

Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza Vickers

BRUNO FILIPE BRONZE DA SILVA

Novembro de 2015

“Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza *Vickers*”

Bruno Filipe Bronze da Silva



Departamento de Física

Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Porto, 2015

Dissertação para obtenção de grau de Mestre

Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Candidato: Bruno Filipe Bronze da Silva, nº 1130019, 1130019@isep.ipp.pt

Orientação científica: Joaquim Fernando Almeida Alves, jaa@isep.ipp.pt



Departamento de Física

Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Porto, 2015

À minha esposa Rosário, e aos meus filhos Bruno e Francisco;

Resumo

O ensaio de dureza, e mais concretamente o ensaio de micro dureza *Vickers*, é no universo dos ensaios mecânicos um dos mais utilizados quer seja na indústria, no ensino ou na investigação e desenvolvimento de produto no âmbito das ciências dos materiais. Na grande maioria dos casos, a utilização deste ensaio tem como principal aplicação a caracterização ou controlo da qualidade de fabrico de materiais metálicos.

Sendo um ensaio de relativa simplicidade de execução, rapidez e com resultados comparáveis e relacionáveis a outras grandezas físicas das propriedades dos materiais. Contudo, e tratando-se de um método de ensaio cuja intervenção humana é importante, na medição da indentação gerada por penetração mecânica através de um sistema ótico, não deixa de exibir algumas debilidades que daí advêm, como sendo o treino dos técnicos e respetivas acuidades visuais, fenómenos de fadiga visual que afetam os resultados ao longo de um turno de trabalho; ora estes fenómenos afetam a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos no ensaio.

O CINFU possui um micro durómetro *Vickers*, cuja realização dos ensaios depende de um técnico treinado para a execução do mesmo, apresentando todas as debilidades já mencionadas e que o tornou elegível para o estudo e aplicação de uma solução alternativa.

Assim, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma solução alternativa ao método ótico convencional na medição de micro dureza *Vickers*. Utilizando programação em *LabVIEW* da *National Instruments*, juntamente com as ferramentas de visão computacional (*NI Vision*), o programa começa por solicitar ao técnico a seleção da câmara para aquisição da imagem digital acoplada ao micro durómetro, seleção do método de ensaio (Força de ensaio); posteriormente o programa efetua o tratamento da imagem (aplicação de filtros para eliminação do ruído de fundo da imagem original), segue-se, por indicação do operador, a zona de interesse (*ROI*) e por sua vez são identificadas automaticamente os vértices da calote e respetivas distâncias das diagonais geradas concluindo, após aceitação das mesmas, com o respetivo cálculo de micro dureza resultante.

Para validação dos resultados foram utilizados blocos-padrão de dureza certificada (*CRM*), cujos resultados foram satisfatórios, tendo-se obtido um elevado nível de exatidão nas medições efetuadas.

Por fim, desenvolveu-se uma folha de cálculo em *Excel* com a determinação da incerteza associada às medições de micro dureza *Vickers*. Foram então comparados os resultados nas duas metodologias possíveis, pelo método ótico convencional e pela utilização das ferramentas de visão computacional, tendo-se obtido bons resultados com a solução proposta.

Palavras-Chave: Micro durómetro *Vickers*, *National Instruments - LabVIEW*, *NI Vision*, cálculo de incertezas.

Abstract

The hardness test, and more specifically the *Vickers* micro hardness test, is in the domain of mechanical tests one of the most used either in industry, education or research and product development within materials science. In most cases, the main application for this test is the characterization or quality control on metallic materials production.

Being a test relatively simple of implementation, speed and comparable outcomes and relatable to other physical magnitudes of materials properties. However, and in a case of a test procedure which human intervention is important in measuring the indentation generated by mechanical penetration through an optical system, even so it shows some weaknesses resulting therefrom, as the training of technicians and respective visual acuities, visual fatigue phenomena that affect the results over a work shift; so, these phenomena's affect the repeatability and reproducibility of results obtained in the assay.

CINFU has a conventional *Vickers* micro hardness tester, whose performance of the tests depends on trained technician for their execution, featured all the above mentioned weaknesses made this equipment eligible for the study and application of an alternative measuring solution.

So this thesis presents the development of an alternative solution to the conventional optical measuring method in the micro *Vickers* hardness test. Using LabVIEW from National Instruments software design, along with computer vision tools (NI Vision), the program starts by asking the technician to check the camera for the acquisition of digital image attached to the micro hardness tester; test method selection (test force); then the program performs the image processing (filtering application for background noise deletion from original image), it follows, indicated by the operator, the region of interest (ROI) and in turn are automatically identified the corners of the square indentation and the respective diagonal distances, decided the acceptance of clamp criteria follows the respective hardness calculation result.

For results validation were used hardness test blocks of certified reference materials (CRM) whose results were satisfactory, the measurements made achieved a high level of accuracy compared with the certified results.

Finally, a spreadsheet in Excel with the uncertainty quantification in the measurements of Vickers micro hardness was developed. After comparing the values obtained by the two methods, conventional optical method and use of computer vision tools, we obtained good results with the solution proposed in this dissertation.

Keywords: Vickers Micro hardness, National Instruments - LabVIEW, NI Vision, Uncertainty measurement.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado não seria possível sem o apoio de um conjunto de pessoas e organismos, os quais me facultaram orientação, apoio, análise crítica, disponibilidade, contributo pessoal e material, companheirismo, amizade e profissionalismo, entre outros.

Assim, e na esperança da memória não atraiçoar a lembrança de todos os quantos me apoiaram, aqui deixo o meu agradecimento:

- Ao meu orientador pedagógico o Prof. Dr. Joaquim Alves;
- Ao Departamento de Física do Instituto Superior de Engenharia do Porto e demais docentes que me acompanharam durante estes últimos dois anos;
- Ao CINFU – Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição, e mais concretamente na figura do seu responsável, a Eng^a. Helena Oliveira;
- A todos os meus colegas de Mestrado, mas em particular à Sandra Santos, ao Paulo Martelo, ao Emanuel Silva e ao Ruben Mendes, à Nádía Amaro, ao Diogo Sousa e ao Joaquim Ferreira;
- A todos os meus colegas de trabalho do CINFU;
- Aos meus familiares e amigos;

A todos o meu Obrigado!

Índice

Resumo	iv
Abstract	v
Agradecimentos	vi
Índice de imagens	ix
Índice de tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xiv
Lista de Símbolos.....	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos.....	1
1.1.1 Motivação	1
1.1.2 Objetivos.....	1
1.2 Contextualização histórica.....	2
1.3 Ensaio de Dureza	3
1.4 Ensaio de Dureza por Risco	4
1.4.1 Escala de <i>Mobs</i>	4
1.4.2 Micro dureza <i>Bierbaum</i> (K)	6
1.5 Ensaio de Dureza por Choque ou Ressalto.....	7
1.5.1 Dureza <i>Shore</i>	7
1.5.2 Dureza <i>Leeb</i> (HL)	10
1.6 Ensaio de Dureza por Penetração.....	13
1.6.1 Dureza <i>Brinell</i> (HB)	13
1.6.2 Dureza <i>Rockwell</i> (HR).....	16
1.6.3 Dureza <i>Vickers</i> (HV).....	19
1.6.4 Dureza <i>Knoop</i> (HKN).....	21
1.6.5 Ensaio de micro dureza <i>Vickers</i>	23
1.7 Erros dos sistemas.....	26
1.7.1 Erro aleatório	26
1.7.2 Erro sistemático.....	26
2 Estado da Arte.....	29
2.1 Sistema ótico.....	29
2.2 <i>Softwares</i> comerciais e/ou proprietários de medição de durezas.....	31
2.3 Cálculo da incerteza associada à medição da dureza <i>Vickers</i>	32
2.3.1 Procedimento sem desvio – (Método 1).....	33
2.3.2 Procedimento com desvio – (Método 2).....	35

3	Solução Desenvolvida.....	38
3.1	Características do micro durómetro <i>Vickers</i> utilizado.....	38
3.2	Adaptação da câmara digital.....	42
3.3	Aquisição de imagem digital.....	42
3.4	Linguagem de Programação.....	43
3.5	Calibração das Imagens	45
3.6	Medições efetuadas pelo algoritmo desenvolvido	46
4	Resultados obtidos com a solução.....	50
4.1	Validação da solução	50
4.2	Resultados obtidos.....	51
5	Conclusões	53
5.1	Conclusões.....	53
5.2	Trabalhos Futuros	54
	BIBLIOGRAFIA	55
	ANEXOS	59
	Anexo 1 – Cálculo de Incertezas – Método 1 (NP EN ISO 6507-1:2011).....	61
	Anexo 2 – Cálculo de Incertezas – Método 2 (NP EN ISO 6507-1:2011).....	62
	Anexo 3 – Certificados dos Blocos Padrões de Dureza (CRM's).....	64
	Anexo 4 – Certificado de conformidade do micro indentador Vickers.....	76
	Anexo 5 – Validação da folha de Cálculo.	77
	Anexo 6 – Resultados obtidos por medição das durezas no CRM.	78

Índice de imagens

Fig. 1 - <i>Carl Friedrich Christian Mohs</i> , Geólogo & Mineralogista Alemão (1773 – 1839), criador da Escala de <i>Mohs</i> usada nos ensaios de dureza dos minerais [3].....	4
Fig. 2 - Escala de dureza de <i>Mohs</i> criada por <i>Friedrich Mohs</i> em 1826 e respectiva relação com a dureza <i>Vickers</i> (kg/mm ²) [4].....	5
Fig. 3 – <i>Kit</i> de teste composto por um conjunto de riscadores para determinação da dureza <i>Mohs</i> . [5].....	5
Fig. 4 – Esquemática do ensaio de micro dureza de <i>Bierbaum</i> (K).	6
Fig. 5 – “Riscador”/Micro durómetro desenvolvido por <i>Bierbaum</i> . [6].....	6
Fig. 6 - <i>Albert F. Shore</i> (1876-1936) criador do esclerómetro de <i>Shore</i> . [8].....	8
Fig. 7 – Primeiros escleroscópios de <i>Shore</i> . a) Original, com tubo graduado. b) Com escala. [10]8	8
Fig. 8 – Princípio de funcionamento do escleroscópio de <i>Shore</i> . [10]	8
Fig. 9 – Esquema do princípio de funcionamento de um durómetro <i>Shore</i> . [10].....	9
Fig. 10 – Exemplo de alguns durómetros <i>Shore</i> , quer analógicos ou digitais, disponíveis no mercado. [10].....	9
Fig. 11 – Dispositivo/”Caneta” impulsora tipo D. [15].....	11
Fig. 12 – Esquemática do princípio de medição da dureza <i>Leeb</i> . [15].....	11
Fig. 13 – Aspeto do durómetro <i>Leeb</i> . (Cortesia do CINFU).	12
Fig. 14 – Vários tipos de “canetas” impulsoras. [16]	12
Fig. 15 – Blocos padrão usados na calibração dos equipamentos de dureza <i>Leeb</i> . [17]	12
Fig. 16 - <i>Johan August Brinell</i> [20], Engenheiro Metalúrgico Sueco (1849 – 1925), criador do método de ensaio de dureza <i>Brinell</i>	13
Fig. 17 – Representação esquemática do ensaio de dureza <i>Brinell</i> . [21]	14
Fig. 18 – Distribuição da carga aplicada ao longo da superfície da calote. [21]	15
Fig. 19 – Durómetro Universal da <i>EMCO-TEST</i> modelo <i>M5U-300</i> . [23]	15
Fig. 20 - <i>Stanley Prichard Rockwell</i> (1886 – 1940), criador do método de ensaio <i>Rockwell</i> . [24]	16
Fig. 21 – Um dos primeiros durómetros <i>Rockwell</i> construídos por <i>Stanley P. Rockwell</i> . [24]	17
Fig. 22 – Representação esquemática da profundidade produzida por um penetrador cónico. [27]	18
Fig. 23 – Relação entre a geometria da indentação do ensaio <i>Vickers</i> com a geometria da esfera <i>Brinell</i> . [21].....	19
Fig. 24 – Possíveis defeitos da impressão da calote. [29].....	20
Fig. 25 – Defeitos de impressão, devidos ao afundamento ou à aderência do metal em volta das faces do penetrador e respetivo efeito das diagonais e áreas da calote. [29]	21
Fig. 26 – Durómetro <i>Knoop</i> para aplicação de cargas reduzidas. [31].....	22
Fig. 27 – Geometria de um indentador de diamante <i>Knoop</i> . [31].....	22
Fig. 28 – Ensaio de micro dureza <i>Knoop</i> , ao longo da microestrutura de uma liga recozida de aço ao carbono com 1,14 %C. [31].....	23
Fig. 29 – Indentador de micro durezas <i>Vickers</i> , utilizado no equipamento do CINFU.	24
Fig. 30 – Ensaio de micro durezas <i>Vickers</i> , num aço de construção de matriz <i>ferrítico-perlítica</i> . [32]	25
Fig. 31 – Micro durómetro <i>Vickers</i> (<i>Struers-Duramin-1</i>).	25
Fig. 32 - Diagrama de <i>Ishikawa</i> com a identificação das principais fontes de erro que afetam o resultado da medição de micro dureza <i>Vickers</i>	27
Fig. 33 – Bloco de referência padrão certificado.....	28
Fig. 34 – Estrutura da cadeia metrológica para definir e propagar as escalas de dureza. [22]	32

Fig. 35 – Diagrama do micro durómetro <i>Struers® Duramin-1</i> . [51].....	38
Fig. 36 – Topo superior do durómetro com local de acoplamento para câmara vídeo e respetivo computador de saída de observação ótica ou vídeo.....	38
Fig. 37 – Conjunto de indentador, objetiva e permutador manual (“torreta”).....	39
Fig. 38 – Vista de pormenor do indentador e das duas objetivas: 40x e 50x (à esquerda e à direita respetivamente).	39
Fig. 39 – Mesa porta amostra e respetivos micrómetros de movimentação no plano em <i>x</i> e <i>y</i> .39	
Fig. 40 – Manivela de ajuste da mesa porta amostra no eixo <i>z</i>	40
Fig. 41 – Vista exterior do conjunto de ocular e micrómetro ótico.	40
Fig. 42– Medição da calote com o micrómetro do micro durómetro. [51]	40
Fig. 43– Realização do zero na leitura do micrómetro. [51].....	40
Fig. 44 – Aspeto do ecrã <i>touchscreen</i> do durómetro <i>Struers Duramin-1</i> . [52].....	41
Fig. 45 – Esquema da vista posterior do micro durómetro <i>Struers Duramin-1</i> , onde se encontram as portas de comunicação. [52].....	41
Fig. 46 – Suporte desenvolvido para fixação da câmara ao micro durómetro <i>Struers® Duramin-1</i>	42
Fig. 47 – Lente redutora com 0,65x de ampliação para sensores até 1/2” (<i>MOTIC® SMZ-18</i>).42	
Fig. 48 – Câmara digital USB, sensor CMOS de 5MP da <i>MOTIC – Moticam-5</i> . [38]	43
Fig. 49 – Câmara digital USB, sensor CCD de 3MP da <i>Lumenera – Infinity2-3</i>	43
Fig. 50 – Fluxograma da rotina de trabalho no programa desenvolvido em <i>LabVIEW</i> para medição de micro dureza <i>Vickers</i>	44
Fig. 51 – Diagrama, de blocos do VI, para aquisição e gravação das imagens.	44
Fig. 52 – Diagrama, de blocos do VI, para aquisição e ajuste dos parâmetros de BCG (<i>Brightness, Contrast e Gamma</i>).....	45
Fig. 53 – Diagrama, de blocos do VI, de medição de micro dureza <i>Vickers</i>	45
Fig. 54 – Régua micrométrica para calibração de microscópios óticos.	45
Fig. 55 – Imagem obtida da escala micrométrica de calibração, onde cada divisão da escala representa 0,01 mm (10 µm).	46
Fig. 56 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4024101.1111.	47
Fig. 57 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4976201.0613.	47
Fig. 58 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 5067401.0713.	48
Fig. 59 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4025501.1111.	48
Fig. 60 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4979001.0613.	49
Fig. 61 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4979101.0513.	49
Fig. 62 – Bloco CRM e respetiva indentação padrão situada dentro do círculo visível na figura.	50
Fig. 63 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (250±9,9) HV0,1.	64
Fig. 64 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (250±9,9) HV0,1. .65	
Fig. 65 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (544±27,9) HV0,1.	66
Fig. 66 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (544±27,9) HV0,1.67	
Fig. 67 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (893±56,1) HV0,1.	68
Fig. 68 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (893±56,1) HV0,1.69	
Fig. 69 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (255±3,0) HV2.	70
Fig. 70 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (255±3,0) HV2.	71
Fig. 71 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (542±7,5) HV2.	72
Fig. 72 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (542±7,5) HV2.	73
Fig. 73 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (865±14,4) HV2.	74
Fig. 74 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (865±14,4) HV2.	75

Fig. 75 – Cópia do certificado de inspeção de fabrico do micro indentador <i>Vickers</i> utilizado nas medições.....	76
Fig. 76 - Validação da folha de cálculo da incerteza associada às medições de micro dureza <i>Vickers</i> de acordo com o exemplo (Quadro D.1) do Anexo da NP EN ISO 6507-1:2011.....	77
Fig. 77 - Cálculo da incerteza associada às medições de micro dureza <i>Vickers</i> de acordo com o exemplo (Quadro D.1) do Anexo da NP EN ISO 6507-1:2011, realizadas ao bloco padrão (250±9,9) HV0,1.....	78

Índice de tabelas

Tabela 1 - Designação dos ensaios de dureza de acordo com a tipologia de funcionamento.	3
Tabela 2 - Ensaio de durezas <i>Mohs</i> – vantagens versus desvantagens.	5
Tabela 3 - Ensaio de durezas <i>Bierbaum</i> – vantagens versus desvantagens.	7
Tabela 4 - Ensaio de durezas <i>Shore</i> – vantagens versus desvantagens.	10
Tabela 5 – Tipologia do impulsor em função dos critérios de peso e espessura, da peça, mínimos. [15]	11
Tabela 6 - Ensaio de durezas <i>Leeb</i> – vantagens versus desvantagens.	12
Tabela 7 - Principais fatores de carga utilizados e respetivas faixas de dureza e indicações. [22]	15
Tabela 8 – Ensaio de durezas <i>Brinell</i> – vantagens versus desvantagens.	16
Tabela 9 – Escalas de dureza <i>Rockwell</i> . [26]	17
Tabela 10 - Ensaio de durezas <i>Rockwell</i> – vantagens versus desvantagens.	18
Tabela 11 - Forças de ensaio usadas no ensaio de dureza <i>Vickers</i> . [22]	20
Tabela 12 – Ensaio de durezas <i>Vickers</i> – vantagens versus desvantagens.	21
Tabela 13 - Ensaio de durezas <i>Knoop</i> – vantagens versus desvantagens.	23
Tabela 14 - Forças de ensaio usadas no ensaio de micro dureza <i>Vickers</i> . [22]	24
Tabela 15 - Ensaio de micro durezas <i>Vickers</i> – vantagens versus desvantagens.	26
Tabela 16 – Características de algumas câmaras disponíveis no mercado das marcas dos principais fabricantes de sistema de microscopia ótica.	30
Tabela 17 – Alguns dos principais fabricantes de micro durómetros <i>Vickers</i> , e a respetiva designação dos <i>softwares</i> de medição, atualmente comercializados.	31
Tabela 18 – Fatores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos ν_{ef} . [49]	33
Tabela 19 – Erro relativo máximo admissível, E_{rel} da máquina de ensaios de dureza. [50]	35
Tabela 20 – Dados sobre os blocos de dureza padrão (CRM) utilizados na validação das medições.	50
Tabela 21 – Medições efetuadas nas indentações de referência dos blocos de dureza padrão pelo <i>software</i> desenvolvido em LV.	50
Tabela 22 – Resultados de micro dureza <i>Vickers</i> obtidas por medição no micrómetro integrado no equipamento <i>Struers Duramin-1</i>	51
Tabela 23 – Resultados de micro dureza <i>Vickers</i> obtidas por medição através do algoritmo implementado no <i>software</i> LV.	51
Tabela 24 – Quadro resumo, com a comparação dos resultados obtidos entre os dois métodos de medição.	52
Tabela 25 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão.	61
Tabela 26 – Medições obtidas por medição no corpo de prova/amostra.	61
Tabela 27 – Balanço de incertezas – método 1 da NP EN ISO 6507-1:2011.	61
Tabela 28 – Medições obtidas por medição no corpo de prova/amostra.	62
Tabela 29 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão.	62
Tabela 30 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão antes e após o ensaio para calibração do micro durómetro.	62
Tabela 31 – Balanço de incertezas – método 2 da NP EN ISO 6507-1:2011.	63

Lista de Abreviaturas

ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CINFU	Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CRM	Material de referência certificado/ <i>Certified Reference Material</i>
EA	<i>European co-operation for Accreditation</i>
EN	Normalização europeia/ <i>European Normalization</i>
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
IPAC	Instituto Português de Acreditação
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Standard Organization</i>
VI	Instrumentos Virtuais/ <i>Visual Instruments – LabVIEW™</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LV	<i>LabVIEW™ - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
NBS	<i>National Bureau of Standards (Substituído pelo NIST)</i>
NI	<i>National Instruments®</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology (antigo NBS)</i>
NP	Normalização Portuguesa
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Lista de Símbolos

α	Ângulo
A	Área
C_i	Coefficiente de sensibilidade
C_p	Fator de correção geometria do penetrador <i>Knoop</i>
D	Diâmetro do indentador (esfera)
d	Diâmetro da impressão ou calote
F	Força
h	Altura
HB	Dureza <i>Brinell</i>
HKN	Micro dureza <i>Knoop</i>
HL	Dureza <i>Leeb</i>
HR	Dureza <i>Rockwell</i>
HV	Dureza <i>Vickers</i>
k	Fator de expansão
K	Micro dureza <i>Bierbaum</i>
λ	Largura do risco (<i>Bierbaum</i>)
m	Massa
n	Tamanho da amostra
ν_i	Número de graus de liberdade
ν_{eff}	Número de graus de liberdade efetivo
P	Carga ou Peso
p	Profundidade
RSS	Raiz da soma dos quadrados (<i>root-sum-square</i>)
s	Desvio-padrão
$u(x_i)$	Incerteza padrão
$u_i(y)$	Incerteza padrão $u(x_i)$ multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade (c_i)
$u_c(y)$	Incerteza padrão combinada
U	Incerteza de medição expandida
V	Volume
v_i	Velocidade de impacto
v_r	Velocidade de resalto

1 Introdução

A presente Dissertação de Mestrado, com o tema Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza *Vickers*, realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia no Instituto Superior de Engenharia do Porto, com orientação do Professor Doutor Joaquim Alves.

Serve o presente capítulo para fazer a apresentação do tema, da motivação da sua escolha, dos objetivos pretendidos com o estudo desenvolvido, da metodologia seguida e da estrutura pela qual se rege o trabalho.

1.1 Motivação e Objetivos

Neste subcapítulo definem-se a motivação do trabalho descrito nesta dissertação, bem como os seus principais objetivos.

1.1.1 Motivação

A medição de durezas através de métodos indiretos, como é o caso do ensaio de micro dureza *Vickers*, cujo resultado de dureza final é obtido pela razão entre a força (F) aplicada no penetrador e a área (A) da calote/indentação resultante da penetração no material, exige por parte dos técnicos/operadores deste tipo de equipamentos um elevado nível de treino e acuidade visual de modo a garantir uma repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos. Uma vez que este ensaio poderá ser realizado por vários técnicos, treinados e aptos para a realização dos mesmos, verifica-se com alguma regularidade discrepâncias nos valores obtidos entre pares e, no caso de múltiplas indentações/amostras, o cansaço visual vai-se apoderando dos técnicos provocando erros nas medições ao longo do turno de trabalho.

Atualmente, os fornecedores/fabricantes de equipamentos oferecem a possibilidade de serem também adquiridos sistemas integrados de determinação de dureza dos materiais por métodos automáticos, ou seja, sem a interferência do operador.

O laboratório de ensaios mecânicos do CINFU possui um micro durómetro *Vickers* convencional, pelo que se tornou elegível à aplicação de uma solução que permita melhorar o seu desempenho, e por sua vez melhorar a qualidade dos resultados obtidos e a qualidade do trabalho dos técnicos.

1.1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de captura e análise de imagem digital, que torne capaz de determinar a partir de um ensaio de dureza por penetração, num micro durómetro *Vickers*, obter o resultado final de dureza sem a interferência do fator humano.

Para tal poder-se-ão elencar alguns objetivos subjacentes ao objetivo primordial referido no parágrafo anterior e que são:

- Determinação do erro e respetiva incerteza associados às medições realizadas pelo método ótico convencional;
- Implementação de um sistema de captura, análise de imagem digital e determinação do valor de micro dureza *Vickers*;
- Determinação do erro e respetiva incerteza associados às medições realizadas pelo método de visão e cálculo computacional;
- Avaliar o potencial da solução desenvolvida através da validação dos resultados com materiais de referência.

1.2 Contextualização histórica

Com o advento da revolução industrial em finais do século XVIII, devido a motivações de carácter socioeconómicas, políticas entre outras, a demanda por novos materiais e técnicas de fabrico levaram ao desenvolvimento de equipamentos de rigor estrutural, dimensional e de qualidade cada vez mais exigentes. [1]

Até então a produção de bens e equipamentos era predominantemente de cariz artesanal (manufatura), produzidos com ferramentas rudimentares sendo elas igualmente de fabrico artesanal. Os artesãos, considerados muitas vezes de artistas, eram conhecidos pelo seu trabalho singular cujas características, pormenores de fabrico do seu trabalho, materiais utilizados, entre outros, e que assentavam muitas vezes em conhecimentos empíricos acumulados e transmitidos ao longo do tempo de geração em geração, o que os tornava conhecedores e reconhecidos mundialmente.

No entanto, e devido à produção ser fundamentalmente manufaturada, esta não conseguia dar resposta à procura, pelo que e mesmo assim, os preços praticados por esses mesmos artesãos afastavam a maioria das bolsas vazias de uma vasta população pobre e faminta, que dominava a Europa do século XVIII/XIX. Uma vez que os produtos eram produzidos como peças únicas, os custos de produção associados eram elevadíssimos pelo que explicava a razão pela qual apenas uma pequena franja da sociedade poderia almejar e alcançar tais produtos.

Devido a uma série de evoluções do ponto de vista socioeconómico que antecederam este período histórico, o paradigma produtivo teve de encontrar novas alternativas, como sendo a industrialização e por sua vez a produção mecanizada, com maior produtividade e a preços cada vez mais acessíveis, por forma a satisfazer um maior número de potenciais consumidores.

Ao abordarmos historicamente a revolução industrial não podemos deixar de referir uma das principais descobertas tecnológicas, a da máquina a vapor. Com a sua descoberta e domínio, deu-se assim início ao desenvolvimento dos caminhos-de-ferro, da construção civil e naval, da indústria, energia, entre outras áreas.

Com todo este desenvolvimento tecnológico foi necessário garantir a qualidade pelo que foram também necessárias ferramentas de caracterização e ensaio, que permitissem classificar e garantir os parâmetros de fabrico através da medição das propriedades dos materiais produzidos.

Tal como as imensas características que os materiais apresentam, também os ensaios foram-se diversificando, desde ensaios de carácter destrutivo até outros que preservam a integridade dos provetes/peças ensaiadas, como é considerado na maioria das vezes o ensaio de durezas.

1.3 Ensaio de Dureza

Ao conceito de dureza são atribuídas diferentes definições, que vão desde uma medição de resistência dos materiais a ações de origem mecânica que se exercem sobre a superfície, como sejam o desgaste, a deformação plástica, a penetração, o risco, etc..

Em ciência dos materiais, dureza é a propriedade característica de um material sólido, que expressa sua resistência a deformações permanentes e está diretamente relacionada com a força de ligação interatômica.

Ao longo dos tempos, foram desenvolvidas técnicas convencionais e expeditas para a medição e quantificação desta propriedade mecânica dos materiais.

Atualmente muitas destas técnicas encontram-se padronizadas, permitindo a sua realização de modo reprodutível em qualquer ponto do globo, com o objetivo de quantificar, de forma comparativa, esta mesma propriedade.

Ao longo dos tempos e desde que há memória e registo, várias foram as técnicas desenvolvidas, equipamentos, e por sua vez ensaios com princípios de operacionalidade também eles distintos.

Basicamente, os ensaios de dureza podem ser classificados de acordo com a sua tipologia de funcionamento. Na

Tabela 1) encontram-se indicados os ensaios mais relevantes no domínio da caracterização dos materiais e com maior expressão quer ao nível industrial quer em atividades de I&D.

Tabela 1 - Designação dos ensaios de dureza de acordo com a tipologia de funcionamento.

Tipologia de ensaio	Designação
Ensaio por Risco	Escala de <i>Mohs</i>
	Micro dureza de <i>Bierbaum</i>
Ensaio por choque ou Ressonância	Ensaio de dureza <i>Shore</i>
	Ensaio de dureza <i>Leeb</i>
	Ensaio de dureza <i>Brinell</i>
Ensaio por Penetração	Ensaio de dureza <i>Vickers</i>
	Ensaio de dureza <i>Rockwell</i>
	Ensaio de micro dureza <i>Knoop</i>
	Ensaio de micro dureza <i>Vickers</i>

1.4 Ensaios de Dureza por Risco

Historicamente, os ensaios de dureza por risco foram os primeiros a serem desenvolvidos [2]. Inicialmente pela aplicação da escala de *Mohs*, mais utilizada em mineralogia, e mais tarde pela utilização dos ensaios de micro dureza de *Bierbaum* e de *Martens* para os restantes tipos de materiais.

1.4.1 Escala de *Mohs*

A escala de *Mohs* foi criada entre 1822 e 1824, tendo sido publicada pela primeira vez na publicação em livro com a sua designação original "*Grund-Riß der Mineralogie*" (Fundamentos de Mineralogia) pelo mineralogista alemão *Carl Friedrich Christian Mohs* (

Fig. 1).

Esta escala consiste essencialmente na quantificação relativa da dureza quando comparado com dez minerais de diferentes durezas existentes na crosta terrestre.



Fig. 1 - *Carl Friedrich Christian Mohs*, Geólogo & Mineralogista Alemão (1773 – 1839), criador da Escala de *Mohs* usada nos ensaios de dureza dos minerais [3].

O ensaio de dureza por risco consiste assim num ensaio comparativo em que se determina a dureza, riscando entre si, o mineral em ensaio (amostra de ensaio ou corpo de prova) com outros de dureza conhecida (amostra padrão).

Pressupõe-se assim a existência de um conjunto de minerais de referência padrão na gama de durezas para o qual é espectável o valor da amostra a ensaiar (Fig. 3). *Carl Mohs* atribuiu valores de 1 a 10 (Fig. 2). O valor de dureza 1 foi dado ao material menos duro da escala, que é o talco, e o valor 10 dado ao diamante que é a substância mais dura conhecida na natureza [6].

Esta escala não é conveniente para os metais, uma vez que na maioria dos casos, os metais e ligas metálicas apresentam durezas na escala de *Mohs* entre 4 e 8, e para pequenas diferenças de dureza este método apresenta muito baixa resolução.

Por exemplo, um aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 *Mohs*, a mesma dureza *Mohs* de um aço temperado.

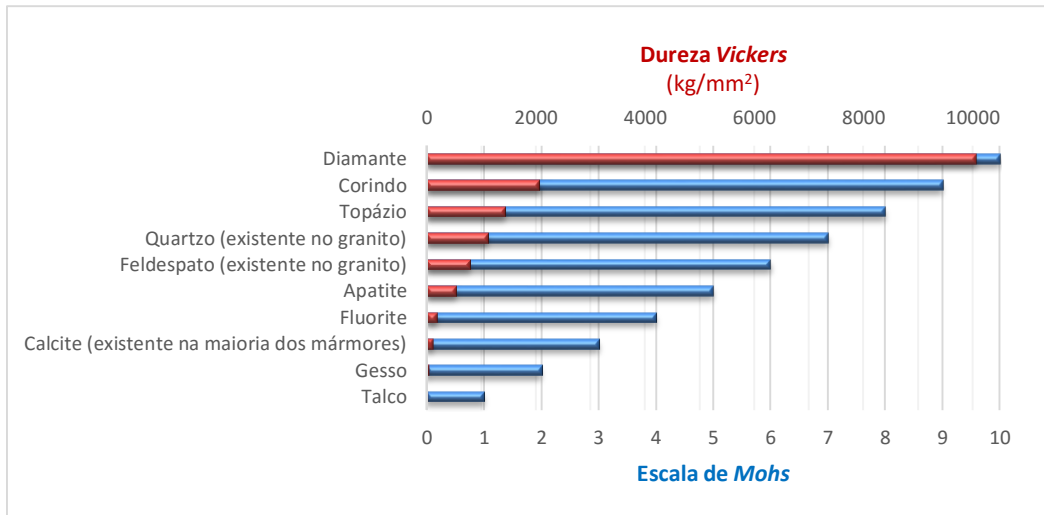


Fig. 2 - Escala de dureza de *Mohs* criada por *Friedrich Mohs* em 1826 e respectiva relação com a dureza *Vickers* (kg/mm²) [4].



Fig. 3 – *Kit* de teste composto por um conjunto de riscadores para determinação da dureza *Mohs*. [5]

Tabela 2 - Ensaio de durezas *Mohs* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rapidez de execução do ensaio; ✓ Baixo custo de investimento na aquisição do equipamento; ✓ Equipamento de fácil operação. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa aplicabilidade em materiais metálicos, sendo mais usado em minerais; ✓ Apesar de largamente usada para minerais, o processo de medição de dureza por risco é impreciso para ser utilizado nos materiais metálicos e nos polímeros. ✓ Escala de medição de baixa resolução, impedindo a diferenciação de durezas entre materiais com durezas relativamente próximas; ✓ Escala de medição não linear;

1.4.2 Micro dureza *Bierbaum* (K)

Devido à limitação na utilização da escala de *Mohs* em materiais metálicos foi desenvolvido por *Christopher H. Bierbaum* em 1923 [6], uma tecnologia baseada num de ensaio dinâmico e que na prática consistia em riscar, a uma força constante de 3 gf, a superfície da amostra com um riscador cuja extremidade deste se encontra um diamante de face quadrada e com um ângulo de 35° entre faces do poliedro.

Por fim, é medida a largura do risco (λ) em micrómetros num microscópio ótico; por aplicação da fórmula $K = \frac{10^4}{\lambda^2} [kg / mm^2]$ (1) obtém-se assim o valor de dureza do material (Fig. 4).

$$K = \frac{10^4}{\lambda^2} [kg / mm^2] \quad (1)$$

Em materiais mais duros poder-se-á utilizar uma carga de 9 gf, contudo e para efeitos de determinação da largura do risco, apenas é tido em linha de conta, metade da largura do mesmo.

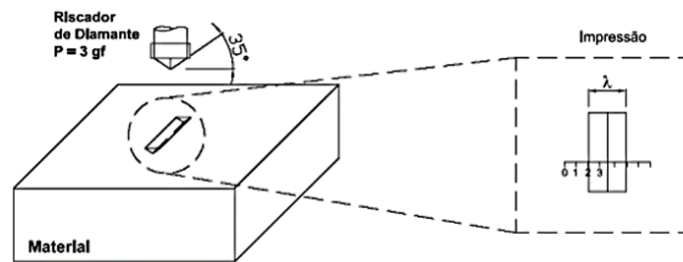


Fig. 4 – Esquemática do ensaio de micro dureza de *Bierbaum* (K).

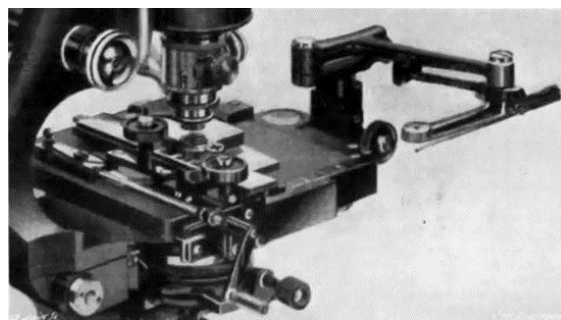


Fig. 5 – “Riscador”/Micro durómetro desenvolvido por *Bierbaum*. [6]

No entanto, este ensaio mostrou-se pouco eficaz na medição em materiais metálicos por efeito de fenómenos tribológicos que afetavam os resultados obtidos.

Este teste chegou a estar padronizado em norma de ensaio para os materiais plásticos, pela ASTM D1526 - *Method of Test for Determination of Bierbaum Scratch Hardness of Plastic Materials*, uma vez que as questões do atrito não eram tão significativas nos polímeros, no entanto esta foi retirada em 1963 [7] e substituída por outras técnicas mais expeditas e com elevado rigor metrológico.

Tabela 3 - Ensaio de durezas *Bierbaum* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<p>✓ Ensaio de dureza quantitativo ao contrário da escala <i>Mohs</i> que é essencialmente semi quantitativo e de leitura subjetiva.</p>	<p>✓ Não aplicável a todos os tipos de materiais; ✓ Sensível a fenômenos de atrito entre o penetrador e o material ensaiado; ✓ Dificuldade na obtenção de um risco de largura constante, devido à existência das fronteiras de grão nos materiais poli cristalinos, originando ressaltos no indentador e que por sua vez induzem a erros de leitura; ✓ A superfície deverá estar limpa e apresentar uma homogeneidade de modo a suportar fenômenos de arrancamento de material por efeito do arraste do riscador</p>

1.5 Ensaios de Dureza por Choque ou Ressalto

Com o objetivo de se obterem valores de dureza mais precisos e alheios de quaisquer fenômenos tribológicos (entre penetrador e a superfície da amostra), de recuperação elástica e relaxamento dos materiais após indentação, foram estudadas e desenvolvidas novas técnicas de ensaio baseadas na relação entre fenômenos de resiliência e a dureza dos materiais.

Assim, e já com esse propósito, *Martel* concebeu em 1895 [2] um teste de penetração dinâmica pela queda de um penetrador na superfície do material e medindo a marca deixada depois de saltar. O número de dureza era, por definição, igual à razão entre a energia do penetrador com o volume da cavidade.

Neste caso o princípio do método considera que o volume da impressão é proporcional ao trabalho realizado para a sua geração. O trabalho é medido pela energia cinética do pêndulo ou êmbolo utilizado. Sendo os parâmetros principais de ensaio a altura de queda do indentador (h), massa do êmbolo (m) e o volume da impressão (V) em mm^3 .

$$Dureza = \frac{m \times h}{V} \quad (2)$$

Mais tarde, conforme veremos de seguida, foram desenvolvidos métodos em que a força da gravidade é substituída pela utilização de uma mola, com características conhecidas, para a projeção e indentação do penetrador na superfície das amostras a ensaiar, como é o caso dos ensaios de dureza *Shore* e dureza *Leeb*.

1.5.1 Dureza *Shore*

Conhecida como dureza *Shore* ou escleroscópio *Shore* (Fig. 7), foi desenvolvido em 1905 pelo engenheiro e inventor norte-americano *Albert F. Shore* (Fig. 6), e é nos dias de hoje amplamente utilizado na medição da dureza de polímeros, elastómeros e borrachas.



Fig. 6 - *Albert F. Shore* (1876-1936) criador do esclerómetro de *Shore*. [8]

O princípio de funcionamento do escleroscópio *Shore* consistia numa impressão causada pela queda livre de um êmbolo. Utilizava uma barra de aço (êmbolo) de peso 2,5 N, com uma ponta padronizada (arredondada) de diamante colocada dentro de um tubo de vidro com uma escala graduada de 0 a 140, tal barra era então largada de uma altura padrão (256 mm) (Fig. 7). [9]

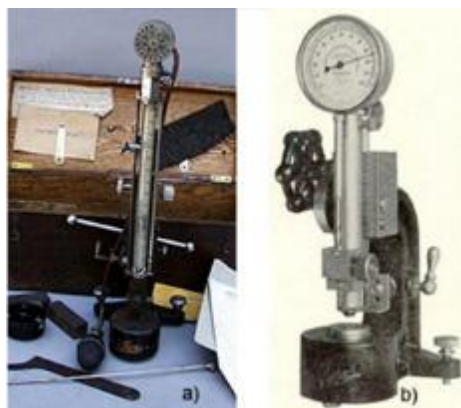


Fig. 7 – Primeiros escleroscópios de *Shore*. a) Original, com tubo graduado. b) Com escala. [10]

O valor da dureza era assim proporcional à energia consumida para formar a marca no corpo de prova e representada pela altura alcançada pelo ressalto do êmbolo (Fig. 8).

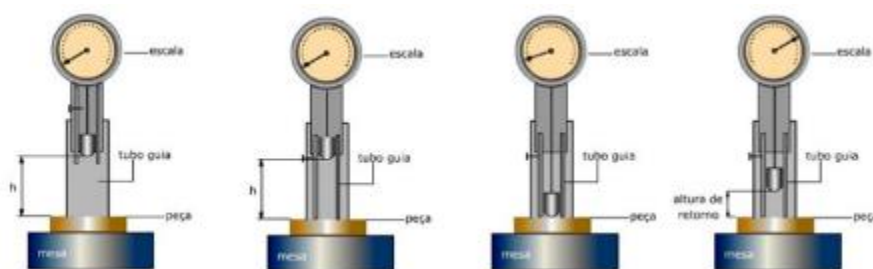


Fig. 8 – Princípio de funcionamento do escleroscópio de *Shore*. [10]

Materiais dúcteis consumiam mais energia na deformação do corpo e o êmbolo alcançava uma altura menor no retorno, indicando uma dureza mais baixa.

Contudo, este método era extremamente sensível a algumas questões operacionais como sendo:

- 1) O material a ser testado deve ser firmemente apoiado para evitar vibrações que podem alterar a leitura;

- 2) O êmbolo deve cair e retornar na direção vertical, portanto a superfície a testar deve estar exatamente na direção horizontal;
- 3) A superfície a medir deve ser lisa. Superfície rugosa pode absorver o impacto do êmbolo e fornecer um valor menor do que o real;
- 4) O impacto sobre a peça causa endurecimento localizado sobre a área de contato. O impacto só deve ser feito uma vez sobre um mesmo ponto.

Uma vez que o esclerômetro apresentava alguns problemas quanto à sua fiabilidade, com o desenvolvimento do durômetro de *Shore*, uma mola passou a substituir a força da gravidade na projeção do indentador.

-O material é então submetido a uma pressão aplicada através de uma mola calibrada que atua sobre o indentador, que pode ser esférico ou cônico. Um dispositivo de indicação fornece a profundidade de indentação. O valor da dureza é dado pela profundidade da penetração (Fig. 9).

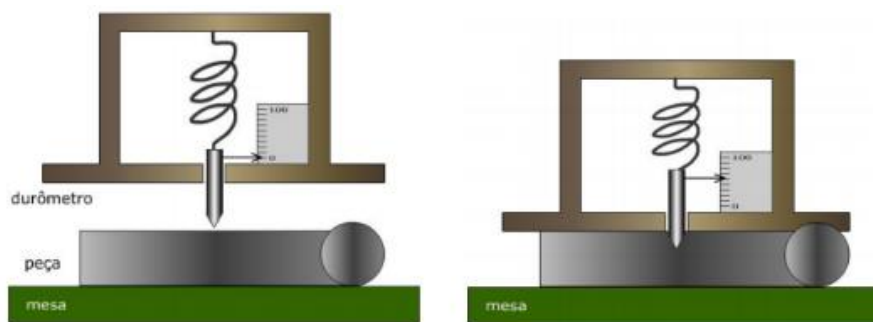


Fig. 9 – Esquema do princípio de funcionamento de um durômetro *Shore*. [10]

Existem diversas escalas utilizadas em materiais com propriedades diferentes. As mais comuns são a A e D, sendo a A utilizada em plásticos macios e a D em plásticos rígidos. No entanto, a ASTM D 2240 [11] contém 12 escalas, dependentes da intenção de uso, sendo elas: A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S e R. Cada escala resulta em um valor entre 0 e 100, sendo que valores maiores indicam um material mais duro.



Fig. 10 – Exemplo de alguns durômetros *Shore*, quer analógicos ou digitais, disponíveis no mercado. [10]

Tabela 4 - Ensaio de durezas *Shore* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Equipamento portátil e de fácil utilização; ✓ Possibilidade de medir dureza de peças de grandes dimensões que não podem ser colocadas em máquinas de dureza por penetração; ✓ A impressão <i>Shore</i> é pequena pelo que poderá ser utilizada para medir peças acabadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deve ser executado com o tubo perfeitamente na vertical; ✓ Muito sensível ao acabamento superficial; ✓ Medições em peças pouco espessas são sensíveis ao tipo de apoio; ✓ Peças pouco espessas ou de baixa rigidez podem entrar em vibração com o impacto., ocasionando erros de leitura.

1.5.2 Dureza *Leeb* (HL)

O método de dureza dinâmico por ressalto *Leeb* foi inventado em 1973 pelo cientista suíço *Dietmar Leeb* enquanto colaborador da empresa *Proceq*. [12] Em 1975 foi lançado o primeiro equipamento comercial com a designação *Equotip* [13].

Uma das principais características deste ensaio é: a elevada portabilidade e o carácter destrutivo praticamente nulo. Este ensaio permite assim, a realização de medições em peças de elevada dimensão e/ou peso elevado, ou ainda quando seja tecnicamente inviável a sua desmontagem e transporte para um laboratório de ensaios para a realização do teste em bancada por outro método convencional (i.e. *Brinell*, *Vickers*, etc.).

O princípio de dureza de *Leeb – HL (Hardness Leeb)* baseia-se no método dinâmico (de ressalto) de um corpo (esfera de metal duro ou diamante industrial) de dureza conhecida “arremessado” com uma força também ela conhecida (por ação de uma mola simples e com uma constante elástica conhecida) contra a superfície de material de dureza desconhecida. [14]

O corpo de impacto é assim impelido pela força de uma mola contra a superfície da peça em teste. A deformação da superfície ocorre quando o corpo de impacto reage com a superfície de ensaio, o que resulta em perda de energia cinética. Esta perda de energia é detetada através da comparação das velocidades de impacto (v_i) e velocidades de ressalto (v_r) quando o corpo de impacto se encontrar numa distância precisa da superfície para a fase de impacto e a fase de ressalto, respetivamente (Fig. 12). [13]

$$HL = \frac{v_r}{v_i} \times 1000 \quad (3)$$

As velocidades são medidas utilizando-se um íman permanente no corpo de impacto que gera uma tensão de indução na bobina do dispositivo de impacto. A tensão detetada é proporcional à velocidade do corpo de impacto. O processamento do sinal fornece-nos então o valor da dureza (Fig. 12).

Este tipo de ensaio é normalmente realizado com um equipamento composto por uma “caneta” impulsora (Fig. 11) e respetiva unidade de controlo e processamento de sinal (Fig. 13).

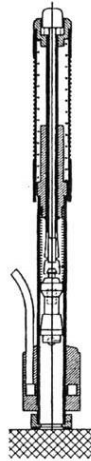


Fig. 11 – Dispositivo/”Caneta” impulsora tipo D. [15]

Existem 6 tipos de “canetas” normalizadas; o tipo D, DC, E, D+15, C e G (Fig. 14), de acordo com a massa/peso e a espessura da amostra/peça a ensaiar (Tabela 5). [15]

Tabela 5 – Tipologia do impulsor em função dos critérios de peso e espessura, da peça, mínimos. [15]

Tipo de “caneta” impulsora	Peso (mínimo) ou	Espessura (mínima)
D, DC, D+15, E	15 lb (5 kg)	1/8 in. (3 mm)
G	40 lb (15 kg)	3/8 in. (10 mm)
C	4 lb (1,5 kg)	1/32 in. (1 mm)

Assim, quanto maior a dureza do material ensaiado maior a altura de ressalto do indentador, uma vez que a energia potencial de impacto é convertida praticamente em energia cinética de ressalto. Contrariamente, quanto mais dúctil/macio o material for, a energia potencial será em parte absorvida pela deformação causada pelo penetrador na superfície da amostra, enquanto a parte restante será então convertida em energia cinética de ressalto, inferior à do caso do material mais duro.

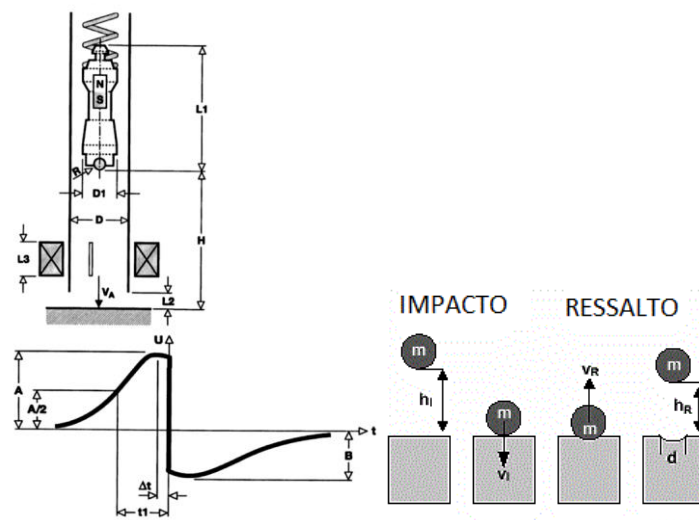


Fig. 12 – Esquematização do princípio de medição da dureza *Leeb*. [15]

Na Fig. 13, está representado o durômetro *Leeb*, disponível no *CINFU*. Na mesma figura é possível ver a consola onde são controlados os parâmetros de ensaio, leitura dos resultados, etc., com a possibilidade de impressão dos mesmo, a “caneta” com o conjunto mola impulsora-indentador e o respetivo bloco padrão (Fig. 15) para verificação e calibração do equipamento de medição.



Fig. 13 – Aspeto do durómetro *Leeb*. (Cortesia do *CINFU*).

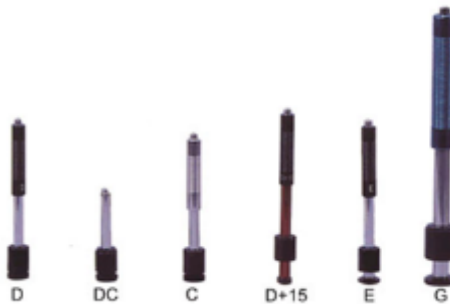


Fig. 14 – Vários tipos de “canetas” impulsoras. [16]



Fig. 15 – Blocos padrão usados na calibração dos equipamentos de dureza *Leeb*. [17]

Tabela 6 - Ensaio de durezas *Leeb* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio <i>Leeb</i> é usado especialmente para avaliação de dureza superficial em peças de grandes dimensões devido à sua portabilidade; 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ensaio sensível à espessura, massa, fixação e qualidade da superfície do material a ensaiar; ✓ Apesar do ensaio permitir a realização de ensaios em várias posições, há que ter em conta a eficiência dos resultados obtidos; ✓ No caso das medições efetuadas nas posições diferentes à comumente usada (horizontal), deverão ser aplicados os fatores de correção correspondentes; excetuando os casos cujo equipamento efetue a correção automaticamente.

1.6 Ensaios de Dureza por Penetração

De grande aplicação e abrangência de materiais, este tipo de ensaios é utilizado quer a nível industrial quer em I&D na ciência dos materiais.

O princípio do ensaio por penetração consiste na aplicação de um penetrador, de geometria conhecida, no material a ensaiar a uma carga constante. Segue-se então a medição da dimensão da impressão causada pela deformação plástica, permanente, e característica do material ensaiado. A impressão é tanto maior quanto mais macio o material for.

Foram vários os métodos de ensaio desenvolvidos ao longo do tempo, partindo deste princípio de ensaio – por penetração. De seguida, serão abordados os ensaios com maior relevância e aplicabilidade prática.

1.6.1 Dureza *Brinell* (HB)

O método de ensaio de dureza *Brinell* foi desenvolvido por um engenheiro sueco de nome *Johan August Brinell* (Fig. 16), proposto em 1900 durante a Exposição Universal de Paris. [18], [19]



Fig. 16 - *Johan August Brinell* [20], Engenheiro Metalúrgico Sueco (1849 – 1925), criador do método de ensaio de dureza *Brinell*.

O princípio deste método consiste em fazer penetrar uma esfera de aço temperado, ou de carboneto de tungsténio de diâmetro D na superfície do metal a ensaiar, sob a ação de uma carga P aplicada gradualmente e durante um intervalo de tempo estabelecido.

O material deforma-se plasticamente e após retirada a carga fica uma impressão com a forma de uma calote esférica que será tanto maior quanto mais macio for o material (Fig. 17).

A dureza do material é caracterizada por um número que corresponde ao quociente entre a carga aplicada em kgf e a área da calote impressa (área de contacto da indentação) em mm^2 . [21]

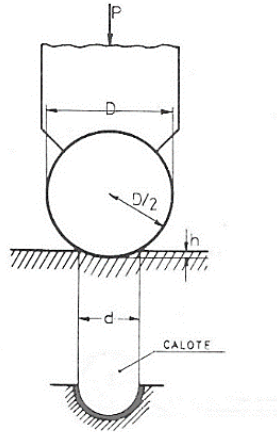


Fig. 17 – Representação esquemática do ensaio de dureza *Brinell*. [21]

O tempo de aplicação da carga pode variar entre 15 a 60 segundos, sendo que quanto maior a dureza esperada menor é o tempo de permanência da carga.

A dureza *Brinell* - *HB* (*Hardness Brinell*) é assim, expressa pela equação:

$$HB = \frac{F}{S} \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (4)$$

A área da calote esférica é dada pela equação:

$$S = \pi Dh \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5)$$

em que D é o diâmetro da esfera e h a altura ou profundidade de penetração da esfera (profundidade da calote). Como o valor de h não é fácil de medir, mede-se o diâmetro médio d da calote, que depende de h através da equação:

$$h = \frac{D}{2} - \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right) \text{ [mm]} \quad (6)$$

onde, a medida do diâmetro da calota (d) deve ser obtida pela média de duas leituras obtidas a 90° uma da outra.

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \text{ [mm]} \text{ (diâmetro médio da calote).} \quad (7)$$

A expressão que permite calcular a dureza *Brinell* resulta finalmente de:

$$HBS \text{ ou } HBW = \text{constante} \times \frac{2F}{\pi D (D - (D^2 - d^2)^{1/2})} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (8)$$

HBS – esfera de aço; *HBW* – esfera de carboneto de tungstênio; constante = $0,102 \approx 1/9,80665$.

A unidade $[\text{N/mm}^2]$, que deveria ser sempre colocada após o valor de *HB*, é suprimida uma vez que a dureza *Brinell* não é um conceito físico satisfatório, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da calote (Fig. 18).

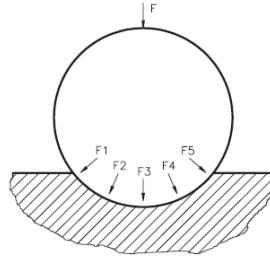


Fig. 18 – Distribuição da carga aplicada ao longo da superfície da calote. [21]

De modo a padronizar o ensaio, foram normalizados valores para os fatores de carga de acordo com a faixa de dureza espectral e respetivo tipo de material (Tabela 7).

Tabela 7 - Principais fatores de carga utilizados e respetivas faixas de dureza e indicações. [22]

F/D^2	Dureza (HB)	Materiais
30	90 - 415	Aços e ferros fundidos
10	30 - 140	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	15 - 70	Cobre, alumínio e suas ligas mais macias
2,5	<30	Chumbo, estanho e antimônio.

Para a realização deste ensaio, é necessário um equipamento (Durómetro Universal) (Fig. 19) constituído por um sistema de aplicação da carga/força – designado por célula de carga, por um penetrador (esfera em aço temperado ou uma esfera de carboneto de tungsténio), e por fim de um sistema ótico com uma capacidade de ampliação que varia entre 20 a 80x e acoplado de um micrómetro para a medição do diâmetro da calote.



Fig. 19 – Durómetro Universal da EMCO-TEST modelo M5U-300. [23]

A expressão dos resultados de dureza *Brinell* é feita através da indicação no número de dureza obtido pela expressão matemática, seguido das letras *HBS* ou *HBW*, conforme se utilize respetivamente um penetrador de aço ou de carboneto.

Tabela 8 – Ensaio de durezas *Brinell* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio <i>Brinell</i> é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas; ✓ É o único ensaio utilizado e aceito para ensaios em metais que não tenham estrutura homogênea; ✓ Equipamento de fácil operação, no entanto, os técnicos necessitam de alguma formação, treino e aferição regular; ✓ Correlação entre o resultado de dureza <i>Brinell</i> e a resistência de tração convencional do material. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Este ensaio está limitado a 450 <i>HBS</i> no caso de indutores de aço temperado e 650 <i>HBW</i> para esferas em carboneto de tungstênio. Caso contrário, há o risco de se danificar os indutores; ✓ A recuperação elástica é uma fonte de erros, pois o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga. Isto é mais sensível quanto mais duro for o metal; ✓ O ensaio não deve ser realizado em superfícies cilíndricas com raio de curvatura menor que 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada, porque haveria escoamento lateral do material e a dureza medida seria menor que a real; ✓ Em alguns materiais podem ocorrer deformações no contorno da impressão, ocasionando erros de leitura.

1.6.2 Dureza *Rockwell* (HR)

A desempenhar as funções de engenheiro metalúrgico na área dos ensaios na empresa *New Departure Mfg. Company* em *Bristol - Connecticut*, *Stanley Prichard Rockwell* (Fig. 20) patenteou em 1919 o primeiro equipamento de durezas para a realização do ensaio de dureza *Rockwell*.



Fig. 20 - *Stanley Prichard Rockwell* (1886 – 1940), criador do método de ensaio *Rockwell*. [24]

Este ensaio seria uma nova ferramenta para a obtenção de uma medida rápida e precisa da dureza do aço de rolamentos (Fig. 21). Contudo foi *Charles H. Wilson* que viu o potencial do equipamento e expandiu a invenção de *Rockwell*, catapultando o teste de dureza *Rockwell* para o que é hoje um dos métodos mais utilizados para o teste de durezas e controle de processo de metais e produtos metálicos (com maior aplicação nas indústrias de moldes, tratamentos térmicos entre outras). [25]

Desde o seu desenvolvimento, a popularidade do teste de dureza *Rockwell* tem crescido constantemente, tal devendo-se ao fato deste ensaio se tratar de um ensaio rápido, direto, expedito e praticamente nenhuma interferência do operador no resultado obtido. [25]



Fig. 21 – Um dos primeiros durômetros *Rockwell* construídos por *Stanley P. Rockwell*. [24]

Ao contrário dos ensaios de dureza *Brinell* e *Vickers*, o ensaio de durezas *Rockwell* não estabelece relação com a área da indentação produzida na penetração, mas sim com a profundidade da mesma.

O ensaio de dureza *Rockwell* pode ser realizado utilizando um dos dois tipos de penetradores normalizados: diamante cônico com um ângulo de abertura de 120° e a ponta ligeiramente arredondada (raio de 0,2 mm) ou uma esfera polida de aço temperado com o diâmetro de 1,59 mm ($1/16''$), 3,17 mm ($1/8''$), 6,35 mm ($1/4''$) e 12,70 mm ($1/2''$). Relativamente às cargas de ensaio estas podem ser: 98N (10kgf) de pré-carga para acomodação do indentedor sobre a superfície e/ou eliminação da heterogeneidade estrutural e superficial da amostra, seguida das cargas de ensaio totais de 589 N (60 kgf), 981 N (100 kgf) e 1471 N (150 kgf) (Tabela 9). [26]

No caso dos ensaios com o objetivo de determinar a dureza *Rockwell* superficial da amostra, a pré-carga passa a ser de 29N (3kgf) seguida das cargas totais de ensaio de 147 N (15 kgf), 294 N (30 kgf) e 441 N (45 kgf) (Tabela 9). [26]

Uma vez que são possíveis várias combinações de geometria do indentedor/força aplicada, dependendo a escolha das propriedades do material a analisar, o número de dureza *Rockwell* (HR) deve ser seguido da letra (A, B, C, D, E, entre outras) correspondente à escala utilizada. [25]

Tabela 9 – Escalas de dureza *Rockwell*. [26]

Método		Superficial			Normal		
Pré-carga		29 N (3 kgf)			98 N (10 kgf)		
Carga de ensaio		15	30	45	60	100	150
Cone de diamante	120°	15N	30N	45N	A	D	C
	1/16"	15T	30T	45T	F	B	G
Esfera de aço	1/8"	15W	30W	45W	H	E	K
	1/4"	15X	30X	45X	L	M	P
	1/2"	15Y	30Y	45Y	R	S	V

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas (primeiro uma pré-carga é aplicada para garantir um contato firme entre o penetrador e a amostra, e, posteriormente aplica-se a carga do ensaio propriamente dita) (Fig. 22). A leitura do valor de dureza é feita diretamente no mostrador acoplado à máquina de ensaio de acordo com uma escala pré-determinada, adequada à dureza do material (Fig. 19).

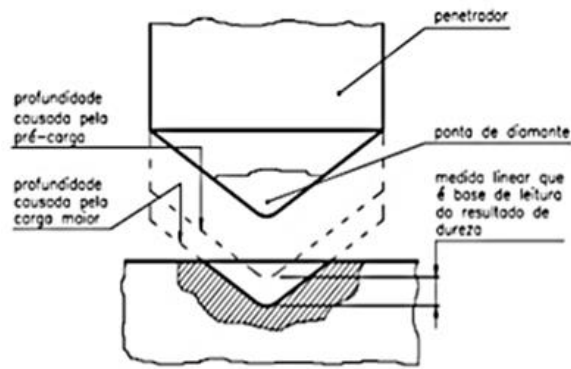


Fig. 22 – Representação esquemática da profundidade produzida por um penetrador cônico. [27]

A profundidade que o penetrador vai atingir durante o ensaio é importante para definir a espessura mínima da amostra. De um modo geral, a espessura mínima da amostra deve ser 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador.

O valor indicado na escala do mostrador é o valor da dureza *Rockwell* e corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga e a profundidade decorrente da pré-carga.

Para escalas normais cada unidade de dureza *Rockwell* equivale a 0,002 mm de profundidade, e para escalas de dureza *Rockwell* superficial cada unidade de dureza equivale a 0,001 mm de profundidade de indentação.

É possível assim obter a medida aproximada desta profundidade (p), a partir do valor de dureza indicado na escala do durómetro (comparador), utilizando as seguintes expressões:

a) Indentador cônico de diamante:

$$HR \Rightarrow p = 0,002 \times (100 - HR) \quad (9)$$

$$HR_{\text{superficial}} \Rightarrow p = 0,001 \times (100 - HR) \quad (10)$$

b) Indentador esférico em aço temperado:

$$HR \Rightarrow p = 0,002 \times (130 - HR) \quad (11)$$

$$HR_{\text{superficial}} \Rightarrow p = 0,001 \times (130 - HR) \quad (12)$$

Tabela 10 - Ensaio de durezas *Rockwell* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio de dureza <i>Rockwell</i> avançou em relação ao ensaio <i>Brinell</i>, já que possibilitou avaliar a dureza de vários metais, que antes não podiam ser ensaiados quanto à dureza; ✓ Medida direta do valor da dureza e a rapidez do teste; ✓ Ensaio não destrutivo, isto é, em geral a peça pode ser utilizada depois de ensaiada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ As escalas de durezas <i>Rockwell</i> não têm continuidade. Por isso, materiais que apresentam dureza no limite de uma escala e no início de outra não podem ser comparados entre si quanto à dureza; ✓ Não tem relação com o valor de resistência à tração, como acontece no ensaio <i>Brinell</i>.

1.6.3 Dureza *Vickers* (HV)

O teste de dureza *Vickers* foi desenvolvido em 1921 por *Robert L. Smith* e *George E. Sandland* na empresa *Vickers Ltd.* em Inglaterra, como uma alternativa ao método de *Brinell* para medir a dureza de materiais. [28]

Este ensaio usa uma pirâmide quadrangular de diamante como instrumento de impressão. O ângulo entre faces opostas da pirâmide é 136° , valor que foi escolhido de modo a obter uma boa relação entre o valor das durezas *Vickers* e *Brinell*. O ângulo de 136° corresponde à geometria de uma impressão dada por uma razão $d/D=0,375$, considerando a pirâmide tangente à esfera de diâmetro D do ensaio *Brinell* representada na Fig. 23. [21]

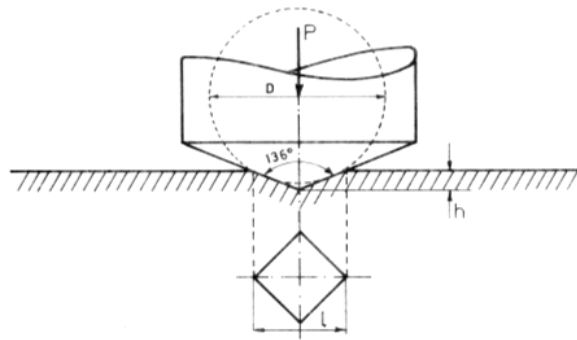


Fig. 23 – Relação entre a geometria da indentação do ensaio *Vickers* com a geometria da esfera *Brinell*. [21]

No ensaio *Vickers* o valor da dureza é definido da mesma forma que no ensaio *Brinell* (carga/área de contato da impressão). Sendo ℓ o comprimento médio da diagonal do losango da impressão, a área de contato é dada pela equação (9, 10).

$$\frac{\rho^2}{2 \times \sin^{\frac{1}{2}}(136^\circ)} = \frac{\rho^2}{1,8544} \quad (13)$$

$$\text{Dureza Vickers (HV)} = 1,8544 \times \frac{P}{\rho^2} \quad (14)$$

O durómetro de ensaio *Vickers* (também realizado num durómetro Universal como exemplificado na Fig. 19) não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais (ℓ_1 e ℓ_2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide.

Na fórmula anterior, a força deve ser expressa em quilograma-força (kgf) e o ℓ corresponde à diagonal média, ou seja:

$$\ell = \frac{\ell_1 + \ell_2}{2} \quad (15)$$

e deve ser expresso em milímetros (mm). Se o equipamento medir o resultado em micrómetros (μm), esse valor deve ser convertido em milímetros.

Neste método, ao contrário do que ocorre no ensaio *Brinell*, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada, que no caso concreto dos

durômetros *Vickers* e por uma questão de padronização, as cargas recomendadas são: 5, 10, 20, 30, 50, 100 kgf (Tabela 11). [22]

Tabela 11 - Forças de ensaio usadas no ensaio de dureza *Vickers*. [22]

Ensaio de dureza <i>Vickers</i>	
Símbolo de dureza	Valor nominal da força de ensaio F N
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,3
HV 100	980,7

O ensaio de durezas *Vickers* oferece duas vantagens sobre o ensaio *Brinell*. O primeiro é o de existir semelhança geométrica entre impressões provocadas por diferentes cargas, o que torna o valor de dureza praticamente independente da carga, exceto para cargas muito baixas em que normalmente se observa um efeito de “pele” na amostra.

A segunda vantagem do ensaio *Vickers* consiste na possibilidade de obter valores de dureza para materiais muito duros (até cerca de 1500 *HV*), o que não é possível com o ensaio *Brinell*.

A dureza *Vickers* é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo *HV* e de um número que indica o valor da carga aplicada. A representação 440 *HV* 30 indica que o valor da dureza *Vickers* é 440 e que a carga aplicada foi de 30kgf. O tempo normal de aplicação da carga varia entre 10 e 15 segundos.

Quando a duração da aplicação da carga é diferente, deverá ser indicado o tempo de aplicação após a carga. Por exemplo, na representação: 440 *HV* 30/20, o último número indica que a carga foi aplicada durante 20 segundos.

Uma impressão perfeita, no ensaio *Vickers*, deve apresentar os lados retos. Entretanto, podem ocorrer defeitos de impressão, devidos ao afundamento ou à aderência do metal em volta das faces do penetrador (Fig. 24).

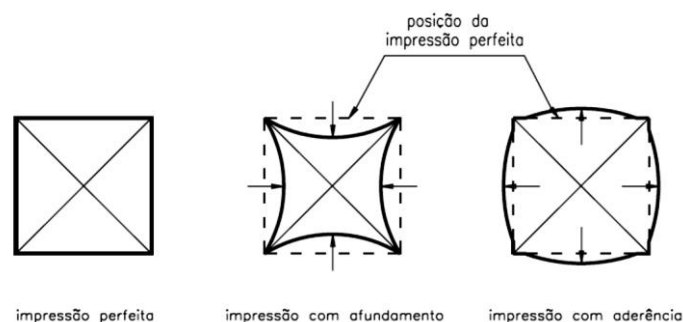
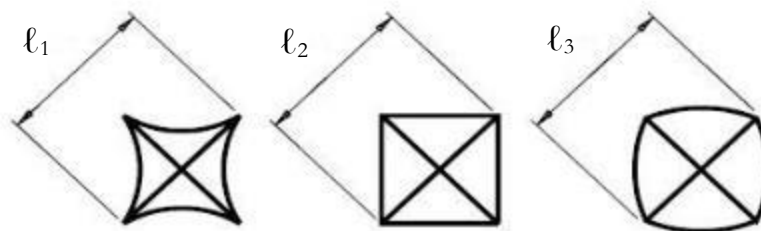


Fig. 24 – Possíveis defeitos da impressão da calote. [29]

Quando ocorrem esses defeitos, embora os valores das medições das diagonais sejam iguais, as áreas de impressão são diferentes (Fig. 25).



$$l_1 = l_2 = l_3 / A_1 < A_2 < A_3$$

Fig. 25 – Defeitos de impressão, devidos ao afundamento ou à aderência do metal em volta das faces do penetrador e respectivo efeito das diagonais e áreas da calote. [29]

Como o cálculo do valor de dureza *Vickers* utiliza a medição da média de duas diagonais, esses erros afetam o resultado da dureza: teremos um valor de dureza maior do que o real nos casos de afundamento e um valor de dureza menor do que o real, nos casos de aderência.

É possível corrigir esses defeitos alterando-se o valor da carga de ensaio selecionada, através do seu incremento ou ainda da sua diminuição, dependendo do material e do tipo de defeito apresentado.

Tabela 12 – Ensaio de durezas *Vickers* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio <i>Vickers</i> fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala; ✓ As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas; ✓ O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável; ✓ Este ensaio aplica-se a materiais de praticamente qualquer espessura, pelo qual é um dos métodos para medição da dureza superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medição ou de aplicação de carga, que alteram muito os valores reais de dureza; ✓ Regulação de velocidade mais crítica (mais demorado).

1.6.4 Dureza *Knoop* (HKN)

Frederick Knoop, Chauncey C. Peters, and Walter B. Emerson, publicaram em 1939 no *Jornal of Research of the National Bureau of Standards - NBS*, atual *NIST*, um artigo técnico onde apresentam um novo método de ensaio de durezas por penetração, desenvolvido em 1937 no *NBS* [30]; método esse semelhante ao princípio de medição usado com o durómetro *Vickers*, no entanto com um indentedor de geometria diferente (Fig. 27).

Este novo ensaio permitiria, segundo os seus autores, obter resultados de elevada precisão em aços de elevada dureza e para cargas de ensaio até 1 kgf (Fig. 26),

O indentedor *Knoop*, à semelhança do *Vickers*, é piramidal de base quadrangular, mas no primeiro a base é em forma de losango e no *Vickers* é quadrada. Assim, para o mesmo valor de carga, a

indentação *Knoop* é menos profunda e mais alongada do que a *Vickers*. Este facto, torna o indentedor *Knoop* adequado à realização de ensaios de dureza em materiais frágeis e filmes finos. [31]

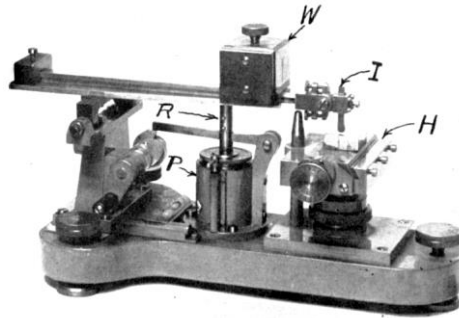


Fig. 26 – Durómetro *Knoop* para aplicação de cargas reduzidas. [31]

Conforme já referido, o penetrador é em forma piramidal, gerando uma impressão no material em forma de losango e cujas diagonais têm uma relação aproximada de 7:1 em vez de 1:1 para a pirâmide de base quadrada usada no ensaio *Vickers* (Fig. 27). [31]

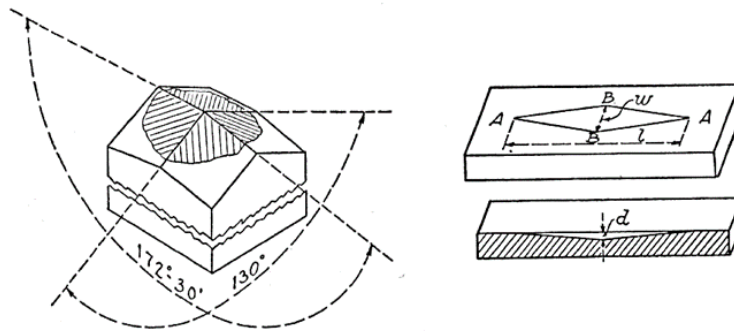


Fig. 27 – Geometria de um indentedor de diamante *Knoop*. [31]

Graças à forma do indentedor é também possível obter medições das diagonais sem o efeito de recuperação elástica dos materiais, uma vez que ao ocorrer, esta tem lugar na direção transversal à indentação e não na direção longitudinal da mesma.

Ora esta situação, e aplicando a constante associada à geometria do penetrador, permite obter resultados de dureza, sem que as respetivas diagonais estejam afetadas (“negativamente”) pela já referida recuperação elástica que ocorrem essencialmente nos materiais metálicos após serem submetidos a uma deformação plástica.

Devido à reduzida dimensão das indentações obtidas no ensaio, as durezas *Knoop* são geralmente classificadas como um ensaio de micro durezas, permitindo à semelhança do ensaio de micro durezas *Vickers*, a determinação da dureza dos vários microconstituintes presentes na matriz de determinado material metálico.

A dureza *Knoop* é dada pela fórmula:

$$HKN = \frac{P}{A} = \frac{P}{C_p L^2} \text{ [kgf / mm}^2\text{]} \quad (16)$$

onde P é a carga aplicada em kgf, A é a área superficial de impressão em mm^2 , L é o comprimento da impressão (em mm) ao longo do maior eixo e C_p é um fator de correção relacionado ao formato do penetrador (idealmente 0,070279). A carga aplicada varia entre 1 gf e 1 kgf.

Este ensaio poderá ser realizado no mesmo micro durómetro em que são realizados os ensaios de micro dureza *Vickers*, necessitando apenas de trocar de tipo de indentador, para *Knoop*, e selecionar os restantes parâmetros correspondentes como carga, tempo de permanência da carga de ensaio velocidade de aproximação e penetração, etc.

Na Fig. 28, podemos observar uma fotomicrografia onde se realizaram 9 micro indentações com uma carga de 100 gf, onde: as indentações 1, 2 e 9 estão numa área onde predominam *ferrite*, *perlite* e *cementite*. As indentações 3 e 8 abrangem uma área correspondente à *troostite* (*perlite* fina). As indentações 4, 6 e 7 estão na *martensite*, finalmente a 5, mostra-nos uma indentação localizada sobre uma ilha de *troostite* completamente rodeada por uma fase *martensítica*. [31]

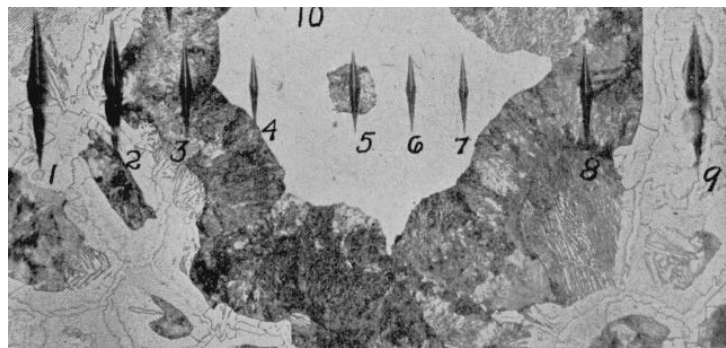


Fig. 28 – Ensaio de micro dureza *Knoop*, ao longo da microestrutura de uma liga recozida de aço ao carbono com 1,14 %C. [31]

Tabela 13 - Ensaio de durezas *Knoop* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio <i>Knoop</i> produz uma indentação que por ser mais estreita é indicada para medida de camadas electro depositadas ou endurecidas; ✓ A penetração é a metade da obtida com um penetrador <i>Vickers</i> para uma mesma carga; ✓ O teste <i>Knoop</i> é bom para materiais frágeis, muito duros, e de seções muito finas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A superfície a ser testada geralmente requer um acabamento metalográfico; ✓ Quanto menor a carga de teste, maior o grau de acabamento superficial necessário; ✓ Devido à semelhança com o teste <i>Vickers</i>, este é mais sensível a erros e medição do que o teste <i>Knoop</i>.

1.6.5 Ensaio de micro dureza *Vickers*

Este ensaio em tudo semelhante ao ensaio de durezas *Vickers*, apenas se diferenciando pela menor dimensão do indentador (Fig. 29), cargas de indentação inferiores (Tabela 14), sistema de microscopia ótico acoplado (utilização de uma ocular de aumento (10x) e respetiva objetiva, que poderá variar entre 30 a 100x), e de um micrómetro com uma resolução de 0,01 micrómetros para a medição da calote, uma vez que as calotes obtidas por este ensaio são à escala micro.



Fig. 29 – Indentador de micro durezas *Vickers*, utilizado no equipamento do CINFU.

Tabela 14 - Forças de ensaio usadas no ensaio de micro dureza *Vickers*. [22]

Ensaio de micro durezas		Ensaio de dureza com força reduzida	
Símbolo de dureza	Valor nominal da força de ensaio F N	Símbolo de dureza	Valor nominal da força de ensaio F N
HV 0,01	0,098 07	HV 0,2	1,961
HV 0,015	0,147	HV 0,3	2,942
HV 0,02	0,196 1	HV 0,5	4,903
HV 0,025	0,245 2	HV 1	9,807
HV 0,05	0,490 3	HV 2	19,61
HV 0,1	0,980 7	HV 3	29,42

Este ensaio tem como principais aplicações, a determinação da dureza para caracterização de superfícies tratadas termicamente e/ou electro revestidas. A medição da dureza ao longo de um corte de perfil de uma amostra tratada permite extrair, por exemplo, a profundidade a que ocorreu a alteração micro estrutural da amostra e por sua vez a eficiência do tratamento efetuado.

Uma vez que a maioria dos tratamentos superficiais visam o endurecimento ou o amaciamento do material até poucas centenas ou ainda décimas de micron de profundidade, como é exemplo: a cementação, a nitruração, a carbonitruração, cianuração, têmpera, endurecimento por plasma, etc., apenas reduzindo a carga e por sua vez a área de contacto de indentação, de modo a manter a relação força aplica *versus* área de indentação, é que se torna possível determinar a micro dureza da “capa” do material tratado.

Outra aplicação para este ensaio é a caracterização da dureza dos diversos microconstituintes presentes na matriz de uma amostra de uma liga metálica.

Na Fig. 30, encontra-se um exemplo para a aplicação deste método de ensaio na medição da dureza num aço de construção, e onde é possível verificar a diferença dimensional das calotes correspondentes às zonas analisadas.

Na imagem é possível vislumbrar uma impressão maior situada num microconstituente mais macio corresponde à fase *ferrítica*, a calote de dimensão e dureza intermédia que abrange a fronteira entre os dois microconstituintes presentes na matriz metálica, *ferrite* e a *perlite*, por último temos a calote de menor dimensão que corresponde a uma dureza superior que de fato corresponde à fase *perlítica*, uma vez que esta fase é uma mistura de uma fase *ferrítica* com lamelas de *carboneto de ferro* (Fe_3C), este último de dureza elevada e de baixa resiliência.

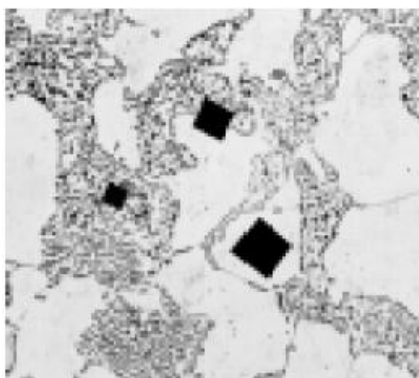


Fig. 30 – Ensaio de micro durezas *Vickers*, num aço de construção de matriz *ferrítico-pearlítica*. [32]

Conforme já referido, a micro dureza *Vickers* envolve geralmente o mesmo procedimento de ensaio que do ensaio de dureza *Vickers*, no entanto, com cargas/forças inferiores a 1 kgf.

A carga pode ter valores tão pequenos como 10 gf, sendo que nestes casos, como a carga aplicada é pequena, a impressão produzida é microscópica, também designada por micro indentação, como mostra a Fig. 30. Para a realização destes ensaios, de micro dureza *Vickers*, são usados micro durómetros *Vickers* (Fig. 31).



Fig. 31 – Micro durómetro *Vickers* (*Struers-Duramin-1*).

No ensaio de micro dureza *Vickers* é aplicada uma força de ensaio (F) à superfície de um provete, através de um penetrador em diamante (pirâmide de base quadrangular, com um ângulo de 136° entre as faces opostas relativamente ao vértice) e medição do comprimento das diagonais da impressão deixada na superfície após remoção da força de ensaio, F .

A dureza é proporcional ao quociente obtido entre a força de ensaio e a área da impressão de dureza resultante, a qual se assume ser uma pirâmide de base quadrada, tendo no vértice o mesmo ângulo que o penetrador.

$$\frac{d^2}{2 \times \sin \frac{1}{2}(136^\circ)} = \frac{F}{1,8544} \quad (17)$$

$$\text{Micro Dureza Vickers (HV)} = 1,8544 \times \frac{P}{d^2} \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (18)$$

Tabela 15 - Ensaio de micro durezas *Vickers* – vantagens versus desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ O ensaio <i>Vickers</i> fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala; ✓ As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas; ✓ O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável; ✓ Este ensaio aplica-se a materiais de praticamente qualquer espessura, pelo qual é um dos métodos para medição da dureza superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medida ou de aplicação de carga, que alteram muito os valores reais de dureza; ✓ A preparação do corpo de prova para micro dureza deve ser feita, obrigatoriamente, por metalografia, utilizando-se, de preferência, o polimento eletrolítico, para evitar o encruamento superficial; ✓ Quando se usam cargas menores do que 300 gf, pode haver recuperação elástica, dificultando a medida das diagonais; ✓ Regulação de velocidade mais crítica (mais demorado).

1.7 Erros dos sistemas

Tal como qualquer equipamento de medição, também o micro durómetro *Vickers* apresenta sempre associado ao valor da mediação, um erro e incerteza. Sendo que os erros poderão ser aleatórios e/ou sistemáticos, como veremos de seguida.

1.7.1 Erro aleatório

De acordo com o *VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia* [33], o erro aleatório dum conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo zero, e pela sua variância. Pode ser reduzido através da repetição das medidas. Algumas origens para os erros aleatórios são: fenómenos de histerese, ruído elétrico, contaminação dos materiais, correntes de ar e/ou vibrações, realização do ensaio por vários operadores e em dias distintos.

1.7.2 Erro sistemático

Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível, são geralmente causados pelo aparelho de medição (com origem no ajuste do zero do aparelho de medição; alinhamento e focagem dos sistemas óticos; uso e fadiga dos aparelhos de medição), observador/técnico (motivados por erros de leitura, estimativa por interpolação e fenómenos de memória) e/ou condições ambientais (causados por fenómenos de flutuação de temperatura, pressão e humidade; vibrações; campos elétricos e/ou magnéticos externos).

Ao contrário do erro aleatório, o erro sistemático e suas causas são normalmente conhecidos podendo-se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido.

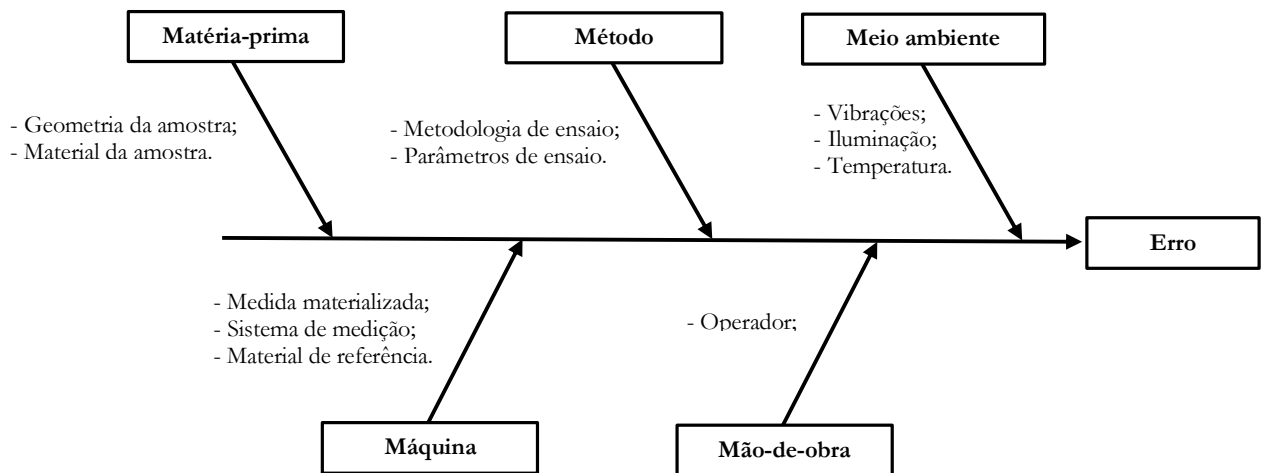


Fig. 32 - Diagrama de Ishikawa com a identificação das principais fontes de erro que afetam o resultado da medição de micro dureza Vickers.

O micro durómetro Vickers é composto essencialmente por dois sistemas de medição, que funcionam autonomamente, e que são:

- 1) Sistema de pesos para a aplicação da carga/força de ensaio denominada por célula de carga;
- 2) Sistema de medição da calote ou indentação, através de um paquímetro micrométrico.

Apesar do ensaio se suportar destes dois sistemas de medição, na realidade a verificação do equipamento apenas atesta a conformidade através da medição da grandeza HV, grandeza esta fruto da relação entre a força [kgf] aplicada pela unidade de área da calote/indentação [mm²], conforme definição de dureza Vickers.

Assim, e de acordo com o Anexo C da NP EN ISO 6507-1:2011, deverá ser prática corrente a verificação periódica do sistema de medição, por parte do operador/técnico, através da medição indireta e direta de um bloco-padrão de dureza conhecida, calibrado e certificado de acordo com NP EN ISO 6507-3:2010 [34].

Antes de se proceder à verificação, deverá verificar-se de maneira indireta o sistema de medição (para cada gama/escala e nível de dureza) através da medição de uma impressão de referência num bloco padrão de dureza, calibrado de acordo com a ISO 6507-3. A dimensão medida deverá estar em conformidade com o valor de certificado, com uma tolerância máxima indicada no Quadro 5 da ISO 6507-2:2005 (Tabela 19). Se o sistema de medição não satisfizer este teste, deverão ser tomadas ações corretivas adequadas. [22]

A verificação direta compreende a comparação da dureza obtida na realização de pelo menos uma indentação no bloco de referência padrão (Fig. 33) e o valor do certificado do bloco padrão. Estes valores medidos deverão estar em conformidade com o certificado, com uma tolerância máxima indicada no Quadro 5 da ISO 6507-2:2005 (Tabela 19). Se o sistema de medição satisfizer este teste, a máquina/durómetro de ensaio poderá ser considerado satisfatório, caso contrário, deverá proceder-se a uma verificação indireta. [22]



Fig. 33 – Bloco de referência padrão certificado (CRM).

2 Estado da Arte

Neste capítulo é apresentado o atual nível de desenvolvimento dos sistemas de aquisição, processamento e tratamento de imagem utilizados nos ensaios de micro dureza *Vickers*.

2.1 Sistema ótico

Conforme já abordado em capítulo anterior, o micro durómetro *Vickers* e mais concretamente o sistema de medição é composto por duas partes importantes, uma referente à aplicação de forças (carga de penetração) e a outra ligada à medição da calote gerada e que por sua vez nos permite determinar a micro dureza do material ensaiado.

Quando este ensaio foi desenvolvido, e que na essência se mantém até aos dias de hoje, o procedimento fazia uso de um sistema de observação e medição ótico, ou seja, este tipo de equipamentos de medição de dureza não eram mais do que um microscópio ótico de reflexão acoplado de um conjunto de massas/pesos, que pressionando um indentador/penetrador de geometria específica conhecida contra a superfície do corpo de prova, gerava uma marca designada por calote ou indentação.

Pela medição por comparação da calote, com uma ocular graduada, obtinha-se a sua dimensão e finalmente, quer fosse por cálculo, quer através da consulta de tabelas (prática ainda hoje possível e presente na norma *NP EN ISO 6707-4:2010*) que relacionavam para determinada força/carga de ensaio a dimensão da calote com o resultado da dureza final correspondente.

Com o desenvolvimento da eletrónica e dos sistemas digitais, estes equipamentos foram evoluindo no sentido da sua total automatização, e principalmente, a medição da calote deixar de ser efetuada pelo “olho humano” e passar a ser feita pelo “olho máquina”, através do desenvolvimento dos sistemas de aquisição digital de imagem (calote), tratamento e medição automática por aplicação de um algoritmo computacional.

Assim, do ponto de vista tecnológico, há que realçar dois aspetos importantes: os sistemas de visão artificial e os sistemas de processamento e tratamento de imagem.

Relativamente à visão artificial, com o desenvolvimento dos sensores de imagem digital mais utilizados nas câmaras, consoante as marcas e os seus respetivos fabricantes, são normalmente usados sensores do tipo CCD (*Charge-Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*).

Para a aquisição da imagem da calote/indentação habitualmente são propostas, pelos fabricantes, câmaras de “baixa” resolução, isto é, câmaras digitais com resolução efetiva entre 1 e 5 Megapixel (Tabela 16); salvo raras exceções quando também é necessária aquisição de vídeo, em que existem câmaras específicas de elevada velocidade de aquisição e resolução, o que não é o caso nos ensaios de durezas cuja imagem é estática e sem “grandes” especificidades em termos de pormenor de imagem.

Tabela 16 – Características de algumas câmaras disponíveis no mercado das marcas dos principais fabricantes de sistema de microscopia ótica.

Modelo	Sensor	Resolução		Píxel Size	Tamanho efetivo do sensor	Tempo de exposição	Taxa de Aquisição	Color/Mono	Sensibilidade espectral	
		[MP]	[Pixel]	[µm]			(máx) [fps]		[nm]	
Zeiss® [35]	AxioCam 105	CMOS	5,0	2560x1920	2,2	5,7x4,28 mm-diagonal 7,1 mm-1/2,5"	100 µs - 2 s	15 - 47	Color	400 - 700
	AxioCam ERc 5s	CMOS	5,0	2560x1920	2,2	5.7x4,28 mm-diagonal 7,1mm-1/2,5"	10 µs - 2 s	13	Color	400 - 700
	AxioCam ICc1	CCD	1,4	1388x1038	4,65	6.3x4,8 mm-diagonal 7,9mm-1/2"	1 ms - 4 s	15 - 28	Color	400 - 700
	AxioCam MRc	CCD	1,4	1388x1040	6,45	8,9x6,7 mm-2/3"	1 ms - 60 s	13 - 38	Color	400 - 700
	AxioCam 503 color	CCD	2,83	1936x1460	4,54	diagonal 11 mm-2/3"	250 µs - 60 s	38 - 93	Color	400 - 720
	AxioCam 503 mono	CCD	2,83	1936x1460	4,54	diagonal 11 mm-2/3"	250 µs - 60 s	38 - 76	Mono	400 - 1000
	AxioCam ICc3	CCD	3,3	2080x1540	3,45	8,1x4,8 mm-diagonal 8,9 mm-1/1,8"	1 ms - 4 s	15 - 28	Color	400 - 700
	AxioCam ICc5	CCD	5,0	2452x2056	3,45	8,5x7,1 mm-2/3"	1 ms - 4 s	9 - 15	Color	400 - 700
	AxioCam MRc 5	CCD	5,0	2584x1936	3,4	8,7x6,6 mm-2/3"	1 ms - 60 s	3 - 16	Color	400 - 710
	AxioCam 506 color	CCD	6,0	2752x2208	4,54	12,5x10 mm diagonal 16mm-1"	250 µs - 60 s	19 - 51	Color	400 - 720
AxioCam 506 mono	CCD	6,0	2752x2208	4,54	12,5x10 mm-diagonal 16 mm-1"	250 µs - 60 s	19 - 51	Mono	400 - 1000	
Leica® [36]	MC120 HD	CMOS	2,5	1824x1368	3,34	6,1x4,6 mm-1/2,3"	0,5 ms - 500 ms	10 - 30	Color	n.d.
	DFC295	CMOS	3,0	2048x1536	3,2	6,55x4,92 mm-1/2"	0,1 ms - 2 s	6 - 35	Color	n.d.
	DMC2900	CMOS	3,1	2048x1536	3,2	6,55 x 4,92 mm-1/2"	0,1 ms - 2 s	4 - 30	Color	400 - 700
	MC170 HD	CMOS	5,0	2592x1944	2,35	6,1 x 4,6 mm-1/2.3"	0,5 ms - 500 ms	10 - 30	Color	n.d.
	DFC550	CCD	1,4	1360x1024	6,45	8,8 x 6,6 mm-2/3"	0,25 ms - 600 s	13 - 56	Color	n.d.
	DFC495	CCD	8,0	3264x2448	2,7	8,81 x 6,61 mm-2/3"	2 ms - 600 s	2 - 48	Color	n.d.
Nikon® [37]	DS-RI2	CMOS	16,25	4908x3264	n.d.	36,0 x 23,9 mm	100 µs - 120 s	6 - 45	Color	n.d.
	DS-Fi2	CCD	5,1	2560x1920	n.d.	2/3"	130 µs - 60 s	2 - 37	Color	n.d.
	DS-Vi1	CCD	2,0	1600x1200	n.d.	1/1,8"	1 ms - 60 s	5 - 29	Color	n.d.
Motic® [38]	Moticam 1	CMOS	0,5	800x600	5,6	3,58x 2,69 mm-1/4"	n.d.	10	Color	n.d.
	Moticam 1SP	CMOS	1,3	1280x1024	3,2	4,10x3,28 mm-1/3,2"	0,08 ms - 5 s	13	Color	n.d.
	Moticam 2	CMOS	2,0	1600x1200	3,2	5,12x3,84 mm-1/3"	0,09 ms - 6 s	5	Color	n.d.
	Moticam 3	CMOS	3,0	2048x1536	3,2	6,55x4,92 mm-1/2"	0,11 ms - 7 s	6	Color	n.d.
	Moticam 5	CMOS	5,0	2592x1944	2,2	5,70x4,28 mm-1/2,5"	0,15 ms - 5 s	4	Color	n.d.
	Moticam 10	CMOS	10,0	3664x2748	1,67	6,12x4,59 mm-1/3"	0,16 ms - 10 s	2,2	Color	n.d.
	Moticam Pro 205	CCD	1,4	1392x1040	4,65	1/2"	0,09 ms - 6 s	n.d.	Color	400 - 700
	Moticam Pro 252	CCD	3,2	2088x1550	3,45	1/1,8"	0,23 ms - 6 s	n.d.	Color	400 - 700
	Moticam Pro 282	CCD	5,0	2588x1960	3,40	2/3"	0,26 ms - 6 s	n.d.	Color	400 - 700
	Moticam Pro 285	CCD	1,4	1392x1040	6,45	2/3"	0,06 ms - 6 s	n.d.	Color	400 - 700
Lumenera® [39]	Infinity1-1M	CMOS	1,3	1280x1024	5,2	diagonal 10,972 mm 1/2"	n.d.	30 - 120	Mono	400 - 1000
	Infinity1-2	CMOS	2,0	1600x1200	4,2	6,72x5,04 mm-1/2"	64 µs - 2 s	15	Color	400 - 700
	Infinity1-3	CMOS	3,1	2048x1536	3,2	6,5x4,9 mm-1/2"	128 µs - 4 s	12	Color	400 - 700
	Infinity1-5	CMOS	5,0	2592x1944	2,2	5,7x4,28 mm-1/2.5"	106 µs to 3 s	7	Color/Mono	400-750/400-1000
	Infinity2-1R	CCD	1,4	1392x1040	4,65	7,6x6,2 mm-1/2"	5.4 µs - 480 s	30 - 52	Color/Mono	400-700/400-1000
	Infinity2-2	CCD	2,0	1616x1216	4,4	diagonal 8,93 mm-1/1,8"	50 µs - 10 s	12	Color/Mono	400-700/400-1000
	Infinity2-3	CCD	3,3	2080x1536	3,45	diagonal 8,93 mm-1/1,8"	50 µs - 10 s	5	Color	400-700
	Infinity2-5	CCD	5,0	2448x2048	3,45	8,7x7,1 mm-2/3"	161 µs - 4260 s	8,5 - 23	Color/Mono	400-700/400-1000

2.2 Softwares comerciais e/ou proprietários de medição de durezas

Relativamente aos *softwares* que são propostos pelos fabricantes de micro durómetros, encontramos na sua generalidade um denominador comum, que é o fato de todos eles serem *softwares* proprietários, pelo que torna impossível o acesso ao código fonte de modo a permitir a qualquer altura adaptarmos o programa em função de um novo requisito de ensaio, mesmo depois de o termos adquirido.

Para além disso, a maioria dos *softwares* são desenvolvidos em ambiente *Windows® da Microsoft®*, e sempre que ocorrem atualizações do sistema operativo, por vezes e devido à falta de disponibilidade de novos *drivers*, é muitas vezes necessário proceder a um novo investimento através da aquisição de atualizações de *software* ou até no limite, à compra de um novo sistema de medição de durezas.

A maioria dos programas disponíveis no mercado, possuem já um grande leque de opções em função do investimento disponível, ou das necessidades dos potenciais clientes. Estes opcionais passam em grande parte das vezes por uma “oferta” gradual, por patamares distintos de automatização do ensaio.

Habitualmente, as marcas optam por oferecer, numa fase inicial, apenas o micro durómetro *Vickers*, operável a partir da consola instalada no equipamento.

De seguida, e em função das necessidades dos clientes e do orçamento disponível, as marcas “oferecem” vários pacotes de opcionais que vão permitindo aumentar o nível de automatização do ensaio. Seguidamente, é habitual os comerciais proporem a aquisição de um terminal PC com o *software* de medição e respetiva licença de utilização (instalada numa “*drive lock*”).

Posteriormente, ou ainda nessa mesma fase, é possível selecionar vários níveis de automatização, através da aquisição das opções: torreta de comutação automática; mesa robotizada; focagem automática, e finalmente sistemas integrados de programação automatizada, permitindo a execução dos ensaios, sem qualquer intervenção do operador na obtenção do(s) resultado(s) de micro dureza.

Apesar dos *softwares* comercializados pelos fabricantes de equipamentos serem desenvolvidos concretamente para os seus modelos, com características próprias de funcionamento, o que os torna quase que à imagem do micro durómetro a que se destinam, também não é menos verdade que esses mesmos fabricantes começaram a disponibilizar *softwares* para serem instalados em micro durómetros de outras marcas.

Esta posição justifica-se, com a tentativa destas marcas “conquistarem” um nicho de mercado composto por micro durómetros relativamente mais antigos, oferecendo assim a possibilidade de um “*upgrade*” funcional dos mesmos (Tabela 17).

Tabela 17 – Alguns dos principais fabricantes de micro durómetros *Vickers*, e a respetiva designação dos *softwares* de medição, atualmente comercializados.

Fabricante	Designação do Software	Fabricante	Designação do Software
Zwick/Roell®	ZHµ.HD - High Definition Software. [40]	emco-TEST®	ecos Workflow™ [41]
LECO®	ConfidDent2™ [42]	Struers®	ecos Workflow™ software [43]
Clemex®	Clemex CMT [44]	Buehler®	OmniMet™ MHT [45]
MIPS®	CDV Vickers [46]		DiaMet™ Wilson® [47]

2.3 Cálculo da incerteza associada à medição da dureza *Vickers*

Para a avaliação completa da incerteza dos resultados associados à medição de dureza *Vickers*, deverá ser utilizado o Guia para a expressão da incerteza dos resultados nas medições (GUM - *Guide to the expression of uncertainty in measurement*) [48].

Contudo, o ensaio de dureza *Vickers* em materiais metálicos encontra-se atualmente normalizado pelo referencial NP EN ISO 6507-1:2011 [22], sendo seguido pela maioria dos laboratórios de ensaios mecânicos e a que o CINFU não é exceção.

De acordo com este referencial, “a abordagem seguida no método de determinação da incerteza considera apenas as incertezas associadas ao desempenho global das medições efetuadas pela máquina de ensaio de dureza em relação aos blocos de referência de dureza (CRM). Estas incertezas de desempenho refletem o efeito combinado de todas as incertezas consideradas separadamente (verificação indireta). Em face desta abordagem, é importante que as componentes individuais associadas ao durómetro satisfaçam as respetivas tolerâncias.” [22]

A norma EN NP ISO 6507-1:2011 recomenda “fortemente a aplicação deste procedimento de verificação até ter decorrido, no máximo, um ano desde a realização de uma verificação direta com resultados satisfatórios” [22], sendo o caso do equipamento utilizado nesta dissertação (ver relatório de verificação do micro durómetro *Vickers* em anexo).

“A Fig. 34 representa a estrutura, com quatro níveis, da cadeia metrológica necessária para definir e propagar as escalas de dureza. A cadeia inicia-se a nível internacional, através das definições internacionais das diferentes escalas de dureza a considerar na realização das intercomparações internacionais. As máquinas de dureza padrão primárias a nível nacional “produzem” blocos de referência de dureza primários para o nível dos laboratórios de calibração. Obviamente, a calibração direta e a verificação destas máquinas deverão ser realizadas com a maior exatidão possível.” [22]

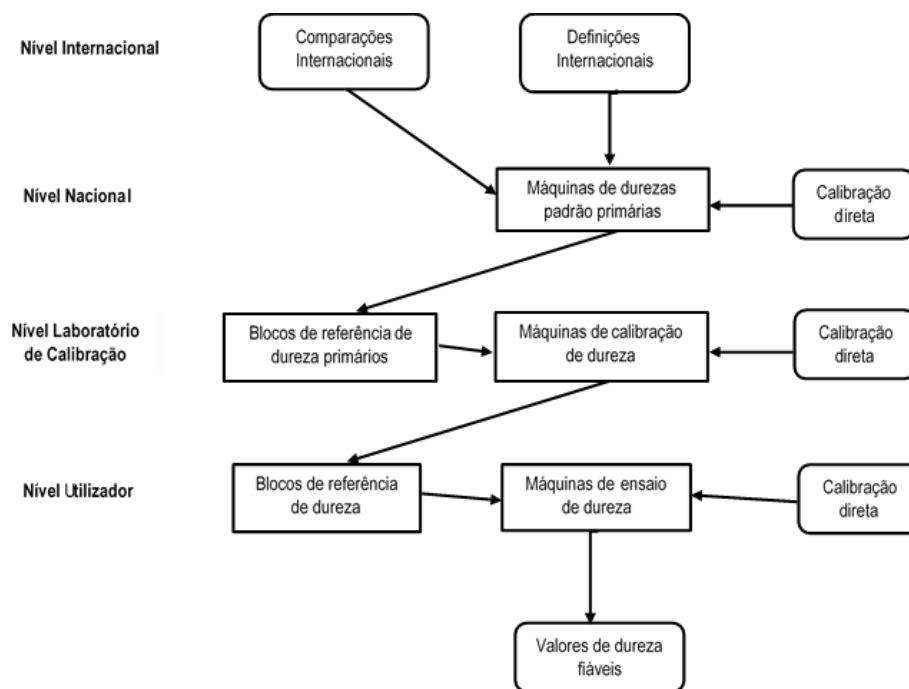


Fig. 34 – Estrutura da cadeia metrológica para definir e propagar as escalas de dureza. [22]

Assim, e de acordo com o procedimento geral que consta do ponto D.2 do *Anexo* da NP EN ISO 6507-1:2011 [22], a incerteza combinada u_I é calculada através do método da raiz da soma dos quadrados (RSS) a partir das diferentes componentes que constam da Fig. 34. A incerteza expandida U , é calculada a partir de u_I , através do seu produto pelo fator de expansão $k = 2$.

Relativamente ao desvio do durómetro, este identificado por desvio b (também designado por erro), calculado a partir da diferença entre:

- o valor médio de cinco indentações realizadas durante a calibração do durómetro, e
- o valor de calibração do bloco de referência

pode ser tomado em consideração de diferentes metodologias de cálculo da incerteza associada.

2.3.1 Procedimento sem desvio – (Método 1)

O método 1, de acordo com o ponto D.4.1 do *Anexo* na NP EN ISO 6507-1:2011 [22], é um método simplificado que poderá ser utilizado sem considerar o erro sistemático da máquina de ensaio de dureza.

De acordo com o método 1, o erro máximo admissível (que significa o intervalo em que a máquina pode diferir do padrão de referência), é utilizado para definir a fonte de incerteza u_E . Não se procedendo neste caso à correção dos valores de dureza, no que se refere ao erro.

De acordo com o modelo matemático:

$$U = k * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2} \quad (19)$$

- u_E – Incerteza devida ao erro máximo admissível associado ao bloco de dureza padrão;
- u_{CRM} – Incerteza padrão devida ao padrão de referência (CRM);
- u_H – Incerteza padrão devida à repetibilidade das medições realizadas no bloco de durezas padrão;
- $u_{\bar{x}}$ – Incerteza padrão devida à repetibilidade das medições realizadas na amostra;
- u_{ms} – Incerteza devida à resolução do equipamento de medição dimensional (micrómetro),

e onde k é dado pela Tabela 18 baseada numa distribuição t de *Student* avaliada para uma probabilidade de expansão de 95 %. Se v_{ef} calculado não for inteiro, o que é normalmente o caso, truncar v_{ef} para o inteiro imediatamente inferior.

Tabela 18 – Fatores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos v_{ef} . [49]

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
v_{ef}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
k	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,01	2,00

Sendo que o resultado da medição é dado por:

$$\bar{X} = \bar{x} \pm U \quad (20)$$

De seguida encontra-se descrito o procedimento para a determinação de U :

- a. Incerteza padrão devida à repetibilidade da amostra ($u_{\bar{x}}$)

Para a determinação da incerteza associada à repetibilidade das medições efetuadas na amostra, são realizadas n medições separadamente (habitualmente 5 indentações), repetidas segundo as mesmas condições. Trata-se de uma incerteza experimental pelo que é do tipo A, cuja incerteza padrão experimental da média é dada por:

$$u_{\bar{x}} = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}} \quad (t_{\text{fator de student}} = 1,14 \text{ para } n=5 \text{ e } \alpha=68,3\%) \quad [22] \quad (21)$$

- b. Incerteza padrão devida à repetibilidade do padrão ($u_{\bar{H}}$)

Para a determinação da incerteza associada à repetibilidade das medições efetuadas no padrão de referência (CRM), são realizadas n medições separadamente (habitualmente 5 indentações), repetidas segundo as mesmas condições. Trata-se de uma incerteza experimental pelo que é do tipo A, cuja incerteza padrão experimental da média é dada por:

$$u_{\bar{H}} = \frac{t \cdot s_H}{\sqrt{n}} \quad (t_{\text{fator de student}} = 1,14 \text{ para } n=5 \text{ e } \alpha=68,3\%) \quad [22] \quad (22)$$

- c. Incerteza devida ao erro máximo admissível (u_E)

$$u_E = \frac{u_{E,2r} \cdot \bar{X}_{CRM}}{2,8} \quad [22] \quad (23)$$

Notas:

- 1) Erro admissível $u_{E,2r}$ de acordo com Quadro 5 da *ISO 6507-2:2012* (Tabela 19); [22]
- 2) \bar{X}_{CRM} de acordo com o certificado de calibração do padrão de referência (CRM); [22]
- 3) O fator de 2,8 é deduzido através da determinação da incerteza padrão relativa a uma distribuição retangular. [22]

- d. Incerteza devida à resolução do equipamento de medição dimensional (micrómetro) (u_{ms}) [22]

$$u_{ms} = \frac{2H}{d} \cdot \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} \quad (24)$$

- e. Incerteza padrão devida ao padrão de referência (u_{CRM})

Trata-se de uma incerteza Tipo B de distribuição normal (B-N), que nos é fornecida pelo certificado de calibração do padrão, U_{CRM} . Como no certificado a incerteza expandida está habitualmente expressa pela incerteza-padrão multiplicada por um coeficiente de expansão k ($k=2$) [22], então, a incerteza-padrão é dada pela equação (25) [22]:

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{k} \quad (25)$$

A grandeza $u_i(\mathbf{y})$ ($i = 1, 2, \dots, N$) é a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída \mathbf{y} , resultando da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada x_i ,

$$u_i(\mathbf{y}) = C_i \times u(x_i) \quad (26)$$

onde C_i é o coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada x_i , i.e., a derivada parcial da função modelo f em relação a x_i , avaliada nas estimativas x_i da grandeza de entrada,

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (27)$$

Tabela 19 – Erro relativo máximo admissível, E_{rel} da máquina de ensaios de dureza. [50]

Símbolo de Dureza	Dureza, HV															
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1500
HV 0,01																
HV 0,015	10															
HV 0,02	8															
HV 0,025	8	10														
HV 0,05	6	8	9	10												
HV 0,1	5	6	7	8	8	9	10	10	11							
HV 0,2		4		6		8		9		10	11	11	12	12		
HV 0,3		4		5		6		7		8	9	10	10	11	11	
HV 0,5		3		5		5		6		6	7	7	8	8	9	11
HV 1		3		4		4		4		5	5	5	6	6	6	8
HV 2		3		3		3		4		4	4	4	4	5	5	6

2.3.2 Procedimento com desvio – (Método 2)

Em alternativa ao método 1, poderá ser utilizado o método 2. Este método está correlacionado com a utilização de um diagrama de controlo, o método 2 poderá levar a valores de incerteza inferiores.

O erro b pode ser considerado como um efeito sistemático. No *GUM* [48] é recomendado o recurso a uma correção para compensar estes efeitos sistemáticos. Esta correção é a base do método 2. O erro máximo admissível u_E deixa de intervir no cálculo da incerteza mas todos os valores de dureza determinados têm de ser corrigidos em função de b , ou o valor de U_{corr} tem de ser acrescido de b .

De seguida encontra-se o procedimento para a determinação da incerteza expandida, U_{corr} :

$$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2} \quad (28)$$

- u_b – Incerteza padrão devida ao desvio (erro) entre calibrações;
- u_{CRM} – Incerteza padrão devida ao padrão de referência (CRM);

- $u_{\bar{H}}$ – Incerteza padrão devida à repetibilidade das medições realizadas no bloco de durezas padrão;
- $u_{\bar{x}}$ – Incerteza padrão devida à repetibilidade das medições realizadas na amostra;
- u_{ms} – Incerteza devida à resolução do equipamento de medição dimensional (micrómetro),

e onde k é dado pela Tabela 18 baseada numa distribuição t de *Student* avaliada para uma probabilidade de expansão de 95 %. Se v_{ef} calculado não for inteiro, o que é normalmente o caso, truncar v_{ef} para o inteiro imediatamente inferior.

sendo que o resultado da medição é dado por:

$$\bar{X}_{corr} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{corr} \quad (29)$$

ou por:

$$\bar{X}_{u\ corr} = \bar{x} \pm (U_{corr} + |\bar{b}|) \quad (30)$$

Conforme se considere que o desvio (erro) b faz parte do valor médio ou da incerteza.

- a. Incerteza padrão devida à repetibilidade da amostra ($u_{\bar{x}}$)

Para a determinação da incerteza associada à repetibilidade das medições efetuadas na amostra, são realizadas n medições separadamente, repetidas segundo as mesmas condições. Trata-se de uma incerteza experimental pelo que é do tipo A, cuja incerteza padrão experimental da média é dada por:

$$u_{\bar{x}} = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}} \quad (t_{\text{fator de t-student}} = 1,14 \text{ para } n=5) \quad [22] \quad (31)$$

- b. Incerteza padrão devida à repetibilidade do padrão ($u_{\bar{H}}$)

Para a determinação da incerteza associada à repetibilidade das medições efetuadas no padrão de referência (CRM), são realizadas n medições separadamente, repetidas segundo as mesmas condições. Trata-se de uma incerteza experimental pelo que é do tipo A, cuja incerteza padrão experimental da média é dada por:

$$u_{\bar{H}} = \frac{t \cdot s_H}{\sqrt{n}} \quad (t_{\text{fator de t-student}} = 1,14 \text{ para } n=5) \quad [22] \quad (32)$$

- c. Incerteza devida à resolução do equipamento de medição dimensional (micrómetro) (u_{ms})

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} \text{ [mm]} \quad (33)$$

- d. Incerteza padrão devida ao padrão de referência (u_{CRM})

Trata-se de uma incerteza Tipo B e distribuição normal (B-N), que nos é fornecida pelo certificado de calibração do padrão, U_{CRM} . Como no certificado a incerteza expandida está habitualmente expressa pela incerteza-padrão multiplicada por um coeficiente de expansão k ($k=2$) [22], então, a incerteza-padrão é dada pela equação (32):

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{k} \quad [22] \quad (34)$$

e. Incerteza padrão devida ao desvio (erro) (u_b)

Para a determinação da incerteza associada ao desvio (erro) repetibilidade das medições efetuadas no padrão de referência (CRM), são realizadas n medições separadamente, repetidas segundo as mesmas condições. Trata-se de uma incerteza experimental pelo que é do tipo A, cuja incerteza padrão experimental da média é dada por:

$$u_b = \frac{t \cdot s_b}{\sqrt{n_m}} \quad (t_{\text{fator de student}} = 1,84 \text{ para } n_m = 2) \quad [22] \quad (35)$$

À semelhança da metodologia utilizada no método 1, os coeficientes de sensibilidade relativos às incertezas são calculados por:

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (36)$$

Relativamente à expressão do resultado de medição, de acordo com o referencial *NP EN ISO 6507-1:2011 – Anexo D.5*, deverá ser indicado o método utilizado. Sendo que, em geral, deverá ser utilizado como resultado da medição o método 1 ($\bar{X} = \bar{x} \pm U$).

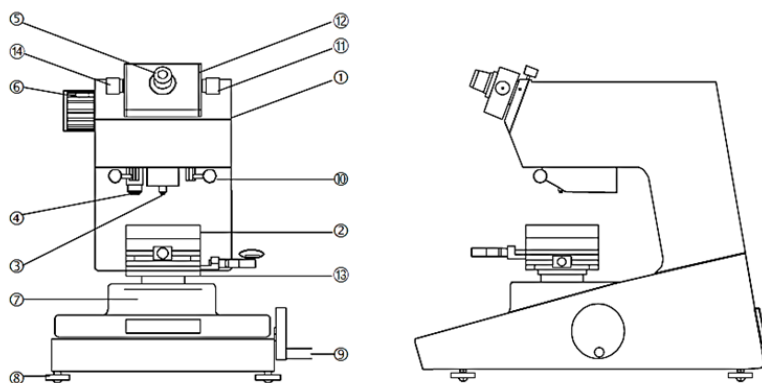
O cálculo das incertezas poderá ser consultado no anexo a este relatório.

3 Solução Desenvolvida

Neste capítulo serão abordadas as várias etapas envolvidas no desenvolvimento da solução proposta, quer ao nível das alterações de adaptação do micro durómetro no que diz respeito à aquisição de imagem, passando pelo tratamento e análise da mesma e posterior determinação do resultado de dureza.

3.1 Características do micro durómetro *Vickers* utilizado

O micro durómetro usado neste trabalho foi adquirido pelo *CINFU*, há aproximadamente 12 anos, sendo da marca *Struers®* e modelo *Duramin-1* (Fig. 35).



- | | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | Unidade principal | 8 | Apoios niveladores |
| 2 | Porta amostra | 9 | Controlo para elevação da Mesa/Base |
| 3 | Indentador | 10 | Seletor manual para permuta entre indentador e objetiva |
| 4 | Objetiva | 11 | Posicionador da barra móvel de medição do micrómetro |
| 5 | Ocular | 12 | Sistema ótico |
| 6 | Seletor de permuta: sistema ótico versus câmara | 13 | Mesa/Base elevatória |
| 7 | Painel de controlo | 14 | Posicionador da barra de referência do micrómetro |

Fig. 35 – Diagrama do micro durómetro *Struers® Duramin-1*. [51]

Apesar do sistema atualmente em utilização não possuir qualquer meio de aquisição de imagem vídeo analógico e/ou digital, o mesmo veio preparado para essa possível adaptação (Fig. 36).



Fig. 36 – Topo superior do durómetro com local de acoplamento para câmara vídeo e respetivo comutador de saída de observação ótica ou vídeo.

Aquando da aquisição do micro durómetro, o fabricante propunha já a possibilidade de através de um vasto leque de opcionais, entre eles o sistema de aquisição de imagem vídeo, mesa robotizada e respetivo *software* de análise, medição de durezas e tratamento dos dados obtidos com a respetiva emissão de relatório, no entanto, na altura e para os efeitos a que se destinava o equipamento, fundamentalmente para formação de técnicos de laboratório, essa opção não foi considerada.

Assim, o micro durómetro utilizado tem a capacidade de realizar ensaios de micro dureza *Vickers* e *Knoop* com forças compreendidas entre 10 gf e 2 kgf. Possui ainda um sistema de observação ótico constituído por uma ocular de 10x e duas objetivas de 40x e 50x de fator de ampliação respetivamente (Fig. 37 e Fig. 38).



Fig. 37 – Conjunto de indentador, objetiva e permutador manual (“torreta”).

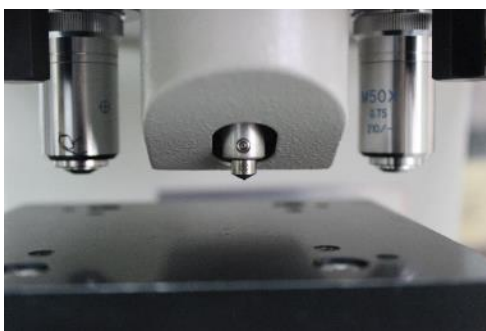


Fig. 38 – Vista de pormenor do indentador e das duas objetivas: 40x e 50x (à esquerda e à direita respetivamente).

O deslocamento da mesa, onde são colocadas as amostras para análise, é feito manualmente com o acionamento de dois micrómetros de 0,01 mm de resolução, nos eixos x e y (Fig. 39). Relativamente ao ajuste da distância focal esta é realizada também manualmente pelo acionamento de uma manivela que faz deslocar a mesa no eixo z (Fig. 40).

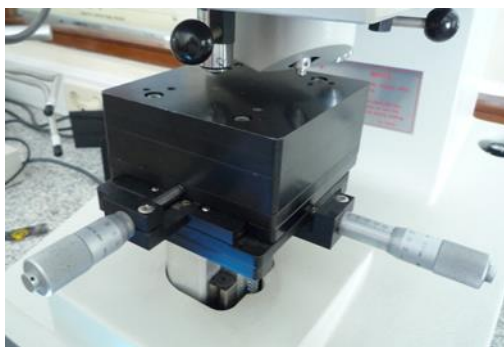


Fig. 39 – Mesa porta amostra e respetivos micrómetros de movimentação no plano em x e y .



Fig. 40 – Manivela de ajuste da mesa porta amostra no eixo z.

Para a medição das diagonais da calote, o micro durómetro possui uma ocular acoplada de um micrómetro (Fig. 42) com resolução $0,01\mu\text{m}$ (Fig. 41).



Fig. 41 – Vista exterior do conjunto de ocular e micrómetro ótico.

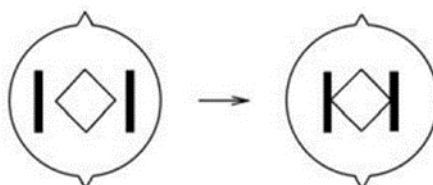


Fig. 42– Medição da calote com o micrómetro do micro durómetro. [51]

Antes da realização de qualquer medição com o micrómetro, deverá ser realizado o zero do micrómetro conforme Fig. 43.

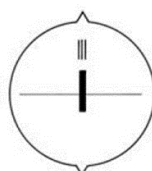


Fig. 43– Realização do zero na leitura do micrómetro. [51]

Relativamente à configuração dos parâmetros de ensaio como sendo: a seleção da carga, velocidade de deslocamento do penetrador, tempo de permanência da carga do mesmo, objetiva utilizada, ajuste do zero do micrómetro de medida da calote, entre outras funções de comunicação de resultados, tratamento estatístico entre outros; são possíveis através de um ecrã *touchscreen* que serve de interface de comunicação entre máquina/durómetro e o utilizador/operador (Fig. 44).

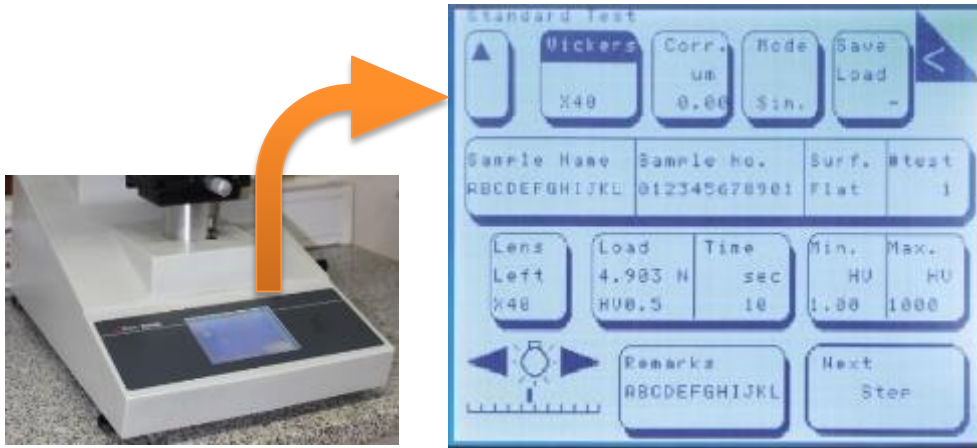


Fig. 44 – Aspeto do ecrã *touchscreen* do durómetro *Struers Duramin-1*. [52]

À semelhança do sistema de aquisição de imagem, o micro durómetro vem também equipado com duas portas de comunicação, uma do tipo RS-232C bidirecional e outra paralela para conexão a uma impressora (protocolo de comunicação ESC/P) (Fig. 45).

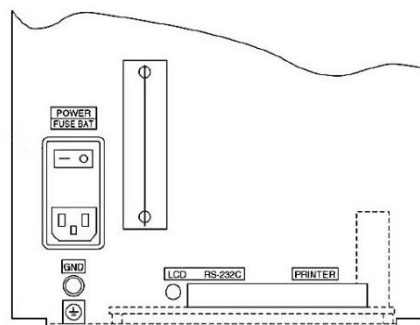


Fig. 45 – Esquema da vista posterior do micro durómetro *Struers Duramin-1*, onde se encontram as portas de comunicação. [52]

3.2 Adaptação da câmara digital

No sentido de dotar o micro durómetro da aquisição de imagem vídeo, foi necessário desenvolver um adaptador de fixação e suporte do respetivo sistema de visão artificial – câmara (Fig. 46). Assim, e com o apoio do departamento de *CNC* do *CINFU*, que gentilmente colaborou na execução de uma peça em alumínio com as dimensões necessárias à fixação da câmara.

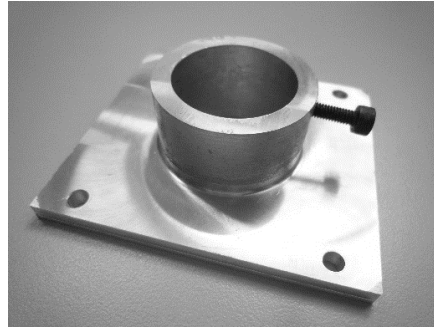


Fig. 46 – Suporte desenvolvido para fixação da câmara ao micro durómetro *Struers® Duramin-1*.

Para além do suporte, foi necessário ainda acoplar entre o suporte e a câmara uma lente redutora do 0,65x de ampliação (Fig. 47), de modo a permitir a redução da distância focal do conjunto ótico.



Fig. 47 – Lente redutora com 0,65x de ampliação para sensores até 1/2” (*MOTIC® SMZ-18*).

3.3 Aquisição de imagem digital

Um dos principais requisitos na seleção das câmaras digitais para a realização deste trabalho, era a conexão via USB (USB2.0), uma vez que na grande maioria dos computadores quer pessoais quer portáteis, atualmente disponibilizam este tipo de porta de comunicação.

O *CINFU* dispõe de uma série de câmaras digitais que estão montadas noutros sistemas de microscopia ótica, contudo e na sua maioria possui apenas comunicação de dados via *firewire* (IEEE 1394 ou *High Performance Serial Bus/HPSB*), porta esta que os computadores atuais já não disponibilizam de série.

Inicialmente, e para aquisição da imagem, foi selecionada uma câmara digital compacta da *MOTIC®*, de média resolução (5MP), e ligação USB, modelo *Moticam-5* (Fig. 48).



Fig. 48 – Câmara digital USB, sensor CMOS de 5MP da MOTIC – Moticom-5. [38]

No entanto, e após vários contactos com o fornecedor e representante nacional (*Emílio de Azevedo Campos, S.A.*) e mesmo diretamente com o fabricante MOTIC® em Hong-Kong, não foi possível obter drivers compatíveis com o *LabVIEW™* (LV); esta solução foi então descartada, optando-se por utilizar uma outra câmara, desta vez da marca *Lumenera* e modelo *Infinity2-3* (Fig. 49) que se encontrava montada noutra microscópio do laboratório metalúrgico do CINFU.



Fig. 49 – Câmara digital USB, sensor CCD de 3MP da Lumenera – Infinity2-3.

Ao consultarmos o sítio na internet deste fabricante – *Lumenera Corporation* (<http://www.lumenera.com/index.php>), facilmente encontramos na área de suporte e disponível para *download*, o *Plug-in* específico para LV da *National Instruments* (NI). [53]

3.4 Linguagem de Programação

Conforme explícito no ponto anterior, para a análise, processamento da imagem e mediação automática de micro dureza *Vickers*, foi escolhido o *LabVIEW™* da *National Instruments* [54].

LabVIEW™ (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*. A primeira versão surgiu em 1986 para o *Macintosh®* e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas operativos *Windows®*, *Linux* e *Solaris*. [54]

Os principais campos de aplicação do LV são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. [54]

Os programas em LV são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, VI. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a sua performance é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível. [54]

Uma das principais aplicações das ferramentas do LV são as bibliotecas de imagem. As ferramentas da NI utilizadas no desenvolvimento do programa foram: *NI LabVIEW™ 2013*, *NI Vision Acquisition Software* [55], *NI Vision Development Module* [56] e *NI IMAQdx* [57].

A programação teve por base uma arquitetura de acordo com passos identificados no fluxograma seguinte (Fig. 50).

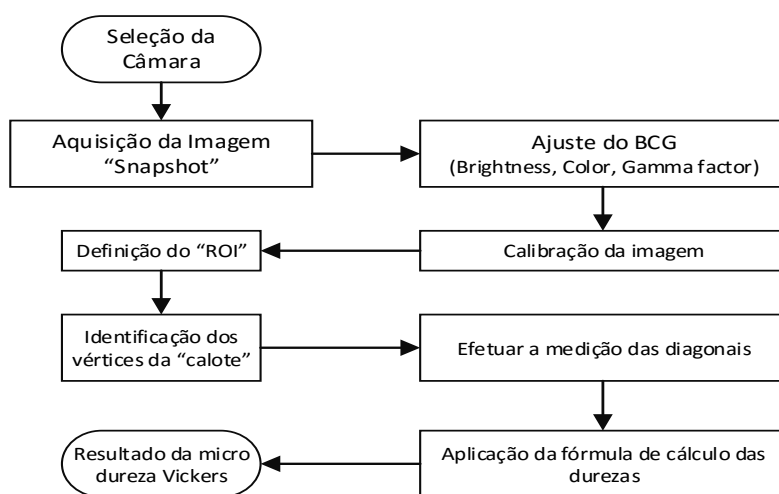


Fig. 50 – Fluxograma da rotina de trabalho no programa desenvolvido em *LabVIEW* para medição de micro dureza *Vickers*.

Nas Fig. 51 a Fig. 53, estão apresentados alguns diagramas de blocos do VI, que compõe o programa principal desenvolvido em LV,

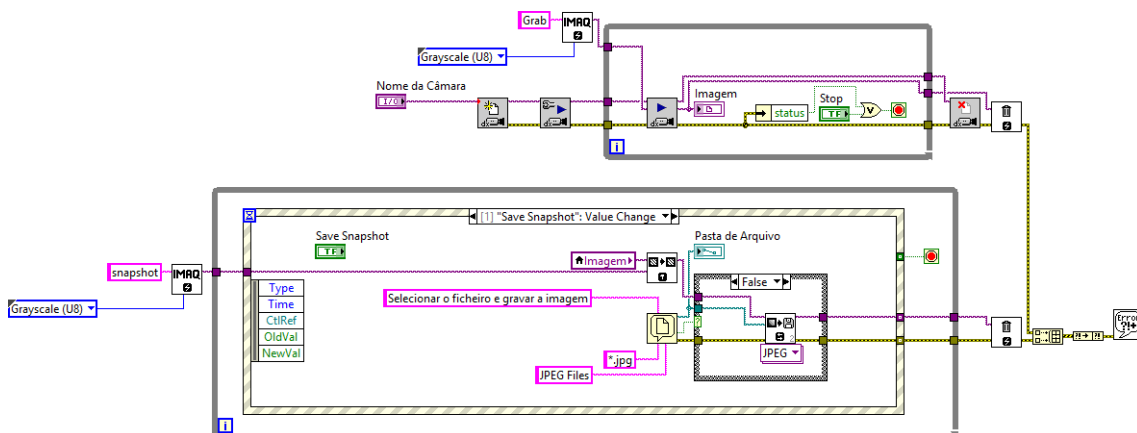


Fig. 51 – Diagrama, de blocos do VI, para aquisição e gravação das imagens.

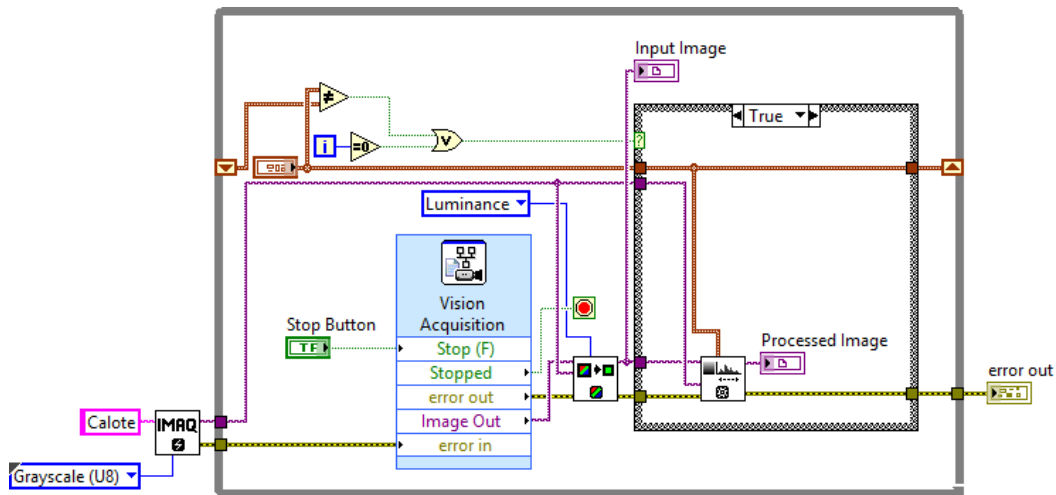


Fig. 52 – Diagrama, de blocos do VI, para aquisição e ajuste dos parâmetros de BCG (*Brightness, Contrast e Gamma*).

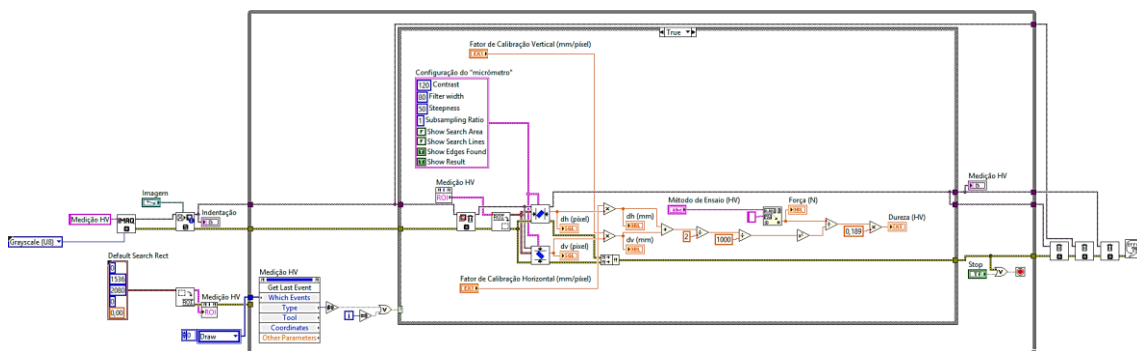


Fig. 53 – Diagrama, de blocos do VI, de medição de micro dureza *Vickers*.

3.5 Calibração das Imagens

Para efetuar a calibração da imagem foi usada uma régua micrométrica graduada de dimensões conhecidas (1 DIV=0,01 mm) (Fig. 54), permitindo estabelecer uma escala que relaciona uma distância da imagem em pixels com a dimensão real em micrômetros (Fig. 55).

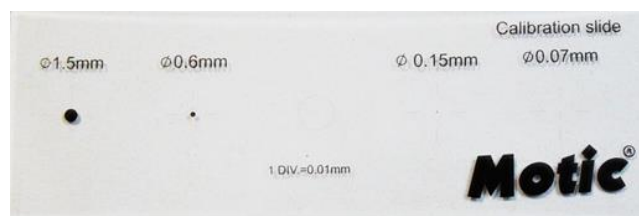


Fig. 54 – Régua micrométrica para calibração de microscópios óticos.

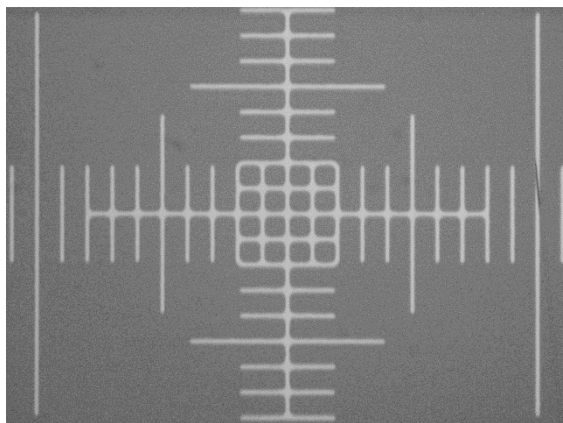


Fig. 55 – Imagem obtida da escala micrométrica de calibração, onde cada divisão da escala representa 0,01 mm (10 μm).

As imagens possuem uma dimensão de 2080 x 1536 pixéis, após calibração com a régua graduada foi possível determinar a razão média entre a dimensão da imagem (pixéis) e a dimensão real (μm) de 0,1074 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ em ambos os eixos x e y da imagem, o que nos dá uma dimensão real de 223,39 x 164,97 μm ou uma área real de aproximadamente 0,04 mm^2 .

3.6 Medições efetuadas pelo algoritmo desenvolvido

No painel frontal do *software* desenvolvido em LV (Fig. 56 a Fig. 61), encontramos duas imagens. Na imagem da esquerda vemos a indentação captada “ao vivo” pela câmara e, na imagem da direita, encontra-se a execução do algoritmo de medição com a visualização da região de interesse (*ROI – Region of interest*), onde se dá a identificação da calote e da respetiva indicação das distâncias entre vértices da indentação gerada.

É ainda possível, aplicar as ferramentas de ajuste dos parâmetros de BCG (*Brightness, Contrast e Gamma*), no caso de serem necessárias.

Os resultados das diagonais (horizontal (dh), vertical (dv) e dmédia) podem ser consultados no mesmo painel e nas caixas correspondentes; as mesmas encontram-se expressas em simultâneo nas unidades pixéis e micrómetros respetivamente.

Através da prévia seleção do método de ensaio utilizado, é indicada a respetiva força em *Newton* usada como carga de ensaio.

Para além disso, e uma vez tendo realizado previamente a calibração da imagem com a régua graduada em x e y , e tendo-se determinado o fator de conversão de pixéis em micrómetros, obteremos então, pela aplicação da fórmula, o resultado final de micro dureza *Vickers* correspondente, em unidades *HV*.

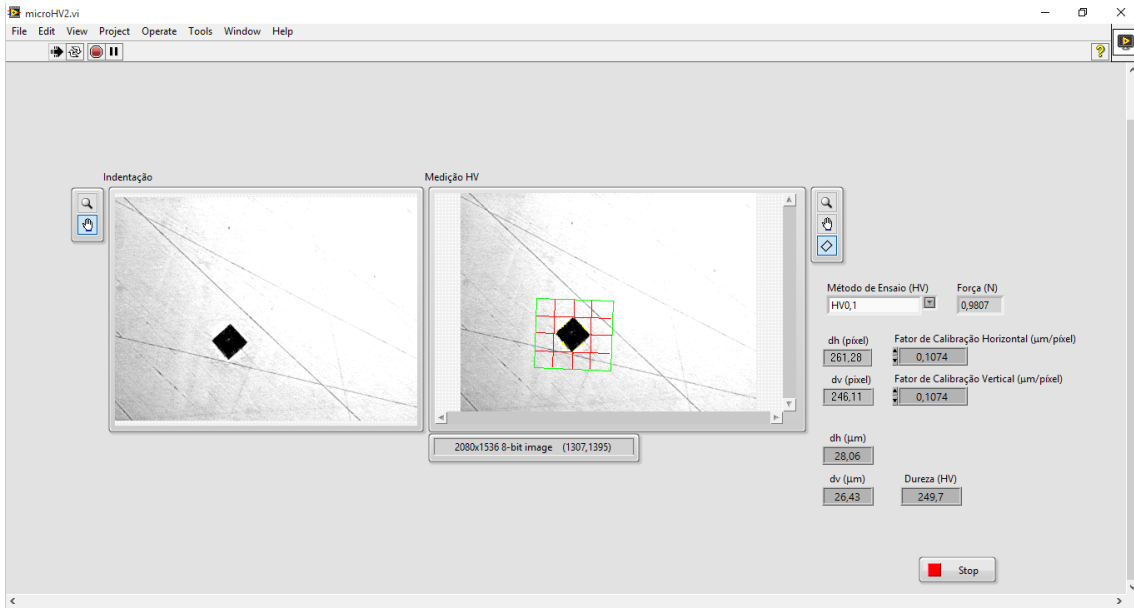


Fig. 56 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4024101.1111.

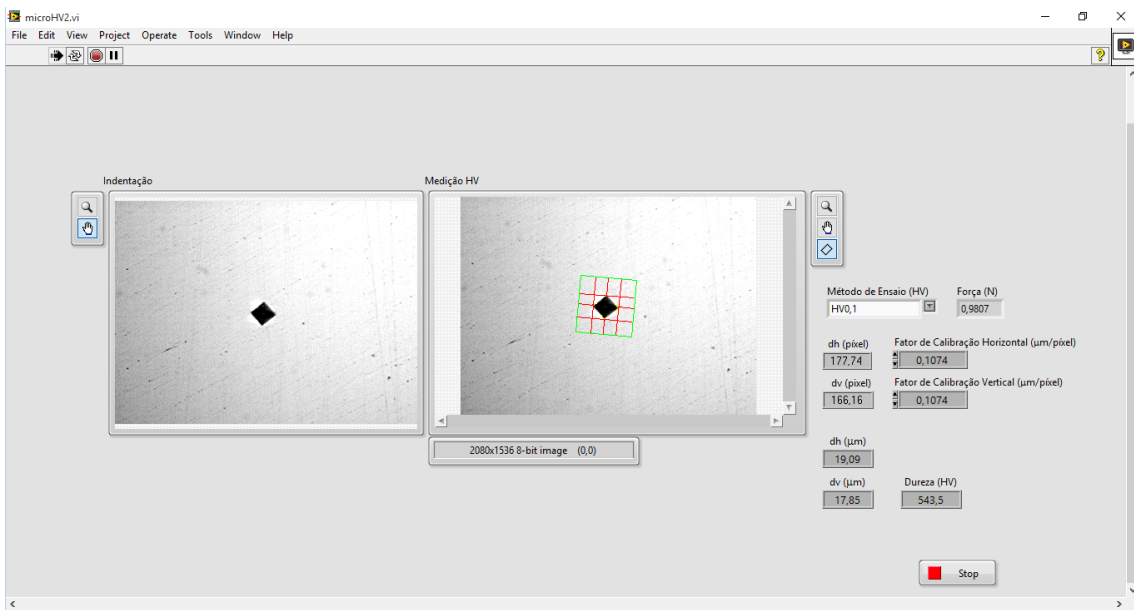


Fig. 57 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4976201.0613.

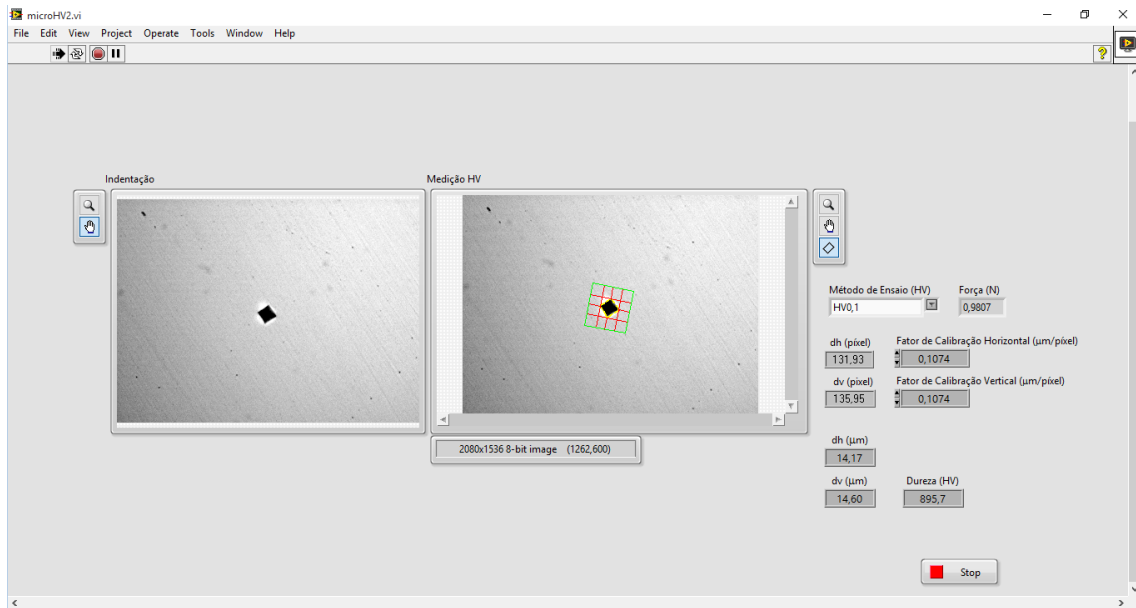


Fig. 58 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 5067401.0713.

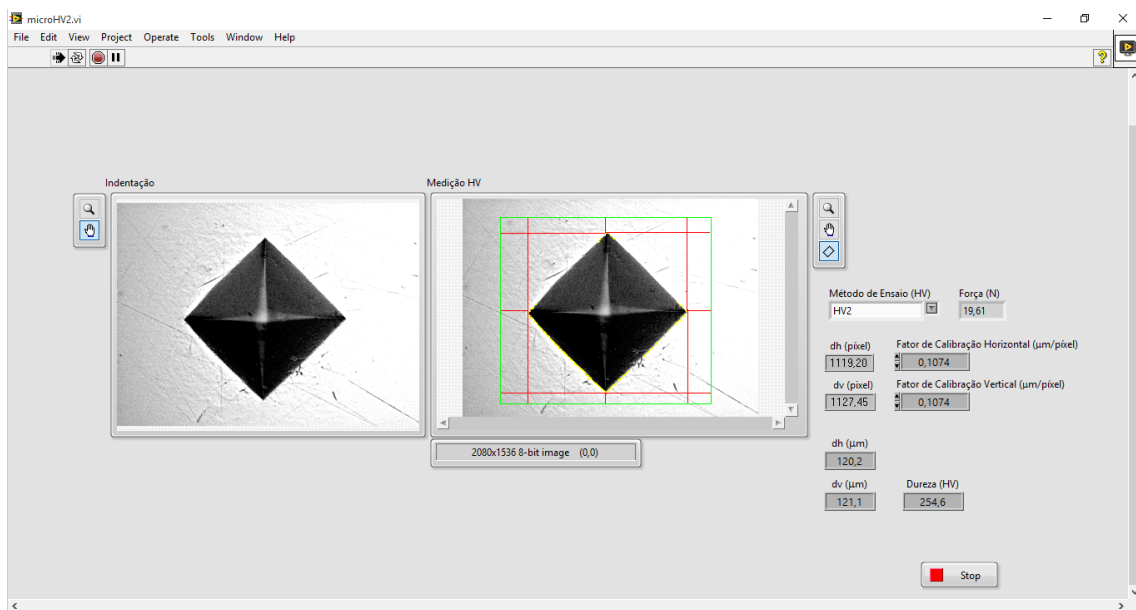


Fig. 59 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4025501.1111.

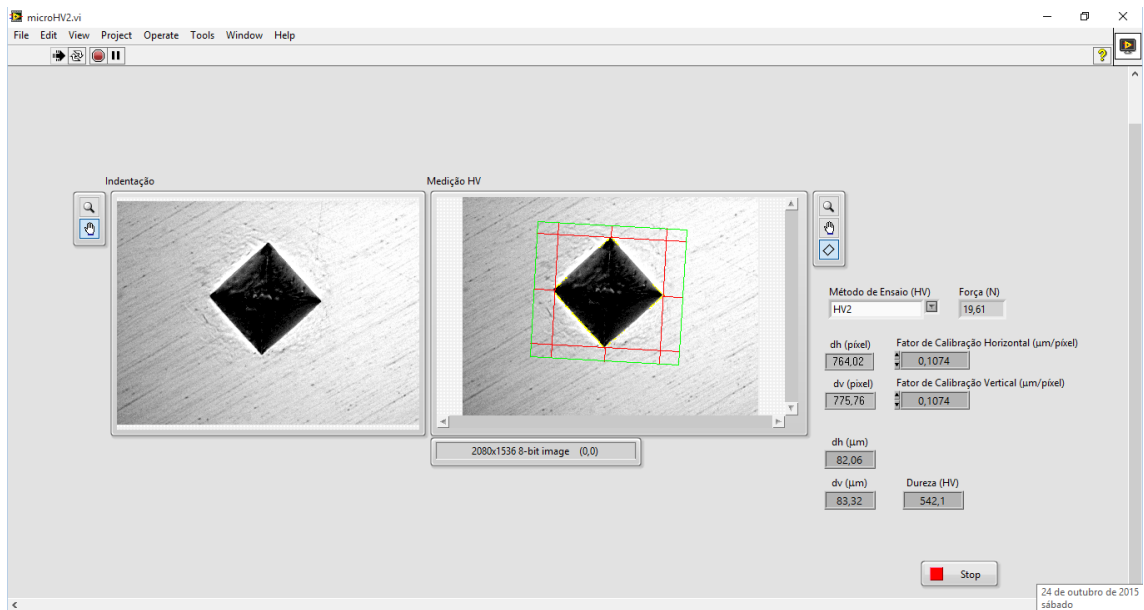


Fig. 60 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4979001.0613.

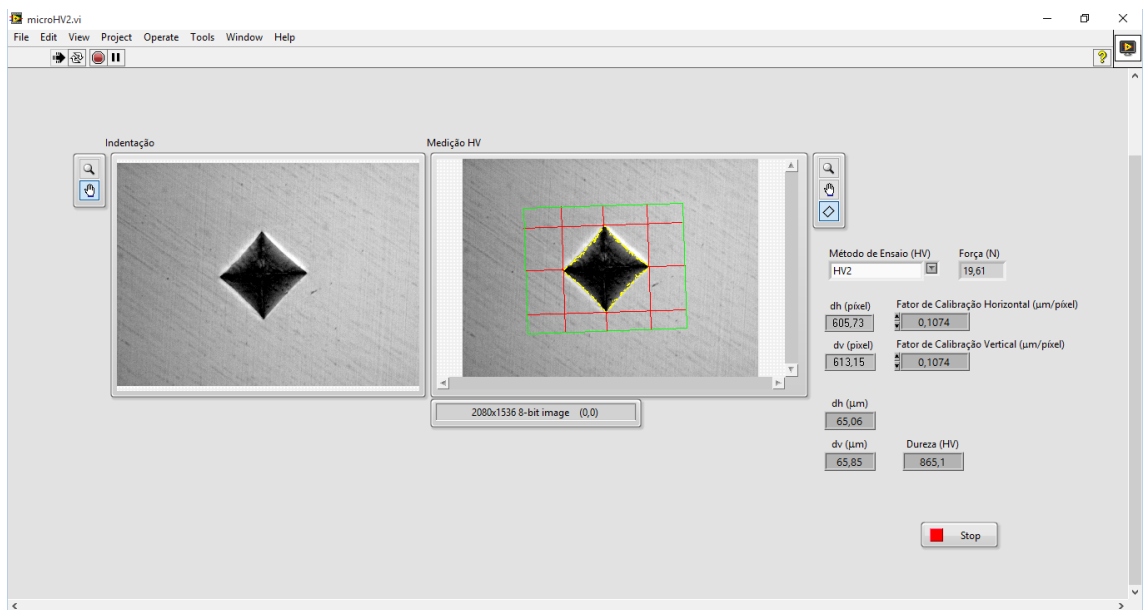


Fig. 61 – Medição da indentação padrão do bloco CRM n.º MPA NRW 4979101.0513.

As medições apresentadas nas Fig. 56 à Fig. 61, serviram também para realizar e evidenciar a validação do algoritmo desenvolvido, com medições realizadas em blocos de dureza padrão de valor certificado (CRM) e cujos resultados serão apresentados adiante na validação da solução.

4 Resultados obtidos com a solução

4.1 Validação da solução

A validação do sistema de aquisição e medição efetuou-se com a medição de blocos padrão de referência certificados. Os blocos padrão utilizados (Tabela 20) possuem uma indentação padrão (Fig. 62), a qual foi usada como referência para validação do sistema de análise automática, uma vez que, tanto o valor das diagonais como o valor de micro dureza correspondente é conhecido através do seu certificado.



Fig. 62 – Bloco CRM e respetiva indentação padrão situada dentro do círculo visível na figura.

Tabela 20 – Dados sobre os blocos de dureza padrão (CRM) utilizados na validação das medições.

F (kgf)	Bloco de referência (CRM)	Diagonal média (CRM) (μm)	Dureza (CRM) (HV)
0,1	MPA NRW 4024101.1111	27,24	250 \pm 9,9
	MPA NRW 4976201.0613	18,46	544 \pm 27,9
	MPA NRW 5067401.0713	14,41	893 \pm 56,1
2	MPA NRW 4025501.1111	120,63	255 \pm 3,0
	MPA NRW 4979001.0613	82,74	542 \pm 7,5
	MPA NRW 4979101.0513	65,47	865 \pm 14,4

De seguida (Tabela 21) são apresentados os valores obtidos nas medições realizadas nos blocos padrão com o *software* desenvolvido.

Tabela 21 – Medições efetuadas nas indentações de referência dos blocos de dureza padrão pelo *software* desenvolvido em LV.

F (kgf)	Dureza (CRM) (HV)	Dureza _{medida} (HV)	Desvio - b (HV)	Desvio - b (%)
0,1	250 \pm 9,9	249,7	+ 0,3	+ 0,12
	544 \pm 27,9	543,5	- 0,5	- 0,09
	893 \pm 56,1	895,7	+ 2,7	+ 0,30
2	255 \pm 3,0	254,6	- 0,4	- 0,16
	542 \pm 7,5	542,1	+ 0,1	+ 0,02
	865 \pm 14,4	865,1	+ 0,1	+ 0,01

4.2 Resultados obtidos

Foram realizados dois conjuntos de ensaios de micro dureza *Vickers* num bloco de referência padrão (CRM), com uma dureza nominal de $(250 \pm 9,9)$ HV0,1. O primeiro conjunto de 5 leituras/micro durezas (

Tabela 22) foram medidas através do sistema ótico convencional, através do micrómetro instalado no micro durómetro, o segundo conjunto de 5 leituras/micro durezas (

Tabela 23) foram medidas no *software* desenvolvido em LV, tendo-se obtido os seguintes resultados:

Tabela 22 – Resultados de micro dureza *Vickers* obtidas por medição no micrómetro integrado no equipamento *Struers Duramin-1*.

MEDIÇÕES NA AMOSTRA				
Leitura	Diagonal		Diagonal Média	Dureza medida
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	(mm)	(HV)
1ª leitura	0,02690	0,02690	0,02690	256
2ª leitura	0,02680	0,02680	0,02680	258
3ª leitura	0,02740	0,02740	0,02740	247
4ª leitura	0,02700	0,02700	0,02700	254
5ª leitura	0,02700	0,02700	0,02700	254
Média			0,02702	254
			Variância	18,0
			Desvio-padrão	4,24
			Incerteza padrão $u(x_i)$	1,90

Tabela 23 – Resultados de micro dureza *Vickers* obtidas por medição através do algoritmo implementado no *software* LV.

MEDIÇÕES NA AMOSTRA				
Leitura	Diagonal		Diagonal Média	Dureza medida
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	(mm)	(HV)
1ª leitura	0,02725	0,02723	0,02724	249,9
2ª leitura	0,02733	0,02726	0,02730	248,9
3ª leitura	0,02727	0,02723	0,02725	249,7
4ª leitura	0,02730	0,02725	0,02728	249,3
5ª leitura	0,02727	0,02720	0,02724	250,0
Média			0,02726	249,6
			Variância	0,22
			Desvio-padrão	0,46
			Incerteza padrão $u(x_i)$	0,21

Tabela 24 – Quadro resumo, com a comparação dos resultados obtidos entre os dois métodos de medição.

QUADRO RESUMO		
Metodologia de medição	Micro durómetro (<i>Struers Duramin-1</i>)	Algoritmo desenvolvido (<i>software LV</i>)
Desvio- b (Erro)	4,0	0,4
Variância	18,0	0,2
Desvio-padrão	4,24	0,46
Incerteza padrão $u(x_i)$	1,90	0,21

5 Conclusões

Neste capítulo serão abordadas as conclusões obtidas na realização da dissertação, com a respetiva discussão e análise crítica dos resultados. Serão ainda abordados possíveis trabalhos a realizar de futuro de modo a dar continuidade ao trabalho ora desenvolvido.

5.1 Conclusões

Com a solução desenvolvida reduz-se significativamente o erro humano, o que se traduz em medições mais exatas (erros menores) e mais precisas (analisando a tabela (24) o desvio padrão com o método desenvolvido é cerca de 10x menor que no método convencional).

A possibilidade de armazenamento das imagens adquiridas torna-se também uma vantagem, uma vez que permite no futuro construir uma biblioteca de dados para diferentes tipos de amostras e ainda permite o rastreio de medições que tenham sido efetuadas no passado (mesmo não tendo a peça já disponível).

A utilização do programa sem dúvida irá facilitar o trabalho dos técnicos. A realização deste tipo de ensaio de dureza por penetração cuja medição recorre à acuidade visual do operador, em trabalhos consecutivos ou de elevado número de indentações (como é o caso das filiações de durezas em materiais soldados), a probabilidade de ocorrer fadiga visual é elevada afetando a qualidade dos resultados obtidos, o que não acontecerá com a utilização do programa cujas medições são efetuadas automaticamente pelo *software*.

Relativamente à calibração das imagens, devido à configuração e qualidade das lentes das câmaras digitais comuns, é habitual ocorrerem distorções que afetam dimensionalmente zonas de particular interesse. Nestes casos são utilizadas grelhas com uma matriz de referência calibrada para aferir dimensionalmente as imagens. Conforme se constatou aquando da calibração com a régua graduada, essa distorção não se verificou, uma vez que a câmara utilizada sendo indicada para microscopia, não possui qualquer lente acoplada fazendo uso do sistema ótico do microscópio/micro durómetro e que possui uma elevada qualidade ótica.

Para além disso, e tendo em conta que o efeito de distorção está relacionado também com a distância focal e alinhamento face à zona de análise, no caso concreto da montagem no microscópio esta situação estará minimizada uma vez que o posicionamento da câmara é fixo assim como a distância focal, sendo que a posição face à amostra é rigorosamente perpendicular. Neste caso, a distância focal sendo constante é também ela reduzida comparada com outras aplicações de aquisição de imagem, e devido ainda ao facto das amostras sujeitas ao ensaio terem uma preparação metalográfica prévia, exibindo uma superfície de análise de elevada planeza, garantindo a mesma focagem ao longo de toda a amostra.

Relativamente à compatibilidade entre as câmaras digitais e o LV, e do programa permitir a ligação de um grande número de câmaras digitais via USB, verificou-se que nem todos os fabricantes de câmaras digitais disponibilizam protocolos compatíveis com estes sistemas, o que poderá significar um custo de aquisição suplementar.

Relativamente ao cálculo de incertezas, e apesar de com a aplicação desta nova metodologia de medição reduzirmos o erro, melhorarmos a resolução do equipamento de medida e as respetivas

incertezas padrão, de acordo com a metodologia de cálculo e expressão das incertezas indicado na NP EN ISO 6507-1:2011, o fator com mais peso no resultado final continua a ser o erro associado ao bloco-padrão de durezas (CRM).

5.2 Trabalhos Futuros

Tendo em conta as restrições normais em termos de disponibilidade do equipamento para desenvolvimento de soluções complementares, como limitações de orçamento para aquisição de ferramentas e dispositivos de automatização dos vários componentes móveis do micro durómetro, em tempo útil para a realização desta dissertação não foi possível desenvolver o sistema de modo a torna-lo autónomo nas restantes funções de controlo do equipamento.

Assim, futuramente, poder-se-ão realizar alguns trabalhos complementares de modo a evoluir o sistema aqui desenvolvido, como sendo:

- Antes de mais, realizar uma análise criteriosa dos custos face aos proveitos, entre a implementação da solução *LabVIEW* com as demais ferramentas de análise de imagem (*NI Vision*) e a aquisição de uma solução tipo “chave na mão” junto do fornecedor do micro durómetro (*Struers*, ou outro).

- Ligação do equipamento (micro durómetro) através da porta RS-232C ao PC e por sua vez ao programa desenvolvido de modo a permitir ao operador controlar todos os parâmetros de ensaio, como a seleção da carga, tempo de permanência da carga de ensaio, velocidade de penetração, entre outros, a partir do próprio programa de ensaio desenvolvido;

- Robotização da mesa no plano horizontal (nos eixos x-y) onde são colocadas as amostras, o que permitiria ao equipamento, após indicação do técnico sobre o posicionamento e forma das amostras, número de indentações e sequência de ensaio, a realização do ensaio de micro dureza de forma totalmente autónoma;

- Para o cumprimento do ponto anterior, seria necessário desenvolver mecanismos de acionamento eletromecânico e de comunicação com o *software*, ao nível da comutação da torreta e da focagem através do deslocamento, no eixo vertical (eixo Z), da mesa porta-amostras;

- Uma vez que este equipamento está preparado para a realização de ensaios *knoop*, replicar todo o trabalho já desenvolvido e demais trabalhos futuros para este tipo de ensaios, permitindo ao equipamento de durezas uma maior oferta de ensaios de micro dureza e por sua vez um maior leque de materiais e/ou técnicas de medição.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Gomes, *Antecedentes do Capitalismo.*, Almada: Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [2] D. François, *Essais mécaniques sur les métaux et alliages.*, Paris: Editions T.I., 2005.
- [3] Encyclopædia Britannica., “Mohs hardness,” [Online]. Available: <http://www.britannica.com/science/Mohs-hardness>. [Acedido em 16 Junho 2015].
- [4] D. Bressan, “When Rock Classification is not hard anymore, thank Mohs Scale of Hardness,” 29 January 2014. [Online]. Available: http://blogs.scientificamerican.com/history-of-geology/files/2014/01/KRIEHUBER_1832_Friedrich_Mohs.jpg.
- [5] Mineralab, “Mineral identification tools by Mineralab,” [Online]. Available: <http://www.mineralab.com/HD2.jpg>. [Acedido em 11 Agosto 2015].
- [6] C. H. Bierbaum, “Hardness Testing of Bearing Metals,” *The Enginner*, p. 420, 20 Abril 1923.
- [7] ASTM International, “Method of Test for Determination of Bierbaum Scratch Hardness of Plastic Materials (Withdrawn 1963),” [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D1526.htm>. [Acedido em 22 Junho 2015].
- [8] alanfgarratt@gmail.com, “DuroPrüf - The History and Origins of the Durometer,” [Online]. Available: www.shore-durometer-history.blogspot.com. [Acedido em 03 Agosto 2015].
- [9] Shore A. T., “Property of Hardness in Metals and Materials,” em *Proceedings*, ASTM, 1911, pp. Vol. 11 - 733-739.
- [10] P. M. L. E. M. J. Rodrigues, “Ensaio Mecânicos de Materiais - Aula 3 - Ensaio de Dureza,” [Online]. Available: <http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula3.pdf>. [Acedido em 9 Setembro 2015].
- [11] ASTM International, *ASTM D2240 - 05(2010) - Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*, West Conshohocken, PA, 2010.
- [12] K. Herrmann, “Chapter 3 - Dynamic Test Methods,” em *Hardness Testing: Principles and Applications*, USA, ASM International, 2011, pp. 78 - 81.
- [13] Proceq, [Online]. Available: <http://www.equotip.com/equotip-550-leeb/?lang=pt-br>. [Acedido em 26 Junho 2015].
- [14] D. Leeb, “Definition of the hardness value “L” in the Equotip dynamic measurement method,” em *VDI Berichte 583*, VDI Berichte, 1986, pp. 109 - 133.
- [15] ASTM International, *ASTM A956-12, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products*, West Conshohocken , PA, 2012.
- [16] Wenzhou Jeenda Instruments Co.,Ltd., “Leeb Hardness Tester - Available Type of Impact Device,” [Online]. Available: http://www.china-durometer.com/images/upload/product_6.jpg. [Acedido em 7 Setembro 2015].
- [17] “Leeb Hardness Tester - Blocos padrão de referência,” [Online]. Available: <http://www.sinowon.de/en/a/zhongwangchanpin/2014/1128/107.html>. [Acedido em 9 Setembro 2015].
- [18] Encyclopædia Britannica, “Johan August Brinell,” 5 Fevereiro 2015. [Online]. Available: <http://www.britannica.com/biography/Johan-August-Brinell>. [Acedido em 21 Junho 2015].
- [19] J. A. Brinell, “Steel ball test report (Mémoire sur les épreuves à bille en acier),” em *Communications présentés devant le congrés international des méthodes d'essai des matériaux de construction*, Paris, 1901.
- [20] A. Hildebrand, “Svenskt porträttgalleri / XVII. Ingeniörer (biografier af Albin Hildebrand)/40,” Projekt Runeberg -, 22 Junho 2015. [Online]. Available: <http://runeberg.org/img/spg/17/0052.1.jpg>. [Acedido em 16 Setembro 2015].

- [21] C. A. G. d. M. Branco, *Mecânica dos Materiais*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.
- [22] IPQ - Instituto Português da Qualidade, *NP EN ISO 6507-1*, Caparica, Lisboa: IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [23] EMCO-TEST Prüfmaschinen GmbH, “Brinell Universal - Härteprüfmaschinen der 3. Generation,” [Online]. Available: <http://www.decca.si/modules/store/uploads/pdf/emco-test-m5u-2.pdf>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [24] ASTM, “ASTM Workshop on the History of Mechanical Testing,” 13 Novembro 2011. [Online]. Available: <http://www.astm.org/COMMIT/E28Presentations/HistoryMechTesting.pdf>. [Acedido em 17 Junho 2015].
- [25] S. R. Low, *Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials*, Washington: National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [26] IPQ - Instituto Português da Qualidade, *NP EN ISO 6508-1*, Caparica, Lisboa: IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [27] M. F. d. S. Ferreira, “Ensaio de dureza Rockwell, Vickers, Brinell e Microdureza, ensaio de tração e ensaio Jominy.,” PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte - Brasil, Outubro de 2011.
- [28] R. L. Smith e G. E. Sandland, *An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1922.
- [29] A. C. Fischer-Cripps, *Introduction to Contact Mechanics - Second Edition*, New South Wales, Australia: Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
- [30] NIST, “Hardness Standardization,” 3 February 2014. [Online]. Available: http://www.nist.gov/mml/msed/mechanical_performance/hardness-standardization.cfm.
- [31] F. Knoop, C. C. Peters e W. B. Emerson, “A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, p. Volume 23, July, 1939.
- [32] B. F. d. Souza, “SENAI - Aula 10 - Ensaio de Dureza,” Scribd, 2011. [Online]. Available: <http://pt.scribd.com/doc/74167849/Aula-10-Ensaio-de-Dureza#scribd>. [Acedido em 15 Setembro 2015].
- [33] JCMG 200:2012, *VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia - 1ª Ed. Luso-Brasileira*, IPQ/INMETRO, 2012.
- [34] IPQ - Instituto Português da Qualidade, *NP EN ISO 6507-3 - Calibração de blocos de referência.*, Caparica, Lisboa: IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [35] Zeiss, “Microscope Cameras - For life science applications and materials research,” Carl Zeiss Microscopy GmbH, [Online]. Available: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/microscope-cameras.html. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [36] Leica Microsystems, “Microscope Cameras for Life Science,” Leica Microsystems GmbH, 2015. [Online]. Available: <http://www.leica-microsystems.com/products/microscope-cameras/life-science/>. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [37] Nikon, “Digital Cameras for Microscopes,” Nikon Corporation, 2014. [Online]. Available: http://www.nikon.com/products/instruments/lineup/bioscience/camera_microscopy/index.htm. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [38] Motic, “Digital Cameras,” Motic, 2015. [Online]. Available: <http://www.moticeurope.com/product/digital/cameras/>. [Acedido em 20 Setembro 2015].

- [39] Lumenera Corporation, “Microscopy Cameras,” Lumenera Corporation, 2015. [Online]. Available: <http://www.lumenera.com/products/microscopy-cameras/>. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [40] Zwick/Roell, “High Definition Software,” [Online]. Available: <http://www.zwick.com/en/products/hardness-testing-machines-and-instruments/hardness-testing-software/high-definition-software.html>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [41] EMCO-TEST Prüfmaschinen GmbH, “The most advanced software package for hardness testers - ECOS Workflow,” 2015. [Online]. Available: <http://www.emcotest.com/en/products-services/software/>. [Acedido em 21 Outubro 2015].
- [42] LECO, “ConfiDent2-Hardness Testing System,” [Online]. Available: <http://hardnesstestingsoftware.com/index.asp>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [43] Struers, “The ecos Workflow™ software – easy and simple operation,” 2015. [Online]. Available: http://www.dura-vision.com/duravision_side7_ecoWorkflow.html. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [44] Clemex Technologies Inc., “Clemex CMT - High definition in automated microhardness testing,” 2015. [Online]. Available: <http://www.clemex.com/en/Products/Specific-Image-Analysis/Clemex-CMT/Description>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [45] Buehler, “OmniMet™ MHT - Automated Microindentation Hardness Testing Systems,” 2012. [Online]. Available: <http://www.buehler.com/China/Brochures/English/Hardness/OmniMet%20MHT%20Brochure.pdf>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [46] MIPS Technology, “CDV Vickers,” MIPS Sistemas, [Online]. Available: <http://www.mipssistemas.com.br/en/cdv-vickers.php>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [47] Buehler, “DiaMet™ Software - Automatic Vickers/Knoop Hardness Test Software,” 2014. [Online]. Available: <http://www.buehler.com/UK/Brochures/English/Hardness/DiaMet%20Brochure.pdf>. [Acedido em 21 Setembro 2015].
- [48] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, JCGM 100:2008 - GUM 1995 with minor corrections, JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology, 2010.
- [49] IPAC - Instituto Português de Acreditação, *OGC010 - Avaliação da Incerteza de Medição em Calibração*, Caparica, Lisboa, 2015-01-06.
- [50] IPQ - Instituto Português da Qualidade, NP EN ISO 6507-2, Caparica, Lisboa: IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2012.
- [51] Struers, Instruction Manual - Duramin-1/-2, Copenhaga/Dinamarca: Struers A/S, 2001.
- [52] Struers, “Duramin - Microhardness testers - More than just hardness testing,” Agosto 2004. [Online]. Available: http://www.struers.kz/tm/Duramin%20brochure_english.pdf. [Acedido em 25 Setembro 2015].
- [53] Lumenera Corporation, “Microscopy Camera Downloads - National Instruments LabVIEW Plug-In,” Lumenera Corporation, (C) 2015. [Online]. Available: <http://www.lumenera.com/support/downloads/microscopy-downloads.php#h>. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [54] National Instruments, “Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW,” [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/pt/>. [Acedido em 16 Setembro 2015].
- [55] National Instruments, “NI Vision Acquisition Software - Software to Acquire, Save, and Display Images,” [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/12892>. [Acedido em 16 Setembro 2015].

- [56] National Instruments, “Módulo NI Vision Development - Funções programáveis de visão,” 2015. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/2881>. [Acedido em 16 Setembro 2015].
- [57] National Instruments, “NI-IMAQ for USB Cameras,” 5 Junho 2013. [Online]. Available: <http://www.ni.com/example/30030/en/>. [Acedido em 16 Setembro 2015].
- [58] RealGems.org, “Mohs Hardness Scale,” 2007 - 2011. [Online]. Available: <http://www.realgems.org/pic/mohs%20en.jpg>.
- [59] “Leeb Hardness Tester - Optional Support Rings,” 2010. [Online]. Available: http://www.china-durometer.com/images/upload/product_5.jpg. [Acedido em 7 Setembro 2015].
- [60] C. d. Wikipédia, “LabVIEW,” Wikipédia, a enciclopédia livre., 12 December 2015. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=LabVIEW&oldid=42584454>. [Acedido em 20 Setembro 2015].
- [61] EA - European co-operation for Accreditation , “EA-10/16 - EA Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements,” (EA Laboratory Committee), 2001.

ANEXOS

Anexo 1 – Cálculo de Incertezas – Método 1 (NP EN ISO 6507-1:2011)

A calibração do durómetro efetua-se para três padrões de diferentes níveis de durezas, para expor o procedimento de cálculo das incertezas na calibração usa-se somente os dados do padrão 250HV0,1, sendo que para os restantes padrões o procedimento é semelhante. Relativamente às medições efetuadas na amostra/corpo de prova, estas foram efetuadas também no bloco-padrão para efeitos de simplificação dos cálculos.

Tabela 25 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão.

Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)
1	0,02720	251
2	0,02723	250
3	0,02731	249
4	0,02723	250
5	0,02722	250
Média	0,02724	250
Desvio-padrão (s)		0,770
Incerteza padrão (u_i)		0,344

Tabela 26 – Medições obtidas por medição no corpo de prova/amostra.

Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)
1	0,02690	256
2	0,02680	258
3	0,02740	247
4	0,02700	254
5	0,02700	254
Média	0,02702	254
Desvio-padrão (s)		4,24
Incerteza padrão (u_i)		1,90

Tabela 27 – Balanço de incertezas – método 1 da NP EN ISO 6507-1:2011.

Fonte de Incerteza	Tipo de incerteza	Estimativa do valor de grandeza	Incerteza padrão		Coeficientes de sensibilidade		Quadrado da contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
			$u(x_i)$	Unid.	C_i	Unid.		
χ_i	A, BN, BR, BT	x_i	$u(x_i)$	Unid.	C_i	Unid.	$u^2_i(y) = (u(x_i) \cdot C_i)^2$	V_i
Durómetro (EMA)	B - R	± 20 HV	7,14	HV	1	HV	51,02041	∞
Repetibilidade (Padrão)	A	250 HV	0,393	HV	1	HV	0,15422	4
Repetibilidade (Amostra)	A	---	2,162	HV	1	HV	4,67305	4
Padrão (CRM)	B - N	$\pm 9,9$ HV	4,95	HV	1	HV	24,50250	50
Resolução (Micrómetro)	B - R	0,0001 mm	5,774E-05	mm	9402,014	HV/mm	2,94660E-01	∞
Variância combinada							$u^2(y)$	80,64
Incerteza padrão combinada							$u(y)$	8,98
Graus de liberdade efetivos							ν_{eff}	372
Fator de expansão							k	1,0
Incerteza padrão Expandida							U	$\pm 18,0$

Expressão final do resultado de dureza: $254,0 \pm 18,0$ HV0,1

Anexo 2 – Cálculo de Incertezas – Método 2 (NP EN ISO 6507-1:2011)

Para a determinação da incerteza associada à medição de micro dureza *Vickers* utilizando o 2º método de cálculo da norma, cujo valor de dureza obtido é corrigido em função do erro (b), e acrescido da incerteza expandida associada (U_{corr}).

Tabela 28 – Medições obtidas por medição no corpo de prova/amostra.

Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)
1	0,02690	256
2	0,02680	258
3	0,02740	247
4	0,02700	254
5	0,02700	254
Média	0,02702	254
Desvio-padrão (s)		4,24
Incerteza padrão (u_i)		1,90

Tabela 29 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão.

Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)
1	0,02720	251
2	0,02723	250
3	0,02731	249
4	0,02723	250
5	0,02722	250
Média	0,02724	250
Desvio-padrão (s)		0,770
Incerteza padrão (u_i)		0,344

Tabela 30 – Medições obtidas por medição no bloco-padrão antes e após o ensaio para calibração do micro durómetro.

Verificação inicial do bloco-padrão			Verificação final do bloco-padrão		
Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)	Medições	Diagonal Média (mm)	Dureza medida (HV0,1)
1	0,02720	251	1	0,02722	250
2	0,02723	250	2	0,02723	250
3	0,02731	249	3	0,02719	251
4	0,02723	250	4	0,02715	252
5	0,02722	250	5	0,02720	251
Média	0,02724	250	Média	0,02720	251

Desvio – Erro (b)	
Desvio - Erro INICIAL	0,0
Desvio - Erro FINAL	1,0
Desvio - Erro MÉDIO	0,5
Desvio-padrão	0,74
Incerteza padrão $u(x_i)$	0,52

Tabela 31 – Balanço de incertezas – método 2 da NP EN ISO 6507-1:2011

Fonte de Incerteza	Tipo de incerteza	Estimativa do valor de grandeza	Incerteza padrão		Coeficientes de sensibilidade		Quadrado da contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
			$u(x_i)$	Unid.	C_i	Unid.		
χ_i	A, BN, BR, BT	x_i					$u^2(y) = (u(x_i) \cdot C_i)^2$	V_i
Desvio do Durómetro (erro)	A	0 HV	0,96477	HV	1	HV	0,93078	1
Repetibilidade (Padrão)	A	250 HV	0,393	HV	1	HV	0,15422	4
Repetibilidade (Amostra)	A	---	2,162	HV	1	HV	4,67305	4
Padrão (CRM)	B - N	$\pm 9,9$ HV	4,95	HV	1	HV	24,5025	50
Resolução (Micrómetro)	B - R	0,0001 mm	5,774E-05	mm	-3470,578	HV/mm	0,29466	∞
Variância combinada							$u^2(y)$	30,56
Incerteza padrão combinada							$u(y)$	5,53
Graus de liberdade efetivos							ν_{eff}	50
Fator de expansão							k	2,1
Incerteza padrão Expandida							U	11,6

O resultado passa assim a ser expresso por;

$$\bar{X}_{\text{corr}} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{\text{corr}} = 254,5 \pm 11,6 \text{ HV}0,1$$

ou por:

$$\bar{X}_{u_{\text{corr}}} = \bar{x} \pm (U_{\text{corr}} + |\bar{b}|) = 254 \pm 12,1 \text{ HV}0,1$$

Anexo 3 – Certificados dos Blocos Padrões de Dureza (CRM's)

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

4024101
DKD-K-06301
2011-11

Gegenstand <i>Object</i>	Härtevergleichsplatte Reference block
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Buderus Edelstahl GmbH Wetzlar FAX +49 (0) 6441 374 2344
Typ <i>Type</i>	-
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	-
Auftraggeber <i>Customer</i>	-
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	430016102
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	2
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2011-11-17

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
*This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Stellv.	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person responsible</i>
	2011-11-17		Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk	Mackrodt

Schwenk

Mackrodt

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 63 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (250±9,9) HV0,1.



No. 430016102 - 4024101.1111



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen.
About the calibration of a reference block according to DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
De l'étalonnage d'un bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.

Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 4024101.1111 (250 ± 9.9) HV0,1

4024101

DKD-K-06301

2011-11

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmessenrichtung / Calibrationmaschine / Machine d'étalonnage: K5771
Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüflfläche / Velocity of the indenter prior to the surface / La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.1 mm/s
Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 2 s
Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K5771
Objektivvergrößerung / Magnification of the objective / Magnification de l'objectif: 100x
Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.85
Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 1000x
Prüftemperatur / Temperature / Température: (20° ± 2°) Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.0 mm
Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
μm	27.20	27.23	27.31	27.23	27.22	-	27.30	27.14
HV	251	250	249	250	250			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 27.24 μm

Relative Spannweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrei: 0.4 %

Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(250 ± 9.9) HV0,1

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2011-11-17

U_{cr}m = 9.9 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)

Enlarged uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence

U_{xc}rm = 9.9 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmessenrichtung (k=2)

Enlarged uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage

U_{cr}mc_{al} = 0.8 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)

Enlarged uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)

Die Härtevergleichsplatte erfüllt die Anforderungen von DIN EN ISO 6507-3.

The reference block fulfills the requirements of DIN EN ISO 6507-3.

Le bloc de référence est conforme aux exigences selon DIN EN ISO 6507-3.

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.

Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.

Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

Fig. 64 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (250±9,9) HV0,1.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

4976201
DKD-K-06301
2013-07

Gegenstand
Object Haertevergleichsplatte
Reference block

Hersteller
Manufacturer Buderus Edelstahl GmbH
Wetzlar
FAX +49 (0) 6441 374 2344

Typ
Type -

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number -

Auftraggeber
Customer -

Auftragsnummer 430018142
Order No.

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines 2
Number of pages of the certificate

Datum der Kalibrierung 2013-07-02
Date of calibration

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European cooperation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	2013-07-02	Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk	Mackrodt

Schwenk

Mackrodt

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 65 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (544±27,9) HV0,1.



No. 430018142 - 4976201.0613



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte in Anlehnung an DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen
About the calibration of a reference block following DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
De l'étalonnage d'un bloc de référence suivant DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.
Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 4976201.0613 (544 ± 27.9) HV0,1

4976201
DKD-K-06301
2013-07

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung / Calibration machine / Machine d'étalonnage: K5771
Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüffläche / Velocity of the indenter prior to the surface / La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.1 mm/s
Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 2 s
Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K5771
Objektivvergrößerung / Magnification of the objectiv / Magnification de l'objectif: 100x
Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.85
Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 1000x
Prüftemperatur / Temperature / Température: (20 ± 2) °Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.1 mm
Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
µm	18.39	18.47	18.43	18.48	18.56	-	18.65	18.46
HV	549	544	546	543	539			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 18.46 µm
Relative Spannweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrel: 0.9 %
Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(544 ± 27.9) HV0,1

*Der Kalibrierwert der Härtevergleichsplatte liegt außerhalb des normativ zulässigen Anwendungsbereichs.
The calibration value of the hardness reference block is outside of the allowed normative application range.
La valeur de calibrage de l'étalon de dureté est en dehors du domaine d'application normatif admissible.*

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2013-07-02

U_{crm} = 27.9 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)
Expanded uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence
U_{xcrm} = 27.7 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung (k=2)
Expanded uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage
U_{crmc} = 3.8 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)
Expanded uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.
Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.
Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

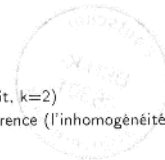


Fig. 66 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (544±27,9) HV0,1.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

5067401
DKD-K-06301
2013-08

Gegenstand <i>Object</i>	Haertevergleichsplatte Reference block
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Buderus Edelstahl GmbH Wetzlar FAX +49 (0) 6441 374 2344
Typ <i>Type</i>	-
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	-
Auftraggeber <i>Customer</i>	-
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	430018373
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	2
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2013-08-19

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European cooperation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
*This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	2013-08-19	Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk 	Mackrodt

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 67 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (893±56,1) HV0,1.



No. 430018373 - 5067401.0713



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte in Anlehnung an DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen
 About the calibration of a reference block following DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
 De l'étalonnage d'un bloc de référence suivant DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.
 Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
 Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 5067401.0713 (893 ± 56.1) HV0,1

5067401
DKD-K-06301
2013-08

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung / Calibration machine / Machine d'étalonnage: K5771
 Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüffläche / Velocity of the indenter prior to the surface / La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.1 mm/s
 Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 2 s
 Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
 Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K5771
 Objektivvergrößerung / Magnification of the objectiv / Magnification de l'objectif: 100x
 Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.85
 Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 1000x
 Prüftemperatur / Temperature / Température: (20 ± 2) °Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.0 mm
 Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
 Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
 Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
µm	14.36	14.35	14.40	14.43	14.50	-	14.64	14.36
HV	899	901	895	891	882			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 14.41 µm
 Relative Spannweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrel: 1.0 %
 Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(893 ± 56.1) HV0,1

*Der Kalibrierwert der Härtevergleichsplatte liegt außerhalb des normativ zulässigen Anwendungsbereichs.
 The calibration value of the hardness reference block is outside of the allowed normative application range.
 La valeur de calibrage de l'étalon de dureté est en dehors du domaine d'application normatif admissible.*

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2013-08-19

U_{crm} = 56.1 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)
 Expanded uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence
 U_{xcrm} = 55.6 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung (k=2)
 Expanded uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage
 U_{rcmal} = 7.8 HV0,1 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)
 Expanded uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.
 Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.
 Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

Fig. 68 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (893±56,1) HV0,1.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

4025501
DKD-K-06301
2011-11

Gegenstand Object	Härtevergleichsplatte Reference block
Hersteller Manufacturer	Buderus Edelstahl GmbH Wetzlar FAX +49 (0) 6441 374 2344
Typ Type	-
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	-
Auftraggeber Customer	-
Auftragsnummer Order No.	430016102
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	2
Datum der Kalibrierung Date of calibration	2011-11-08

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
*This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Stellv.	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person responsible
	2011-11-09		Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk	Kolanek



Schwenk

Kolanek

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 69 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (255±3,0) HV2.



No. 430016102 - 4025501.1111



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen.
About the calibration of a reference block according to DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
De l'étalonnage d'un bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.

Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 4025501.1111 (255 ± 3.0) HV2

4025501
DKD-K-06301
2011-11

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung / Calibration machine / Machine d'étalonnage: K4133
Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüffläche / Velocity of the indenter prior to the surface / La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.2 mm/s
Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 5 s
Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K4133
Objektivvergrößerung / Magnification of the objective / Magnification de l'objectif: 50x
Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.60
Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 500x
Prüftemperatur / Temperature / Température: (20° ± 2°) Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.0 mm
Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
µm	121.03	120.37	120.88	120.47	120.40	-	120.23	120.58
HV	253	256	254	256	256			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 120.63 µm
Relative Spannweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrel: 0.6 %
Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(255 ± 3.0) HV2

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2011-11-08

U_{crm} = 3.0 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)
Enlarged uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence
U_{xcrm} = 2.7 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung (k=2)
Enlarged uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage
U_{rcmcal} = 1.4 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)
Enlarged uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)
Die Härtevergleichsplatte erfüllt die Anforderungen von DIN EN ISO 6507-3.
The reference block fulfills the requirements of DIN EN ISO 6507-3.
Le bloc de référence est conforme aux exigences selon DIN EN ISO 6507-3.

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.
Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.
Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

Fig. 70 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (255±3,0) HV2.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

4979001
DKD-K-06301
2013-06

Gegenstand <i>Object</i>	Haertevergleichsplatte Reference block
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Buderus Edelstahl GmbH Wetzlar FAX +49 (0) 6441 374 2344
Typ <i>Type</i>	-
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	-
Auftraggeber <i>Customer</i>	-
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	430018116
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	2
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2013-06-10

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
*This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	2013-06-10	Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk	Kolanek



Schwenk

Kolanek

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 71 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (542±7,5) HV2.



No. 430018116 - 4979001.0613



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen.
 About the calibration of a reference block according to DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
 De l'étalonnage d'un bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.

Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
 Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 4979001.0613 (542 ± 7.5) HV2

4979001
DKD-K-06301
2013-06

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmessenrichtung / Calibration machine / Machine d'étalonnage: K4133
 Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüffläche / Velocity of the indenter prior to the surface /
 La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.2 mm/s
 Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 5 s
 Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
 Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K4133
 Objektivvergrößerung / Magnification of the objectiv / Magnification de l'objectif: 50x
 Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.60
 Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 500x
 Prüftemperatur / Temperature / Température: (20 ± 2) °Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.1 mm
 Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
 Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
 Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
µm	82.43	82.82	83.03	82.65	82.76	-	82.69	82.83
HV	546	541	538	543	541			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 82.74 µm
 Relative Spannweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrel: 0.7 %
Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(542 ± 7.5) HV2

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2013-06-10

U_{crm} = 7.5 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)
 Expanded uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence
 U_{xcr} = 6.9 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmessenrichtung (k=2)
 Expanded uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage
 U_{crmc} = 3.0 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)
 Expanded uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)
 Die Härtevergleichsplatte erfüllt die Anforderungen der DIN EN ISO 6507-3.
 The reference block fulfills the requirements of DIN EN ISO 6507-3.
 Le bloc de référence est conforme aux exigences selon DIN EN ISO 6507-3.

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.
 Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.
 Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

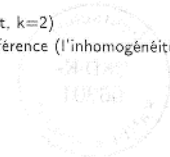


Fig. 72 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (542±7,5) HV2.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium / Calibration laboratory

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

4979101
DKD-K-06301
2013-06

Gegenstand <i>Object</i>	Haertevergleichsplatte Reference block
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Buderus Edelstahl GmbH Wetzlar FAX +49 (0) 6441 374 2344
Typ <i>Type</i>	-
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	-
Auftraggeber <i>Customer</i>	-
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	430018116
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	2
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2013-06-10

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
*This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	2013-06-10	Dipl. Masch. Ing. D. Schwenk	Kolanek

Schwenk

Kolanek

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Postanschrift: D-44285 Dortmund
Telefon +49(0) 231 4502441 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: kalibrierung@mpanrw.de · www.mpanrw.de/crm/

Fig. 73 – Cópia do certificado de calibração do padrão de dureza (865±14,4) HV2.



No. 430018116 - 4979101.0513



Kalibrierschein / Certificate / Certificat

Über die Kalibrierung einer Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 für die indirekte Prüfung von Vickers-Härteprüfmaschinen.
 About the calibration of a reference block according to DIN EN ISO 6507-3 for the indirect verification of Vickers hardness testing machines.
 De l'étalonnage d'un bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3 pour vérification indirecte des machines d'essai de dureté Vickers.
 Kennzeichen des Herstellers / Mark of the producer / Marque du producteur: **B**
 Zeichen der Kalibrierstelle / Sign of the manufacturer / Signe de l'institut d'étalonnage:

MPA NRW 4979101.0513 (865 ± 14.4) HV2

4979101
DKD-K-06301
2013-06

Kalibrierbedingungen / Calibration conditions / Conditions d'étalonnage

Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung / Calibration machine / Machine d'étalonnage: K4133
 Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers an die Prüffläche / Velocity of the indenter prior to the surface / La vitesse d'approche du pénétrateur au surface: < 0.2 mm/s
 Aufbringzeit der Prüfkraft / Increase time of test force / Temps d'augmentation de la force: 5 s
 Einwirkdauer der Prüfkraft / Duration of test force / Durée d'application de la force: 15 s
 Messmikroskop / Measuring microscope / Microscope de mesure: K4133
 Objektivvergrößerung / Magnification of the objective / Magnification de l'objectif: 50x
 Numerische Apertur / Numerical aperture / Ouverture numérique: 0.60
 Gesamtvergrößerung / Total magnification / Magnification totale: 500x
 Prüftemperatur / Temperature / Température: (20 ± 2) °Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Dicke der Härtevergleichsplatte / Thickness of reference block / Epaisseur du bloc de référence: 6.1 mm
 Mittlere Länge der Eindruckdiagonalen der fünf Eindrücke - Einzelwerte vom Monitoreindruck im Kreis (d1,d2)
 Mean length of the diagonals of five indentations - Single values of the monitor indentation in the circle (d1,d2)
 Diagonales moyennes des cinq empreintes - Les valeurs simples en cercle (d1,d2):

No.	1	2	3	4	5	-	5: d1	5: d2
µm	65.57	65.21	65.63	65.69	65.24	-	65.10	65.38
HV	862	872	861	859	871			

Mittelwert / Mean value / Valeur moyenne: 65.47 µm
 Relative Spanweite Rrel / Relative repeatability Rrel / Répétabilité relative Rrel: 0.7 %
 Härte der Härtevergleichsplatte / Hardness of reference block / Dureté du bloc de référence:

(865 ± 14.4) HV2

Kalibrierdatum / Date of calibration / Date de l'étalonnage: 2013-06-10

U_{CRM} = 14.4 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte (k=2)
 Expanded uncertainty of the hardness reference reference block / L'incertitude élargi du bloc de référence
 U_{CRM} = 12.9 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härte-Bezugsnormalmesseinrichtung (k=2)
 Expanded uncertainty of standardizing machine / L'incertitude élargi du duromètre pour l'étalonnage
 U_{CRMAL} = 6.3 HV2 Erweiterte Messunsicherheit der Härtevergleichsplatte beim Kalibrieren (Inhomogenität, k=2)
 Expanded uncertainty of hardness reference block due to inhomogeneity / L'incertitude élargi du bloc de référence (l'inhomogénéité)
 Die Härtevergleichsplatte erfüllt die Anforderungen der DIN EN ISO 6507-3.
 The reference block fulfills the requirements of DIN EN ISO 6507-3.
 Le bloc de référence est conforme aux exigences selon DIN EN ISO 6507-3.

Hinweis / Note / Note

Auf die empfohlene Gültigkeitsdauer der Härtevergleichsplatte nach DIN EN ISO 6507-3 wird hingewiesen.
 Attention is called to the recommended period of validity of the reference block according to DIN EN ISO 6507-3.
 Nous signalons la restriction de validité recommandée du bloc de référence selon DIN EN ISO 6507-3.

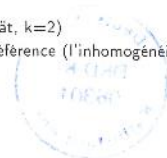


Fig. 74 – Cópia do verso do certificado de calibração do padrão de dureza (865±14,4) HV2.

Anexo 4 – Certificado de conformidade do micro indentador *Vickers*


 INSPECTION SHEET	
TYPE OF PENETRATOR : MICRO VICKERS	
PRODUCT NO.	18324
RIDGE-TO-RIDGE	: A-A' 148° 09' (136° 03')
(FACE-TO-FACE)	: B-B' 148° 08' (136° 02')
WEIGHT 1.4g±0.02	: 1.42
LENGTH 11mm+0. -0.05	: 10.99
OFF SET 0.5 μ UNDER	: GOOD
* FACE-TO-FACE ANGLE 136° ±30' BY JIS IS EQUAL TO 148° 07' ±23' OF RIDGE-TO-RIDGE	
DATE : 2011.05.18	INSPECTOR : <i>Miyazaki</i>
TOKYO DIAMOND TOOLS MFG CO.,LTD 340-3, IMAI, OKAYA CITY, NAGANO	

Fig. 75 – Cópia do certificado de inspeção de fabrico do micro indentador *Vickers* utilizado nas medições.

Anexo 5 – Validação da folha de Cálculo.

Ensaio de μ dureza Vickers / μ Vickers Hardness Test													
EQUIPAMENTO/EQUIPMENT		MEDIÇÕES NA AMOSTRA						MEDIÇÕES NO BLOCO-PADRÃO (CRM)					
Marca/Struers		Diagonal		Diagonal Média	Dureza medida	VERIFICAÇÃO INICIAL		Verificação Final					
Modelo/Model: Duramin - 1		d_1 (mm)	d_2 (mm)	(mm)	(HV)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	(mm)	(HV)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	(mm)	(HV)
Nr de Série/Serial No: 5650091		Leitura											
Ano de fabrico/year: 2000		0,06653	0,06653	0,06653	419,0	0,07012	0,07012	0,07012	377	0,07023	0,07023	0,07023	376
INDENTADOR/INDENTER		0,06499	0,06499	0,06499	439,0	0,07023	0,07023	0,07023	376	0,07014	0,07014	0,07014	377
Nr de Série/Serial No: 18324		0,06427	0,06426	0,06427	449,0	0,07014	0,07014	0,07014	377	0,07022	0,07022	0,07022	376
Ano de fabrico/year: 2011		0,06476	0,06479	0,06478	442,0	0,07014	0,07014	0,07014	377	0,07004	0,07004	0,07004	378
PARÂMETROS DE ENSAIO/TEST PARAMETERS		0,06458	0,06469	0,06464	443,9	0,07014	0,07014	0,07014	377	0,07023	0,07023	0,07023	376
Força/Force: 1 kgf		Média		0,06504	438,6	Média		0,07015	376,8	Média		0,07017	376,6
Resolução do micrómetro: 0,0001 mm		Variância		133,4		Variância		0,22		Variância		0,79	
BLOCO-PADRÃO/CRM		Desvio-padrão		11,55		Desvio-padrão		0,47		Desvio-padrão		0,89	
Dureza/Hardness: 376 HV		Incerteza padrão $u(x_i)$		5,17		Incerteza padrão $u(x_i)$		0,21		Incerteza padrão $u(x_i)$		0,40	
$U_{(k=2)}$: 6 HV		Desvio - b (ERRO)				Desvio - b (ERRO)				Desvio - b (ERRO)			
EMA: 4 %		Desvio - Erro INICIAL				Desvio - Erro INICIAL		0,8		Desvio - Erro FINAL		0,6	
CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA À CALIBRAÇÃO DE DUREZA VICKERS - Método 1 (NP EN ISO 6507-1:2011)		Desvio - Erro MÉDIO				Desvio - Erro MÉDIO		0,7		Desvio-padrão		0,14	
		Incerteza padrão $u(x_i)$				Incerteza padrão $u(x_i)$		0,18					
Fonte de Incerteza	Tipo	Estimativa do valor de grandeza	Incerteza padrão	Unid.	Coefficientes de sensibilidade	Unid.	Quadrado da contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade					
x_i	A/BN/BR/BT	x_i	$u(x_i)$		c_i		$u^2(y) = (u(x_i) \cdot c_i)^2$	V_i					
Durómetro (EMA)	B - R	$\pm 15,04$ HV	5,37	HV	1	HV	28,85224	∞					
Repetibilidade (Padrão)	A	376,8 HV	0,45	HV	1	HV	0,20631	4					
Repetibilidade (Amostra)	A	---	5,89	HV	1	HV	34,67648	4					
Padrão (CRM)	B - N	± 6 HV	3,00	HV	1	HV	9,00000	50					
Resolução	B - R	0,0001 mm	5,77E-05	mm	6743,212	HV/mm	0,151570	∞					
Resultado:		438,6 \pm 17,1 HV1											
		Variância combinada				$u^2(y)$		72,89					
		Incerteza padrão combinada				$u(y)$		8,54					
		Graus de liberdade efetivos				ν_{eff}		17,58					
		fator de expansão				k		2,0					
		Incerteza padrão Expandida				U		$\pm 17,1$					
CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA À CALIBRAÇÃO DE DUREZA VICKERS - Método 2 (NP EN ISO 6507-1:2011)													
Fonte de Incerteza	Tipo	Estimativa do valor de grandeza	Incerteza padrão	Unid.	Coefficientes de sensibilidade	Unid.	Quadrado da contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade					
x_i	A/BN/BR/BT	x_i	$u(x_i)$		c_i		$u^2(y) = (u(x_i) \cdot c_i)^2$	V_i					
Desvio - Erro (b)	A	0 HV	0,18	HV	1	HV	0,03132	1					
Repetibilidade (Padrão)	A	377 HV	0,45	HV	1	HV	0,20631	4					
Repetibilidade (Amostra)	A	---	5,89	HV	1	HV	34,6765	4					
Padrão (CRM)	B - N	± 6 HV	3,00	HV	1	HV	9,00000	50					
Resolução	B - R	0,0001 mm	5,77E-05	mm	6743,212	HV/mm	0,15157	∞					
Resultado:		439,3 \pm 13,3 HV1											
		438,6 \pm 14 HV1											
		Variância combinada				$u^2(y)$		44,07					
		Incerteza padrão combinada				$u(y)$		6,64					
		Graus de liberdade efetivos				ν_{eff}		6					
		fator de expansão				k		2					
		Incerteza padrão Expandida				U		$\pm 13,3$					

Fig. 76 - Validação da folha de cálculo da incerteza associada às medições de micro dureza *Vickers* de acordo com o exemplo (Quadro D.1) do Anexo da NP EN ISO 6507-1:2011.

