

## DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO POR MEIO DE ANÁLISE DE IMPRESSÃO EM ENSAIO DE DUREZA

1 OZORIO, Marcelo de Jesus Cevey

2 MACHADO, Joubert Alexandro

3 Meer, Marco Van Der

### Resumo

O encruamento é uma propriedade dos materiais que é caracterizado por um fenômeno de endurecimento que ocorre quando um material se deforma plasticamente, sendo avaliado pelo seu coeficiente. A obtenção do coeficiente de encruamento de um material se dá por uma série de ensaios de dureza com aplicação de uma carga "Q" e medições dos diâmetros das impressões obtidos "d", com os dados formulados e tratados com o auxílio de equações e da linearização de um gráfico logarítmico, através do ângulo formado pela curva  $\log Q$  e  $\log d$ , pode-se obter o coeficiente de encruamento de um material com base na lei de Meyer. Com o coeficiente de encruamento do material, o mesmo pode ser caracterizado por aproximação na comparação de coeficientes de encruamento característicos de determinados materiais, sendo que para uma precisão maior dos resultados, é necessário uma análise mais aprofundada por meio de espectrometria e outros ensaios, os quais não são pertinentes ao presente trabalho.

Palavras-chave: Coeficiente de encruamento, ensaio de dureza, encruamento.

### 1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento de projetos de componentes mecânicos, é imprescindível o conhecimento das características do material a ser utilizado, as condições de trabalho, e o meio em que o componente estará inserido.

Conforme Cripriano (2008), um material para ser utilizado em determinada aplicação, deve atender aos requisitos de projeto, sendo assim, deve ser previamente verificado suas propriedades em laboratório. Alguns dos ensaios que o material pode ser submetido são: Ensaio de dureza, tração, impacto, torção, fadiga, dentre outros, os quais são subdivididos em ensaios destrutivos e não destrutivos. Ensaios destrutivos são mais atrativos para a indústria, uma vez que podem ser utilizados em peças acabadas e semiacabadas sem comprometer sua funcionalidade e com um baixo custo de realização.

O encruamento no material, é uma propriedade mecânica importante a qual pode ser obtida pelo ensaio não destrutivo de dureza, sendo que o objetivo deste trabalho é analisar a impressão de um penetrador em um material metálico submetido a um ensaio de dureza, de modo que pela análise do diâmetro da impressão deixada na peça pelo penetrador, seja obtido o coeficiente de encruamento do material por meio da lei de Meyer e o mesmo seja caracterizado por aproximação, comparando-se valores de coeficientes de encruamento de outros materiais.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Encruamento é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido à deformação plástica, conforme Callister (2008), pode ser chamado também de endurecimento por trabalho, algumas vezes por ocorrer em temperatura ambiente pode ser chamado de trabalho a frio. Durante esse processo, observa-se inicialmente uma grande movimentação de discordâncias ao longo de toda a estrutura cristalina. Então, após certa deformação, o excesso de discordâncias começa a criar uma resistência à propagação das mesmas, o que causa o endurecimento do material.

Para Dieter (1961) existe uma variação na resistência e na ductilidade com o aumento da quantidade encruamento conforme pode ser visto na Figura 1. Na maioria dos processos de trabalho a frio uma ou duas dimensões do metal são reduzidas enquanto outras dimensões aumentam. Grandes deformações produzem uma reorientação dos grãos numa orientação preferencial. Devido ao aumento da energia interna no estado de trabalho a frio, a reatividade química é também aumentada, levando a uma diminuição geral na resistência à corrosão e, em certas ligas, introduz a possibilidade do aparecimento de trincas.

Cipriano (2008) afirma que o encruamento pode ser medido através do coeficiente de encruamento, representado por "n". O valor de "n" é obtido através de relação matemática empírica, considerando que a parcela da curva tensão-deformação real situada entre o escoamento e a estricção é representada por uma equação exponencial dada por:

$$\sigma_v = K \delta^n \quad (1)$$

Onde:

K = coeficiente de resistência;

$\sigma_v$  = tensão verdadeira aplicada ao corpo-de-prova;

$\delta$  = a deformação verdadeira sofrida pelo corpo-de-prova;

Analisando a equação (1), nota-se que seria difícil obter uma análise quanto à tensão e a deformação do material para obter o coeficiente de encruamento por uma operação de compressão, sendo que ela foi formulada baseada empiricamente para ensaios de tração em um corpo de prova. Sendo assim, surge como ferramenta para esse caso a Lei de Meyer.

A dureza Meyer é uma medida mais fundamental da dureza à impressão, Dieter (1961) cita que ainda que seja raramente usada para medidas práticas de dureza, Meyer propôs uma relação empírica entre a

carga aplicada no ensaio e o tamanho da impressão deixada no corpo de prova. Essa relação é normalmente chamada Lei de Meyer, dada por:

$$F=K.d^{n'} \quad (2)$$

F = carga aplicada, kg

d = diâmetro da impressão, mm

n' = uma constante do material relacionado ao encruamento do metal

k = uma constante do material expressando a resistência do metal à penetração

O parâmetro n' é a inclinação da linha reta que é obtida no gráfico log P por log d, e k é o valor de P para d = 1. Metais totalmente recozidos têm um valor de n' de cerca de 2,5 enquanto n' é aproximadamente 2 para metais totalmente encruados. Esse parâmetro está aproximadamente relacionado ao coeficiente de encruamento na equação exponencial para a curva tensão verdadeira-deformação verdadeira. O expoente na Lei de Meyer é aproximadamente igual ao coeficiente de encruamento mais 2.

$$n'=n+2 \quad (3)$$

Para esta análise, criam-se gráficos logarítmicos para encontrar o coeficiente de Meyer do material (que é igual à inclinação da reta – coeficiente angular) dados por.

$$\log F = \log k + (n+2) \log d \quad (4)$$

Os materiais podem ser caracterizados aproximadamente pelo coeficiente de encruamento. Na tabela 1 temos exemplos coeficientes de encruamento para alguns materiais.

Além da caracterização do material por meio da análise do coeficiente de encruamento, o ensaio de dureza pode caracterizar

aproximadamente a curva de tensão deformação baseado no ensaio de dureza, contemplado por Tabor, conforme visto na figura 2 .

O método se baseia no fato de que existe uma semelhança na forma da curva de escoamento com a curva obtida quando se mede a dureza Meyer sendo essencialmente empírico, uma vez que a complexa distribuição de tensões na impressão da dureza impede uma relação direta com a distribuição de tensões num teste de tração ou compressão. Entretanto, o método se aproxima da condição de muitos metais e, portanto, é de interesse na obtenção de valores do escoamento. A partir de um estudo da deformação nas impressões de dureza, Tabor concluiu que a deformação verdadeira era proporcional ao raio  $d/D$  e poderia ser expressa como

$$\varepsilon = 0,2 d/D \quad (5)$$

A tensão limite de escoamento a 0,2 por cento de deformação pode ser determinada com boa precisão por medidas de dureza Vickers de acordo com a relação:

$$\sigma_{0.2} = (DHP/3) \cdot (0,1)^{[(n'-2)]} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_{0.2}$  = tensão limite de escoamento a 0,2 por cento, kg/mm<sup>2</sup>

DPH = número da dureza Vickers

$n' = n + 2$  = o expoente na Lei de Meyer

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento das medições e levantamento de dados para obtenção do coeficiente do encruamento foi utilizada uma amostra de material metálico que sofreu embutimento e foi lixada para o ensaio de dureza.

Foram realizadas impressões na amostra para o ensaio de dureza com um penetrador esférico com cargas variando de 30 a 100 kgf na escala Meyer e medidos os diâmetros médios das impressões deixadas na peça em um equipamento EMCO-TEST M4C 025 G3M, próprio para ensaios de dureza e medições dessa natureza, que pode ser visto na figura 3.

Os dados obtidos pela impressão do penetrador na amostra foram realizados aplicando-se as cargas na escala Meyer até que a impressão continuasse visível na tela do equipamento utilizado para o ensaio de dureza. Os diâmetros médios da esfera impressa na peça foram obtidos pela medição no próprio equipamento, conforme figura 4 e os dados do respectivo diâmetro obtido conforme a aplicação da carga foram compilados na Tabela 2.

Para obtenção do coeficiente de encruamento, os dados foram tratados e calculados com base no referencial teórico e conforme as equações (3) e (4) para obtenção do valor de "n" correspondente ao coeficiente de encruamento do material.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a análise e medição das impressões obtidas pelo ensaio de dureza no material, as relações de força e diâmetros de impressão obtidos além dos resultados de  $\log d$  e  $\log F$  estão apresentados na tabela 2.

Com os valores do  $\log d$  e  $\log F$ , foi obtido a curva de encruamento do material analisado conforme figura 6, devidamente linearizado, de modo que a inclinação da reta obtida na linearização, corresponde ao coeficiente de Meyer  $n'$ , conforme equação (3).

Com a relação trigonométrica, o coeficiente de inclinação da reta retorna um valor de  $n' = 2,14$ , sendo que, aplicada a equação (3), tem-se:

$$n' = n + 2$$

$$2,14 = n + 2$$

$$n = 0,14$$

Dessa forma tem-se um coeficiente de encruamento igual a 0,14 que, de acordo com a tabela 1, é compatível com o de um de médio carbono (4340 – Recozido) por meio de comparação tão somente.

Não é possível afirmar qual é o material exatamente, porém pelas características do coeficiente de encruamento com relação a um aço de médio carbono, e as dimensões do corpo de prova, pode-se relacionar o material como um aço estrutural, em barra de diâmetro semelhante a vergalhões utilizados na construção civil, hipótese que pode ser reforçada que aços estruturais tem em média de 20 a 40% de carbono, o qual é o critério adotado neste trabalho como fim comparativo na relação da dureza do material uma vez que a metalografia para reconhecimento da composição química completa do material não foi realizada, não tendo parâmetros para definir qual a influência dos elementos de liga no encruamento deste material em específico.

Segundo Chiaverini (1982), aços estruturais de elevada resistência são encruados a frio durante seu processo de fabricação, sendo estes trefilados, encruados por torção ou encruados por compressão, sendo que estes materiais apresentam um maior limite de resistência se comparado a materiais com mesma composição química que não passam por estes processos, porém tem como ônus uma menor capacidade de alongamento e redução em sua ductilidade.

### 3 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, tem-se que o coeficiente de encruamento pode fornecer características sobre o comportamento do material ensaiado, dizendo, por exemplo, se ele se comporta como um material rígido, elástico ou se possui regiões plásticas e elásticas bem definidas.

Além disso, mostra-se essencialmente neste caso o uso de um importante recurso para a determinação do coeficiente de encruamento que é a lei de Meyer. Devido às dificuldades de se trabalhar aqui com dados

como deformação e tensão de escoamento, essa lei é utilizada para apenas se trabalhar com parâmetros como força e diâmetro da impressão do penetrador, tornando essa análise mais simplificada e obtendo-se o coeficiente de encruamento através de uma simples equação de conversão e análise gráfica.

Verifica-se também que a partir do referencial teórico que o coeficiente de encruamento tem relação com a curva de escoamento do material, quando aplicado o método de Tabor, que alia o ensaio de dureza Vickers e o Coeficiente de Meyer como parâmetro para caracterização das características mecânicas do material.

## REFERÊNCIAS

[1] Callister Jr., W. D., 2008, "Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução", 7ª edição, LTC - Livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro, Brasil.

[2] Chiaverini, V., 1982, "Aços e Ferros Fundidos", 5ª Edição, ABM - Associação Brasileira de Metais, São Paulo, Brasil.

[3] Cipriano, G. L., 2008, "Determinação do Coeficiente de Encruamento de Metais Através da Morfologia das Impressões de Dureza na Escala Macroscópica", Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

[4] Dieter, G. E., 1961, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Inc.,US, New York, EUA.

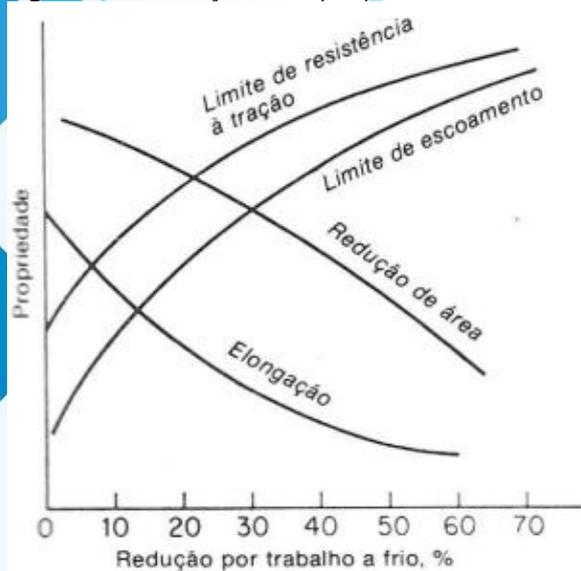
Sobre o(s) autor(es)

1 Engenheiro de Produção Mecânica, Pós Graduando em Engenharia de Segurança do Trabalho (UNOESC) , marcelocevey@gmail.com.

2 Engenheiro Químico, Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais (UFPR), joubert.machado@pr.senai.br .

3 Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica (UTFPR), marco.meer@gmail.com

Figura 1 – Variação nas propriedades do material devido ao trabalho a frio



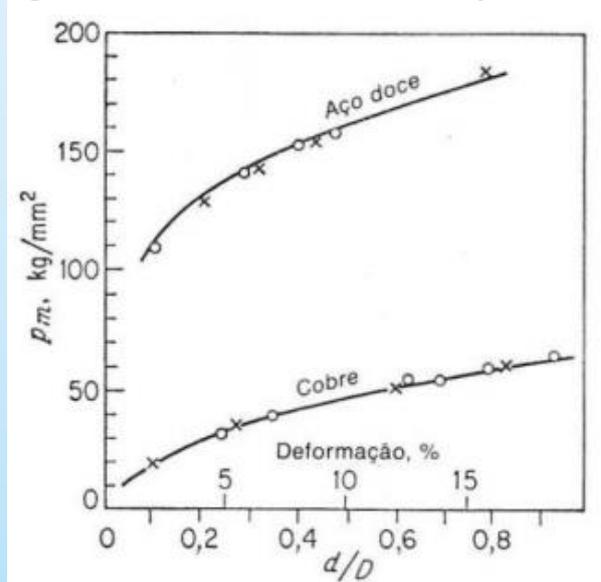
Fonte: Dieter (1961)

Tabela 1 - Coeficiente de encruamento de alguns materiais

Metal	Condição	n
Aço 0,05% C	Recozido	0,26
Aço 4340	Recozido	0,15
Aço 0,6% C	Temperado e revenido a 538°C	0,1
Aço 0,6% C	Temperado e revenido a 704°C	0,19
Cobre	Recozido	0,54
Latão 70/30	Recozido	0,49

Fonte: Adaptador de Dieter (1961)

Figura 2 - Curva de tensão deformação baseado no ensaio de dureza



Fonte: Dieter (1961)

Tabela 2 - Forças utilizadas e diâmetros obtidos.

d	F	log d	log F
374,51	30	2,5735	1,4771
437,29	40	2,6408	1,6021
475,86	50	2,6775	1,6990
526,75	60	2,7216	1,7782
656,70	100	2,8174	2,0000

Fonte: Os autores

Figura 3 - Máquina de teste de dureza EMCO-TEST M4C 025 G3M.



Fonte: Os autores

Figura 4 - Medição dos diâmetros das impressões para cada força aplicada.



Fonte: Os autores