwell C de "dureza de base carbono" e dos elementos de liga sobre a "dureza de base martensítica" é multiplicado por um fator que varia de 1,25 (para 0,05%C) até 4 (para 0,60%C). Este fator é conhecido como "fator de martensita". A "dureza de base martensítica", o "fator de martensita" e a "dureza máxima" dependem somente do teor de carbono e a "dureza de base carbono" depende ainda ligeiramente da velocidade de resfriamento. Da mesma maneira, os efeitos das adições de elementos de liga são independentes do teor de carbono, da velocidade de resfriamento, com a suposição de que não haja interação entre eles. Eles agem da mesma maneira que um aumento da velocidade de resfriamento.

Os autores do método em pauta prepararam monogramas para facilitar o uso do seu método, os quais são apresentados na figura 2.

Segundo estes autores, o cálculo das durezas Jominy varia de ± 6 unidades

na escala Rockwell C, o que é suficientemente preciso para servir como guia na seleção e no tratamento térmico do material. Entretanto, este modelo não se presta muito bem para aplicação em controle de qualidade.

2.3. Regressão numérica

Utilizando as técnicas de análise por regressão, Just³ deduziu expressões que possibilitam calcular diretamente as durezas de Jominy em distâncias diferentes na barra Jominy, a partir da composição química.

Ele determinou que a dureza na distância Jominy zero é governada somente pelo teor de carbono. Os elementos de liga influenciam na formação de martensita, de bainita, etc., e assim alteram as curvas Jominy. Até em torno de 3/8 da polegada de profundidade (~10mm), a estrutura martensítica é responsável pela dureza. Para profundidades maiores, a dureza já se deve a estruturas não martensíticas.

A equação seguinte foi apresentada por Just, em 1967, no XXIII Colóquio sobre tempera³.

$$J(1/4''-2'')=J(-6-80\text{mm})=95\sqrt{C}-0,0028S^2\sqrt{C}+20\text{Cr}+38\text{Mo}+14\text{Mn}+ \\ +6\text{Ni}+6\text{Si}+39\text{V}+96\text{P}-0,8\text{K}-12\sqrt{S}+0,95\text{S}-13\text{HRC} \quad (2.1)$$

em que

- J - Dureza Jominy em HRC;
- S - Distância Jominy em mm;
- K - Tamanho de grão austenítico ASTM;
- C - Teor percentual de carbono;
- Cr- Teor percentual de cromo;
- Mn- Teor percentual de manganês;
- Ni- Teor percentual de níquel;

Si - Teor percentual de silício;
V - Teor percentual de vanádio;
P - Teor percentual de fósforo.

Para distâncias menores que 6mm, geralmente, as influências dos elementos de liga são desprezíveis. Portanto, a equação abaixo calcula as durezas nas posições $J_{0'' \rightarrow 1/4''}$ utilizando o teor de carbono,

$$J_{0'' \rightarrow 1/4''} = J_{0-6mm} = 60\sqrt{C} + 20HRC \quad (2.2)$$

Os limites destas equações são:

C < 0,6%
Cr < 2%
Mn < 2%
Ni < 4%
Mo < 0,5%
V < 0,2%

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço SAE 8620 foi escolhido como material de estudo em parte devido à facilidade de sua obtenção. O seu comportamento regular numa barra Jominy e a sua média temperabilidade foram também decisivos na sua escolha. Cento e vinte amostras de corridas diferentes deste aço na COMPANHIA AÇOS ESPECIAIS ITABIRA (ACESITA), foram coletadas, forjadas e usinadas até a dimensão correta (figura 25). Antes da usinagem, o material foi normalizado a 930°C durante uma hora.

A temperatura de austenitização é de 930°C, durante 30 minutos. Completa a austenitização, o ensaio era realizado segundo a recomendação das normas^{4,5,6,7}.

Para determinar as durezas ao longo de um corpo de prova Jominy, foram usados os métodos de Field (constantes de divisão), de Craft e Lamont (parâmetros de adição) e de Just (por regressão numérica), mencionados anteriormente.

A determinação da distância crítica Jominy experimental e do diâmetro crítico ideal via experimental pode ser resumida em quatro pontos:

1. Ajustar a melhor curva aos pontos experimentais do ensaio Jominy.
2. Determinar a dureza correspondente a uma estrutura de 50% de martensita (esta dureza é uma função do teor de carbono)⁸.
3. Identificar a distância, na curva Jominy, correspondente à dureza determinada.
4. Calcular o diâmetro crítico ideal (DCI) através da equação seguinte.

$$J_D = 0,000605 \cdot DCI^6 - 0,012449 \cdot DCI^5 + 0,101188 \cdot DCI^4 - 0,407727 \cdot DCI^3 + 0,86004 \cdot DCI^2 - 0,66343 \cdot DCI + 0,154442 \quad (3.1)$$

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Comparação dos métodos estimativos das curvas Jominy

Para comparar os três métodos usados na determinação das curvas Jominy, os desvios (ΔJ) de dureza foram calculados, isto é, a dureza calculada no ponto 1/16 da polegada da extremidade de têmpera foi comparada com a dureza experimental do mesmo ponto e assim sucessivamente. Este procedimento foi repetido para todas as amostras e para cada um dos métodos.

Para efeito de comparação e pela necessidade, do método de Field, de conhecer primeiramente o valor de diâmetro crítico ideal, o diâmetro crítico ideal determinado via experimental foi introduzido para o cálculo. Quanto aos outros dois métodos, as durezas foram determinadas diretamente a partir da composição química.

A partir dos valores dos desvios (ΔJ) calculados foram determinados os parâmetros $\mu_{\Delta J}$ (média dos desvios) e $\sigma_{\Delta J}$ (desvio padrão dos desvios) que são mostrados na tabela II e representados na figura 3.

Conclui-se que o método de Field é o que melhor estima as durezas ao longo de um corpo de prova Jominy. Desde que se conheça o diâmetro crítico de um material com boa precisão, pode-se calcular a curva Jominy corretamente.

4.2. Determinação da banda de temperabilidade do aço SAE 8620

Ajustando os valores das durezas medidas, foi possível calcular as médias e os desvios-padrão. Estes valores são tabelados e mostrados a seguir, tabela III. Pela distribuição normal, sabe-se que o intervalo entre $\mu+\sigma$ e $\mu-\sigma$ contém 66,7% dos dados. Então, a banda de temperabilidade dos aços SAE8620 (de produção ACESITA) pode ser estabelecida, representando os valores $\bar{J}+\sigma$ e $\bar{J}-\sigma$ graficamente, o que pode ser visto na figura 4. Geralmente, o uso das composições químicas máxima e mínima na determinação de uma banda de tempe-

rabilidade não é recomendado, pois cada usina tem a sua prática de aciação, o que pode distribuir as corridas de forma não aleatória na faixa de composição. Portanto, a maneira mais satisfatória é esta apresentada, que se baseia em corridas experimentais.

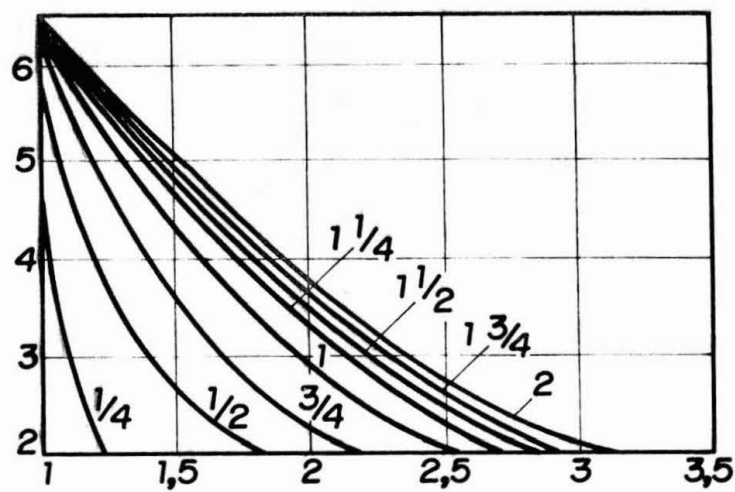
5. CONCLUSÕES

1. O método de Craft-Lamont é de utilização mais complicada e apresenta desvios grandes nas distâncias próximas à extremidade de têmpera.
2. As equações de Just, obtidas por regressão numérica, não permitem calcular durezas nos pontos intermediários entre 0 mm (extremidade de têmpera) e 7 mm ($\sim 1/16''$).
3. As equações de Just apresentam desvios grandes (nas regiões perto de $1/4''$ da extremidade de têmpera) e estes diminuem ao se afastar da extremidade.
4. O método de Field é o que melhor estima as durezas ao longo de um corpo de prova Jominy.

6. BIBLIOGRAFIA

1. FIELD, J. Calculation of Jominy end-quench curve from analysis. Metal Progress: 402-5, Mar.1943.
2. CRAFT,W. & LAMONT,J.L. Hardenability and steel selection. Sir Issac Pitman & Sons, London, 1949.279p.
3. JUST,E. Hardenability formula. Härt. Techn. Mitt., 23(2):85-100,Jul. 1968.
4. ORGANIZATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. Essai de Trempabilité par trempe en bout de L'acier (Essai Jominy); 150/R 642, Suisse, 1967.15p.
5. DEUTSCHER NORMEN AUSSCHUSS. Prüfung von Eisenwerkstoffen Stimabschreckversuch; DIN 50191, Witten, 1971. 4p.
6. ACESITA. Programa de ensaios conjuntos de teste Jominy e projeto de norma; Acesita; 1978. 19p.
7. SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS. Methods of determining hardenability of steels; SAE J406a, Philadelphia, 1962. 5p.
8. SIEBERT,C.A. et alii. The hardenability of steels - concepts, metallurgical influences and industrial applications. ASM, Metals Park, Ohio, 1977, 218p.
9. DOANE,D.V. & KIRKALDY,J.S. Hardenability concepts with applications to steel. AIME. Warrendale, PA, 1977. 626p.

DIÂMETRO CRÍTICO IDEAL, DCI ["]



DUREZA INICIAL/DUREZA NUM PONTO INTERMEDIÁRIO

Figura 1 - Variação da constante de divisão com o diâmetro crítico ideal - DCI¹.

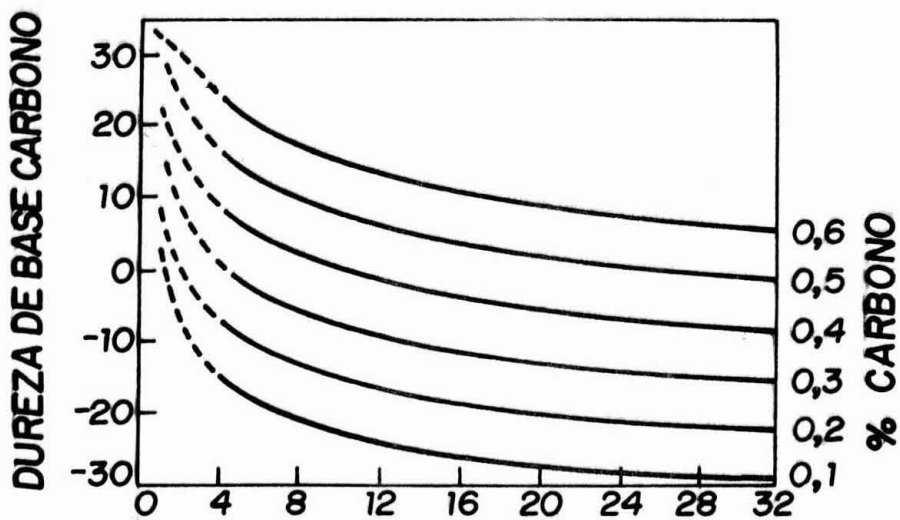
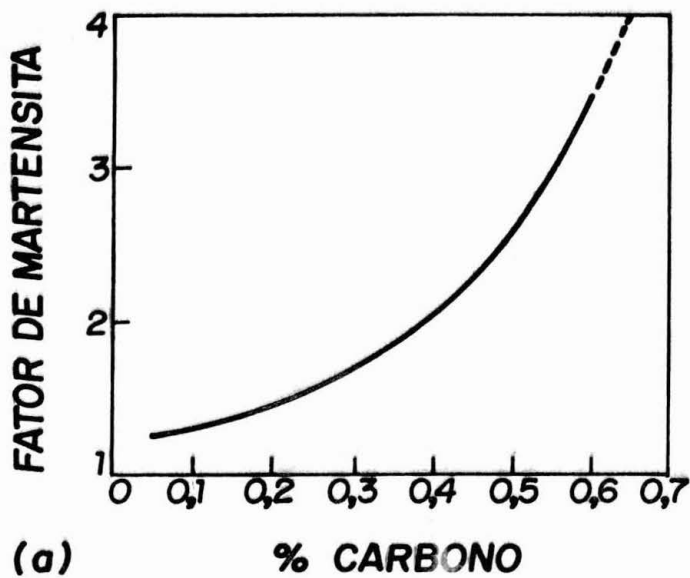


Figura 2 - Os parâmetros de adição desenvolvidos por Craft-Lamont².

- a. Fator de martensita
- b. Dureza de base martensítica.

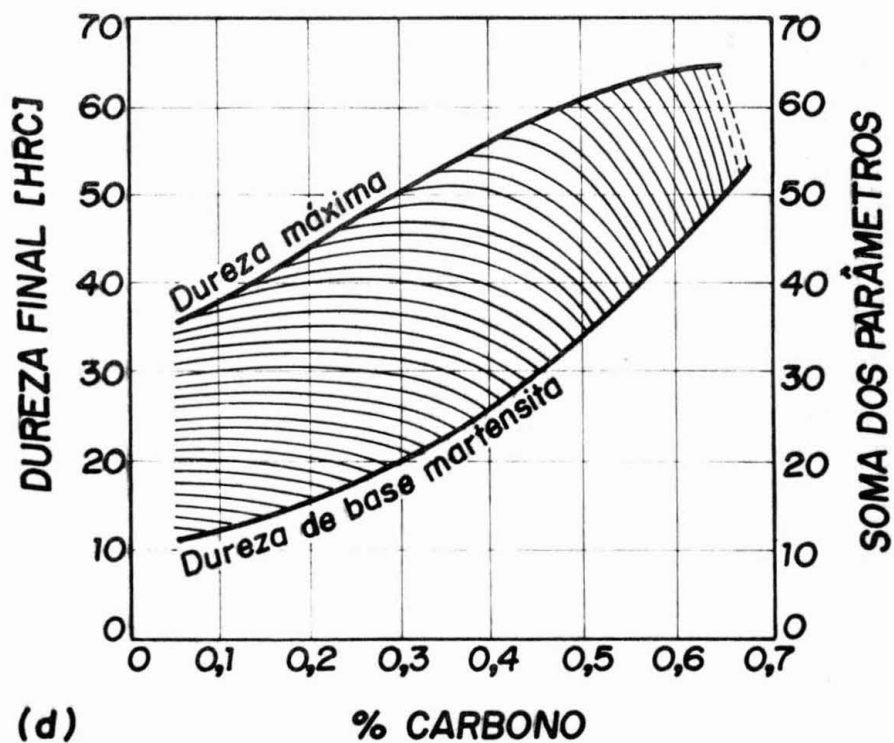
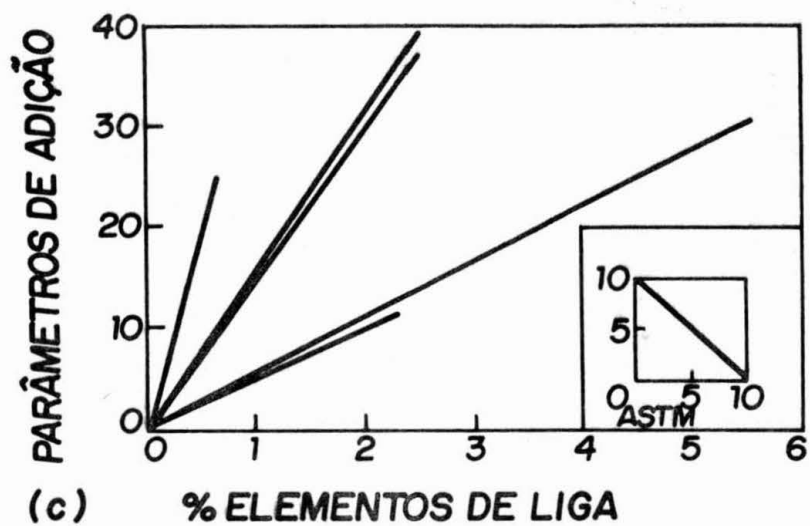


Figura 2 - Os parâmetros de adição desenvolvidos por Craft-Lamont².

- c. Dureza devida à adição de elementos de liga;
- d. Nomograma final.

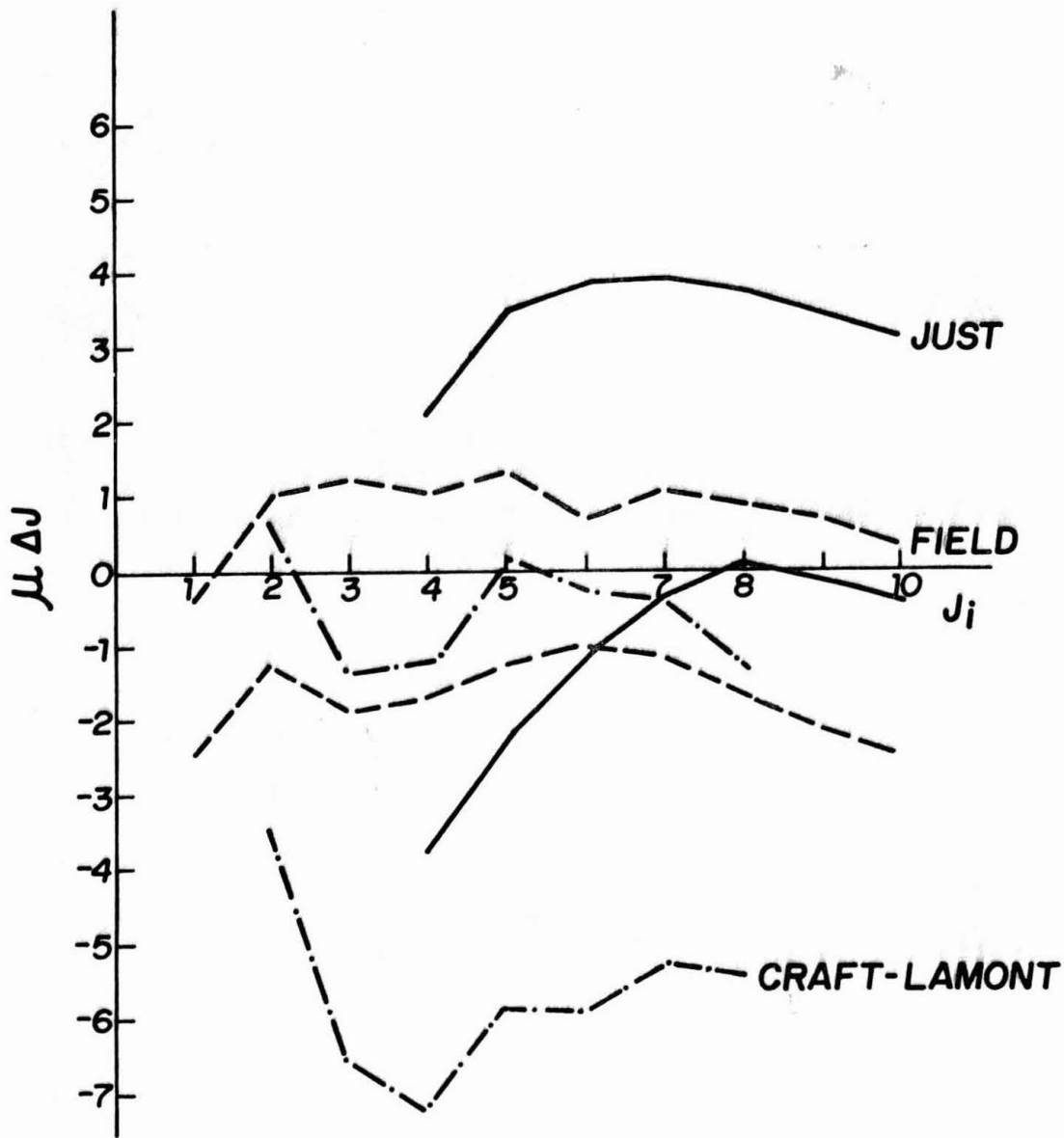


Figura 3 - Os desvios médios de dureza em cada ponto dos corpos de prova Jominy, segundo os métodos de Just, de Field e de Craft-Lamont.

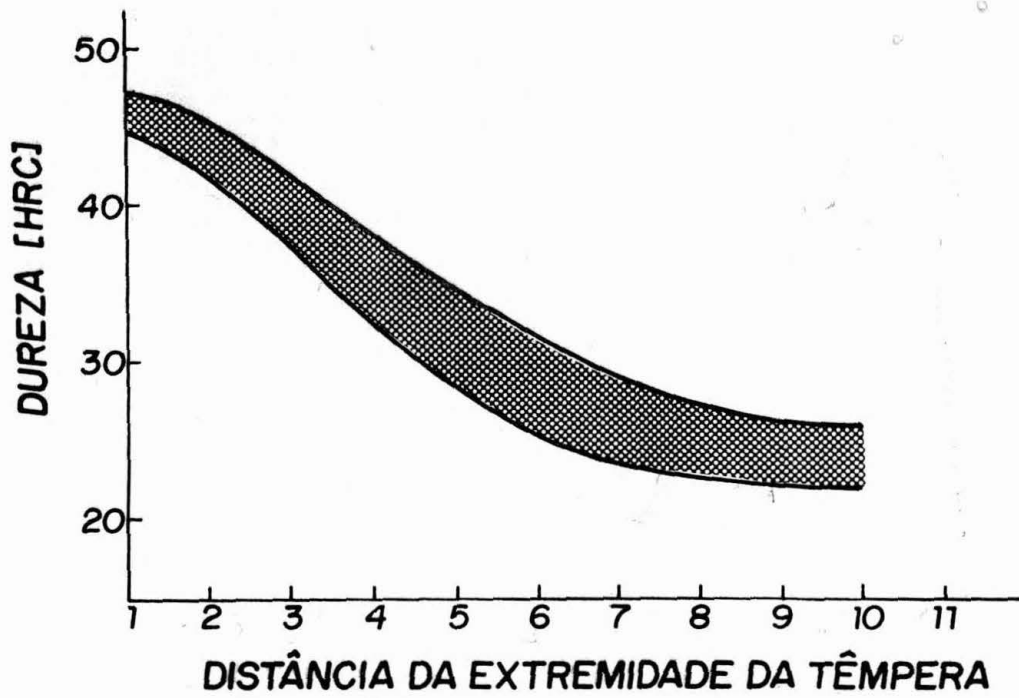


Figura 4 - A banda de temperabilidade do aço SAE 8620 determinada estatisticamente.

Tabela II - Os valores das médias dos desvios e dos desvios padrão das durezas calculadas dos dados experimentais.

	FIELD		JUST		CRAFT & LAMONT	
	$\mu\Delta J$	$\sigma\Delta J$	$\mu\Delta J$	$\sigma\Delta J$	$\mu\Delta J$	$\sigma\Delta J$
J-1	-1,4	1,1	-	-	-	-
J-2	-0,1	1,2	-	-	-1,4	2,0
J-3	-0,3	1,5	-	-	-3,8	2,5
J-4	-0,3	1,4	-0,8	2,9	-4,2	3,0
J-5	0,0	1,3	-0,6	2,9	-2,8	3,0
J-6	-0,1	0,9	1,3	2,5	-3,0	2,9
J-7	-0,1	1,1	1,8	2,1	-2,8	2,4
J-8	-0,3	1,3	-1,9	1,9	-3,3	2,1
J-9	-0,7	1,4	1,7	1,8	-	-
J-10	-1,0	1,4	1,4	1,8	-4,1	1,8

Tabela III - As médias e os desvios padrão das durezas determinadas estatisticamente.

	\bar{J}	σ	$\bar{J}+\sigma$	$\bar{J}-\sigma$
J-1	46,0	1,3	47,3	44,7
J-2	43,7	1,5	45,2	42,2
J-3	40,0	2,5	42,5	37,5
J-4	35,3	3,2	38,5	32,1
J-5	31,6	3,2	34,8	28,4
J-6	29,0	2,9	31,9	26,1
J-7	27,0	2,5	29,5	24,5
J-8	25,5	2,2	27,7	23,3
J-9	24,5	2,1	26,6	22,4
J-10	23,7	2,0	25,7	21,7

