

UMA NOVA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE DUREZA VICKERS

**João Moreno VILAS BOAS DE SOUZA SILVA (1); Juliana CARVALHO SÁ (2);
Nierlly Karinni DE ALMEIDA MARIBONDO GALVÃO (3)**

(1) Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica – UFRN Campus Universitário, Lagoa Nova CEP 59.072-970 Natal-RN e-mail: joaomorenovilasboas@gmail.com

(2) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – UFRN, e-mail: jsa@ufrnet.br

(3) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – UFRN, e-mail: nierlly@yahoo.com.br

RESUMO

O ensaio de dureza é amplamente empregado em pesquisa e avaliação de materiais para controle de qualidade. A técnica da microdureza Vickers é bastante difundida por inúmeras vantagens, entretanto, os resultados desse ensaio estão sujeitos a erros causados pelo operador do processo no momento da medição das diagonais da impressão deixada pelo penetrador na amostra ensaiada. Com o objetivo de solucionar esse problema, foi elaborada uma nova metodologia para o cálculo da dureza Vickers sem a necessidade da medição das diagonais supracitadas. Essa metodologia baseou-se em fórmulas encontradas na literatura que correlacionam a profundidade da penetração do identador Vickers no material com a marca das suas diagonais deixadas no mesmo. Para encontrar o valor da profundidade do identador no material ensaiado, foi calculada a deformação plástica sofrida pelo material a uma carga conhecida. A deformação plástica foi analisada através da diferença entre o avanço e o recuo de um penetrador sobre a amostra utilizada. Esse processo foi realizado em um microdurômetro microscópio, onde foi acoplado um identador Vickers e uma célula de carga. Em seguida, as durezas calculadas pela nova metodologia foram comparadas com as durezas calculadas em um microdurômetro comercial com o intuito de testar sua eficiência.

Palavras chave: microdureza, microdurômetro, célula de carga.

1. INTRODUÇÃO

No estudo da ciência dos materiais, bem como no seu dimensionamento, são de grande importância vários parâmetros obtidos através dos ensaios mecânicos. Pode-se definir ensaio mecânico, como a observação do comportamento mecânico de um material quando submetido à ação de agentes externos, como esforços e outros. Os ensaios são executados sob condições padronizadas, em geral definidas por normas, de forma que seus resultados sejam significativos para cada material e possam ser facilmente comparados. Dentre os ensaios de materiais, o ensaio de dureza possui extrema importância, pois fornece inúmeras informações sobre o material, o que permite trabalhar com maior confiabilidade e obter maior longevidade do mesmo (TSUI; JOO, 2001).

Atualmente, o ensaio de dureza é amplamente empregado em pesquisa e avaliação de materiais para controle da qualidade, por ser um método menos oneroso e mais rápido para quantificação de propriedades mecânicas de materiais. Entretanto, os resultados do ensaio estão sujeitos a incertezas de alguns parâmetros como: a força aplicada, as dimensões e geometria do penetrador, o tempo de aplicação de carga e a habilidade do operador. De acordo com o método utilizado, o parâmetro “habilidade do operador” apresenta uma influência significativa no resultado final da medida, podendo representar uma grande fonte de erro. Por essa razão, torna-se importante o desenvolvimento de uma metodologia que não seja influenciada pela capacidade de observação e interpretação do operador (PODCHIBIAKIN, 2003).

Visando minimizar esse erro, surgiram os primeiros processos de automatização de dureza. Sugimoto; Kawaguchi (1997), desenvolveram, portanto, um método de medição da área da impressão através de análise de imagens. Desse modo, a área da impressão deixada pelo penetrador sobre o material pode ser calculada automaticamente e com maior exatidão, mesmo em superfícies não totalmente polidas.

Por outro lado, alguns autores resolveram automatizar o processo de medição de dureza, eliminando a necessidade da medição da impressão deixada pelo penetrador. Para isso, desenvolveram técnicas de medição da deformação do material durante o ensaio de dureza. Essas técnicas se baseiam em equipamentos que possuem um atuador de força, um sensor de deslocamento e um sensor de carga (HAY; PHARR, 2000; GUBICZA *et al.*, 1996).

Enfim, a necessidade de sistemas automatizados de medição de dureza torna-se fundamental para a obtenção de resultados precisos e confiáveis.

Nesse trabalho foi desenvolvido um sistema automatizado para medição de microdureza em um microscópio óptico. Essa medição foi feita a partir da profundidade de penetração no material aplicando-se uma carga dinâmica. A penetração no material é calculada levando-se em consideração apenas a deformação plástica. Esse aparato é constituído de um motor de passo, uma célula de carga e um penetrador de diamante padrão. O motor de passo é o atuador de força e sensor de deslocamento do sistema, enquanto que a célula de carga funciona como sensor de carga. Todo o sistema é controlado por um microcomputador através de um programa computacional e uma placa A/D de 8 bits também desenvolvidos nesse trabalho. A partir da construção desse aparato tornou-se possível a determinação da dureza de materiais sem a necessidade da medição clássica das diagonais, diminuindo assim, a fonte de erro causado pelo operador.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Deformação elástica

A elasticidade é a propriedade do material de retornar à forma original, uma vez removida a força externa atuante. Esse fenômeno ocorre em todos os materiais sólidos, pelo menos no estágio inicial de deformação. Os átomos são deslocados e, cessada a aplicação da carga, eles retornam ao seu estado original. Não há, portanto, formação de defeitos nos cristais (GUY, 1980; FERRAZ, 2003).

Nesse caso, a tensão e a deformação são proporcionais e expressa pela lei de Hooke através da equação (1) (CALLISTER, 2002):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

ε = Deformação ;

σ = Tensão aplicada;

E = Módulo de elasticidade;

2.2. Deformação plástica

Em contraste com a simplicidade da deformação elástica, a deformação plástica ocorre de várias maneiras. A plasticidade é a propriedade do material não voltar à sua forma inicial após a remoção da carga externa, obtendo-se deformações permanentes. Quando a deformação plástica é atingida, ocorre alteração da estrutura interna do material, aumentando a sua dureza. Esse aumento na dureza por deformação plástica, é denominado endurecimento por deformação a frio ou encruamento e é acompanhado da elevação do valor da resistência e redução da ductilidade do metal (FERRAZ, 2003).

Quando ocorre uma deformação plástica, há um rompimento de ligações atômicas e, posteriormente, essas ligações são reativadas com novos átomos. Tal fato faz com que o objeto não retorne ao seu formato original (GUY, 1980).

2.3. Microdureza

A dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, originando diversas interpretações. Num bom dicionário, dureza é qualidade ou estado de duro, rijeza. Duro, por sua vez, é definido como difícil de penetrar ou de riscar, consistente, sólido. Essas definições não caracterizam o que é dureza para todas as situações, pois ela assume um significado diferente conforme o contexto em que é empregada (SOUZA, 1974).

É importante destacar que, apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações. Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência do que qualquer outro ensaio mecânico, pois são simples, mais baratos e não comprometem funcionalmente a peça ensaiada (CHANG *et al.*, 1976).

No século XVII, como a construção dos objetos de uso se dava de modo essencialmente artesanal, não se conhecia um controle de qualidade regular dos produtos fabricados. Avaliava-se a qualidade de uma lâmina de aço ou a dureza de um martelo, simplesmente pelo próprio uso (CLAASSEN; CHYNOWETH, 1987).

O ensaio de dureza teve um avanço excepcional entre o século XVII, onde se estimava a dureza das pedras preciosas friccionando-as com uma lima, e o século XX, onde em 1925, Smith e Sandland abriram caminho para a determinação de microdureza a partir do ensaio de dureza Vickers.

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada “F” pela área de impressão “A” deixada no corpo ensaiado (SOUZA, 1974).

A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais “d₁” e “d₂” formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide. Conhecendo as medidas das diagonais e a sua média “d”, é possível calcular a dureza Vickers através da equação (2) (SOUZA, 1974).

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{d^2} \quad [\text{Eq. 02}]$$

Suwanprateeb (1998), realizou uma análise geométrica do penetrador Vickers e encontrou a fórmula da dureza Vickers em função da profundidade “h” da penetração no material. Como demonstra a equação (3).

$$HV = \frac{1,8544 \times F \times \cos^2 74^\circ}{4 \times h^2 \times \cos^2 16^\circ} \quad [\text{Eq. 03}]$$

O ensaio Vickers possui inúmeras vantagens com relação a outros ensaios de dureza. Porém, isso não quer dizer que o ensaio Vickers resolva todos os problemas de avaliação de dureza dos materiais. Mas, somado aos outros métodos já estudados, é um bom caminho para atender às necessidades de processos industriais cada vez mais exigentes e sofisticados.

Uma grande desvantagem do método de microdureza Vickers consiste no fato de que seus resultados vêm influenciados pela medição do operador do microdurômetro que é responsável por ler e quantificar as diagonais deixadas pela impressão do penetrador. Em alguns casos, torna-se conveniente tornar a medição da microdureza independente do operador automatizando o processo (PODCHIBIAKIN, 2003).

2.4. Automação dos ensaios de dureza

Ensaio de dureza automatizados representam uma nova forma de ensaio mecânico que tem evoluído bastante quando comparados com os ensaios tradicionais de medição de dureza. Desenvolvidos no início dos anos 80 com o avanço da informática, esses métodos se baseiam numa alta necessidade de instrumentação com um contínuo monitoramento da carga e deslocamento do penetrador (BULYCHEV *et al.*, 1975; SHORSHOROV *et al.*, 1982).

Essa modalidade de ensaio, além de fornecer a dureza, também pode disponibilizar os valores do módulo de elasticidade do material. Fornece também os dados da curva de carga versus profundidade (tensão X deformação), podendo ainda, em alguns equipamentos, captar imagens das impressões deixadas pelo penetrador, mesmo que essa possua escala nanométrica. Devido a essa grande vantagem, a técnica de ensaio de dureza automatizada vem sendo largamente utilizada para análise de filmes finos (VANLANDINGHAM, 2003).

3. METODOLOGIA

Para construção do aparato experimental, foi utilizado um microscópio da marca Carl Zeiss Jena, onde foi acoplado um sistema automatizado constituído por um sensor e um sensor/atuador. O custo deste sistema automatizado foi cerca de 40 vezes menor do que um microdurômetro convencional. O sensor utilizado foi uma célula de carga do tipo G5N da Alfa Instrumentos e o sensor/atuador foi um motor de passo tipo ímã permanente unipolar com 4 enrolamentos, ambos com alimentação de 12V (Figura 2).

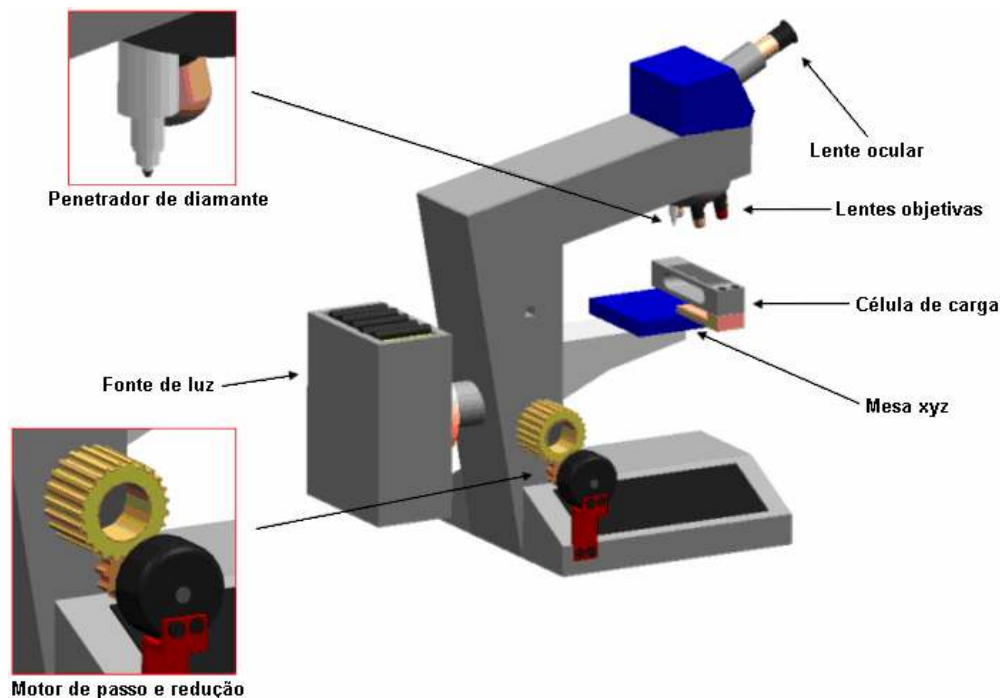


Figura 2 – Aparato experimental.

O motor de passo utilizado necessita de 24 passos para a realização de uma volta, porém, usando-se movimento de meio passo, foi possível obter a precisão de 96 passos por volta. Esse foi acoplado a um conjunto de engrenagens (proporcionando um aumento de 48 vezes na sua precisão), o qual foi acoplado ao eixo de ajuste fino do microscópio. Esse eixo do microscópio realiza um deslocamento vertical de 100 μm na cremalheira a cada rotação. Portanto, multiplicando-se o valor do número de passos (96) pela redução (48), tem-se o valor do número de passos necessários que o motor deve realizar para que o eixo do ajuste fino do microscópio realize um rotação. Com isso, a cada 4608 passos dados pelo motor, é realizada uma rotação pelo eixo do ajuste fino. Obteve-se, portanto, uma precisão do movimento vertical da cremalheira de 0,021 μm por passo dado pelo motor. Com o objetivo de arrefecer o motor de passo, foi fixado ao mesmo um dissipador de energia-térmica e um ventilador com alimentação de 12V.

Através de um circuito controlador, de uma placa multiplexadora, de um programa e de um microcomputador, foi possível obter o controle do motor de passo.

A célula de carga foi fixada por meio de um suporte de aço à mesa xyz do microscópio, a qual está acoplada na cremalheira. Um porta amostra cilíndrico de aço inox com 40 mm de diâmetro e 2 mm de altura foi rosqueado na célula de carga. Essa foi fixada na mesa de modo que seu porta-amostra ficasse centralizado e com a inclinação de 90° em relação a um penetrador que foi colocado no suporte das lentes objetivas do microscópio. O penetrador usado foi uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°.

Através de um circuito amplificador, de um circuito A/D, de uma placa multiplexadora, de um programa e de um microcomputador, foi possível fazer aquisição de dados da célula de carga (Figura 3).

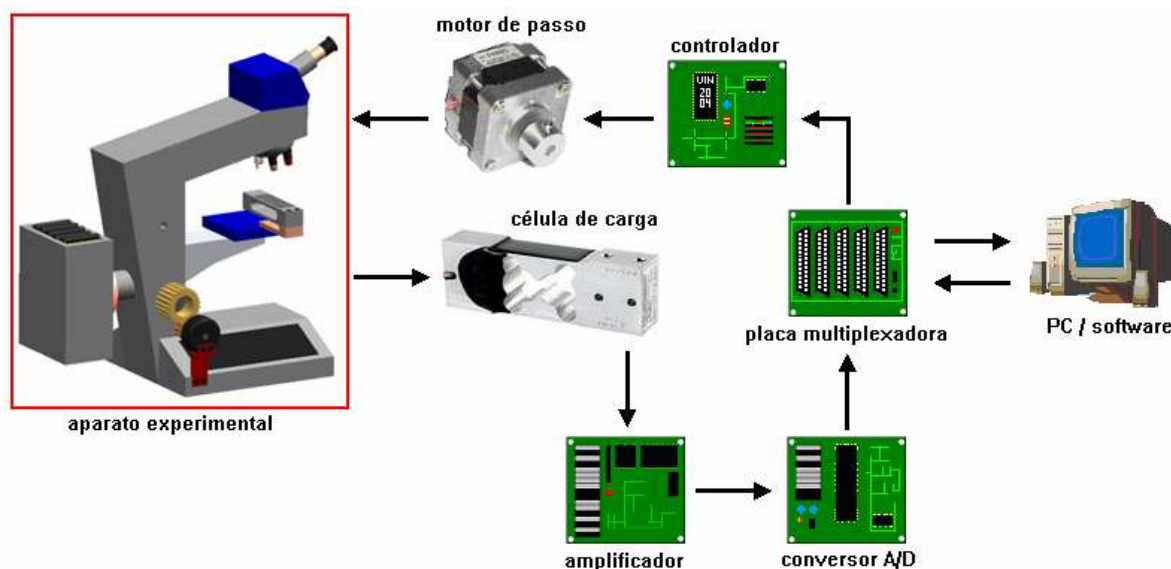


Figura 3 – Esquema de aquisição e controle do aparato experimental.

3.1. Programa de controle

O programa de controle foi desenvolvido usando a linguagem de programação Delphi, que é um ambiente de desenvolvimento de projetos orientado a objeto. Esse programa consiste em calcular a dureza de um material através da deformação produzida por um penetrador de diamante aplicando-se uma carga pré-determinada.

O programa possui cinco fases para determinar a dureza do material. Em todas as fases o programa realiza um monitoramento contínuo, armazenando em um banco de dados as variáveis nº de passos e carga aplicada. As fases do programa são:

1- Fase de contato: Nessa fase, o programa procura um contato inicial com o material ensaiado. Para isso, ele verifica o valor da carga exercida na célula de carga para cada passo executado pelo motor. A partir do momento que o valor da carga sai de zero, o programa avança para a segunda fase;

2- Fase de carga: Nessa fase, o programa executa passos no motor, de modo a aplicar uma carga crescente sobre o material ensaiado até atingir uma carga previamente estabelecida, verificando o valor da carga para cada passo executado. Uma vez atingida a carga pré-determinada, o programa inicia a terceira fase;

3- Fase de fluência: Nessa fase, o programa mantém o processo inerte em um intervalo de tempo previamente estabelecido pelo usuário. Cessado o tempo de fluência, o programa começa a quarta fase;

4- Fase de descarga: Nessa fase, o programa executa passos no motor na direção inversa a da fase de carga, de modo a aplicar uma carga decrescente sobre o material ensaiado até atingir a carga inicial, verificando o valor da carga para cada passo executado. Uma vez atingida a carga inicial, o programa inicia a quinta e última fase;

5- Cálculo da dureza: Nessa fase, o programa desliga o motor, conta o número de passos executados e traça uma curva de todo o processo. Nessa curva, o programa fornece a diferença entre o número de passos executados na fase de carga e descarga, e a partir desse valor calcula a dureza do material.

3.2. Preparação das amostras

Tarugos de vários materiais (principalmente metálicos) com diferentes durezas foram selecionados. Os materiais escolhidos foram: resina acrílica, alumínio, cobre, aço 1020, aço 1045, aço inox austenítico, aço inox martensítico e aço ferramenta vc-60. Com a ajuda de um torno, eles foram transformados em corpos de prova cilíndricos com diâmetro menor que 40 mm, uma vez que o porta-amostra possui esse diâmetro. Um lixamento manual foi realizado com lixas de carbeto de silício de granulometrias 80, 150, 220, 360, 500, 600 1200 e 2000 e polidas com alumina 1 μ m. Após o uso da lixa 2000, a peça passou por um polimento na politriz APL-4 da Arotec revestida com feltro onde se gotejou alumina 1 μ m para que a amostra ficasse isenta de riscos.

3.3. Realização dos experimentos

Foram selecionados 8 materiais com durezas distintas, sendo 7 metais com durezas entre 73 e 796 HV e uma resina acrílica com dureza 13 HV. Os 7 metais escolhidos foram: alumínio, cobre, aço 1020, aço 1045, aço inox austenítico, aço inox martensítico e aço ferramenta vc-60. Foram realizados 2 tipos de ensaio para se avaliar a dureza do material. O primeiro consistiu em medir a dureza Vickers, e o segundo em obter a dureza através do aparato experimental desenvolvido nesse trabalho.

O ensaio de dureza Vickers foi realizado em um microdurômetro modelo HVS 1000A da Pantec. Utilizou-se uma carga de 300g por 20 segundos para se obter os resultados. As impressões foram feitas em pontos equidistanciados de 0,5 mm, totalizando 10 pontos por amostra. As microdurezas Vickers foram calculadas a partir da medida das diagonais formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide deixada pelo penetrador. Em seguida, foram desconsiderados o maior e o menor valor de dureza restando 8 valores. Essa média foi considerada como a dureza do material.

Os ensaios no aparato experimental foram realizados de forma semelhante ao microdurômetro. No aparato, foram feitos 10 ensaios com o tempo de 20ms por passo no motor até uma carga pré-determinada de 300g e um tempo de fluência de 20s. As impressões foram feitas de modo que a distância entre elas fosse de 0,5mm. Após realizado cada ensaio, o programa forneceu o valor de dureza do material a partir da deformação plástica encontrada. Em seguida, o maior e o menor valor de dureza foram desconsiderados, restando 8 valores. A partir desses 8 valores foi calculada a média e o desvio padrão.

Para cada ensaio realizado, foi feita a aquisição de dados em tempo real. Os dados coletados foram carga e nº de passos. Os dados foram gravados em arquivos TXT, sendo possível traçar gráficos carga versus número de passos através de um programa editor de gráficos. Uma análise criteriosa dos gráficos foi realizada, assim como uma comparação entre os valores de dureza dos materiais encontrados através do ensaio de dureza tradicional e os valores de dureza encontrados pelo aparato experimental.

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Em todos os ensaios de dureza realizados pode-se obter gráficos da carga versus o número de passos, ou seja, de tensão versus deformação, onde cada passo representa o deslocamento vertical do penetrador em aproximadamente 21 nm. Todos os ensaios de dureza realizados nesse trabalho apresentaram três fases distintas (Figura 4):

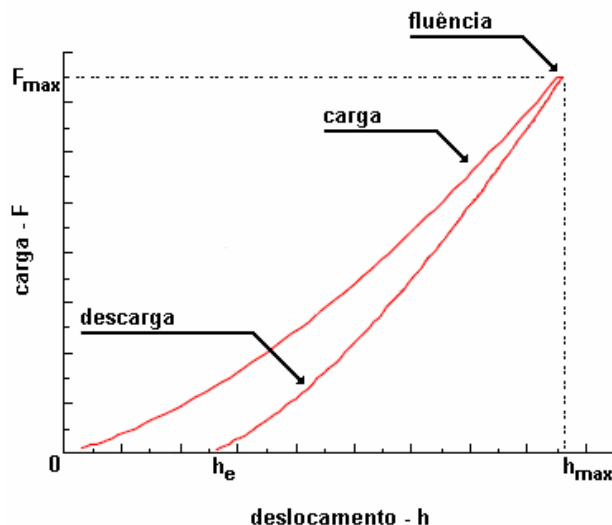


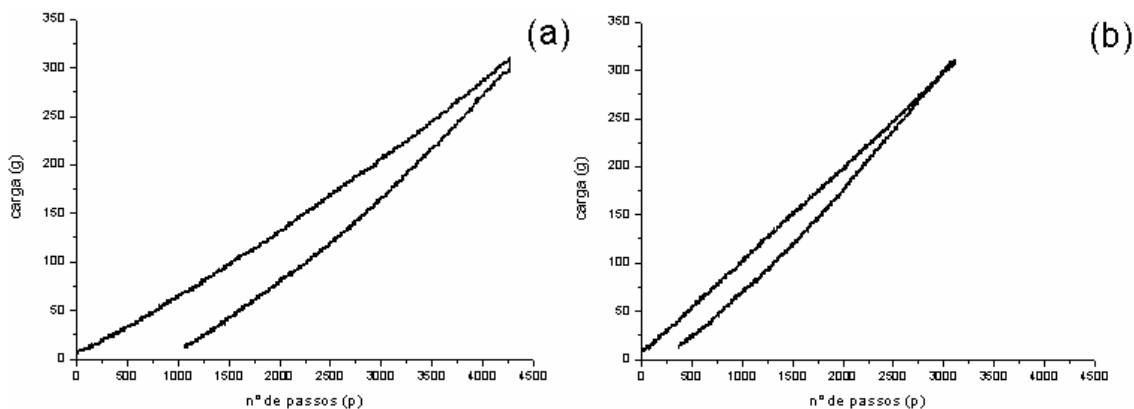
Figura 4 – Gráfico de carga-descarga em função do deslocamento do penetrador.

Na fase de carga o penetrador avança de modo contínuo com direção perpendicular à superfície da amostra. Essa primeira fase inicia-se no momento do contato entre o penetrador e a amostra e é finalizada quando a carga aplicada atingir o valor limite pré-definido. Nesse ponto carga máxima $F_{m\acute{a}x}$ e profundidade máxima $h_{m\acute{a}x}$ são atingidas.

Após a fase de carga, impõe-se uma fase intermediária de fluência, que corresponde à manutenção da carga máxima durante um intervalo de tempo previamente estabelecido.

A fase de descarga começa no instante em que o penetrador inicia o movimento de retrocesso e termina quando, após a recuperação da componente elástica da deformação, deixa de haver contato entre o penetrador e o material. A deformação elástica h_e é recuperada e a deformação plástica que permanece após o recuo do penetrador representa a profundidade da impressão deixada pelo mesmo sobre o material.

A seguir, são apresentados os gráficos carga versus número de passos de alguns materiais ensaiados (Figura 6a, 6b, 6c, 6d).



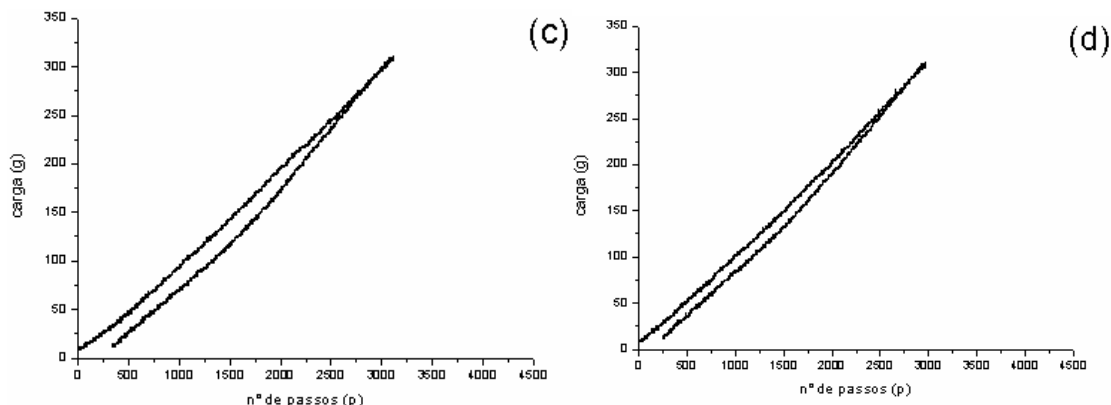


Figura 6: Curva carga versus número de passos dos seguintes materiais (a) resina acrílica (b) alumínio (c) cobre (d) aço 1020.

Na figura acima, a carga representa a tensão mecânica e o número de passos representa o deslocamento do penetrador, ou seja, a deformação do material ensaiado

Pode-se notar que para os materiais com dureza menores, tornou-se necessário um maior número de passos para atingir a carga pré-determinada. Tal fato ocorre porque, quanto menos duro for o material, maior deformação ele sofrerá, sendo necessário maior deslocamento do penetrador até atingir a carga pré-estabelecida. Todavia, quanto mais duro for o material, ele sofrerá menor deformação e a célula de carga atingirá mais rapidamente a deflexão necessária para a o sistema acusar a carga pré-estabelecida.

O modo como a curva de carga evolui em função da profundidade de penetração durante a carga e descarga está relacionado com aspectos do comportamento do material face à dureza. A curva da fase de carga apresenta uma forma parabólica cuja curvatura traduz a relação linear entre a carga e o quadrado da profundidade da impressão, como foi demonstrado na equação (2).

No gráfico da profundidade da impressão versus dureza podemos constatar que a dureza se comporta de maneira inversamente proporcional à profundidade da impressão. Com o decréscimo da profundidade da impressão ocorre um aumento exponencial da dureza. Em profundidades por volta de 35 μm a subtração de 0,1 μm representou um aumento de 0,1 HV enquanto que em profundidades por volta de 3,5 μm a mesma subtração de 0,1 μm representou um aumento de 50 HV (Figura 7).

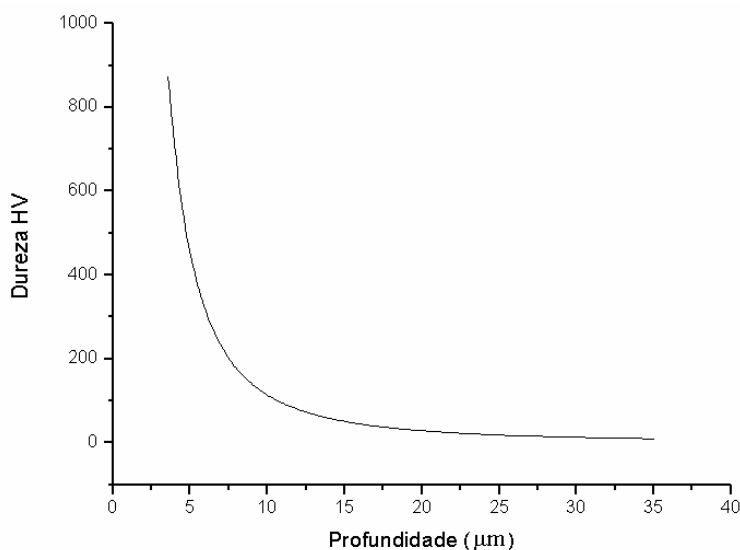


Figura 7 – Gráfico da profundidade da impressão versus dureza HV para a carga de 300g.

Por essa razão, tornou-se difícil calcular dureza acima de 500 vickers, uma vez que a diferença de profundidade da impressão entre um material de dureza 600 HV e um material de dureza 800HV varia em pouco mais de 1 μm . Com isso, em materiais com dureza a partir de 500 HV, uma pequena diferença no número de passos representa uma grande diferença na dureza Vickers, limitando esse processo. Porém, esse problema pode ser resolvido com o uso de uma placa de aquisição de maior resolução, a qual não necessitaria de amplificação para receber o sinal da célula de carga diminuindo assim o ruído e, consequentemente, aumentando a precisão da célula de carga.

Na tabela 1 encontram-se os valores de dureza dos ensaios realizados nos 8 materiais da Figura 40. Onde HVauto é a dureza Vickers encontrada através do método automatizado proposto nesse trabalho e HVtrad é a dureza Vickers encontrada pela maneira tradicional.

Tabela 1 – Dureza HV_{0,3/20} (HVtrad) encontrada no microdurômetro tradicional versus a dureza HV (HVauto) encontrada no aparato experimental.

Material	HVtrad	Desv. Padrão	HVauto	Desv. Padrão
RESINA ACRÍLICA	13 HV _{0,3/20}	± 1	9	± 2
ALUMÍNIO	73 HV _{0,3/20}	± 4	71	± 13
COBRE	111 HV _{0,3/20}	± 5	110	± 10
AÇO AISI 1020	209 HV _{0,3/20}	± 10	224	± 23
AÇO AISI 1045	336 HV _{0,3/20}	± 16	290	± 30
AÇO INOX AUSTENÍTICO	509 HV _{0,3/20}	± 26	852	± 163
AÇO INOX MARTENSÍTICO	782 HV _{0,3/20}	± 39	796	± 141
AÇO FERRAMENTA VC-60	796 HV _{0,3/20}	± 40	918	± 158

Pode se notar que para os materiais com durezas acima de 500 HV_{0,3/20}, alguns resultados tornaram-se imprecisos. Isto se deve ao fato de, a partir desses valores de durezas, uma pequena variação da profundidade da penetração representa uma grande mudança na dureza Vickers, como foi citado anteriormente.

A dureza Vickers HVauto foi encontrada através das seguintes expressões matemáticas:

$$h = p \times 2,170138 \times 10^{-5} \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$cf = 0,5 \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$HV_{auto} = \frac{1,8544 \times F \times \cos^2 74^\circ}{4 \times h^2 \times \cos^2 16^\circ} \times cf \quad [\text{Eq. 06}]$$

Onde:

F = Carga aplicada;

p = Diferença de passos entre a fase de carga e descarga do processo de medição de dureza;

h = Deformação plástica do material;

cf = Coeficiente de correção;

O coeficiente de correção torna-se necessário, pois a fórmula de dureza Vickers é baseada em um sistema onde a carga é aplicada de forma perpendicular à amostra. Porém, nesse sistema, a célula de carga precisa defletir para medir a carga aplicada. À medida que a mesma deflete, a força exercida pelo penetrador sobre a amostra deixa de ser perpendicular à mesma. Esse desvio angular que ocorre entre a amostra e o penetrador devido à deflexão da célula de carga.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos baseados na metodologia utilizada permitiram concluir que:

- O método de medição de dureza proposto nesse estudo funcionou de maneira satisfatória em materiais com durezas menores que 500 HV_{0,3/20}. Porém em materiais com durezas superiores, essa técnica apresentou limitações, uma vez que necessitaria de componentes com maior precisão;
- Os gráficos obtidos nos ensaios permitiram uma interpretação de propriedades mecânicas dos materiais ensaiados, tais como: deformação plástica, deformação elástica e módulo de elasticidade;
- O aparato experimental desenvolvido nesse trabalho apresentou menor custo quando comparado à equipamentos de ensaios de dureza tradicionais e automatizados. Isso se deve ao fato do aparato ter sido construído, adaptando a um microscópio óptico comercial, um sensor e um atuador de baixo custo;
- Os métodos de automatização de medição de dureza comportam-se como uma ferramenta de fundamental importância para minimizar a fonte de erro causada pelo operador em ensaios de dureza tradicionais.

REFERÊNCIAS

BULYCHEV, S.I.; ALEKHIN, V.P.; SHORSHOROV, M.KH.; TERNOVSKII, A.P.; SHNYREV, G.D. Determining Young's Modulus from the Indenter Penetration Diagram, **Zavod. Lab.**, v. 41, n. 9, p. 1137-40, 1975.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CHANG, S. C. *et al.* **J. of Mater. Sci.**, v.11, p.623, 1976.

CLAASSEN, R. S.; CHYNOWETH, A. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: sua evolução, prática e perspectivas**. 2a ed. Editora da Universidade de São Carlos, São Carlos, SP/Brasil, 1987.

FERRAZ H. O Aço Na Construção Civil, **Revista Eletrônica de Ciências**. 22ª ed, 2003.

GUBICZA, J.; JUH'ASZ, A; LENDVAI, J. A new method for hardness determination from depth sensing indentation tests. **Journal Of Materials Research**, v. 11, n. 12, 1996.

GUY A. G. **Ciência dos Materiais**. São Paulo, 1ª Edição LTC, 1980.

HAY, J.L.; PHARR, G.M. Mechanical Testing and Evaluation. **ASM International**, v. 8, n. 10, p. 232-43, 2000.

PODCHIBIAKIN, D. et al. **Comparación de Diferentes Métodos de Medición de la Impronta de la Imagen de Microdurómetros**. In: Jornadas Sam/Conamet/Simposio Materia, p. 1979-82, 2003.

SHORSHOROV, M.KH.; BULYCHEV, S.I.; ALEKHIN, V.P. Work of plastic deformation during indenter indentation, **Sov. Phys. Dokl.**, v. 26, n. 8, p. 769-71, 1982.

SOUZA, S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Edgard Blucher LTDA, 3ª ed, 1974.

SUWANPRATEEB, J. A comparison of different Methods in Determining Load-and Time- Dependence of Vickers Hardness in Polymers. **Polymer Testing**, v. 17, p 495-5006, 1998.

TSUI, T.Y.; JOO, Y. A new technique to measure through film thickness fracture toughness. **Thin solid films**, v. 401, p. 203-10, 2001.

VANLANDINGHAM, M.R. Review of instrumented indentation. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, 2003.