

MEDIÇÃO DE IDENTIFICAÇÕES DE DUREZA COM ALGORITMOS DE VISÃO COMPUTACIONAL E TÉCNICAS DE DECISÃO COM INCERTEZAS

*Fabiana Rodrigues Leta¹
Wilson Berilli Mendes²
João Carlos Soares De Mello³*

Resumo: Em um sistema de medição de dureza Brinell e Vickers, a extração do diâmetro e diagonal das marcas de indentação está sujeita a erros, mesmo quando efetuados pelos mais experientes operadores. Uma das fontes de erros é o fato das indentações exibirem linhas de contornos sem nitidez. Com o objetivo de minimizar os erros de medição decorrentes da influência do operador, o presente artigo apresenta uma abordagem de medição automática de dureza Brinell e Vickers, baseada em algoritmos de Visão Computacional, cujo foco principal está no desenvolvimento de algoritmos para extração das características dimensionais das marcas de indentação, onde o usuário não tenha interferência no resultado final da dureza. São apresentados quatro algoritmos para extração da característica dimensional da marca de indentação para cada ensaio de dureza. Como cada algoritmo é mais ou menos apropriado, dependendo da situação, e como o usuário não deve interferir na escolha, o algoritmo mais apropriado é escolhido com base em elementos da teoria dos jogos.

Palavras-chave: Algoritmos de Medição, Visão Computacional, Jogos, Decisão

Abstract: In hardness measure system, Brinell e Vickers, the process to obtain the diameter and e diagonal of the indentation, is liable to errors, since when made by experienced operators. This happens because the boundary lines are not sharp and by the fact that the human vision needs to training and is so liable to sick and fatigue. To minimize this important factor of the measure process, the observer's capability and interpretation, this works presents a methodology to automatic measure the hardness indentation, by using Computer Vision techniques. The main focus is the development of methods to extract the features of indentation measurement. With this methodology the user's skill has no influence in the final hardness result. It's developed four methods to obtain the measurement of the indentation's dimension for each hardness test. Also the best methodology is chosen with the aid of game theory elements.

Key-words: Measuring Algorithms, Computer Vision, Games, Decision.

¹ Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

² Instituto de Pesquisa da Marinha

³ Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios de dureza são realizados por durômetros (Fig. 1) e consistem basicamente em verificar o quanto um dado material resiste à penetração de um determinado penetrador. O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado, de diâmetro D ,

sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga F , durante um tempo t , produzindo uma calota esférica de diâmetro d (Fig. 2a). Já 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° (Fig. 2b).

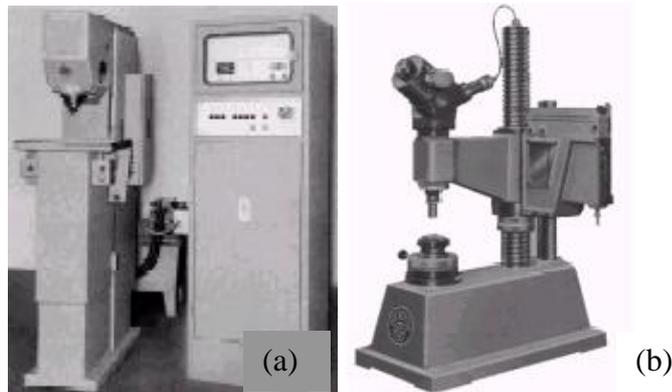


Figura 1 – Durômetros (a) Brinell e (b) Vickers.

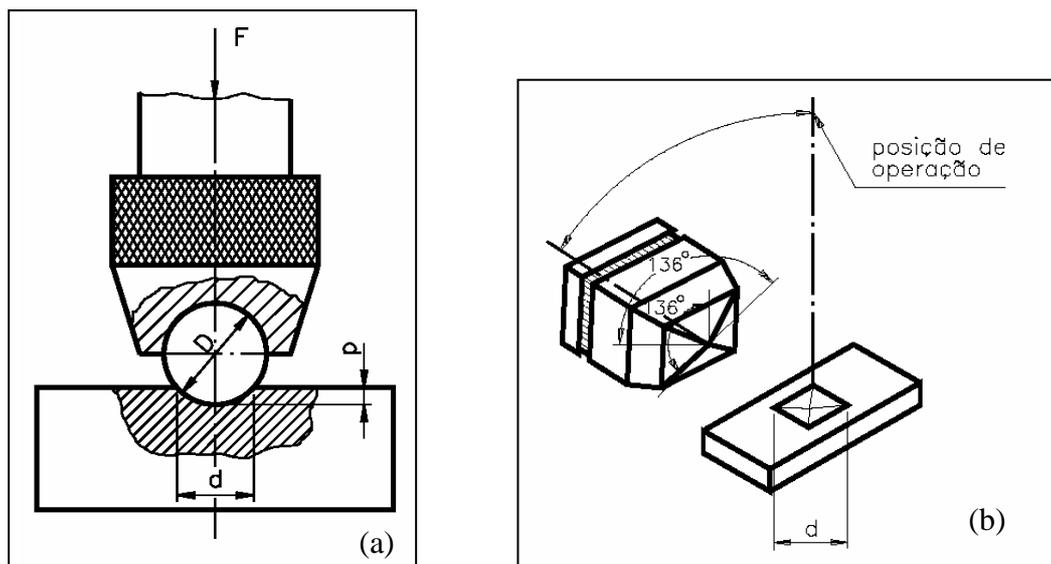


Figura 2 – Penetradores Brinell (a) e Vickers (b).

Os ensaios de dureza objetivam obter uma relação entre a força aplicada e a área impressa no material, que são obtidas através da medição do diâmetro para o caso da dureza Brinell e da diagonal para Vickers. A medição desses parâmetros pode ser feita através de uma

escala graduada (Fig. 3a), por uma escala incremental (Fig. 3b), ou por um sistema de medição automático desses parâmetros utilizando técnicas de Visão Computacional (Fig.3c).

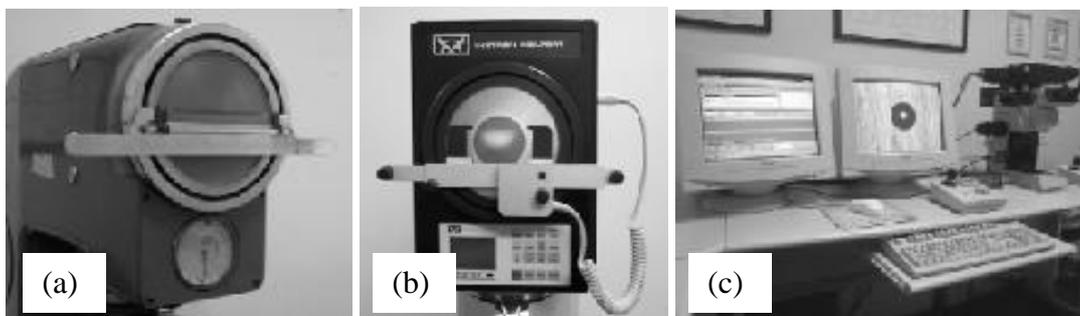


Figura 3 – Sistemas de Medição: (a) Escala Gradual, (b) Escala Incremental e (c) Sistema Proposto (Pires et al., 2001).

O ensaio de dureza é empregado amplamente em pesquisa e avaliação de materiais para controle de 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 incerteza de alguns parâmetros como: a força de teste aplicada, as dimensões da esfera de penetração, o tempo de aplicação de carga, o método/dispositivo para medição da penetração 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. Este erro pode decorrer de deficiências no treinamento do observador para realização do ensaio e da sua bagagem individual que leva a interpretações diferenciadas. Por esta razão, torna-se importante o desenvolvimento de uma metodologia que não seja influenciada pela capacidade de observação e interpretação do operador, nem pelas escolhas sobre métodos automáticos que ele não deve fazer.

Especificamente em medições de identificações de dureza Vickers e Brinell, é importante adicionar o fato de que as marcas de identificação não exibem linhas de contornos bem definidos (Mendes e Leta, 2003). Existe uma região com variação de tonalidade do preto (o que é considerado a identificação) para o branco (o que é suposto a parte do material que não apresenta deformação).

A maioria dos trabalhos relacionados à área de visão, não apresenta aplicações específicas em

medições de dureza. Nascimento et al (2001) destacam o erro obtido por um *software* analisador de imagens comercial, aplicado para medições de dureza Vickers, através da extração da característica área. Cabe ressaltar que este *software* necessita que o usuário manipule as imagens de acordo com seu bom senso visual, para descartar ou adicionar pré-processamentos, conforme a qualidade das imagens em relação a erros grosseiros. Entretanto, uma imagem pode apresentar erros que não são visualmente observados e, na proposta de uma metodologia automática, apresentada no presente artigo, o objetivo é proporcionar ao usuário um ambiente em que não se necessite tomar nenhuma decisão que exija conhecimentos específicos ligados à área de imagem.

Neste contexto, apresenta-se uma abordagem de medição automática de dureza Brinell e dureza Vickers, baseada em algoritmos de Visão Computacional, com o objetivo de minimizar estes importantes fatores no processo de medição e de fazer a seleção dos algoritmos que gerem, nas piores condições, os menores erros relativos aos valores verdadeiros dos padrões. Para a seleção dos algoritmos são usados elementos de teoria dos jogos.

2. SISTEMA DE MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DE DUREZA

Cada um dos sistemas de medição automática de dureza proposto envolve o desenvolvimento e implementação as etapas apresentadas na Fig. 4. A metodologia desenvolvida para elaboração deste sistema tomou de base

os resultados obtidos, a partir da implementação de diversos algoritmos, em imagens de ensaios de dureza de blocos padrão.

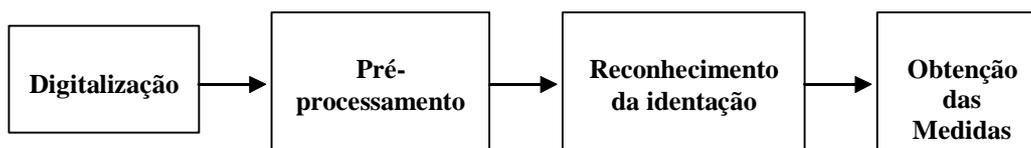


Figura 4 – Etapas do sistema de medição automática de dureza.

2.1. DIGITALIZAÇÃO DE IMAGEM

No processo de digitalização, as imagens são convertidas para a forma numérica, isto é, a imagem é convertida em pequenas regiões chamadas *pixel* (*picture elements*), que consiste na menor divisão da imagem, em uma grade retangular. Em cada *pixel*, a imagem é representada pela reflexão da luz medida, onde a intensidade é quantificada através de um número inteiro associado a cada *pixel*.

Portanto, a imagem passa a ser representada por uma matriz de inteiros (Castelman, 1979). Conseqüentemente, o tamanho de uma imagem é função do número de *pixels* que ela possui, e pode ser vista como uma matriz de $n \times m$. Uma

imagem carrega no seu interior uma série de informações como cores, intensidades de luz, que adequadamente processadas, permitem a análise desta imagem. Pode-se destacar o histograma da imagem que através de sua visualização, permite obter indicação da qualidade da imagem quanto ao nível de contraste e quanto ao brilho médio entre outras.

O histograma de uma imagem é a função que descreve um conjunto de números indicando o percentual de *pixels* naquela imagem, que apresenta um determinado nível de cinza. Estes valores são normalmente representados por um gráfico de barras (Fig. 5), que fornece para cada nível de cinza o número (ou o percentual) de *pixels* correspondentes na imagem.

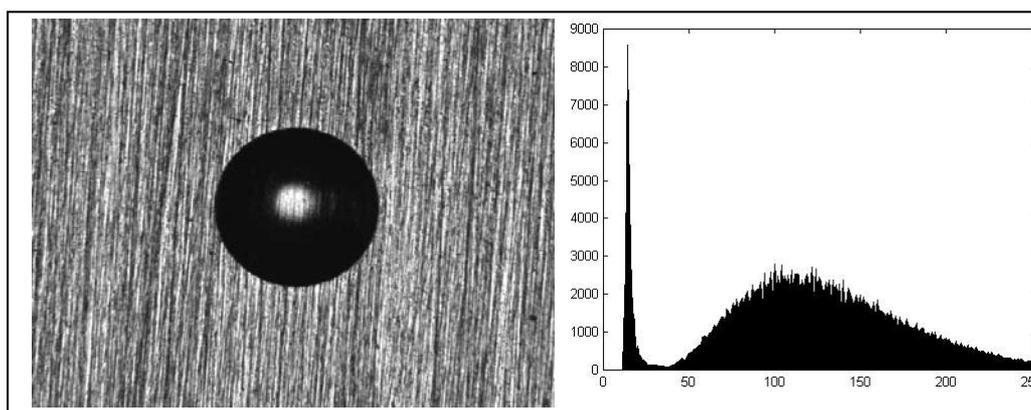


Figura 5. Histograma de uma imagem em tons de cinza.

A digitalização das imagens analisadas no presente artigo foi realizada no Laboratório de Ensaios Metalográficos do Instituto Nacional de Tecnologia. Todas as imagens obtidas são em tons de cinza, com tamanho de 640×320 *pixels* e profundidade de 8 bits. As imagens foram capturadas com ampliação de 50x, 100x e 200x.

2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento de imagens consiste em uma etapa fundamental para a obtenção de bons resultados na fase de análise. Existe uma grande variedade de técnicas que realizam a melhoria de imagens, entretanto muitas delas podem

também acrescentar ou diminuir informações na imagem, o que pode acarretar resultados incorretos na etapa de análise, ou, em alguns casos, até impossibilitar a obtenção de resultados. Os tópicos a seguir apresentam os pré-processamentos utilizados para as imagens de dureza Brinell e Vickers, considerando-se as técnicas que geraram os menores erros.

2.2.1. Imagens Brinell

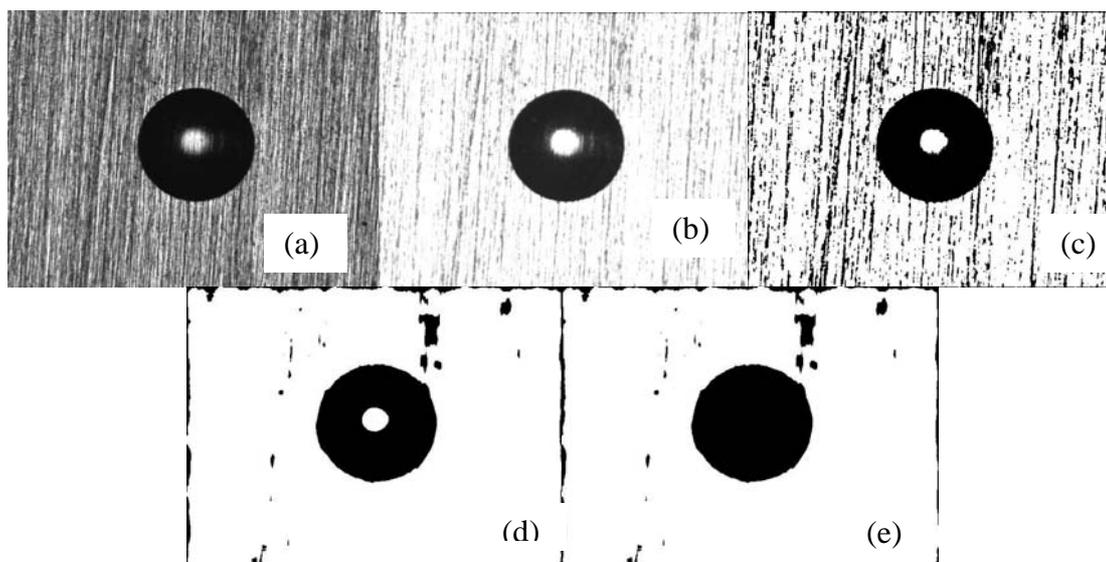


Figura 6 – Resultados obtidos de uma imagem original Brinell (a) após a aplicação de: (b) Filtro passa-baixa 3x3, (c) *Thresholding* Global em 25% (d) Filtro mediana de raio 9 (e) Filtro morfológico para preenchimento.

Na Figura 6 tem-se a seqüência de resultados (b), (c), (d) e (e) da aplicação do pré-processamento na imagem original (a). Observando o resultado apresentado em (b), pode-se notar que ocorreu um grande destaque da indentação na imagem, entretanto a imagem ainda se apresenta com variação de tonalidades. Após a segmentação (c), junto com o destaque da indentação, foi destacada também uma grande quantidade de ruído, que diminuiu após a aplicação do filtro mediana (d). Também se pode observar que as imagens apresentavam uma região de fundo no interior da indentação, gerando a necessidade da aplicação de um filtro morfológico que preenchesse a região. Como resultado final do pré-

Depois de vários testes, a seguinte seqüência foi utilizada como padrão para as imagens Brinell (Mendes e Leta, 2002): Filtro passa baixa 3x3; *Threshold* global em 25%; Filtro mediana de raio 9; Preenchimento morfológico

Com exceção do filtro passa baixa, que é um filtro cujo processamento objetiva filtrar as tonalidades mais altas, o *threshold* global, o filtro mediana e o preenchimento morfológico são comentados anteriormente.

processamento tem-se a imagem apresentada em (e).

2.2.2. Imagens Vickers

A princípio, foi testado o mesmo pré-processamento utilizado nas imagens Brinell para imagens de dureza Vickers, mas os resultados não foram satisfatórios. Foram testadas outras formas de pré-processamento, entretanto, a seqüência das etapas resumiu-se na aplicação do *Thresholding* Modal.

Na figura 7, tem-se o resultado (b) da aplicação do pré-processamento na imagem original (a), com a marca de indentação da dureza totalmente destacada do fundo (Mendes e Leta, 2003).

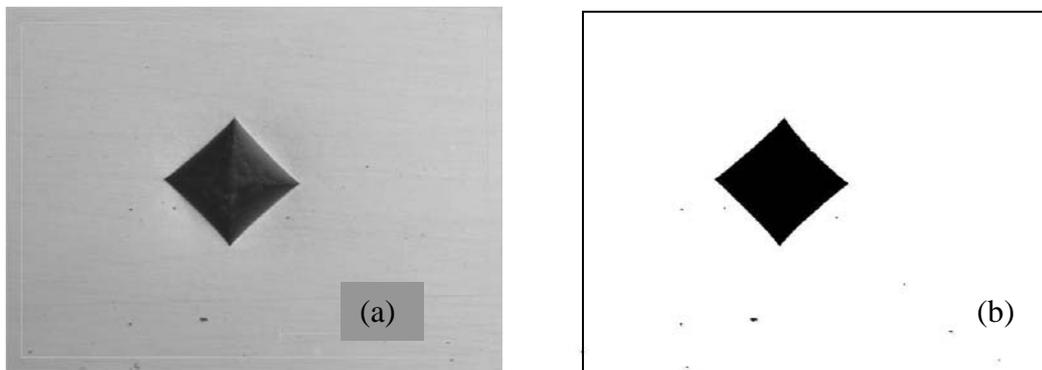


Figura 7 – Resultados obtidos de uma imagem original Vickers (a) após a aplicação de: (b) *Thresholding* Modal.

2.3. IDENTIFICAÇÃO DE OBJETOS

Após o pré-processamento, é comum que uma imagem ainda apresente outros objetos que devem ser considerados como ruídos. O processo de reconhecimento visa garantir que apenas o objeto de interesse seja destacado da imagem. São considerados objetos em uma imagem, qualquer conjunto de pontos agrupados, isto é, conectados e, em função desta conexão, esses objetos possuem características como área, perímetro, centro geométrico, entre outras, que podem ser determinadas.

Uma das formas de se identificar os diferentes objetos da imagem, é utilizar o algoritmo 4-conectado ou 8-

conectado (Heijden, 1994) para reconhecer cada objeto e posteriormente eliminar aqueles com uma determinada característica indesejável, como por exemplo, a área abaixo de um determinado valor. Aplicando então este algoritmo, é destacado cada elemento da imagem, ou seja, cada objeto pertencente à imagem. Assim, sabendo-se que o único objeto de interesse na imagem consiste na marca de identificação, torna-se possível eliminar todos aqueles cuja área não é significativa. Como resultado, pode-se observar nas figuras 8 e 9, as imagens Brinell e Vickers com apenas a marca de identificação do ensaio de dureza. Isto é, sem nenhum outro elemento proveniente de ruídos.

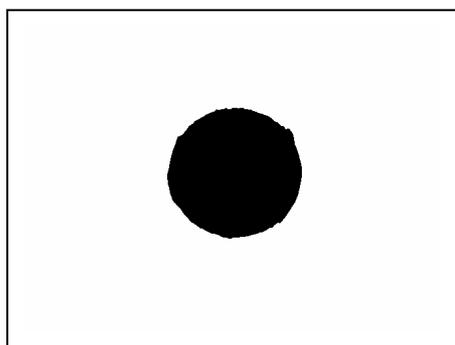


Figura 8 – Resultado obtido da imagem Brinell pós-processada, após a aplicação do algoritmo 4 conectado.

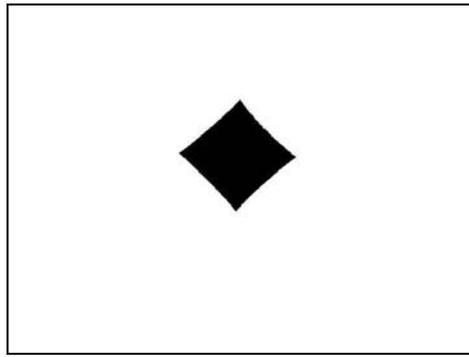


Figura 9 – Resultado obtido da imagem Vickers pós-processada, após a aplicação do algoritmo 4 conectado.

Diante da possibilidade de inclusão de ruídos ao objeto de interesse, a escolha do algoritmo 4-conectado e não do 8-conectado na identificação do objeto, ocorreu em função de que o 8-conectado tende a aumentar as características perímetro e área, que são, a posterior, utilizadas para obtenção das medidas.

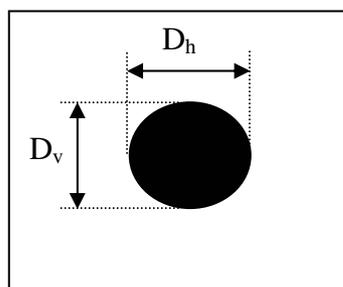
2.4. OBTENÇÃO DAS MEDIDAS

A última etapa consiste na análise da imagem que, no caso em estudo, refere-se à extração do diâmetro da indentação obtida para os ensaios de dureza Brinell e da diagonal no caso de ensaios de dureza Vickers.

Conforme apresentado no anexo A e B, as durezas Brinell (HB) e Vickers (HV) são definidas pelas seguintes equações:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1)$$

Onde F é a força aplicada, D é o diâmetro da esfera e d é o diâmetro da indentação.



$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (2)$$

Onde F é a força aplicada e d é a média das diagonais da indentação.

Para cada ensaio de dureza, foram desenvolvidas quatro metodologias com o objetivo de avaliar suas limitações e vantagens.

2.4.1. Dureza Brinell

Para extração do diâmetro da indentação das imagens obtidas nos ensaios de dureza Brinell, foram utilizados os seguintes métodos: Diferença de Coordenadas (DC); Área (A); Perímetro (P); e, Três Pontos Equidistantes (TPE).

2.4.1.1. Diferença de coordenadas

Este é um dos métodos mais simples utilizados nesta aplicação, e consiste em obter o diâmetro da impressão (D) através da média aritmética entre o diâmetro extraído na direção vertical (D_v) e na horizontal (D_h) da área impressa.

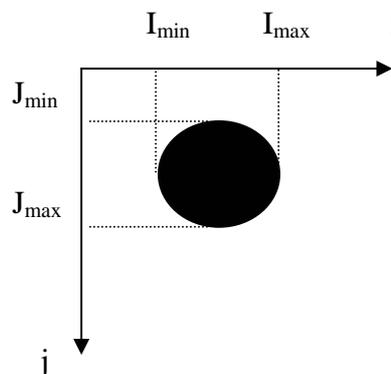


Figura 10 – Método de medição por diferenças de coordenadas

Para isto, o algoritmo identifica as coordenadas máximas (I_{\max} e J_{\max}) e mínimas (I_{\min} e J_{\min}), na vertical e na horizontal, e calcula os diâmetros através da diferença entre estas coordenadas, conforme apresenta as equações 3 a 5, e ilustra a figura 10.

$$D = \frac{D_h + D_v}{2} \quad (3)$$

$$D_v = J_{\max} - J_{\min} \quad (4)$$

$$D_h = I_{\max} - I_{\min} \quad (5)$$

2.4.1.2. Área

Consiste em obter o diâmetro a partir do cálculo da área da impressão na imagem. A área é dada contando o número de *pixels* pretos, que correspondem à identificação da imagem (eq. 6).

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Area}{\pi}} \quad (6)$$

Sendo que,

$$Area = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l B(i, j) \quad (7)$$

Onde $B(i, j)$ corresponde a um *pixel* preto da imagem.

2.4.1.3. Perímetro

Consiste em obter o diâmetro a partir da detecção do perímetro da área impressa. Isto é, foi desenvolvido um algoritmo para identificar e contabilizar os *pixels* pertencentes ao contorno e obter o diâmetro diretamente da fórmula do perímetro (eq. 8).

$$D = \frac{Perimetro}{\pi} \quad (8)$$

Sendo que o perímetro é obtido contabilizando-se os pontos 4-conectados pertencentes à borda, isto é,

$$P_4 = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l B(i, j) | V_8(B) = 255 \quad (9)$$

Onde B corresponde a um *pixel* preto da imagem e $V_8(B)$ os vizinhos 8-conectados de B .

2.4.1.4. Três pontos equidistantes

Consiste em obter o diâmetro a partir da substituição das coordenadas de três pontos equidistantes, pertencentes ao contorno da área impressa (Fig. 11), na equação da circunferência (eq. 10). Para isto foi desenvolvido um algoritmo que além de identificar os *pixels* do contorno através do algoritmo de perseguição de aresta, armazena todas as suas coordenadas em um vetor.

Teoricamente, em um sistema ideal, com apenas três pontos quaisquer, pode-se obter a equação de uma circunferência. Entretanto, num sistema real, se estes pontos forem muito próximos um dos outros, aumenta-se a chance de se obter erros maiores. Conseqüentemente, considerando pontos mais afastados, obtêm-se erros menores. Partindo da hipótese de que o menor erro ocorre quando estes pontos são equidistantes, a proposta foi identificar três pontos que fossem “equidistantes” em relação às posições no vetor de coordenadas dos pontos do perímetro. Portanto, neste método, o algoritmo escolhe randomicamente um primeiro ponto que, juntamente com outros dois, formam o primeiro conjunto de três pontos “equidistantes”. A partir daí, o algoritmo realiza uma varredura em todos os três pontos equidistantes do vetor, substituindo cada coordenada na equação da circunferência.

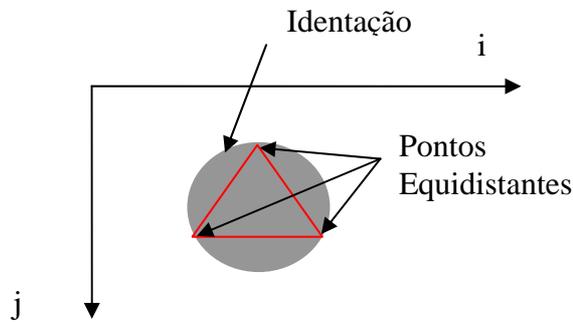


Figura 11 – Método de medição por Três Pontos Equidistantes

Portanto, dada a equação da circunferência:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (10)$$

$$x^2 + y^2 - 2ax - 2ay + a^2 + b^2 = R^2 \quad (11)$$

e três pontos quaisquer do contorno:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3).$$

A partir da forma linear:

$$Ax + By + C = x^2 + y^2 \quad (12)$$

Onde,

$$A = 2a, B = 2b \text{ e}$$

$$C = R^2 - a^2 - b^2 \quad (13)$$

Tem-se a seguinte formulação matemática,

$$Ax_1 + By_1 + C = x_1^2 + y_1^2$$

$$Ax_2 + By_2 + C = x_2^2 + y_2^2 \quad (14)$$

$$Ax_3 + By_3 + C = x_3^2 + y_3^2$$

Cuja solução pode ser obtida pela formulação matricial:

$$\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{B} \quad (15)$$

Com o objetivo de minimizar os erros, o cálculo do diâmetro foi feito com base na média do levantamento de todos os conjuntos de três pontos equidistantes. Também foi considerado um desvio padrão de 20 % uma vez que, após vários testes, verificou-se que, a partir deste, os

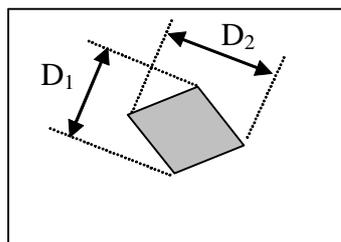


Figura 12 – Método de Medição por Diferença de coordenadas

resultados não apresentaram variação significativa.

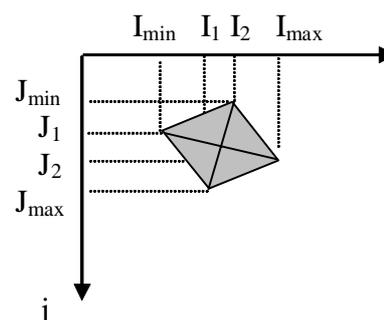
2.4.2. Dureza Vickers

No caso da dureza Vickers, a indentação possui vértices que definem as diagonais da marca de impressão.

Com exceção do método TPE, para extração da diagonal foram utilizados os mesmos métodos da extração do diâmetro com as devidas adaptações. Assim, foram utilizados os métodos: Diferença de coordenadas (DC); Área (A); Perímetro (P); e, Vértices do Perímetro (VP).

2.4.2.1. Diferença de coordenadas

Este método consiste em obter as diagonais da impressão (D1 e D2) a partir das distâncias cartesianas entre as coordenadas dos *pixels* de coordenadas máximas (I_{\max} e J_{\max}) e mínimas (I_{\min} e J_{\min}), na direção vertical e horizontal, uma vez que não é possível garantir um perfeito alinhamento entre as diagonais da marca de indentação e os eixos de coordenadas das imagens de ensaios Vickers, conforme ilustra a Figura 12.



Portanto,

$$D_1 = \sqrt{(J_{\max} - J_{\min})^2 + (I_1 - I_2)^2} \quad (16)$$

$$D_2 = \sqrt{(I_{\max} - I_{\min})^2 + (J_1 - J_2)^2} \quad (17)$$

A partir das diagonais denominadas de horizontal e de vertical (Denomina-se a direção considerando-se os eixos cartesianos coincidentes com as diagonais do losango), pode-se obter a média das diagonais.

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (18)$$

2.4.2.2. Área

Consiste em obter a diagonal média a partir da detecção da área impressa da identificação. Isto é, utilizando um algoritmo para extração da característica área, pode-se obter a diagonal média diretamente da fórmula da área.

$$D = \sqrt{2 \times Area} \quad (19)$$

Sendo novamente que,

$$Area = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l B(i, j) \quad (20)$$

Onde $B(i,j)$ corresponde a um *pixel* preto da imagem.

2.4.2.3. Perímetro

Consiste em obter a diagonal média a partir da detecção do perímetro da área impressa. Para tanto, o algoritmo identifica e contabiliza os *pixels* pertencentes ao contorno e obtém a diagonal média diretamente da fórmula do perímetro.

$$D = \frac{P\sqrt{2}}{4} \quad (21)$$

Sendo que o perímetro é obtido contabilizando-se os pontos 4-conectados pertencentes à borda, isto é,

$$P_4 = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^l B(i, j) | V_8(B) = 255 \quad (22)$$

Onde B corresponde a um *pixel* preto da imagem e $V_8(B)$ os vizinhos 8-conectados de B.

2.4.2.4. Vértices do perímetro

O método denominado Vértices do Perímetro (VP) consiste em obter as diagonais a partir da identificação dos vértices do perímetro da área impressa. O algoritmo envolve as seguintes etapas: Utilização do algoritmo desenvolvido para identificar e armazenar os *pixels* pertencentes ao contorno da área impressa, usado na metodologia de extração do diâmetro pelo método TPE.

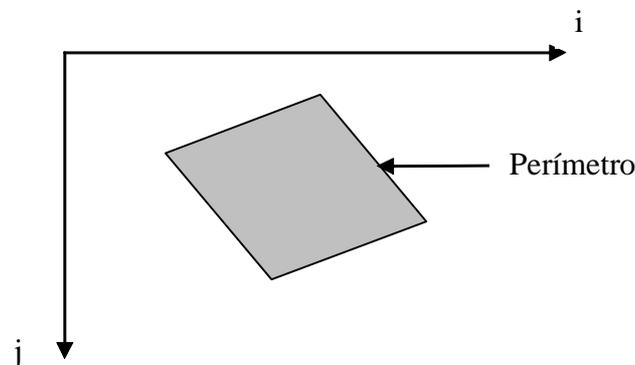


Figura 13 – Detecção do Perímetro

Geração de um paralelogramo a partir de quatro vértices, tomando como base um elemento qualquer (randômico)

do vetor de coordenadas do perímetro, e mais três pontos equidistantes em termos de posicionamento no vetor (Fig. 14). A

partir da Fig. 15 são extraídas as distâncias entre cada *pixel* pertencente ao perímetro perpendicularmente ao lado mais próximo do paralelogramo. Os

vértices são determinados a partir do cálculo das quatro maiores distâncias (Fig. 16).

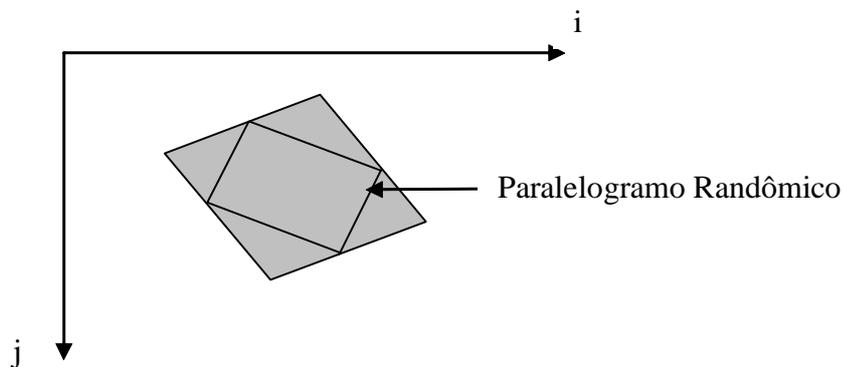


Figura 14 – Inserção de um paralelogramo i dômico.

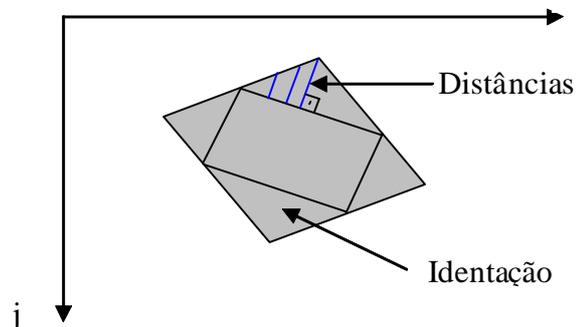


Figura 15– Cálculo das Distâncias perpendiculares

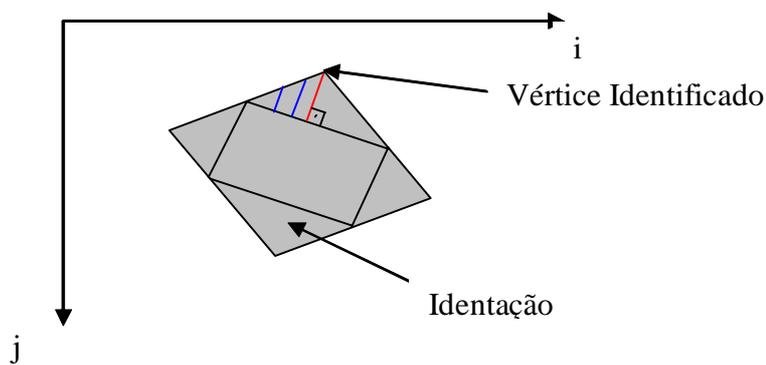


Figura 16 – Identificação dos Vértices pelas distâncias maiores

Com o objetivo de eliminar possíveis erros em virtude da diferença de inclinação entre o paralelogramo e a idetação, são gerados novos paralelogramos com inclinações

diferentes a partir do vetor de coordenadas, conforme apresentado no passo 2, de forma a se determinar o conjunto de quatro pontos que mais caracterizam as diagonais, isto é, com maiores distâncias.

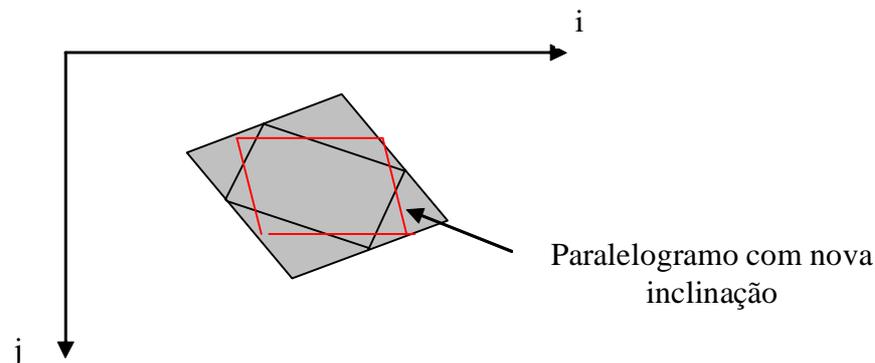


Figura 17 – Identificação de vértices através de paralelogramos com inclinações diferentes

E finalmente, cálculo da diagonal média a partir das coordenadas dos vértices identificados.

3. RESULTADOS

As técnicas apresentadas foram implementadas e aplicadas em imagens fornecidas pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT), juntamente com os valores de conversão obtidos através da digitalização de escalas para cada faixa de ampliação. Estas imagens foram obtidas a partir de ensaios de dureza de blocos-padrão e foram capturadas de diversas situações de impressões de dureza: polidas, com defeito, riscos e artefatos. Algumas imagens foram fornecidas com os seus respectivos valores nominais certificados pelos blocos-padrão e outras foram fornecidas apenas com os valores de dureza obtidos pelo analisador de imagens do INT. Os valores de conversão fornecidos para as ampliações de 200x, 100x e 50x são respectivamente 200/237, 200/117 e 200/59 $\mu\text{m}/\text{pixels}$.

3.1. Dureza Brinell

Para dureza Brinell, as imagens utilizadas são de ensaios cuja carga aplicada foi de 187.5 kgf, diâmetro da esfera igual a 2,5 mm e ampliação de 50x. Os valores de dureza correspondem aos valores nominais de diâmetro de 679, 936 e 1400 μm .

É importante lembrar que resultados visuais satisfatórios podem não significar resultados expressivos em um sistema de medição. As tabelas seguintes destacam uma comparação dos erros obtidos com as técnicas de visão desenvolvidas: Diferença de Coordenadas (DC); Área (A); Perímetro (P) e Três Pontos Equidistantes (TPE). Os valores verdadeiros (VV) consistem nos valores dos diâmetros certificados dos blocos-padrão. As tabelas 1 a 3 apresentam resultados onde o pré-processamento utilizado foi o definido como padrão. Este pré-processamento consiste na aplicação de: filtro passa-baixa 3x3; *thresholding* global 25%; filtro mediana de raio 9 e preenchimento morfológico.

Tabela 1 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=679 μm (*Thresholding* Global = 25%)

	Diâmetro (μm)	Erro (%)
DC	688,1	1,25
A	686,7	1,04
P	747,7	10,02
TPE	683,9	0,63
VV	679,6	-

Tabela 2 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=936 μ m (*Thresholding* Global = 25%)

	Diâmetro (μ m)	Erro (%)
DC	933,9	-0,26
A	936,7	0,04
P	843,8	-9,88
TPE	933,7	-0,28
VV	936,3	-

Tabela 3 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=1400 μ m (*Thresholding* Global = 25%)

	Diâmetro (μ m)	Erro (%)
DC	1308,5	-6,27
A	1316,7	-5,69
P	1202,0	-13,90
TPE	1313,9	-5,89
VV	1396,1	-

As tabelas 4 a 6 apresentam resultados das imagens cujo pré-processamento é baseado naquele utilizado em imagens Vickers, isto é, o

thresholding modal e o filtro mediana antes do preenchimento morfológico e do algoritmo 4-conectado.

Tabela 4 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=679 μ m (*Thresholding* Modal)

	Diâmetro (μ m)	Erro (%)
DC	671,2	-1,24
A	672,5	-1,04
P	604,2	-11,09
TPE	669,6	-1,47
VV	679,6	-

Tabela 5 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=936 μ m (*Thresholding* Modal)

	Diâmetro (μ m)	Erro (%)
DC	927,1	-0,98
A	929,6	-0,71
P	835,2	-10,80
TPE	926,9	-1,00
VV	936,3	-

Tabela 6 - Valores dos diâmetros e erros obtidos - Brinell D=1400 μ m (*Thresholding* Modal)

	Diâmetro (μ m)	Erro (%)
DC	1411,9	1,13
A	1408,3	0,87
P	1271,1	-8,95
TPE	1405,9	0,70
VV	1396,1	-

Apesar de ter sido feito posteriormente, é importante ressaltar, que o pré-processamento baseado no definido para dureza Vickers apresentou bons resultados para dureza Brinell. Mesmo não se obtendo os menores erros, neste caso, observa-se uma maior estabilidade, uma vez que se percebe uma menor variação nos valores dos erros em relação às três faixas de dureza, o que não ocorreu com o pré-processamento definido como padrão.

Observando-se as tabelas apresentadas, pode-se destacar que a metodologia de extração do diâmetro pela área (A) e pelo método dos Três Pontos Equidistantes (TPE) são os que apresentam melhores resultados para ensaios Brinell independente do pré-processamento. Entretanto, ambos os métodos apresentam uma oscilação em relação à faixa de valor de dureza.

Também pode-se observar nos resultados apresentados, que o método do perímetro apresenta maior erro para todos os pré-processamentos. Este fato ocorre devido à grande influência das

irregularidades presentes nos contornos das marcas de identações (Mendes e Leta, 2003).

3.2. Dureza Vickers

Para ensaios de dureza Vickers, as imagens apresentadas na figura 3.7 (a), (b) e (c), são referentes a uma carga aplicada de 10 kgf, com ampliações variando respectivamente de 200x, 100x e 50x, de um bloco padrão com valor nominal de dureza correspondente a HV 833.

A seguir, apresentam-se as tabelas com os resultados da metodologia aplicada a ensaios Vickers, destacando novamente uma comparação dos erros obtidos com as técnicas de visão desenvolvidas: Diferença de Coordenadas (DC); Área (A); Perímetro (P) e Vértices do Perímetro (VP). Os valores verdadeiros (VV) consistem nos valores das diagonais certificadas dos blocos-padrão. Considerando como pré-processamento padrão utilizado o *thresholding* modal e preenchimento morfológico.

Tabela 7 - Valores das diagonais e erros obtidos - Vickers HV833 (Amp. = 200x)

	Diag. (μm)	Erro (%)
DC	143,53	3,8
A	140,14	6,07
P	113,97	23,61
VP	143,57	3,77
VV	149,2	-

Tabela 8 - Valores das diagonais e erros obtidos - Vickers HV833 (Amp. = 100x)

	Diag. (μm)	Erro (%)
DC	141,9	4,89
A	142,81	4,28
P	106,37	28,71
VP	142,01	4,82
VV	149,2	-

Tabela 9 - Valores das diagonais e erros obtidos - Vickers HV833 (Amp. = 50x)

	Diag. (μm)	Erro (%)
DC	138,94	-6,88
A	132,29	-11,33
P	103,07	-30,92
VP	132,49	-11,20
VV	149,2	-

Para dureza Vickers, observa-se que o erro diminui para imagens com maior ampliação e que as metodologias de extração da diagonal pelo método da área (A) e dos vértices do perímetro (VP) apresentaram resultados pouco estáveis, ou seja, observa-se uma grande variação do erro para ampliações diferentes. O método DC apresentou melhores resultados.

Novamente pode-se observar pelos resultados apresentados, que o método do perímetro apresenta maior erro devido à influência das irregularidades presentes nos contornos das marcas de identações.

4. METODOLOGIA PADRÃO

Em geral, as informações, utilizadas em tomadas de decisões de qualquer atividade, são medidas relacionadas com o objeto em estudo. Não é difícil observar que em um sistema automatizado, decisões são tomadas segundo um determinado critério que nem sempre convergem para a obtenção do melhor resultado. Isto é, quando se opta pela automatização, supõe-se que o sistema tomará decisões que satisfazem àquele usuário que não tem conhecimento suficiente para escolher a metodologia que melhor caberia ao seu caso em particular.

Em qualquer sistema de medição, as decisões são tomadas com foco na qualidade e credibilidade da medida que é resultado de um processo de medição, que determina a sua incerteza. Em função da impossibilidade da obtenção da incerteza dos resultados obtidos, a idéia é definir uma metodologia padrão para medição de dureza utilizando as tabelas de erros apresentados com o uso de elementos de teoria da decisão e teoria dos jogos.

A teoria dos jogos aplica-se quando as conseqüências de uma decisão não dependem apenas da decisão tomada, mas depende também de fatores não controlados pelo decisor, simbolizados pela figura de um jogador oponente. Na teoria dos jogos clássica, o oponente

também toma decisões que maximizam os seus ganhos. No caso em estudo, tem-se na verdade um jogo de um só jogador. Este tipo de jogo apresenta, em princípio, pouco interesse, já que o jogador único limita-se a maximizar os seus ganhos. No entanto, no presente caso, o jogador não sabe quais as conseqüências de suas decisões. Esta situação é análoga à do jogo de dois jogadores com soma nula, onde a natureza (ou, no presente caso, o material cuja dureza se quer medir) é o oponente, cujas decisões não são conscientes.

Neste caso, como o operador, ou primeiro jogador, não sabe qual o melhor método a ser usado, podendo então aplicar os resultados da teoria dos jogos, em particular o uso de estratégias conservadoras. Como o oponente não reage às estratégias, não tem sentido falar em jogo com repetição nem estratégias mistas.

Para se decidir por uma metodologia padrão para medição de dureza com base nos resultados anteriormente apresentados, apresenta-se uma comparação entre a estratégia *minmax* e a estratégia do menor arrependimento. A utilização apenas do *minmax* como estratégia seria uma atitude conservadora clássica, uma vez que com esta espera-se decidir pela menor perda entre as maiores de uma determinada matriz de perdas. É uma estratégia que garante que, se tudo correr mal, o resultado da medição não será mau.

Portanto, a estratégia “*minmax*” consiste em escolher uma metodologia, determinando-se aquela que obtém o menor erro entre os maiores erros obtidos pelo conjunto de metodologias, e a estratégia de “menor arrependimento” consiste em escolher a metodologia em que, para o pior caso, o usuário se arrependerá menos com o erro do resultado obtido, isto é, que objetiva decidir pelo método em que, para uma dada imagem de dureza, o usuário se arrependerá menos de ter escolhido um método em detrimento de outro que daria um melhor resultado com o erro obtido.

Dada uma matriz de pagamento, que é o conjunto de valores absolutos que um determinado jogador tem que pagar dependendo da estratégia utilizada, o método *minmax* resume-se em determinar os maiores valores para cada jogador e posteriormente indicar a estratégia cujo maior valor é o menor entre os demais. Por outro lado, o método do menor arrependimento (o método de menor custo da oportunidade perdida), consiste na aplicação do método *minmax* em uma matriz auxiliar, que é obtida a partir da matriz de perdas, isto é, a matriz auxiliar é resultante da diferença entre cada valor e o menor valor em cada estratégia. A tabela de erros que relaciona as metodologias desenvolvidas com os casos apresentados, faixa de dureza ou grau de ampliação, será a matriz de pagamentos, que na verdade são perdas, e maximizar o pagamento neste caso implica em obter o menor erro.

Então, supondo uma matriz de erros M, com 3 linhas (definidas pelas metodologias desenvolvidas) e 3 colunas (definidas por três situações, como ampliação 200x, 100x e 50x), composta pelos seguintes elementos:

$$M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Para determinar a metodologia padrão segundo a estratégia *minmax*, primeiro determina-se o vetor dos maiores erros:

$$MaE = |b_1 \ b_2 \ b_3| \text{ no qual,}$$

$$b_1 = \text{maior valor entre } a_{11}, a_{12} \text{ e } a_{13}$$

$$b_2 = \text{maior valor entre } a_{21}, a_{22} \text{ e } a_{23}$$

$$b_3 = \text{maior valor entre } a_{31}, a_{32} \text{ e } a_{33}$$

Em seguida, decide-se pelo método cujo valor de b é o menor.

Para determinar a metodologia padrão segundo o critério Menor Arrependimento, primeiro determina-se o vetor dos menores erros:

$$MeE = |c_1 \ c_2 \ c_3| \text{ no qual,}$$

$$c_1 = \text{menor valor entre } a_{11}, a_{21} \text{ e } a_{31}$$

$$c_2 = \text{menor valor entre } a_{12}, a_{22} \text{ e } a_{32}$$

$$c_3 = \text{menor valor entre } a_{13}, a_{23} \text{ e } a_{33}$$

Em seguida, determinam-se os elementos da matriz auxiliar:

$$AUX = \begin{vmatrix} (a_{11} - c_1) & (a_{12} - c_2) & (a_{13} - c_3) \\ (a_{21} - c_1) & (a_{22} - c_2) & (a_{23} - c_3) \\ (a_{31} - c_1) & (a_{32} - c_2) & (a_{33} - c_3) \end{vmatrix}$$

E finalmente, aplica-se o método *minmax* na matriz AUX para determinação da metodologia padrão, calculando as maiores diferenças para cada metodologia, que são os maiores valores para cada linha da matriz AUX e escolhendo a metodologia cujo valor é o menor entre os maiores encontrados.

É importante ressaltar que, o método *minmax* é fundamental, pois mesmo que não seja utilizado como uma estratégia independente, ele faz parte das etapas do método do menor arrependimento.

4.1. Metodologia Padrão para Dureza Brinell

Como foi apresentado resultados referentes às duas formas de pré-processamento para as imagens de dureza Brinell, a aplicação das estratégias *minmax* e menor arrependimento foi feita separadamente.

Isto é, primeiro, apresenta-se a aplicação da teoria dos jogos para os erros obtidos com o pré-processamento definido como padrão e depois para o pré-processamento baseado no utilizado para dureza Vickers.

Portanto, dada a matriz de perdas apresentada na tabela 10, determina-se pelo método *minmax* que a metodologia área é a padrão para extração do diâmetro, pois obtém-se o menor erro (5,69) entre o conjunto dos maiores erros apresentados na tabela 11.

Por outro lado, pelo método do menor arrependimento, identifica-se primeiro os menores valores para cada faixa de dureza (Tab. 12).

Tabela 10 – Matriz de perdas referente aos valores absolutos dos erros obtidos para as três faixas de dureza utilizando o pré-processamento definido como padrão (*Thresholding* Global 25%)

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	1,25	0,26	6,27
A	1,04	0,04	5,69
P	10,02	9,88	13,90
TPE	0,63	0,28	5,89

Tabela 11 – Identificação do método a partir do menor valor (em negrito) entre os maiores valores (em itálico) da matriz de perdas apresentada na tabela 10

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	1,25	0,26	<i>6,27</i>
A	1,04	0,04	<i>5,69</i>
P	10,02	9,88	<i>13,90</i>
TPE	0,63	0,28	<i>5,89</i>

Tabela 12 – Identificação dos menores valores (em itálico) para cada faixa de dureza

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	1,25	0,26	6,27
A	1,04	<i>0,04</i>	<i>5,69</i>
P	10,02	9,88	13,90
TPE	<i>0,63</i>	0,28	5,89

Em seguida determina-se a matriz auxiliar a partir da diferença entre cada

elemento e o menor valor para cada coluna (Tab. 13).

Tabela 13 – Matriz auxiliar obtida a partir da matriz de perdas apresentada na tabela 10.

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	0,62	0,22	0,58
A	0,41	0,0	0,0
P	9,39	9,84	8,21
TPE	0,0	0,24	0,2

Finalmente, a metodologia dos três pontos equidistantes (TPE) é indicada como padrão para extração do

diâmetro após a aplicação do método *minmax* na matriz auxiliar (Tab. 14).

Tabela 14 – Identificação do método a partir da aplicação da estratégia *minmax* matriz apresentada na tabela 14.

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	<i>0,62</i>	0,22	0,58
A	<i>0,41</i>	0,0	0,0
P	9,39	<i>9,84</i>	8,21
TPE	0,0	<i>0,24</i>	0,2

Para os resultados obtidos com o pré-processamento baseado no que foi utilizado para dureza Vickers, a matriz de perdas apresenta-se na tabela 15. Novamente determina-se pelo método

minmax que a metodologia área é a padrão, pois se obtém o menor erro (1,04) entre o conjunto dos maiores erros apresentados na tabela 16.

Tabela 15 - Matriz de perdas referente aos valores absolutos dos erros obtidos para as três faixas de dureza utilizando pré-processamento baseado no utilizado para dureza Vickers (*Thresholding Modal*)

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	1,24	0,98	1,13
A	1,04	0,71	0,87
P	11,09	10,80	8,95
TPE	1,47	1,00	0,70

Tabela 16 – Identificação do método a partir do menor valor (em negrito) entre os maiores valores (em itálico) da matriz de perdas apresentada na tabela 15.

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	<i>1,24</i>	0,98	1,13
A	<i>1,04</i>	0,71	0,87
P	<i>11,09</i>	10,80	8,95
TPE	<i>1,47</i>	1,00	0,70

Pelo método do menor arrendimento, os menores valores para cada faixa de dureza são identificados na tabela 17.

Em seguida a matriz auxiliar é obtida a partir da diferença entre cada

elemento e o menor valor para cada coluna (Tab. 18).

E finalmente, a metodologia da área (A) é novamente indicada como padrão para extração do diâmetro após a aplicação do método *minmax* na matriz auxiliar (Tab. 19).

Tabela 17 – Identificação dos menores valores (em itálico) para cada faixa de dureza

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	1,24	0,98	1,13
A	<i>1,04</i>	<i>0,71</i>	0,87
P	11,09	10,80	8,95
TPE	1,47	1,00	<i>0,70</i>

Tabela 18 – Matriz auxiliar obtida a partir da matriz de perdas apresentada na tabela 17.

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	0,2	0,27	0,43
A	0,0	0,0	0,17
P	10,05	10,09	8,25
TPE	0,43	0,29	0,0

Tabela 19 – Identificação do método a partir da aplicação da estratégia *minmax* matriz apresentada na tabela 18.

	D= 679	D= 936	D= 1400
DC	0,2	0,27	<i>0,43</i>
A	0,0	0,0	<i>0,17</i>
P	10,05	<i>10,09</i>	8,25
TPE	<i>0,43</i>	0,29	0,0

Observa-se que, para alguns casos, a estratégia *minmax* pode decidir

pela mesma metodologia padrão que a estratégia menor arrendimento.

Quando isto não acontece, observa-se nas tabelas apresentadas, que se um corpo de prova tiver sempre o maior erro, mesmo que a diferença seja pequena, ele determinará o método a ser usado com a estratégia *minmax*. Portanto, o método do menor arrependimento é mais indicado, principalmente se forem feitas várias medições.

4.2. Metodologia padrão para Dureza Vickers

Aplicando a teoria dos jogos aos resultados apresentados para dureza Vickers, tem-se a matriz de perdas com os valores absolutos dos erros apresentada na tabela 20.

Pelo método *minmax*, a metodologia que determina a dureza através da diferença de coordenadas (DC) é a padrão, pois o valor (6,88) é o menor entre o conjunto dos maiores valores apresentados na tabela 22.

Tabela 20- Matriz de perdas referente aos valores absolutos dos erros obtidos para as três faixas de ampliação (Dureza Vickers HV 833)

	50x	100x	200x
DC	6,88	4,89	3,8
A	11,33	4,28	6,07
P	30,92	28,71	23,61
VP	11,20	4,82	3,77

Tabela 21 - Identificação do método a partir do menor valor (em negrito) entre os maiores valores (em itálico) da matriz de perdas apresentada na tabela 20

	50x	100x	200x
DC	6,88	4,89	3,8
A	11,33	4,28	6,07
P	30,92	28,71	23,61
VP	11,20	4,82	3,77

Aplicando a estratégia do menor arrependimento às metodologias apresentadas para medição de dureza Vickers, têm-se os menores valores para cada faixa de dureza identificados na tabela 22. Novamente a matriz auxiliar é

obtida a partir da diferença entre cada elemento e o menor valor para cada coluna (Tab. 23).

Tabela 22 – Identificação dos menores valores (em itálico) para cada faixa de ampliação

	50x	100x	200x
DC	6,88	4,89	3,8
A	11,33	4,28	6,07
P	30,92	28,71	23,61
VP	11,20	4,82	3,77

Tabela 23 – Matriz auxiliar obtida a partir da matriz de perdas apresentada na tabela 20.

	50x	100x	200x
DC	0,0	0,61	0,03
A	4,45	0,0	2,3
P	24,04	24,43	19,84
VP	4,32	0,54	0,0

E finalmente, a metodologia da diferença de coordenadas (DC) é indicada como padrão para extração da diagonal

após a aplicação do método *minmax* na matriz auxiliar (Tab. 23).

Tabela 24 – Identificação do método a partir da aplicação da estratégia *minmax* matriz apresentada na tabela 23.

	50x	100x	200x
DC	0,0	0,61	0,03
A	4,45	0,0	2,3
P	24,04	24,43	19,84
VP	4,32	0,54	0,0

Para imagens referentes à dureza Vickers, ambas as estratégias decidiram pela metodologia diferença de coordenadas (DC). Conseqüentemente, valem as mesmas considerações feitas anteriormente sobre escolha da metodologia. Ressalta-se que as escolhas feitas levaram em consideração os corpos de prova disponíveis. Para uma decisão industrial, vários corpos de prova deveriam ser testados antes da escolha do método padrão.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta as principais etapas de um sistema para medição automática de idetações, obtidas em ensaios de dureza Brinell e Vickers, que inclui desde a etapa de pré-processamento até a etapa final de análise da imagem. A maior dificuldade em se criar um método automático, sem interferência do operador, se refere às diferentes qualidades de imagens obtidas em ensaios.

Como pode ser observado nos resultados apresentados, o pré-processamento apresenta grande influência nos resultados obtidos. Logo, a escolha das técnicas de pré-processamento a serem adotadas em um sistema automático de medição, consiste em uma etapa fundamental para a geração de bons resultados. Por outro lado, a escolha inadequada pode levar a acréscimos ou redução do número de *pixels* na impressão e, conseqüentemente, na extração incorreta do diâmetro e/ou diagonais das idetações. Cabe ressaltar que uma dada etapa de pré-

processamento, utilizada em uma determinada aplicação, pode impossibilitar a obtenção de resultados em outras. Portanto, a padronização do pré-processamento, em um único procedimento, de um sistema com mais de uma aplicação, mesmo que semelhantes, pode restringir a qualidade dos resultados.

Logo, o estudo e a busca por diferentes tipos de filtros e algoritmos, para tratamento de imagens em geral, devem ser contínuos para se obter melhores resultados em sistemas automáticos de medição por Visão Computacional. Neste contexto, para obter melhores resultados, vêm sendo desenvolvidas outras técnicas de processamento e análise das imagens aplicadas a ensaios de dureza.

Em relação às metodologias para extração do diâmetro e diagonais apresentadas, verifica-se que o método do perímetro apresenta o maior erro em todos os casos. Isto se deve ao fato que qualquer irregularidade na borda contribui para o aumento e/ou diminuição da borda da indetação. Estas alterações podem ocorrer em função das técnicas de pré-processamento utilizadas, que apesar de melhorarem a imagem tornando possível sua análise, prejudicam principalmente a avaliação do perímetro.

De acordo com os resultados apresentados, também é importante destacar que, para dureza Vickers, as metodologias apresentam comportamentos distintos para cada faixa de ampliação, entretanto, para dureza Brinell, no pré-processamento definido como padrão, isto é, que utiliza o

thresholding global, todas as metodologias apresentam melhores resultados na faixa de dureza intermediária (HB 936). No pré-processamento baseado no utilizado no ensaio Vickers, isto é, que utiliza o *thresholding* modal, as metodologias também apresentam comportamentos distintos para cada faixa de dureza.

Analisando os resultados obtidos quanto a qualidade, observa-se que alguns deles, se comparados com outros sistemas de medição convencionais (Pires et al, 2001), apresentam erros melhores para alguns casos e piores em outros. Obter erros pequenos, mesmo que não seja para todos os casos, é importante como resultado satisfatório e como motivação para se desenvolver um método automático de medição de indentações, onde se objetiva minimizar erros decorrentes do operador, uma vez que uma determinada metodologia de extração do diâmetro ou da diagonal, para uma mesma imagem e um mesmo pré-processamento, não apresenta variação em seus resultados. O cálculo da incerteza é fundamental e deve ser feito para garantir credibilidade aos resultados. Para tal, deve ser feito um levantamento das possíveis influências externas do sistema apresentado em diversas análises para diferentes condições de processos e diferentes amostras.

Num sistema automático real, o método do menor arrependimento é bastante útil caso sejam feitas medidas seqüências. A primeira medida seria feita pelo método obtido pelo uso da estratégia escolhida. Com base nas medidas então adquiridas, o próprio sistema escolheria os métodos para uma segunda medição, esta definitiva.

Portanto, avançar no estudo dos erros envolvidos no processo através da análise de incertezas, principalmente os relativos a imagens digitalizadas, adicionado ao desenvolvimento de outras metodologias de pré-processamento e extração de características, abre novas portas para se adquirir novas tecnologias a serem utilizadas em medição por imagens.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERJ, pelo fomento ao projeto temático de pesquisa intitulado Metrologia baseada em Visão Computacional, ao CNPq (processo 301095/2003-5) e, ao INT pelas imagens dos ensaios de dureza de blocos padrão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Facon, J. (1996). Morfologia Matemática: Teoria e exemplos, UC-PUC, Curitiba-Brasil.
- Gomes, J. e Velho, L. (1994). Computação Gráfica :Imagem. INPA-SBM, Rio de Janeiro, 1rd edition.
- Gonzales, R. W., R. (1993). Digital Image Processing. Addison-Wesley, 1rd edition.
- Heijden, F. V. (1994). Image Based Measurement Systems, John Wiley & Sons, NY.
- Jain, R. et al, Machine Vision, McGraw-Hill International editions, 1995.
- Mendes, V. B., Leta, F. R. (2003). Automatic Measurement of Brinell and Vickers Hardness Using Computer Vision Techniques, XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia.
- Mendes, V. B., Leta, F. R.. (2002). Metodologia de Medição Automática de Dureza Brinell por Meio de Técnicas de Visão Computacional, CONEM, Paraíba, Brasil.
- Nascimento, J. L. et al (2002). Expressão da Incerteza de Medição da Dureza Vickers - Parâmetros Relevantes, CONEM, Paraíba, Brasil.
- Pires, F. et al (2001). Comparison Between Different Methods for Measurement of Brinell Hardness Indentation, Instituto Nacional de Tecnologia, Metrology, Paris, France.