

Ferramenta computacional para análise de imagens de ensaios mecânicos de dureza

Software tool for analysis of mechanical hardness assessment in images

Pedro P. Rebouças Filho
pedrosa_rf@hotmail.com
UFC/IFCE

Victor Hugo C. de Albuquerque
victor.albuquerque@fe.up.pt
UNIFOR/CCT/PPGIA

Tarique da Silveira Cavalcante
tariquesc@yahoo.com.br
UFC/IFCE

João Manuel R. S. Tavares
tavares@fe.up.pt
FEUP/DEMec

Resumo

Este artigo apresenta uma ferramenta computacional capaz de determinar as durezas Brinell e Vickers a partir de imagens de indentações. A referida ferramenta integra algoritmos de processamento e análise de imagem, como crescimento de regiões e contornos ativos (*snakes*). Para validar a ferramenta proposta, foram realizadas comparações dos resultados obtidos por ela e pelo processo convencional a partir de indentações realizadas no aço ABNT 1020. A partir dessa comparação, pode-se afirmar que a ferramenta desenvolvida é mais rápida, intuitiva na sua aplicação e menos dependente da subjetividade do operador.

Palavras-chave: Ensaio de Dureza, Durezas Brinell e Vickers, Processamento e Análise de Imagem, Crescimento de Regiões, Contornos Ativos, Snakes.

Abstract

This paper presents a computational tool capable of determining the Brinell and Vickers hardnesses from indentation images. The tool integrates algorithms of image processing and analysis such as region growing and snakes. For validation purpose, the results obtained by the developed tool were compared with those obtained by the conventional process from indentations made in ABNT 1020 steel. The comparison confirmed that the developed tool is faster, intuitive in its application and less dependent on the operator's subjectivity.

Keywords: Hardness testing, Brinell and Vickers hardness, Image Processing and Analysis, Region Growing, Snakes

1 Introdução

Os ensaios mecânicos de durezas são fundamentais para avaliar as propriedades mecânicas de materiais metálicos, pois a partir do valor de dureza é possível determinar a resistência ao desgaste e obter uma aproximação dos valores de ductilidade, tensão de escoamento, entre outros parâmetros mecânicos dos materiais analisados.

A grande desvantagem da realização dos ensaios mecânicos de dureza está na forma convencional (manual) como são realizados, uma vez que são altamente susceptíveis a falhas, como: calibração incorreta da máquina de teste usada, deficiente interpretação do operador na leitura das diagonais das impressões realizadas (indentações), entre outros fatores que interferem negativamente no valor de dureza medido. Assim, no contexto de ensaios mecânicos, ferramentas computacionais estão sendo desenvolvidas para tornar o trabalho do operador menos complexo e os resultados, mais

robustos. Como exemplos de trabalhos que apresentam ferramentas computacionais aplicadas na área das Ciências dos Materiais, pode-se citar: Albuquerque *et al.* (2008, 2009a), que aplicam uma rede neural *backpropagation* e uma *self-organizing map* para segmentar e quantificar de forma rápida e satisfatória microestruturas de ferros fundidos a partir de imagens; Rebouças Filho *et al.* (2009), que apresentam e analisam um sistema computacional baseado em técnicas de processamento e análise de imagem capaz de determinar os valores de dureza de materiais metálicos a partir de imagens de identificações; Durão *et al.* (2009) e Albuquerque *et al.* (2009b), que utilizam uma plataforma de processamento e análise de imagem para obter medidas como área e diâmetro de furos e máximos diâmetros delaminados associados, necessárias para a avaliação do dano causado por operações de furação em placas de materiais compósitos a partir das imagens radiográficas.

Nesse sentido, visando tornar a medição das durezas Brinell e Vickers mais rápida, precisa e independente da interpretação do operador, desenvolveu-se uma ferramenta computacional para medição dessas durezas a partir de imagens de identificações. A referida ferramenta é baseada em técnicas de processamento e análise de imagem, e foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C/C++. Na fase de segmentação, isto é, de identificação, da área de identificação nas imagens em análise foram consideradas e comparadas duas técnicas clássicas em processamento e análise de imagem: crescimento de regiões e contornos ativos (usualmente designados por *snakes*). Os resultados obtidos através da ferramenta computacional desenvolvida usando as duas técnicas de segmentação consideradas são analisados e comparados com os obtidos pelo processo de medição convencional.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: na seção seguinte, são descritas as técnicas de processamento e análise de imagem integradas na ferramenta desenvolvida para segmentar as áreas de identificação, os ensaios de dureza considerados, bem como o material utilizado para validação da ferramenta proposta; na seção 3, os resultados obtidos são indicados e discutidos; por fim, na última seção, são apresentadas as considerações finais.

2 Procedimentos Experimentais

Para a realização da medição das durezas Brinell (usou-se uma carga de 187.5 kgf e um penetrador constituído por metal duro com 2.5 mm de diâmetro) e Vickers (adotou-se uma carga de 120 kgf e um penetrador piramidal de diamante), foi usado um aço ABNT 1020 e, além do método convencional de medição de durezas, a ferramenta computacional desenvolvida, baseada em técnicas de processamento e análise de imagem descritas nas seções seguintes.

2.1 Processamento e Análise de Imagem

A utilização de técnicas de processamento e análise de imagem tornou-se bastante comum em várias áreas das Ciências dos Materiais, principalmente no desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de ter alguma “capacidade visual”, podendo, assim, realizar com sucesso tarefas complexas e repetitivas de forma rápida e precisa (Albuquerque, 2007a).

Um sistema típico de processamento e análise de imagem é constituído por operações de aquisição de imagem, pré-processamento de imagem, segmentação de imagem, extração de atributos a partir de imagens segmentadas, e de reconhecimento e identificação de atributos (Figura 1).

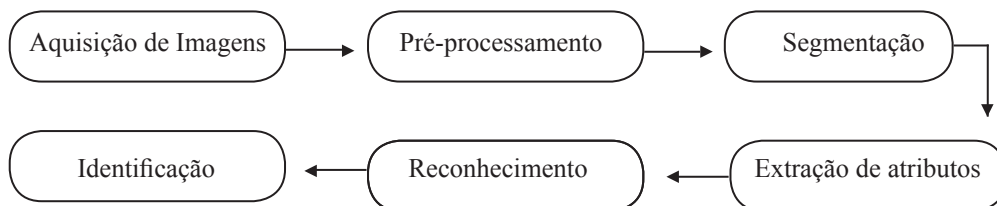


Figura 1: Sequência de operações envolvidas num sistema típico de processamento e análise de imagem.

A seguir, são descritas as duas técnicas consideradas na ferramenta computacional desenvolvida para segmentar as imagens de identificações: crescimento de regiões e contornos ativos.

2.1.1 Crescimento de regiões

O crescimento de regiões (CR) é uma técnica bastante usada em processamento de imagem para unir regiões de interesse (ROI – *Region Of Interest*) que se apresentam separadas e deverão ser unidas, pois partilham algum atributo (ou atributos) que deverá guiar o referido processo de crescimento. Assim, a técnica de CR realiza a associação de grupos ou subgrupos de *pixels* em regiões desejadas.

A agregação das regiões é determinada pela seleção de uma semente na região em análise, como um *pixel* que se destaca por fortemente pertencer a essa região, a qual deverá crescer por conquista dos *pixels* vizinhos, os quais apresentam características semelhantes às da região desejada. Tais características são obtidas, por exemplo, considerando parâmetros de intensidade, média local, variância local, entre outros (Gonzalez e Woods, 2008).

O CR pode ser realizado localmente quando uma semente (*pixel*) é selecionada na região desejada. Contudo, também pode ser realizado globalmente, sendo, nesse caso, distribuídos *pixels* por várias áreas de uma mesma imagem.

Para a aplicação do algoritmo de CR, inicialmente, determina-se uma ROI na qual se deseja realizar a análise. Esta pode ser subdividida em n regiões $R(R_1, R_2, \dots, R_n)$ (Gonzalez e Woods, 2008).

A equação relativa para a aplicação da técnica de crescimento de regiões é:

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

indicando que a segmentação da região desejada deve ser completa; R_i é uma região conectada para $i = 1, 2, \dots, n$, em que $R_i \cap R_j = \phi$ para $i \neq j$.

O crescimento de regiões foi integrado na ferramenta computacional desenvolvida, para determinar o valor das durezas Brinell e Vickers a partir de imagens de indentações e segmentar as áreas das indentações nas imagens em análise.

2.1.2 Contornos ativos

Os contornos ativos, ou *snakes*, foram inicialmente introduzidos em 1987 por Kass, Witkin e Terzopoulos (Kass *et al.*, 1987). Eles permitem segmentar as regiões presentes em imagens por detecção dos seus contornos. Esse método é aplicado com sucesso em vários problemas de processamento e análise de imagem, como para detectar bordas e rastreamento de objetos (em vigilância eletrônica, por exemplo). Contudo, não existe uma *snake* perfeita para todas as aplicações, sendo os algoritmos desenvolvidos em função da aplicação em causa.

O método original das *snakes* consiste em traçar uma curva inicial ao redor ou dentro da área a segmentar. Posteriormente, essa curva se deforma devido a forças que a puxam ou empurram-na até as bordas da área desejada. Essa detecção é realizada por interações sucessivas de minimização da energia da curva envolvida. Assim, o modelo de uma *snake* pode ser visto como uma parametrização 2D de uma curva geométrica $c(s)$, tal que:

$$\left\{ \begin{array}{l} [0,1] \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ s \rightarrow c(s) = (x(s), y(s)) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

em que a posição de cada ponto na imagem a segmentar é determinada pelas coordenadas $x(s)$ e $y(s)$. O modelo é chamado de deformável porque varia a sua forma de acordo uma função de energia:

$$E = \int_0^1 \left[e_1 |c'(s)|^2 + e_2 |c''(s)|^2 + E_{ext}(c(s)) \right] ds, \quad (3)$$

em que $c'(s)$ e $c''(s)$ representam a primeira e a segunda derivada da curva $c(s)$ respectivamente, e E_{ext} é o termo da energia associado à forças externas, também designadas por forças de imagem.

A função energia E é composta por uma energia externa (E_{ext}) que é definida por propriedades da imagem (normalmente o gradiente ou a intensidade dos *pixels*) e por uma energia interna dada pela relação entre os nodos do próprio contorno ativo (geralmente a distância euclidiana e/ou a diferença angular). A energia interna é definida pelas derivações da função $c(s)$, em que a primeira derivada $c'(s)$ é dita como energia de elasticidade do contorno, o que traduz a sua capacidade de se distanciar ou se aproximar dos pontos vizinhos. A segunda derivada $c''(s)$ é a energia de suavização do contorno que tende a deixá-lo contínuo (energia de continuidade). Esta última torna-se nula quando o contorno fica plano.

O MCA Greedy é um modelo que descreve uma curva (*snake*) suave controlada por energias internas, ajustando a elasticidade, rigidez e energia gradiente da imagem. Nesse modelo, a curva é ajustada através de sucessivas minimizações locais de energia (Nixon e Aguado, 2002; Pisa, 1998). Assim, seja $c(s) = (x(s), y(s))$ a posição paramétrica do contorno, a sua função de energia (Pisa, 1998) é dada por:

$$E = \int_0^1 E_{int}(c(s))d_s + \int_0^1 E_{img}(c(s))d_s, \quad (4)$$

em que E_{int} e E_{img} representam a energia interna da curva e a energia relativa à imagem, respectivamente. Essa formulação pode ser reescrita para o caso discreto, isto é, quando há um número finito de pontos representando os contornos a serem ajustados. Assim, alterando essa formulação para caso discreto, a energia interna da curva pode ser descrita como:

$$E_{int} = \alpha(s) \left| \frac{d}{d_s} c(s) \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{d^2}{d_s^2} c(s) \right|^2, \quad (5)$$

em que $\alpha(s)$ e $\beta(s)$ representam os pesos associados a cada energia. O primeiro termo influencia a curva a se comportar como uma “corda” resistente à extensão e está relacionado com a tensão da curva, denominada de energia de curvatura. O segundo termo possibilita a curva a agir como uma “haste” resistente à flexão e está relacionada com a rigidez da curva, chamada de energia de continuidade (Nixon e Aguado, 2002; Pisa, 1998).

Há várias maneiras de definir a função energia da imagem para o MCA Greedy, mas para estabelecer uma definição útil ao caso estudado, consideram-se a atração da curva para as características dominantes, como linhas E_{linha} , bordas (ou orlas de intensidade) E_{borda} e terminações E_{term} . A energia total da imagem pode ser expressa como uma combinação de três energias:

$$E_{img} = w_{linha} \cdot E_{linha} + w_{borda} \cdot E_{borda} + w_{term} \cdot E_{term}, \quad (6)$$

em que cada w_i é o peso respectivo para cada função energia (Nixon e Aguado, 2002; Pisa, 1998).

As bordas são detectadas em áreas da imagem onde a magnitude de intensidade muda bruscamente, ou seja, quanto mais rápida é a mudança de magnitude, maior contraste tem a borda associada. Uma boa técnica de detecção de bordas, como o gradiente, possibilita o reconhecimento de formas de maneira simples e rápida. Seja a função imagem $f(x, y)$, então o gradiente $g(x, y)$ e a direção $\phi(x, y)$ são:

$$g(x, y) \cong \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (7)$$

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right), \quad (8)$$

sendo:

$$\Delta x = f(x+n, y) - f(x-n, y), \quad (9)$$

$$\Delta y = f(x, y+n) - f(x, y-n), \quad (10)$$

em que n é um número inteiro, usualmente igual a 1 (um). A função energia que detecta bordas pode ser definida como o gradiente (Gonzalez e Woods, 2008), obtendo-se:

$$E_{borda} = g(x, y). \quad (11)$$

Desse modo, o MCA Greedy é atraído para regiões com bordas de alto contraste, como as regiões de níveis de cinzento mais claras (Nixon e Aguado, 2002; Pisa, 1998). A detecção de terminações permite que extremidades livres de linhas ou vértices atraiam o MCA Greedy, evitando a percepção de falsos contornos. Utilizando uma versão da imagem original e passando um filtro do tipo gaussiano é possível descartar alguns vértices e linhas falsas presentes na imagem original (Gonzalez e Woods, 2008).

Como função energia relativa às terminações, considerou-se:

$$E_{term} = \frac{d}{d^2} \theta(x, y), \quad (12)$$

em que $n^1 = (\cos\theta, \sin\theta)$ é um vetor unitário ao longo da direção gradiente e $n^1 = (-\sin\theta, \cos\theta)$ é um vetor unitário perpendicular à direção gradiente. Através da combinação de E_{borda} , E_{term} e E_{linha} pode-se desenvolver um MCA Greedy fortemente atraído para bordas e extremidades presentes na imagem original (Nixon e Aguado, 2002; Pisa, 1998).

Esse método possui algumas limitações, dentre elas, os parâmetros (pesos) considerados, pois são próprios para cada aplicação, devendo ser testados e ajustados para obter-se bons resultados.

Após uma explicação das ferramentas computacionais usadas neste trabalho, são apresentadas a seguir as principais considerações a respeito das durezas Brinell e Vickers.

2.2 Dureza Brinell

O ensaio de medição de dureza Brinell (HB) utiliza penetradores esféricos que podem ser fabricados de aço, para matérias com dureza até 350 HB, e metal duro (tungstênio), para matérias com dureza entre 350 HB e 650 HB. A escolha dos penetradores está relacionada às propriedades mecânicas do material em análise, bem como à escolha do diâmetro da esfera de penetração. De acordo com a tabela da norma ABNT NBR NM 187-1 (2005), o ensaio de dureza Brinell utiliza esferas com 2.5 (a mais comum), 5 e 10 mm de diâmetro.

Para a aplicação do ensaio Brinell, o corpo de prova deve estar com a superfície de medição livre de oxidações, arestas, lubrificantes, dentre outros elementos “estranhos” ao ensaio. A superfície deve estar plana e bem acabada para que o operador tenha certeza de que a medição será correta. Deve ser garantido que não sejam causadas deformações no lado oposto ao da superfície submetida ao ensaio. Para tal, a amostra deve ter no mínimo uma espessura de oito vezes o diâmetro da penetração. Além disso, devem-se evitar vibrações e choques sobre o equipamento de medida.

O diâmetro médio da impressão d em mm é dado por:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (13)$$

em que d_1 e d_2 são os valores em mm dos diâmetros medidos na impressão pelo operador.

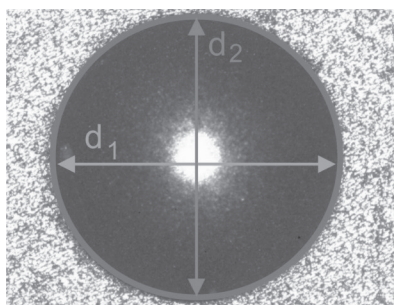


Figura 1: Diâmetros mensurados no ensaio de dureza Brinell.

Após a atuação do penetrador sobre o corpo de prova, o operador deve obter o diâmetro médio d deixado pela esfera no dispositivo mostrador. O valor desse diâmetro é utilizado para obter o valor de dureza associado usando a tabela da norma NBR NM 187-2 (2003) ou recorrendo ao cálculo da mesma dureza através da equação:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (14)$$

em que F é a força aplicada em kgf, D é o diâmetro do penetrador esférico em mm.

2.3 Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers é muito vantajoso, pois, além de permitir medir a dureza de corpos de grandes dimensões, pode ser utilizado em corpos de reduzido tamanho, suporta qualquer material metálico, cerâmico ou outro material, independentemente da sua dureza, pode ser aplicado também em materiais irregulares, muito finos ou muito espessos, principalmente porque os penetradores usados são em diamante.

O valor da dureza deve ser seguido pela sigla HV, juntamente com a carga e o tempo aplicados durante a execução do ensaio. A escala de dureza HV é contínua, o que facilita a operação e torna os resultados obtidos mais rigorosos.

O penetrador utilizado no ensaio Vickers é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com ângulos entre faces de 136°. A leitura do valor do diâmetro da impressão deve ser feita por um visor (mostrador) acoplado ao microscópio do durômetro a ser utilizado. Assim, calcula-se a área da impressão causada pelo penetrador no corpo de prova com a seguinte equação:

$$A = \frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}, \quad (15)$$

em que d é diagonal média da impressão na amostra em mm:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (18)$$

em que d_1 e d_2 são os valores em mm das diagonais medidas em mm na impressão pelo operador.

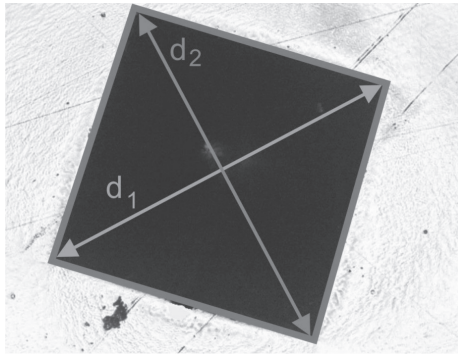


Figura 3: Diagonais d_1 e d_2 mensuradas na dureza Vickers.

O tempo de duração da impressão é de 10 a 15 segundos e as cargas variam de 5 a 120 kgf. O cálculo da dureza é dado por:

$$HV = \frac{F}{A}, \quad (16)$$

em que F é a força aplicada em kgf.

Substituindo a equação 3 em 4, tem-se:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}. \quad (17)$$

Convencionalmente, não é necessário calcular o valor da dureza utilizando a equação 18, bastando uma simples consulta da tabela fixada na norma ABNT NBR NM 188-1 (2005), que contém valores específicos para cada valor de diagonal da impressão mensurada e carga aplicada.

Apesar das muitas vantagens, esse método requer cuidados especiais. A manutenção do equipamento deve ser constante, visto que os defeitos de velocidade e medição podem comprometer todo o ensaio. A preparação do corpo de prova requer polimento, de preferência, eletrolítico.

Como o penetrador é indeformável, a dureza obtida independe da carga utilizada para materiais homogêneos.

3 Resultados e Discussão

A medição convencional de durezas é um processo manual e bastante subjetivo, pois a leitura do valor do diâmetro médio da impressão do penetrador depende diretamente do ângulo de visão do operador (paralaxe) e da experiência deste. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser imprecisos e até mesmo incorretos. Assim, a ferramenta computacional desenvolvida visa tornar mais rápida e precisa a medição das durezas Vickers e Brinell a partir de imagens de indentação.

Para realizar o ensaio de dureza de um dado material, deve-se primeiramente preparar metalograficamente a amostra, de forma a obter-se uma superfície de ensaio inteiramente polida. Para se utilizar a ferramenta computacional desenvolvida, após o respectivo ensaio, a imagem da indentação é adquirida usando um microscópio óptico.

A título de exemplo, a microestrutura do aço ABNT 1020 usado neste trabalho é apresentada na Figura 4.

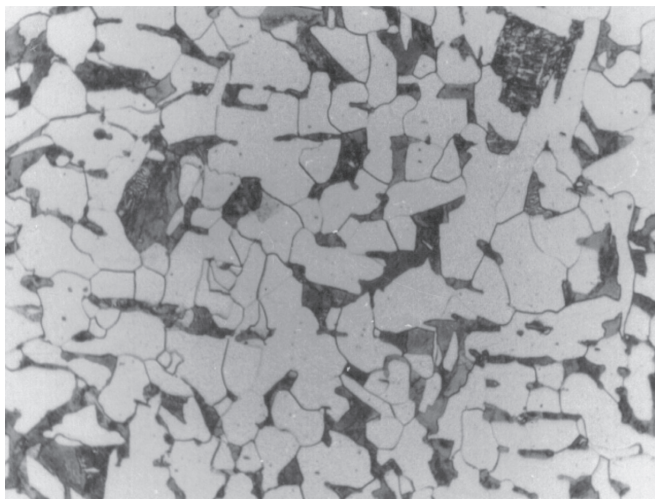


Figura 4: Imagem microscópica (346x) de um aço ABNT 1020 atacado com reagente nital 2.0%.

A utilização da ferramenta computacional proposta é iniciada através da abertura da imagem com a região da indentação resultante do ensaio realizado. Posteriormente, para analisar a imagem aberta, a ferramenta possibilita duas técnicas: crescimento de regiões e contornos ativos. No caso da primeira, o utilizador deve clicar no interior da região de indentação, o que inicia o processo automático de binarização da imagem original, baseado em seu histograma, sendo o limiar utilizado dado pelo ponto do histograma que apresenta o menor número de *pixels* (Rebouças Filho *et al.*, 2009), e, em seguida, aplica-se automaticamente a técnica de crescimento de regiões na imagem binária obtida.

Para a aplicação dos contornos ativos, basta o utilizador selecionar a região de indentação com um clique no seu interior, para que um contorno ativo se desenvolva até contornar toda a região de indentação. Após a imagem de indentação estar segmentada, são calculadas automaticamente as diagonais necessárias para o cálculo de dureza pretendido. Finalmente, para obter o valor da dureza do ensaio, o utilizador deve inserir o valor da carga utilizada, o valor da escala segundo a qual a imagem analisada foi adquirida pelo microscópio óptico, e seleccionar o tipo de ensaio de dureza pretendido, Vickers ou Brinell.

A título de exemplo de ilustração da utilização da ferramenta desenvolvida numa medição da dureza Vickers, na Figura 5, é apresentada uma imagem original de indentação, a área de indentação determinada pela técnica de crescimento de regiões (a vermelho) e a mesma área delimitada (também a vermelho) pela técnica de contornos ativos.

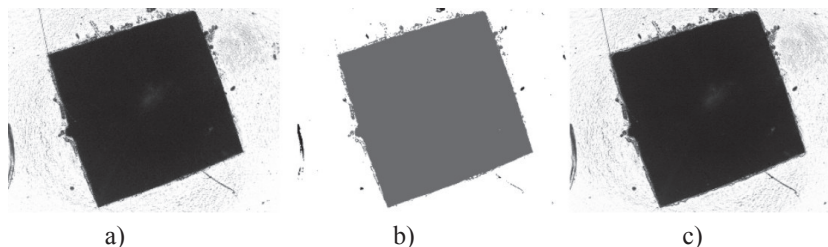


Figura 5: Imagem original de uma indentação de dureza Vickers (a), áreas resultantes da aplicação das técnicas de crescimento de regiões (b) e de contornos ativos (c).

Do mesmo modo, a Figura 6 ilustra uma imagem original de uma indentação da dureza Brinell, a área de indentação determinada pela técnica de crescimento de regiões e a mesma área delimitada pela técnica de contornos ativos.

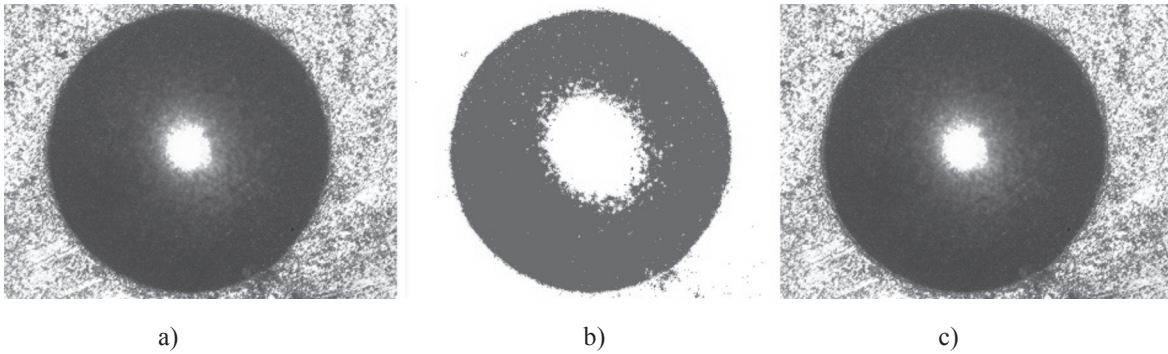


Figura 6: Imagem original de uma indentação de dureza Brinell (a), áreas resultantes da aplicação das técnicas de crescimento de regiões (b) e de contornos ativos (c).

A ferramenta computacional desenvolvida oferece ainda a opção de guardar a imagem processada de forma que possa ser analisada numa fase posterior.

Neste trabalho, como já referido, nos ensaios de dureza Vickers realizados, foi utilizado um penetrador de diamante e uma carga de 120 kgf, enquanto para os ensaios de dureza Brinell utilizou-se um penetrador esférico de diâmetro 2.5 mm e uma carga de 187.5 kgf. Os resultados obtidos para 10 indentações sobre o mesmo corpo de prova (uma amostra de aço 1020), pelo método convencional de medida e usando a ferramenta computacional desenvolvida, estão indicados nas Tabelas 1 e 2 para os ensaios Vickers e Brinell, respectivamente.

Tabela 1: Resultados de dureza Vickers obtidos pelo método convencional e usando a ferramenta computacional desenvolvida.

Indentação	Método convencional	Ferramenta computacional - crescimento de regiões	Ferramenta computacional - contornos ativos
1	169.73 HV	168.99 HV	173.21 HV
2	167.39 HV	167.19 HV	173.72 HV
3	164.24 HV	162.33 HV	171.17 HV
4	162.56 HV	156.33 HV	169.00 HV
5	163.12 HV	161.34 HV	168.32HV
6	161.73HV	167.42 HV	166.08 HV
7	162.00HV	159.15 HV	171.94 HV
8	166.23HV	159.32 HV	174.05 HV
9	167.68HV	164.19 HV	173.30 HV
10	168.85HV	164.98 HV	170.82 HV
Média	165.35 HV	163.12 HV	171.16 HV
Desvio padrão	2.98	4.13	2.64
Erro relativo em relação à média	0.57%	0.80%	0.49%

A partir dos resultados experimentais obtidos, constata-se que as médias das durezas obtidas pela técnica de crescimento de regiões se aproxima mais dos valores correspondentes obtidos pelo método convencional de medição do que as obtidas pela técnica dos contornos ativos.

Outro fato importante é em relação aos desvios padrão observados. A disparidade entre as medidas de dureza de um mesmo material é comum devido à dureza ser uma medida pontual do material, podendo ser influenciada por variações de geometria, composição química, entre outras características da amostra em análise. Contudo, percebe-

se que o desvio padrão nas medidas de dureza Vickers com a técnica de crescimento de regiões é maior, pois é mais suscetível a interferências de ruído em regiões quadradas, devido a um falso vértice “vivo” que interfere nas medidas obtidas. A técnica dos contornos ativos considera os vértices sempre do mesmo modo, resultando em medidas mais constantes, porém, como não consideram os vértices “vivos”, as medidas obtidas são mais distante das obtidas pelo método convencional.

Tabela 2: Resultados de dureza Brinell obtidos pelo método convencional e usando a ferramenta computacional desenvolvida.

Identação	Método convencional	Ferramenta computacional - crescimento de regiões	Ferramenta computacional - contornos ativos
1	136.36 HB	138.15 HB	140.85 HB
2	142.78 HB	142.45 HB	143.69HB
3	143.05 HB	146.11 HB	148.86 HB
4	174.89 HB	174.38 HB	177.63 HB
5	141.33 HB	136.50 HB	127.2 HB
6	134.75 HB	131.76 HB	137.26 HB
7	132.73 HB	134.70 HB	138.94 HB
8	146.82 HB	147.19 HB	150.91 HB
9	138.69 HB	142.31 HB	150.67 HB
10	138.69 HB	138.87 HB	146.15 HB
Média	143.00 HB	143.24 HB	146.22 HB
Desvio padrão	11.96	11.97	13.18
Erro relativo em relação à média	2.64%	2.64%	2.85%

No ensaio de dureza Brinell, a identificação resultante tem uma forma aproximadamente circular, não apresentando cantos “vivos”. Assim, os resultados obtidos pela técnica de contornos ativos se aproximam mais dos obtidos pelo método convencional e pela técnica de crescimento de regiões. Através dos desvios padrão obtidos, é notório que, em áreas de identificação circulares, o ruído afeta menos a técnica de crescimento de regiões e mais a técnica dos contornos ativos.

Tendo em consideração a análise dos resultados experimentais obtidos, verifica-se que todos os erros relativos à média são menores que 5%, conforme sugerem Seabra (1979) e Albuquerque *et al.* (2007b), o que traduz que as dez identificações consideradas para cada ensaio de dureza são o suficiente para a análise da dureza do material envolvido.

4 Considerações Finais

A medição convencional da dureza de materiais é um processo cansativo, fastidioso e inteiramente dependente da leitura subjetiva das diagonais de identificação realizada pelo operador, sendo por isso bastante propício à obtenção de erros.

Para tornar esse tipo de ensaio mais preciso, rápido e menos subjetivo, desenvolveu-se uma ferramenta computacional baseada em técnicas de processamento e análise de imagem, nomeadamente contornos ativos e crescimento de regiões. Essas técnicas de segmentação de imagem foram integradas numa ferramenta computacional dedicada à obtenção de durezas Vickers e Brinell a partir de imagens de identificação de forma semiautomática.

Quer para o ensaio de dureza Vickers quer para o ensaio de dureza Brinell, a técnica de crescimento de regiões obteve resultados mais precisos do que a técnica de contornos ativos, e, quando comparada com o processo convencional de medida, os resultados são obtidos de forma mais rápida e menos dependente da subjetividade do operador.

Referências

ALBUQUERQUE, V. H. C. de. Sistema de visão computacional para a caracterização da grafita usando microfotografias. Dissertação (Departamento de Engenharia de Teleinformática) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2007.

ALBUQUERQUE, V. H. C. de et al. Evaluation of multilayer perceptron and self-organizing map neural network topologies applied on microstructure segmentation from metallographic images. *NDT & E International*, [s.], v. 42, n. 7, p. 644-651, 2009.

ALBUQUERQUE, V. H. C. de et al. Sistema de segmentação de imagens para quantificação de microestruturas em metais utilizando redes neurais artificiais. *Revista Matéria (UFRJ)*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 394-407, 2007.

ALBUQUERQUE, V. H. C. de et al. A new solution for automatic microstructures analysis from images based on a backpropagation artificial neural network. *Nondestructive Testing and Evaluation*, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 273-283, 2008.

ALBUQUERQUE, V. H. C. de; TAVARES, J. M. R. S.; DURÃO, L. M. P. Evaluation of delamination damage on composite plates using an artificial neural network for the radiographic image analysis. *Journal of Composite Materials*, [s.l.], v. 44, p. 1139-1159, 2010.

ASTM E140-05e1. Standard hardness conversion tables for metals relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, superficial hardness, Knoop hardness, and Scleroscope hardness. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, USA, West Conshohocken, Pennsylvania, 2005. DOI: 10.1520/E0140-07.

ASTM E92-82(2003)e2. Standard test method for Vickers hardness of metallic materials. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, USA, West Conshohocken, Pennsylvania, 2003. DOI: 10.1520/E0092-82R03

DURÃO, L. M. P. et al. Tool effects on hybrid laminates drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, [s.l.], v. 25, p. 476-481, 2010.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. *Digital image processing*. 3-ed. USA: Upper Saddle River; NJ: Addison-Wesley, 2008.

KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. Snakes: active contours models. *Journal of Computer Vision*, v. 1, p. 321-331, 1987.

NIXON, M. S.; AGUADO, A. S. *Feature extraction and image processing*. Oxford: Newnes, 2002.

PISA, I.T.; RUIZ, E. E. S. Tracking left ventricular wall motion using active contour model snakes: PR-Greedy algorithm. *International Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. Rio de Janeiro: SIBIGRAPI Digital Library Archive, 1998.

REBOUÇAS FILHO, P. P.; CAVALCANTE, T. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C. de; TAVARES, J. M. R. S. Brinell and Vickers hardness measurement using image processing and analysis techniques. *Journal of Testing and Evaluation*, [s.l.], v. 38, p. 102220, 2010.

SEABRA, A. V. *Correlação das propriedades mecânicas dos aços com a microestrutura*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1979.

Sobre os autores

Pedro Pedrosa Rebouças Filho

Possui graduação em Mecatrônica Industrial pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (2007) e atualmente é aluno de Mestrado em Engenharia de Teleinformática na Universidade Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia Biomédica, com ênfase em Processamento de Sinais Biológicos.

Victor Hugo C. de Albuquerque

Doutor em Engenharia Mecânica, com ênfase em Materiais, pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB (2010). Mestre em Engenharia de Teleinformática pela Universidade Federal do Ceará – UFC (2007). Graduado em Tecnologia em Mecatrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará – CEFET-CE (2006). Técnico em Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará – CEFET-CE (2004). Tem experiência na área de Análise de Imagens e Caracterização de Materiais, atuando principalmente nos seguintes temas: processamento de sinais (imagens), reconhecimento de padrões, segmentação de imagens, caracterização microestrutural, ensaios não destrutivos e destrutivos, envelhecimento térmico, transformações de fases, ligas passíveis do efeito memória de forma, ligas a base de CuAl para aplicações industriais.

Tarique da Silveira Cavalcante

Graduado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará – CEFET-CE em Mecatrônica Industrial. Mestrando em Engenharia de Teleinformática na Universidade Federal do Ceará, na área de Sinais e Sistemas / Processamento de Sinais Biológicos. Atualmente, é Pesquisador do Grupo G5IMCO (Grupo de Simulação Computacional), pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Tem experiência na área de Visão Computacional, Engenharia Biomédica, Robótica, Mecatrônica, Automação e Simulação.

João Manuel R. S. Tavares

Licenciou-se em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP em 1992. Em 1995, obteve o grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores e o grau de Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores em 2001, também na FEUP. Desde 2001, é Investigador Sênior e Coordenador de Projeto no Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental – LOME do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI. Desde 2001, é Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec da FEUP. Dos seus atuais interesses de investigação, destacam-se: Visão Computacional, Visão 3D, Visualização Científica, Biomecânica e Desenvolvimento de Produto. Atualmente, é cochair da ECCOMAS Thematic Conference on Computational Vision and Medical Image Processing – VipIMAGE e do International Symposium on Computational Modeling of Objects Represented in Images: Fundamentals, Methods and Applications – ComplIMAGE, coeditor-chefe do International Journal for Computational Vision and Biomechanics – IJCV&B e editor-chefe do International Journal of Imaging (IJI) e do International Journal of Biometrics and Bioinformatics – IJBB. É coeditor e coautor de vários livros, números especiais de revistas, artigos em conferências nacionais e internacionais e de artigos em revistas nacionais e internacionais. Desde 2001, tem sido responsável por vários projetos de investigação financiados e orientador de várias dissertações de mestrado concluídas e em curso, bem como de várias teses de doutoramento em curso.