

• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo numérico do ensaio de dureza com indentador Knoop

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico

Autor

António Xavier Botelho Martins

Orientadores

Professor Doutor José Valdemar Bidarra Fernandes

Doutora Nataliya Sakharova

Júri

Presidente	Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Valdemar Bidarra Fernandes Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Doutora Nataliya Sakharova Investigadora Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Jorge Manuel Afonso Antunes Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Coimbra, Julho, 2012

Não basta conquistar a sabedoria, é preciso saber usá-la.

Cícero

À Adriana

Agradecimentos

O presente estudo aqui apresentado só foi possível graças à cooperação e apoio de algumas pessoas, às quais ficarei eternamente grato:

Aos meus orientadores, **Professor Valdemar Fernandes** e **Doutora Nataliya Sakharova**, a minha gratidão pelo apoio prestado, dedicação, empenho e imensurável saber de orientação.

À inegável ajuda da **Professora Marta Oliveira**, que sempre se mostrou disponível em todos os momentos e situações.

À **Eng^a. Isabel Simões** e ao **Professor Jorge Antunes**, parceiros nas publicações, por todo o apoio e acompanhamento ao longo de toda a realização deste estudo.

A todos os meus professores do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Coimbra por todos os conhecimentos e experiências transmitidos ao longo de todo o curso.

A todos os meus amigos e colegas de mestrado pela amizade, convivência e por estarem presentes em todos os momentos.

Ao **Pedro Prates** por toda a ajuda inicial nos processos de simulação numérica e apoio durante a realização do presente trabalho.

Aos meus pais **José** e **Violeta** por todo o apoio, carinho e afecto, por me permitirem frequentar o curso com que sempre sonhei e ainda pela firme confiança que sempre depositaram em mim.

Aos meus avós **António e Ermelinda**, por todas as palavras sábias e apoio.

À minha namorada **Adriana**, minha inspiração, a quem dedico este trabalho, por todo o apoio e sobretudo pelo desmedido amor que jamais sonhei que existisse.

MUITO OBRIGADO!

Resumo

Os ensaios de dureza por indentação são frequentemente utilizados na caracterização das propriedades mecânicas dos materiais. Nestes ensaios são geralmente utilizados indentadores Vickers, Berkovich e cónico. O Indentador 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 indentador Knoop adequado à realização de ensaios de dureza em materiais frágeis e filmes finos. Contudo, a maioria dos estudos nesta área revertem a favor dos indentadores Vickers, Berkovich e de geometria cónica, não existindo muitos estudos focados no indentador Knoop.

Neste contexto, este estudo tem como objectivo conhecer em detalhe a influência das propriedades mecânicas de materiais na geometria e atributos da indentação Knoop e, inversamente, possibilitar a aplicação de um procedimento simples para avaliar as propriedades mecânicas, utilizando este indentador. Assim, é proposta e validada uma metodologia de análise dos resultados de ensaios dinâmicos de dureza (*“depth-sensing indentation”*), referentes ao indentador Knoop, baseada na utilizada para o indentador Vickers.

Neste estudo recorre-se ao código de simulação numérica por elementos finitos, DD3IMP, desenvolvido e continuamente actualizado no Centro de Engenharia

Mecânica da Universidade de Coimbra (CEMUC). A malha de elementos finitos utilizada foi previamente desenvolvida e otimizada e a modelação do indentador Knoop toma em consideração a imperfeição habitualmente existente na ponta dos indentadores reais.

Palavras-chave: Ensaio de dureza, Indentador Knoop, Indentadores planos, Simulação numérica.

Abstract

The indentation hardness tests are often used for characterizing the mechanical properties of materials. Vickers and Berkovich indenters are generally used for this purpose. Vickers and Knoop indenters have pyramidal shapes, but with different bases: square for the Vickers, and rhomb for the Knoop. Thus, for the same load value, the Knoop indentation is shallower and wider than the Vickers. This makes the Knoop indenter appropriate for testing hardness of brittle materials and thin films. However, most studies in this area are performed with Vickers, Berkovich or conical indenters, and there are not many studies focusing on the Knoop indenter.

In this context, the purpose of this study is to study in detail the influence of the mechanical properties of materials on the geometry and attributes of the Knoop indentation and, inversely, to allow the application of a simple procedure to evaluate the mechanical properties, using this indenter. Therefore, a methodology for analysing the results of depth-sensing indentation with the Knoop indenters is proposed and validated; this methodology is based on the one currently used for the Vickers indenter.

This study resorted to the DD3IMP finite element code for numerical simulation, developed and continuously updated in the Center of Mechanical Engineering, University of Coimbra (CEMUC). The finite element mesh used was previously developed

and optimized and the modeling of the Knoop indenter takes into account the imperfections that usually occur at the tip of real indenters.

Keywords Hardness test, Knoop indenter, Flat indenters, Numerical simulation.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Indentadores Knoop e Vickers.....	3
1.2. Curva de carga-descarga.....	6
1.2.1. Curva de carga.....	8
1.2.2. Curva de descarga.....	8
2. MODELAÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA.....	17
2.1. Indentadores numéricos	17
2.1.1. Função de área	18
2.2. Malha de elementos finitos	23
2.3. Materiais	24
3. ESTUDO DAS CURVAS DE INDENTAÇÃO.....	27
3.1. Curva de carga	31
3.2. Curva de descarga.....	31
4. INDENTADORES PLANOS.....	33
5. INDENTADORES PIRAMIDAIIS.....	39
5.1. Área de contacto da indentação	39
5.2. Módulo de elasticidade	42
5.3. Factor de correcção geométrico β	47
5.3.1. Método I.....	47
5.3.2. Método II.....	47
5.3.3. Resultados de β	50
6. DUREZA.....	59
7. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Máquina de ensaio de dureza Tukon, usando um indentador Knoop (figura retirada de http://www.minsocam.org/msa/collectors_corner/arc/knoop.htm).	3
Figura 1.2. Geometria dos indentadores Vickers e Knoop e respectivas indentações (adaptado de H.S. Güder <i>et al.</i> (2011)).	4
Figura 1.3. Exemplo de curva de carga-descarga de um material elasto-plástico obtida num ensaio dinâmico de dureza.	7
Figura 1.4. Curvas de carga-descarga, obtida e corrigida, de um material ensaiado numericamente neste trabalho (propriedades mecânicas: $E=400GPa$, $n=0.15$ e $\sigma_y=6GPa$ – ver Tabela 2.2).	8
Figura 1.5. Esquemas representativos: (a) Curva de carga-descarga de um material elasto-plástico obtida num ensaio dinâmico de dureza com indentador Vickers (ou Berkovich) e representação da profundidade de contacto da indentação h_c ; (b) geometrias de indentação à carga máxima e após descarga, indicando os parâmetros geométricos correspondentes.	10
Figura 1.6. Distribuição das forças de recuperação elástica: (a) Indentador Vickers; (b) Indentador Knoop.	14
Figura 1.7. Representação esquemática dos perfis de indentação, na carga máxima e após descarga: (a) Ao longo da diagonal menor da indentação Knoop, no plano perpendicular à superfície da amostra; (b) No plano da superfície da amostra. ...	15
Figura 2.1. Geometria dos diversos indentadores (no plano θxz) com indicação a sombreado do $\frac{1}{4}$ utilizado nas simulações numéricas.	18
Figura 2.2. Defeitos na ponta do indentador Knoop: (a) ponta em plano, como considerado nas simulações numéricas; (b) ponta em linha (“ <i>offset</i> ”, que ocorre em indentadores piramidais reais, embora a ponta seja também geralmente arredondada).	19
Figura 2.3. Corte esquemático por um plano paralelo ao eixo dos indentadores piramidais, numérico e ideal, ilustrando a altura do defeito de ponta, Δh ; para igual valor da área da secção transversal, a altura do indentador numérico é h e a do indentador ideal é $(h+\Delta h)$	20
Figura 2.4. Evolução da tangente dos ângulos θ_1 e θ_2 em função da razão R	22
Figura 2.5. Evolução da razão entre a altura dos indentadores piramidais, para a mesma área de secção transversal (tomando como referências as áreas dos indentadores Vickers e Knoop) em função de R ; mostram-se as equações que permitem determinar as alturas dos indentadores Vickers e Knoop em função da altura dum qualquer indentador; h , h_V e h_K representam as alturas de um indentador qualquer, indentador Vickers e Knoop, respectivamente.	22

Figura 2.6. Malha de elementos finitos utilizada nas simulações numéricas: (a) Vista global; (b) Detalhe da região central da malha, mais refinada.....	23
Figura 3.1. Curvas de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ relativamente pequenos ($E=70GPa$, $n=0.01$, $\sigma_y=10$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).....	27
Figura 3.2. Curvas de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ intermédios ($E=70GPa$, $n=0.05$, $\sigma_y=2$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).....	28
Figura 3.3. Curva de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ relativamente elevados ($E=400GPa$, $n=0.01$, $\sigma_y=2$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).....	28
Figura 3.4. Como a Figura 3.1, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=70GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=10GPa$	29
Figura 3.5. Como a Figura 3.2, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=70GPa$, $n=0.05$ e $\sigma_y=2GPa$	30
Figura 3.6. Como a Figura 3.3, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=400GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=2GPa$	30
Figura 4.1. Carga <i>versus</i> profundidade de indentação, em regime elástico, para simulações com indentadores planos de materiais com diferentes valores para o módulo de Young.....	34
Figura 4.2. Evolução dos valores médios de β em função do rácio R	36
Figura 4.3. Valores de β correspondentes às várias geometrias dos indentadores planos. .	36
Figura 4.4. Distribuições de tensão equivalente (GPa) obtida com os indentadores planos para o material com $E=200GPa$: (a) $R=1$ (Vickers); (b) $R=7.11$ (Knoop).	37
Figura 5.1. Área de contacto normalizada em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com o indentador Vickers, K2 ($R=4$) e Knoop, isto é, com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade: (a) A_c/A_{ideal} ; (b) A_{fe}/A_{ideal}	40
Figura 5.2. Comparação da área de contacto normalizada, A_{fe}/A_{ideal} , em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com os indentadores Vickers, K2 e Knoop (com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade).	41
Figura 5.3. Comparação da área de contacto normalizada, A_c/A_{ideal} , em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com os indentadores Vickers, K2 e Knoop (com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade).	42
Figura 5.4. Evolução das razões E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referentes aos cinco indentadores estudados.....	44
Figura 5.5. Contornos de uma indentação com indentador Vickers à carga máxima (amostra com $E=70GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6GPa$): (a) Contorno médio; (b) Contornos interior e exterior.	45

Figura 5.6. Contornos de uma indentação com indentador Knoop à carga máxima (amostra com $E=70GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6GPa$): (a) Contorno médio; (b) Contornos interior e exterior.....	46
Figura 5.7. Evolução da razão P/S^2 em função da razão H/E_{rin}^2 para valores de $h_{final}/h_{máx} < 0.85$: (a) Dureza H_c obtida em função de A_c ; (b) Dureza H_{fe} obtida em função de A_{fe}	50
Figura 5.8. Evolução das razões normalizadas E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao estudo de cada um dos cinco indentadores. Em cada figura indica-se o valor do respectivo factor de correcção geométrico utilizado.....	52
Figura 5.9. Evolução das razões normalizadas E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao indentador Knoop, corrigido com $\beta=1.479$	53
Figura 5.10. Evolução da razão E_{cR}/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao estudo pelo método de Riester.....	54
Figura 5.11. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes, obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=70GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=10GPa$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{máx}=0.1926$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{máx}=0.2844$).....	55
Figura 5.12. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=200GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6GPa$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{máx}=0.622$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{máx}=0.702$).....	56
Figura 5.13. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=400GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=2GPa$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{máx}=0.898$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{máx}=0.921$).....	57
Figura 6.1. Evolução da dureza H_c em função da razão $h_{final}/h_{máx}$ (indentador Knoop), para os indentadores Vickers, K2 e Knoop.....	60
Figura 6.2. Semelhante à Figura 6.1, mas referente à evolução da dureza H_{fe}	61
Figura 6.3. Evolução da dureza H_c , H_{fe} , e H_{cR} , em função da razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais com o indentador Knoop.....	62
Figura 6.4. Evolução de H_{fe}/E_{in} e H_c/E_{in} com a razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais com o indentador Vickers.....	63
Figura 6.5. Evolução de H_{fe}/E_{in} , H_c/E_{in} e H_{cR}/E_{in} com a razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais, com o indentador Knoop.....	64
Figura 6.6. Evoluções da dureza Knoop em função da dureza Vickers, para os casos de H_c e H_{fe} ; a equação (6.3) está representada a verde.....	66
Figura 6.7. Evolução da razão L/m , à carga máxima, em função de $h_{final}/h_{máx}$	66
Figura 6.8. Evolução da dureza Knoop obtida pelo método proposto por Riester <i>et al.</i> (2001), H_{cR} , em função da Vickers H_c	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Classificação da dureza em conformidade com a carga aplicada (adaptado de Bückle, 1973).	2
Tabela 1.2. Parâmetro ε para os diversos indentadores (adaptado de Oliver e Pharr, 1992).	10
Tabela 2.1. Designações e respectivos parâmetros geométricos dos indentadores numéricos, de fundo plano e piramidais.....	21
Tabela 2.2. Propriedades mecânicas, elásticas e plásticas, dos materiais utilizados nas simulações numéricas dos indentadores piramidais.....	25
Tabela 3.1. Valores de n em relação a R	31
Tabela 3.2. Valores de m em relação a R	32
Tabela 4.1. Valores obtidos para o factor de correcção β nos ensaios numéricos com indentadores planos.	35
Tabela 5.1. Valores de β em função de R , para os indentadores piramidais. Para comparação, mostram-se também os valores de β obtidos para os indentadores planos.....	51

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A	Área de contacto da indentação.
A_0	Área do “ <i>offset</i> ”.
A_c	Área de contacto da indentação avaliada com base na profundidade de contacto da indentação determinada através da curva de descarga, h_c .
A_{fe}	Área de contacto da indentação avaliada através do contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima.
A_i	Área de contacto da indentação relativa ao indentador ideal.
A_p	Área dos indentadores de fundo plano.
C	Complacência à carga máxima.
E	Módulo de Elasticidade do material.
E_c	Módulo de Elasticidade determinado com base na área de contacto da indentação, A_c , avaliada através da profundidade de contacto da indentação, h_c .
E_{cR}	Módulo de Elasticidade determinado com base no método de “ <i>Riester</i> ” (indentador Knoop).
E_{fe}	Módulo de Elasticidade determinado com base na área de contacto avaliada no contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima, A_{fe} .
E_{in}	Módulo de Elasticidade utilizado como dado de entrada nas simulações numéricas.
E_r	Módulo de Elasticidade reduzido.
H	Dureza.
H_c	Dureza determinada com base na área de contacto da indentação, A_c , avaliada com base na profundidade de contacto da indentação, h_c .

H_{cR}	Dureza Knoop determinada com base no método de “ <i>Riester</i> ”.
H_{fe}	Dureza determinada com base na área de contacto avaliada no contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima, A_{fe} .
h	Profundidade de indentação.
h_c	Profundidade de contacto da indentação determinada através da curva de descarga.
h_{final}	Profundidade de indentação final ou residual (após descarga).
$h_{máx}$	Profundidade máxima de indentação (à carga máxima).
n	Coefficiente de encruamento.
P	Carga aplicada.
$P_{máx}$	Carga máxima aplicada.
S	Rigidez à carga máxima.
β	Factor de correcção geométrico (dependente da geometria do indentador).
ν	Coefficiente de Poisson.
σ_y	Tensão limite de elasticidade do material.

Siglas

CEMUC	Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.
DD3IMP	Programa de elementos finitos. Contração de <i>Deep Drawing 3D IMPLICIT Code</i> .
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

1. INTRODUÇÃO

A dureza é uma propriedade dos materiais, geralmente definida como a resistência à deformação plástica por indentação, aquando da aplicação de uma carga. No entanto, o termo dureza pode ainda estar relacionado com a resistência ao risco, abrasão ou corte (resistência ao arranque de aparas). Quanto mais duro for o material, maior é a sua resistência à deformação permanente.

Os ensaios de dureza são actualmente muito utilizados, mas os primeiros ensaios foram realizados no século XVII, ainda que de forma rudimentar (ver Antunes, 2006). Neste século, a ideia de dureza já era tida em conta na análise comparativa da capacidade dos materiais resistirem ao riscado por outros materiais, nomeadamente minerais.

Actualmente, os ensaios de dureza são efectuados com recurso a um indentador, classificado segundo a sua geometria, que pela aplicação controlada de uma carga vai penetrar na amostra de material a ensaiar, segundo a direcção normal à sua superfície, até uma dada profundidade, durante um determinado período de tempo (geralmente alguns segundos), após o qual é efectuado o recuo do indentador e é medida a área da indentação residual na amostra. A dureza é então calculada através do quociente entre o valor da carga máxima aplicada, $P_{m\acute{a}x}$, e a área de indentação residual (após descarga), A , utilizando a relação seguinte:

$$H = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A}, \quad (1.1)$$

A dureza pode ser classificada, de acordo com o valor da carga aplicada, em macro, micro, ultramicro e nanodureza. Na Tabela 1.1 é descrita essa classificação, segundo Bückle (1973):

Tabela 1.1. Classificação da dureza em conformidade com a carga aplicada (adaptado de Bückle, 1973).

<i>Dureza</i>	<i>Carga: P (N)</i>
<i>Ultramicrodureza e nanodureza</i>	$P \leq 0.05$
<i>Microdureza</i>	$0.05 < P \leq 2.0$
<i>Baixa carga</i>	$2.0 < P \leq 30$
<i>Macro dureza</i>	$P > 30$

A medição da macrodureza de materiais é um método rápido e simples de caracterização mecânica, a partir de uma amostra de dimensões relativamente pequenas. Quando o material possui uma microestrutura muito fina e pretende caracterizar-se mecanicamente os seus componentes, a utilização da ultra ou mesmo da nanodureza é vantajosa. Como neste e noutros casos, as cargas aplicadas são muito pequenas é necessário determinar de forma precisa a área de indentação, o que só é possível recorrendo a equipamentos designados de DSI (“*depth-sensing indentation*”), relativamente recentes, que permitam traçar a evolução da carga em função da profundidade de indentação, durante o ensaio. Estes equipamentos, de grande precisão, dispensam a medição do tamanho da indentação por meios ópticos.

Bückle (1973) mostrou que, no caso da macrodureza, o valor da dureza não depende da carga máxima aplicada. Já no caso de ensaios de microdureza, o valor da dureza tem tendência a aumentar à medida que o valor da carga máxima aplicada diminui. No caso de ensaios às escalas da ultramicro e nanodureza, esta tendência acentua-se. Além disso, a dispersão de resultados, num dado conjunto de ensaios dum mesmo material, aumenta, devido à reduzida dimensão das indentações. Por tal motivo, quando se efectuam ensaios a estas escalas, é necessário ter cuidados especiais com o acabamento superficial da amostra e evitar vibrações inconvenientes no equipamento.

Na indústria, os três tipos de ensaios mais geralmente utilizados são os de dureza Rockwell, Brinell, e Vickers. Porém, os ensaios de dureza são diversos, uns mais conhecidos e utilizados do que outros, sendo de destacar a título de curiosidade:

- Rockwell (indentador esférico ou cónico, sendo este último o mais utilizado)

- Brinell (indentador esférico)
- Vickers (indentador piramidal de base quadrada)
- Berchovich (indentador piramidal de base triangular)
- Knoop (indentador piramidal de base em forma de losango)
- Shore (dureza de ressalto)

1.1. Indentadores Knoop e Vickers

Knoop, Peters e Emerson (1939) propuseram um indentador invulgar, piramidal de diamante, que ficou conhecido como o indentador Knoop. Foi então, construída a máquina Tukon (Figura 1.1) pela *Wilson Mechanical Instrument Company*, que utilizava este indentador para efectuar ensaios de dureza.



Figura 1.1. Máquina de ensaio de dureza Tukon, usando um indentador Knoop (figura retirada de http://www.minsocam.org/msa/collectors_corner/arc/knoop.htm).

Embora não haja muitos estudos acerca do ensaio de dureza com indentador Knoop, a sua geometria piramidal de base quadrangular em forma de losango, torna-se ideal para utilização em determinadas situações, sendo recomendado para filmes finos e materiais frágeis e ainda na caracterização da anisotropia de materiais. De facto, nestes ensaios, a indentação é extremamente superficial, apresentando menor profundidade e

maior largura do que a indentação Vickers, para áreas de contacto semelhantes. Na Figura 1.2 comparam-se as geometrias destes dois indentadores. O indentador Knoop tem ângulos entre arestas opostas de 172.5° e de 130° , respectivamente, $2\theta_1$ e $2\theta_2$; o indentador Vickers tem geometria piramidal de base quadrada com ângulos apicais, isto é, 136° entre faces opostas e, conseqüentemente, 148.11° entre arestas opostas ($2\theta_1 = 2\theta_2 = 2\theta$). Deste modo, enquanto a indentação Vickers tem as duas diagonais iguais, a indentação Knoop tem as duas diagonais diferentes, sendo a maior 7.11 vezes a menor.

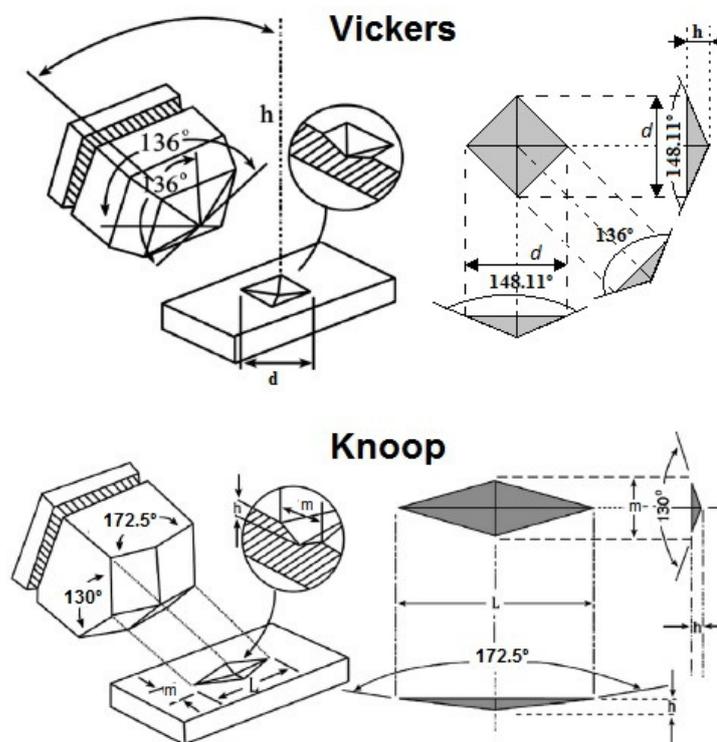


Figura 1.2. Geometria dos indentadores Vickers e Knoop e respectivas indentações (adaptado de H.S. Güder *et al.* (2011)).

Designando por L e m a maior e a menor das diagonais temos, no caso da indentação Knoop:

$$R = \frac{L}{m} = 7.11, \quad (1.2)$$

e no caso da indentação Vickers ($L = m = d$):

$$R = \frac{L}{m} = \frac{d}{d} = 1, \quad (1.3)$$

onde d é a diagonal da indentação Vickers.

As áreas das secções transversais dos indentadores Vickers, A_V , e Knoop, A_K , relacionam-se com a respectiva altura, h (h_V e h_K , referente a Vickers e Knoop, respectivamente), pelas equações:

$$A_V = 2h_V^2(\operatorname{tg}\theta)^2; A_V = 24.50h_V^2, \quad (1.4)$$

$$A_K = 2h_K^2\operatorname{tg}\theta_1\operatorname{tg}\theta_2; A_K = 65.44h_K^2, \quad (1.5)$$

sendo os ângulos θ , θ_1 e θ_2 iguais a 74.055, 86.25 e 65°, respectivamente (Figura 1.2). Ou seja, para a mesma altura de pirâmide, a razão entre as áreas das secções transversais dos indentadores Knoop e Vickers é:

$$\frac{A_K}{A_V} = 2.67, \quad (1.6)$$

ou ainda, de outro modo, para a mesma área de secção transversal, a razão entre as alturas das pirâmides Knoop e Vickers é:

$$\frac{h_K}{h_V} = 0.612, \quad (1.7)$$

e, inversamente, a razão entre as alturas das pirâmides Vickers e Knoop é:

$$\frac{h_V}{h_K} = 1.634, \quad (1.8)$$

1.2. Curva de carga-descarga

Os equipamentos de ensaio dinâmico de dureza (DSI - “*depth-sensing indentation*”) permitem traçar a curva de carga-descarga que traduz a evolução da carga aplicada com a profundidade de indentação. A partir do traçado desta curva é possível obter, além da dureza, o módulo de elasticidade do material.

A Figura 1.3 ilustra a curva de carga-descarga típica de um ensaio dinâmico de dureza. Após a fase de aproximação da ponta do indentador à amostra, o ensaio inicia-se, com o indentador a penetrar a superfície da amostra por aplicação de uma carga de valor crescente até ao valor máximo, $P_{máx}$, a que corresponde a profundidade de indentação máxima, $h_{máx}$. Durante o ensaio, o material indentado fica sujeito essencialmente a tensões de compressão. Após manutenção à carga máxima, durante um período pré-definido, para estabilização da deformação, inicia-se a fase de descarga, que termina quando o indentador deixa de contactar com a superfície da amostra. Durante a descarga, ocorre apenas recuperação elástica, pelo que a profundidade de indentação final (residual), h_{final} , é inferior a $h_{máx}$. É comum realizar também um período de manutenção, próximo do final da descarga, com o objectivo de corrigir a deriva térmica do equipamento (por exemplo: Antunes *et al.*, 2002), que influencia os resultados dos ensaios. No presente estudo, referente a ensaios numéricos, esta correcção não é necessária.

Se o comportamento do material for puramente elástico, durante a fase de carga não há deformação plástica, mas apenas elástica, a qual é totalmente recuperada durante a descarga e, conseqüentemente a profundidade de indentação residual é nula. Se o comportamento do material for puramente plástico, a profundidade de indentação residual, h_{final} , é igual à profundidade de indentação máxima, $h_{máx}$, pois não ocorre recuperação elástica durante a descarga.

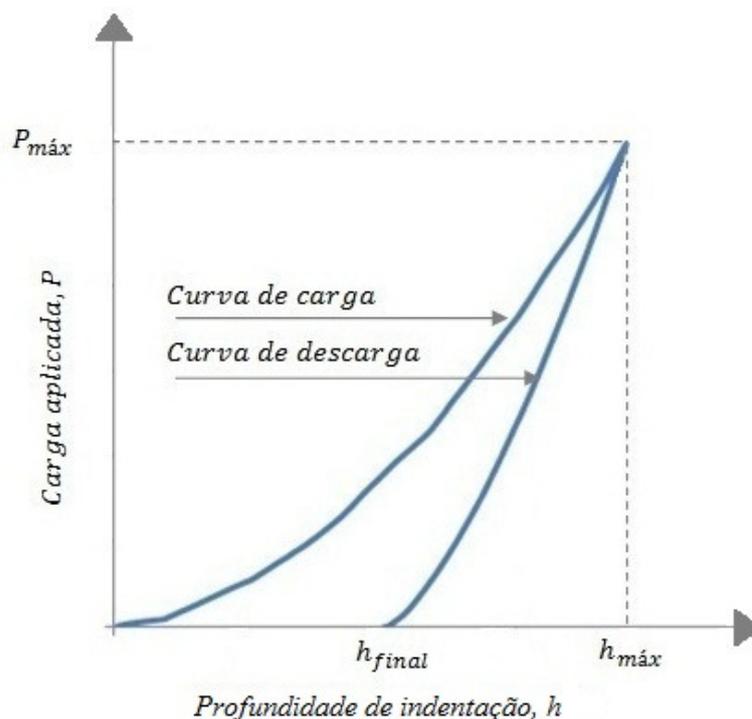


Figura 1.3. Exemplo de curva de carga-descarga de um material elasto-plástico obtida num ensaio dinâmico de dureza.

Como os indentadores reais não têm a geometria ideal, apresentando entre outros, o designado “*offset*” (defeito de ponta), é necessário corrigir a curva de carga-descarga. Esta correcção consiste em determinar a altura do indentador ideal, $h_{corrigido}$, correspondente à área do indentador real, A :

$$h_{corrigido} = \sqrt{\frac{A}{K}}, \quad (1.9)$$

em que K é igual a 24.50, para os indentadores Vickers (e Berkovich) e 65.44, para o indentador Knoop (ver equações (1.4) e (1.5)).

Na Figura 1.4 mostra-se um exemplo de correcção da curva obtida num ensaio numérico com o indentador Knoop ($E = 400\text{GPa}$, $n = 0.15$ e $\sigma_y = 6\text{GPa}$), realizado neste trabalho, em que o defeito do indentador é idêntico ao que ocorre em casos experimentais. A correcção da curva carga-descarga desloca-a ligeiramente para a direita.

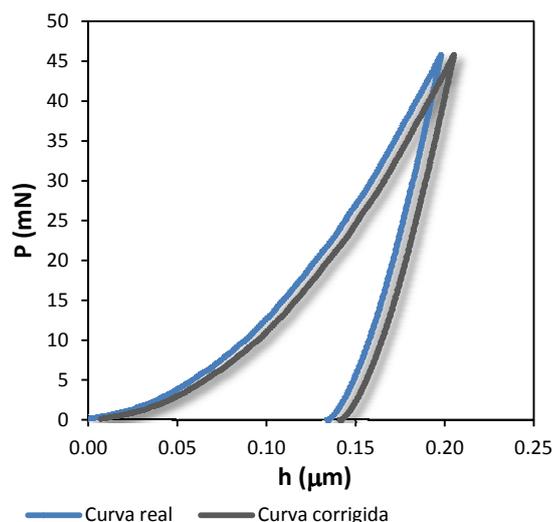


Figura 1.4. Curvas de carga-descarga, obtida e corrigida, de um material ensaiado numericamente neste trabalho (propriedades mecânicas: $E=400\text{GPa}$, $n=0.15$ e $\sigma_y=6\text{GPa}$ – ver Tabela 2.2).

1.2.1. Curva de carga

A curva de carga traduz a evolução dos valores da carga *versus* profundidade de indentação, até à carga máxima, como se mostra na Figura 1.5 (a). Esta curva pode ser descrita pela designada lei de Meyer (Meyer, 1908):

$$P = kh^n, \quad (1.10)$$

em que P representa a carga aplicada, h é a profundidade de indentação e n é o coeficiente de sensibilidade à profundidade de indentação. Quando este factor tem o valor igual a 2 ($P = kh^2$, a equação (1.10) passa a designar-se por lei de Kick (Kick, 1885)), o material não mostra sensibilidade à profundidade de indentação, isto é, o valor da dureza não depende da carga aplicada. Geralmente, os materiais são sensíveis à carga aplicada, diminuindo o valor de dureza à medida que a carga diminui. Deste modo, o valor de n é geralmente inferior a 2.

1.2.2. Curva de descarga

A curva de descarga é traçada desde o ponto em que a carga aplicada é máxima, até ao ponto em que a carga passa a ser nula (momento em que deixa de existir contacto entre o indentador e a amostra), como se mostra na Figura 1.5 (a).

A curva de descarga pode ser descrita por uma lei de potência do tipo (Oliver e Pharr, 1992):

$$P = k(h_{m\acute{a}x} - h_{final})^m, \quad (1.11)$$

em que m e k são parâmetros que dependem do material.

Com efeito, a curva de descarga em ensaios com indentadores reais não é linear, apesar de ocorrer apenas recuperação elástica, durante esta fase do ensaio. Isto deve-se ao facto de a área de contacto não se manter constante, durante a descarga, reduzindo-se progressivamente.

1.2.2.1. Determinação da dureza

Quando se recorre à curva de indentação para avaliar a dureza, esta é definida pela razão entre a carga máxima aplicada e a área de contacto de indentação (segundo a Norma Europeia ISO 14577 (2002)):

$$H_{IT} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_C}, \quad (1.12)$$

em que a área de contacto, A_C , é avaliada através da profundidade de contacto da indentação, h_c , sendo esta, determinada a partir da curva de descarga (curva de indentação corrigida), segundo a expressão seguinte (Oliver e Pharr, 1992):

$$h_c = h_{m\acute{a}x} - h_s = h_{m\acute{a}x} - \varepsilon CP_{m\acute{a}x}, \quad (1.13)$$

em que C é a complacência, isto é, o inverso da derivada da curva de descarga na carga máxima, e ε é um parâmetro que depende da geometria do indentador, cujo valor está compreendido entre 0.72 e 1 (Oliver e Pharr, 1992), como se mostra na Tabela 1.2 (ε define o valor de $h_s = \varepsilon CP_{m\acute{a}x}$, (ver Figura 1.5. (b)).

Tabela 1.2. Parâmetro ϵ para os diversos indentadores (adaptado de Oliver e Pharr, 1992).

	Indentador	ϵ
Piramidais	Berkovich	0.72 ou 0.75
	Vickers	0.72 ou 0.75
	Knoop	0.72 ou 0.75
	Cónico	0.72
	Esférico	0.75

A Figura 1.5 que ilustra uma curva de carga-descarga para o caso do indentador Vickers (ou Berkovich), mostra também as geometrias de indentação à carga máxima e após descarga. No caso deste indentador, a área de contacto é igual à área de indentação à carga máxima.

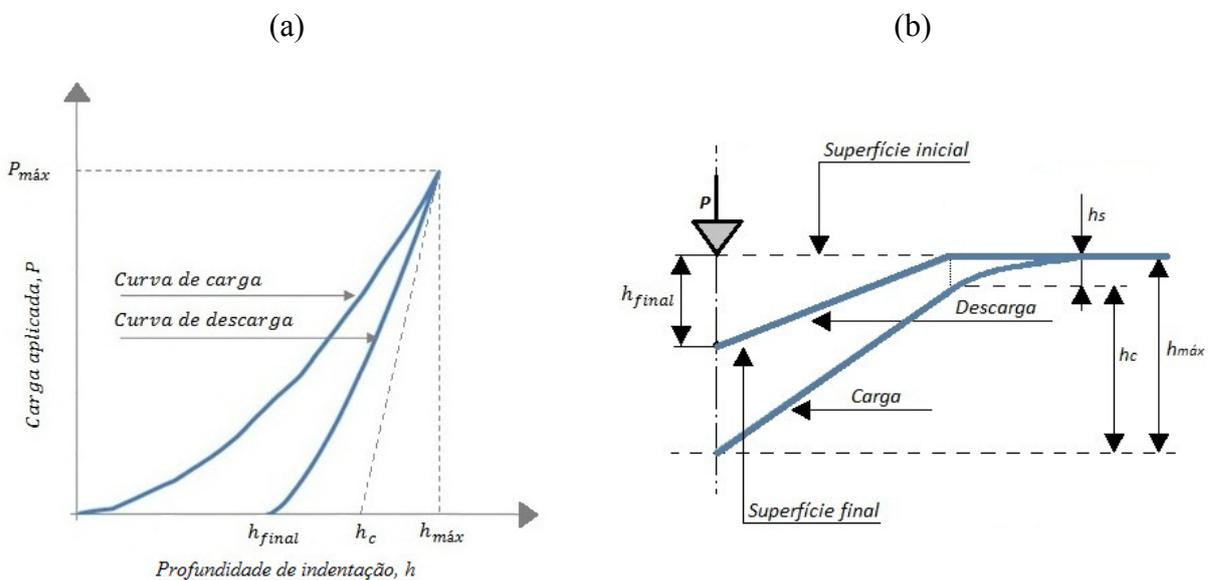


Figura 1.5. Esquemas representativos: (a) Curva de carga-descarga de um material elasto-plástico obtida num ensaio dinâmico de dureza com indentador Vickers (ou Berkovich) e representação da profundidade de contacto da indentação h_c ; (b) geometrias de indentação à carga máxima e após descarga, indicando os parâmetros geométricos correspondentes.

1.2.2.2. Determinação do módulo de elasticidade

São agora apresentados dois métodos de análise dos ensaios dinâmicos de dureza para determinação do módulo de elasticidade de materiais. O método convencional de “*Oliver and Pharr*” (Oliver e Pharr, 1992), geralmente utilizado para os ensaios Vickers e Berkovich e o método de “*Riester*” (Riester *et al.*, 2001), recomendado para ser utilizado como correcção ao método convencional, e aplicado ao indentador Knoop.

1.2.2.2.1. Método convencional de “*Oliver and Pharr*”

A avaliação do módulo de elasticidade parte do conhecimento de que ocorre apenas deformação elástica durante a descarga. Sneddon (1965) mostrou que, no caso de indentadores circulares rígidos de fundo plano, a carga aplicada, P , é relacionada com a deflexão elástica da superfície do material, h_e , com recurso à seguinte equação:

$$P = \frac{2E}{(1-\nu^2)} ah_e, \quad (1.14)$$

em que E é o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson, a o raio do indentador circular de fundo plano (raio de contacto). Assim, esta equação traduz uma relação linear entre a carga aplicada e a deflexão elástica.

A equação (1.14) pode ser aplicada a qualquer indentador plano, desde que se introduza um factor de correcção geométrico, β , que depende da geometria do indentador plano em causa. A equivalência entre punções de fundo plano, circular e com outra geometria, é efectuada a áreas idênticas obedecendo à condição $A = \pi a^2$, em que A representa a área do indentador de fundo plano com geometria diferente da circular ($a = \sqrt{A/\pi}$). Deste modo, a equação anterior passa a escrever-se:

$$P = \beta \frac{2E}{(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{A}{\pi}} h_e, \quad (1.15)$$

A derivada $\frac{dh_e}{dP}$ da equação (1.15), permite escrever:

$$\frac{dh_e}{dP} = \frac{(1-\nu^2)}{2Ea} \frac{1}{\beta}, \quad (1.16)$$

Considerando a equivalência entre um indentador circular de fundo plano e um indentador piramidal, no início da descarga, de modo que o inverso da derivada da curva de descarga à carga máxima, isto é a complacência $C = \left(\frac{dh}{dP}\right)_{P_{máx}}$ (C é o inverso da rigidez, $S = \left(\frac{dP}{dh}\right)_{P_{máx}}$), seja igual a $\frac{dh_e}{dP}$, é possível obter a equação que relaciona a complacência, C , com o módulo de elasticidade reduzido, E_r :

$$C = \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r \sqrt{A_c}} \frac{1}{\beta}, \quad (1.17)$$

na qual o módulo de elasticidade reduzido, E_r , e a área de contacto, A_c , são expressos pelas equações seguintes:

$$E_r = \frac{E}{(1-\nu^2)}, \quad (1.18)$$

$$A_c = \pi a^2, \quad (1.19)$$

em que a , corresponde ao raio de contacto equivalente do indentador circular de fundo plano.

No caso de ensaios experimentais, a complacência do equipamento, C_e , deve também ser considerada na equação (1.17), que ganha a seguinte forma:

$$C = C_e + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r \sqrt{A_c}} \frac{1}{\beta}, \quad (1.20)$$

ou seja, a complacência da amostra, C_a , pode ser representada por:

$$C_a = C - C_e, \quad (1.21)$$

Em ensaios numéricos, como no caso presente, a complacência do equipamento, C_e , é nula.

No caso de ensaios experimentais, o módulo de elasticidade reduzido, E_r , depende também das constantes elásticas do indentador e a equação (1.18) deve ser substituída por:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (1.22)$$

em que os índices a e i são, respectivamente, referentes à amostra e ao indentador.

1.2.2.2. Método de “Riester”

O método de “*Oliver and Pharr*” é geralmente aplicado aos indentadores Vickers, Berkovich e cónico, mas segundo Riester *et al.* (2001) quando aplicado ao indentador Knoop, conduz à sobreavaliação dos valores do módulo de elasticidade e da dureza, para materiais com elevado valor da razão entre a dureza e o módulo de elasticidade (H/E). Riester *et al.* (2001) justificam este resultado com recuperações elásticas diferentes segundo as diagonais menor e maior da indentação. Tal é ilustrado nas Figuras 1.6 e 1.7. Na Figura 1.6 mostra-se esquematicamente a distribuição das forças de recuperação elástica para os casos dos indentadores Vickers e Knoop, segundo Riester *et al.* (2001). Estes autores concluem que estas forças são iguais segundo os dois eixos, no caso do indentador Vickers (ou segundo o diâmetro no caso de um indentador cónico), mas tal não acontece, no caso do indentador Knoop. Na Figura 1.7 mostram-se os perfis de indentação, na carga máxima e após descarga, ao longo do eixo menor da indentação Knoop, ilustrando que a retracção elástica da diagonal menor é significativa, o mesmo não acontecendo com a diagonal maior (Marshall *et al.*, 1982), em consequência da distribuição de forças ilustradas na Figura 1.6. Ou seja, à carga máxima, a razão entre os comprimentos de contacto L/m é 7.11 e após descarga, o comprimento L' mantém-se igual a L , enquanto o comprimento m se reduz para m' .

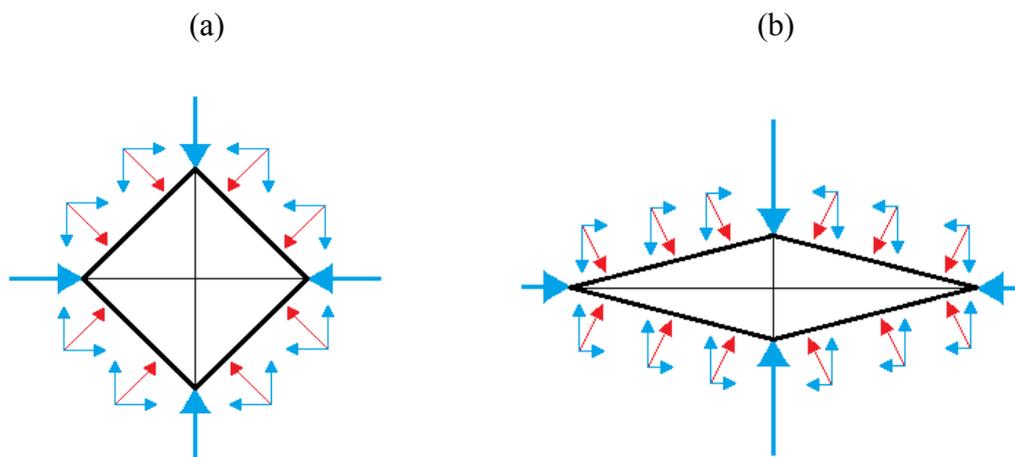


Figura 1.6. Distribuição das forças de recuperação elástica: (a) Indentador Vickers; (b) Indentador Knoop.

Assim, segundo Riester *et al.* (2001), no caso do indentedor Knoop, os resultados obtidos pelo método de “*Oliver and Pharr*”, necessitam de correcção da área de contacto, devido à sua menor simetria geométrica (diagonais de tamanho diferente), quando comparada com os indentedores Vickers, cónico e Berkovich. Com base em resultados anteriores, estes autores consideram que a retracção elástica, em termos do comprimento da diagonal menor da indentedação, é quantificada por uma equação do tipo:

$$\frac{m'}{m} = 1 - \alpha \frac{L}{m} \frac{H}{E}, \quad (1.23)$$

em que α é um factor geométrico igual a 0.45, determinado com base em ensaios realizados para um largo conjunto de materiais. Da equação (1.23) pode concluir-se que a contracção elástica da diagonal menor depende das propriedades dos materiais, nomeadamente da razão entre a dureza e o módulo de elasticidade, H/E .

A Figura 1.7 mostra que a recuperação elástica segundo o eixo menor tem um acréscimo suplementar de um volume, ABC , quando comparado ao que acontece com a diagonal maior do indentedor Knoop, ou com ambas as diagonais no caso dos indentedores Vickers ou Berkovich. Isto é, a recuperação elástica, na região do contorno de contacto próxima da diagonal menor, tem componente vertical mas também horizontal no sentido do centro da indentedação. De modo a considerar este comportamento na metodologia para

determinação da dureza e do módulo de elasticidade, Riester *et al.* (2001) propõem que o valor da área a entrar nas equações (1.12) e (1.20), deverá ser corrigida substituindo o ângulo θ_2 por um ângulo θ'_2 , na equação (1.5), dado pela seguinte expressão:

$$\operatorname{tg} \theta'_2 = \left(\frac{m}{m'}\right) \operatorname{tg} \theta_2, \quad (1.24)$$

em que, os ângulos θ_2 e θ'_2 do indentador Knoop são correspondentes aos ângulos θ_r e θ'_r indicados na Figura 1.7, respectivamente.

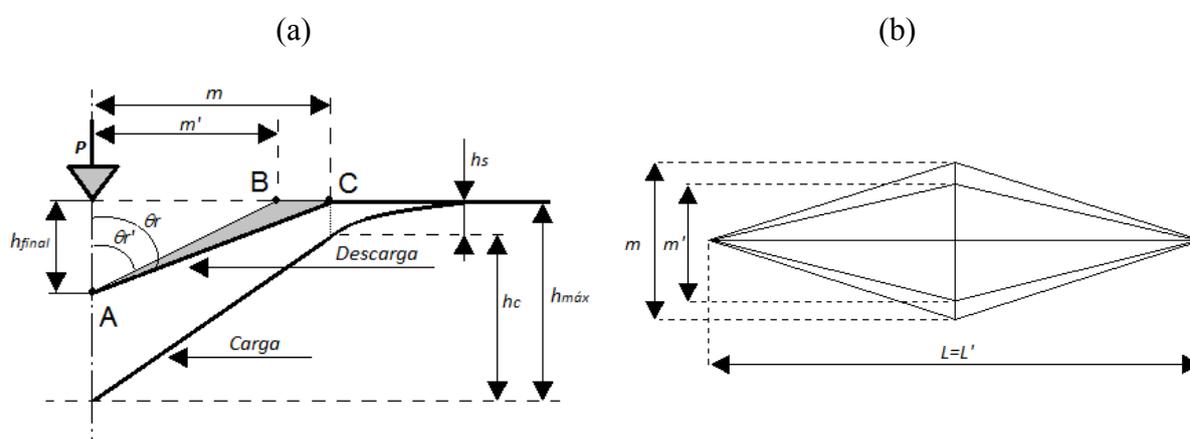


Figura 1.7. Representação esquemática dos perfis de indentação, na carga máxima e após descarga: (a) Ao longo da diagonal menor da indentação Knoop, no plano perpendicular à superfície da amostra; (b) No plano da superfície da amostra.

Finalmente, a correção dos valores de dureza, H , e de módulo de elasticidade, E , obtidos pelo método de “*Oliver and Pharr*”, é efectuada com recurso a um método iterativo, em que se utilizam sucessivamente as equações (1.23), (1.24), (1.5) e (1.12), para a dureza, ou (1.20), para o módulo de elasticidade.

Em resumo, após remoção da carga, a diagonal maior da indentação residual, L' , é sensivelmente igual à diagonal maior da superfície de contacto, L . No caso da diagonal menor, duas situações extremas podem ocorrer para m e m' :

- **Materiais com razão H/E elevada (próxima de 0.20) $\Rightarrow m' \ll m$** (retracção elástica da diagonal menor significativa); necessidade de utilizar as equações (1.23) e (1.24) para corrigir os valores da dureza e do módulo de elasticidade.
- **Materiais com razão H/E pequena (próxima de zero) $\Rightarrow m' \approx m$** (ausência de retracção elástica da diagonal menor); não é necessário efectuar correcção dos valores da dureza e do módulo de elasticidade.

2. MODELAÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA

Neste estudo recorre-se à simulação numérica para realizar os ensaios de dureza. Isto permitiu ter acesso a um conjunto de resultados em materiais com propriedades mecânicas conhecidas e convenientemente escolhidas e utilizar indentadores com geometrias evoluindo desde o Vickers ao Knoop.

Os ensaios numéricos foram realizados recorrendo à versão 45 revista do programa de elementos finitos DD3IMP (desenvolvido e actualizado continuamente no CEMUC). A malha de elementos finitos e os cinco indentadores utilizados neste estudo foram construídos previamente a este trabalho.

2.1. Indentadores numéricos

Foram utilizados cinco indentadores piramidais diferentes, sendo as suas geometrias modeladas com diferentes valores da razão R (razão entre as diagonais maior e menor) dos indentadores evoluindo desde $R = 1$ a $R = 7.11$, que correspondem às razões entre as diagonais das secções transversais dos indentadores Vickers e Knoop, respectivamente. Os indentadores restantes têm valores de R entre aqueles dois valores e iguais a 2.5, 4.0 e 5.5.

Foram ainda utilizados indentadores de fundo plano em forma de losango, com os mesmos valores da razão entre as diagonais maior e menor.

Os indentadores foram realizados em CAD no programa comercial *CATIA*[®] e as suas geometrias modeladas usando superfícies paramétricas *Bézier*, permitindo desta forma uma perfeita descrição da ponta do indentador. Uma vez que os indentadores piramidais reais, como o Vickers e o Knoop possuem uma imperfeição na ponta, esta foi também considerada nos indentadores numéricos utilizados no presente estudo.

Na Figura 2.1 mostram-se as geometrias da secção transversal dos indentadores piramidais e dos correspondentes indentadores de fundo plano (no plano Oxz , perpendicular ao eixo dos indentadores, Oy), que são identificados pelo valor da razão entre as diagonais, R . Em ambos os casos, dada a simetria dos indentadores, segundo os planos Oxy e Oyz , foi apenas considerado um quarto do indentador nos ensaios numéricos.

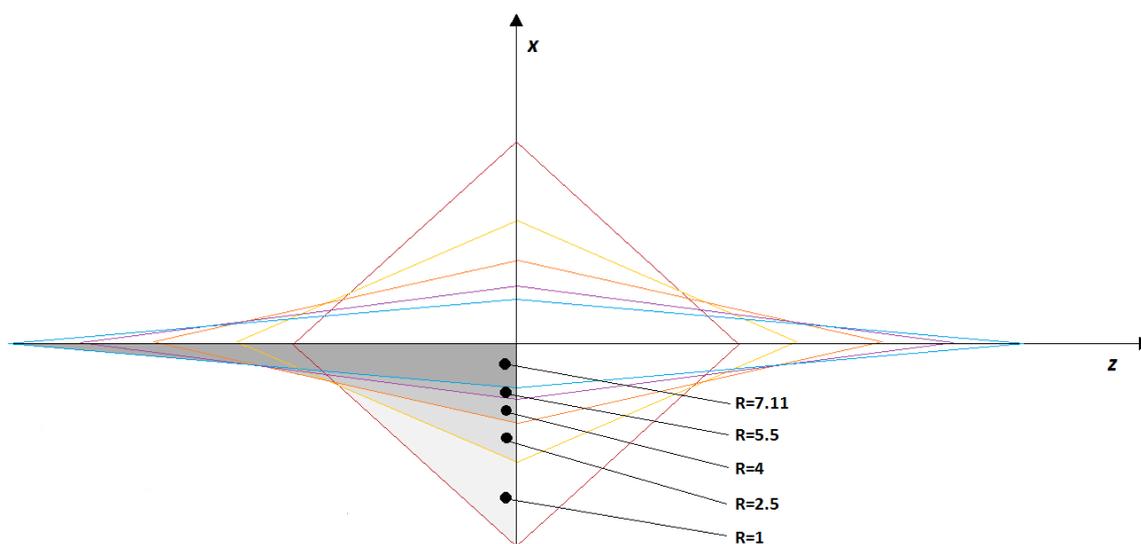


Figura 2.1. Geometria dos diversos indentadores (no plano Oxz) com indicação a sombreado do $\frac{1}{4}$ utilizado nas simulações numéricas.

2.1.1. Função de área

No caso de indentadores piramidais de base quadrada geometricamente perfeitos (indentadores ideais, ou seja sem defeito), a função de área pode ser expressa por:

$$A = 2h^2 \operatorname{tg} \theta_1 \operatorname{tg} \theta_2, \quad (2.1)$$

em que h é a altura da pirâmide e θ_1 e θ_2 representam metade dos ângulos entre arestas opostas da pirâmide.

Os indentadores piramidais reais, em particular os quadrangulares como o Vickers, apresentam geralmente defeito na ponta, que se traduz pelo facto de terminarem numa linha, mais ou menos arredondada (e não num ponto, como no caso dum indentador perfeito).

Nas simulações efectuadas, à semelhança de outros estudos (por exemplo: Antunes, 2006), foi considerado um defeito de ponta nos indentadores piramidais, que consiste num plano perpendicular ao eixo da pirâmide, cuja área é idêntica à do defeito dos indentadores reais, ou mais propriamente esta área foi escolhida de tal modo que as correcções a fazer nas funções de área nos indentadores numéricos e experimentais sejam idênticas. A Figura 2.2 ilustra os defeitos referidos, isto é com plano na ponta, nos

indentadores piramidais numéricos, e com “*offset*”, nos indentadores reais, para o caso do indentador Knoop.

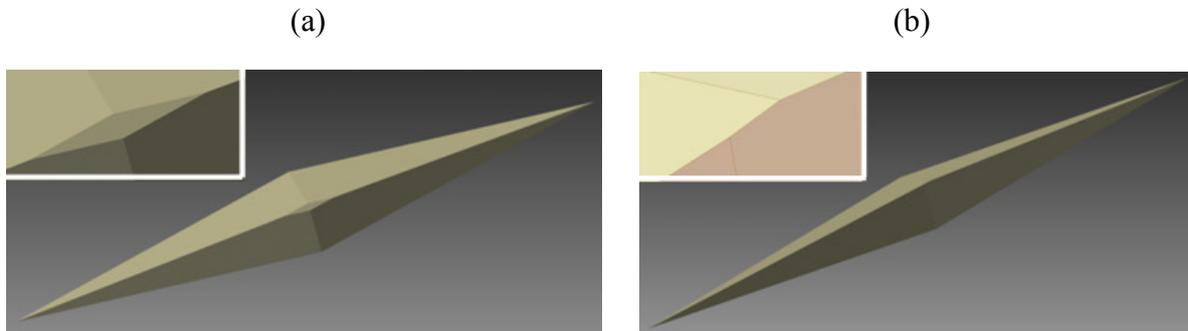


Figura 2.2. Defeitos na ponta do indentador Knoop: (a) ponta em plano, como considerado nas simulações numéricas; (b) ponta em linha (“*offset*”, que ocorre em indentadores piramidais reais, embora a ponta seja também geralmente arredondada).

Devido à existência da imperfeição na ponta do indentador (plano), a função de área do indentador numérico é dada pela expressão seguinte:

$$A = 2(h + \Delta h)^2 \operatorname{tg}\theta_1 \operatorname{tg}\theta_2, \quad (2.2)$$

em que Δh é a altura do defeito (igual à distância do plano de ponta ao vértice do indentador ideal). A geometria dos indentadores piramidais numéricos está representada esquematicamente na Figura 2.3, que ilustra um corte de um indentador, por um plano paralelo ao seu eixo.

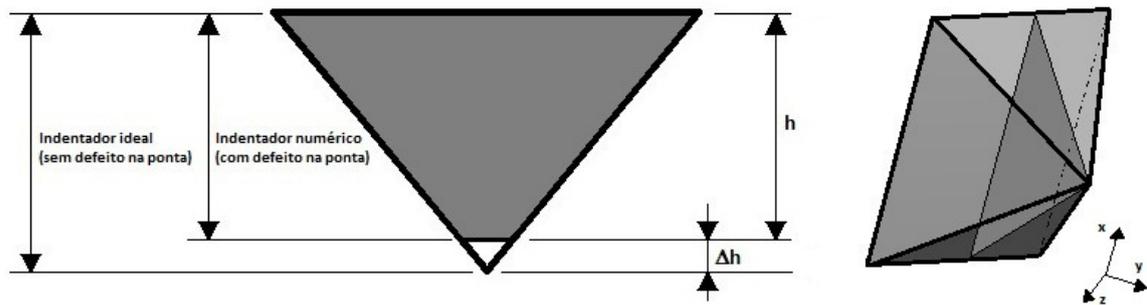


Figura 2.3. Corte esquemático por um plano paralelo ao eixo dos indentadores piramidais, numérico e ideal, ilustrando a altura do defeito de ponta, Δh ; para igual valor da área da secção transversal, a altura do indentador numérico é h e a do indentador ideal é $(h + \Delta h)$.

O valor da altura do defeito de ponta, Δh , pode ser obtido através da expressão seguinte:

$$\Delta h = \sqrt{\frac{A_0}{2tg\theta_1tg\theta_2}}, \quad (2.3)$$

em que A_0 é a área do plano de ponta, cujo valor foi escolhido para todos os indentadores numéricos igual a $0.0032\mu m^2$ (Sakharova *et al.*, 2009; Antunes *et al.*, 2007).

Nestas condições, a equação genérica das funções de área dos indentadores numéricos (equação (2.2)) pode escrever-se:

$$A = ah^2 + bh + c, \quad (2.4)$$

em que $a = 2tg\theta_1tg\theta_2$, $b = 4\Delta h tg\theta_1tg\theta_2$ e $c = 2\Delta h^2tg\theta_1tg\theta_2 = A_0$.

Quando b e c são iguais a zero, a equação anterior traduz a função de área do indentador piramidal ideal correspondente (equação (2.1)):

$$A = ah^2, \quad (2.5)$$

Na Tabela 2.1 indicam-se as designações, V, K1, K2, K3 e K e respectivos parâmetros geométricos dos vários indentadores numéricos, de fundo plano (cuja área, A_p ,

é sempre igual a $7.21\mu\text{m}^2$) e piramidais, utilizados neste trabalho, com valores da razão entre diagonais, R , iguais respectivamente a 1, 2.5, 4, 5.5 e 7.11, cujos valores extremos correspondem aos casos dos indentadores Vickers ($R = 1$) e Knoop ($R = 7.11$).

Tabela 2.1. Designações e respectivos parâmetros geométricos dos indentadores numéricos, de fundo plano e piramidais.

		<i>Indentadores de fundo plano</i>				<i>Indentadores piramidais</i>					
		R	m (μm)	L (μm)	A_p (μm^2)	θ_1 ($^\circ$)	θ_2 ($^\circ$)	Δh (μm)	$c = A_0$ (μm^2)	b (μm)	a
<i>Indentadores</i>	<i>V</i>	1	3.7974	3.7974	7.21	74.0546	74.0546	0.0114	0.0032	0.5600	24.5000
	<i>K1</i>	2.5	2.4017	6.0042	7.21	81.3478	69.1723	0.0096	0.0032	0.6650	34.5500
	<i>K2</i>	4	1.8987	7.5947	7.21	83.9560	67.0462	0.0085	0.0032	0.7556	44.6000
	<i>K3</i>	5.5	1.6192	8.9056	7.21	85.3366	65.8369	0.0077	0.0032	0.8364	54.6500
	<i>K</i>	7.11	1.4241	10.1255	7.21	86.2500	65.0000	0.0070	0.0032	0.9152	65.4400

No caso dos indentadores piramidais, as tangentes dos ângulos θ_1 e θ_2 obedecem a uma relação quase linear com a razão entre as diagonais, R . Obviamente, a tangente do ângulo, θ_1 , associado à diagonal maior, aumenta e, ao invés, a tangente do ângulo θ_2 , associado à diagonal menor, diminui, com o aumento da razão R .

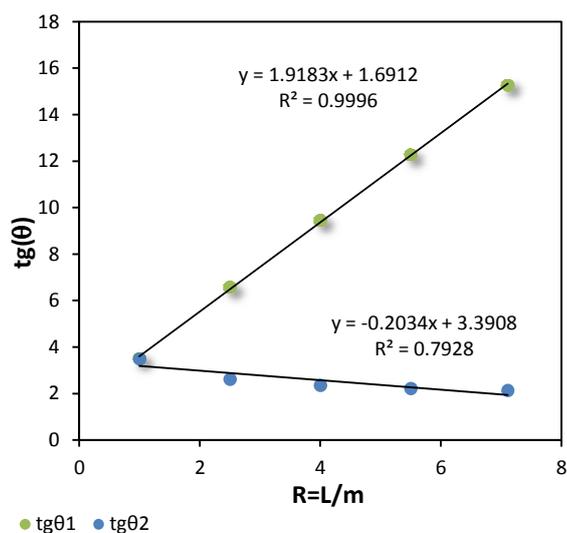


Figura 2.4. Evolução da tangente dos ângulos θ_1 e θ_2 em função da razão R .

Como consequência da escolha dos ângulos θ_1 e θ_2 para os indentadores piramidais K1, K2 e K3, indicados na Tabela 2.1 (cujas tangentes evoluem quase linearmente com R como se mostra na Figura 2.4), a razão entre a altura dos indentadores piramidais, para a mesma área de secção transversal (tomando como referências as áreas dos indentadores Vickers e Knoop) evolui de modo quase linear com R , como se mostra na Figura 2.5. As equações desta figura, permitem determinar as alturas dos indentadores Vickers, h_V , e Knoop, h_K , em função da altura, h , dum qualquer indentador com área de secção transversal idêntica.

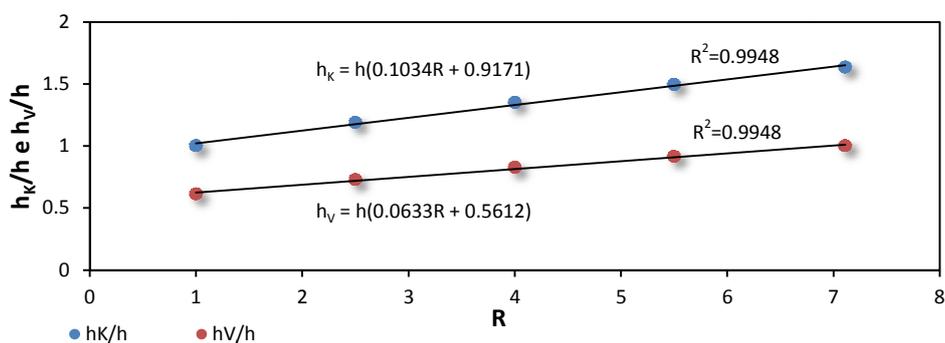


Figura 2.5. Evolução da razão entre a altura dos indentadores piramidais, para a mesma área de secção transversal (tomando como referências as áreas dos indentadores Vickers e Knoop) em função de R ; mostram-se as equações que permitem determinar as alturas dos indentadores Vickers e Knoop em função da altura dum qualquer indentador; h , h_V e h_K representam as alturas de um indentador qualquer, indentador Vickers e Knoop, respectivamente.

2.2. Malha de elementos finitos

A simulação numérica dos ensaios necessários à elaboração deste estudo foi realizada recorrendo ao programa de elementos finitos, DD3IMP, desenvolvido no Grupo de Tecnologia do Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Este programa é adequado para simulações que envolvam processos de grandes deformações plásticas e rotações, e recorre a um algoritmo totalmente implícito de Newton-Raphson. Permite a simulação de ensaios de dureza utilizando qualquer tipo de indentador (diferentes geometrias) e considera a existência de atrito entre o indentador e a amostra.

A amostra utilizada nas simulações numéricas dos materiais possui raio e espessura iguais a $40\mu\text{m}$. A discretização foi realizada por meio de elementos do tipo hexaedros lineares de oito nós isoparamétricos de modo a possibilitar uma boa relação entre a precisão dos resultados e o tempo de cálculo (duração da simulação). A malha de elementos finitos é composta por 18 300 elementos e possui 19 569 nós.

Na Figura 2.6, é possível observar-se a malha de elementos finitos utilizada, sendo de destacar a região central da malha, onde ocorre a indentação. Esta região é mais refinada do que o resto da amostra de modo a permitir obter a área de contacto com a precisão requerida à determinação da dureza e do módulo de elasticidade. O tamanho desta região é $1.5\mu\text{m}$ de espessura (profundidade segundo $0y$) e $1.5\mu\text{m}$ de raio.

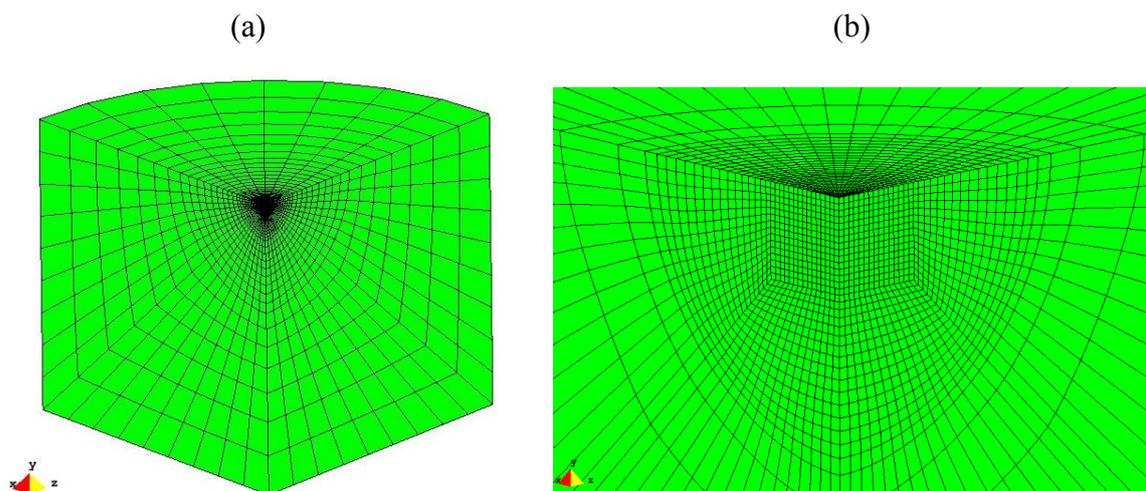


Figura 2.6. Malha de elementos finitos utilizada nas simulações numéricas: (a) Vista global; (b) Detalhe da região central da malha, mais refinada.

De forma a testar a aptidão da malha para realizar este tipo de ensaios, foi utilizado o indentador Vickers (ver Tabela 2.1) na simulação de alguns materiais. A comparação dos módulos de elasticidade obtidos com os de entrada na simulação revelou que a malha de elementos finitos manifesta ter a precisão necessária para ser utilizada.

2.3. Materiais

Nas simulações numéricas foram utilizados 48 materiais fictícios. Foi imposta uma profundidade máxima de indentação, $h_{máx}$, de $0.2\mu m$. O comportamento plástico dos materiais foi modelado considerando que a tensão equivalente de von Mises, σ , e a deformação plástica, ε , são relacionados segundo a lei de Swift (1952):

$$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^n, \quad (2.6)$$

na qual, k , ε_0 e n (coeficiente de encruamento) são constantes do material. O valor de ε_0 é muito pequeno e muitas vezes considerado igual ao valor da deformação elástica correspondente à tensão limite de elasticidade do material em tracção ($\varepsilon_0 = \sigma_y/E$, em que σ_y é a tensão limite de elasticidade em tracção e E é o módulo de elasticidade), neste trabalho, ε_0 foi considerado sempre igual a 0.005.

Da equação anterior resulta que a tensão limite de elasticidade do material é dada pela equação seguinte:

$$\sigma_y = k\varepsilon_0^n, \quad (2.7)$$

Para realizar as simulações dos ensaios de dureza com indentadores piramidais foram escolhidos materiais com diferentes valores de módulo de elasticidade, E , iguais a 70, 200 e 400 GPa . O coeficiente de Poisson, ν , foi sempre igual a 0.3. Para cada valor do módulo de elasticidade, escolheram-se materiais com valores de tensão limite de elasticidade, σ_y , iguais a 2, 6, 10 e 20 GPa . Finalmente, para cada uma das combinações anteriores escolheram-se quatro valores diferentes do coeficiente de encruamento, $n = 0.01, 0.05, 0.15$ e 0.30 . Deste modo, procurou-se que a razão entre a profundidade de indentação final (residual) e a profundidade de indentação máxima ($h_{final}/h_{máx}$),

compreenda uma vasta gama de valores, entre 0 e 1. Na Tabela 2.2 são identificados os 48 materiais fictícios e suas propriedades mecânicas.

Tabela 2.2. Propriedades mecânicas, elásticas e plásticas, dos materiais utilizados nas simulações numéricas dos indentadores piramidais.

E (GPa)	ν	σ_y (GPa)				n	ϵ_0
70	0.3	2	6	10	20	0.01	0.005
						0.05	
						0.15	
						0.30	
200		2	6	10	20	0.01	
						0.05	
						0.15	
						0.30	
400		2	6	10	20	0.01	
						0.05	
						0.15	
						0.30	

No caso dos indentadores planos, os ensaios foram realizados em regime elástico e por isso apenas interessa considerar as propriedades elásticas. Neste contexto, foram realizados ensaios em materiais com valores do módulo de elasticidade, E , iguais a 30, 200, 400, 600 e 800GPa. O coeficiente de Poisson, ν , foi sempre igual a 0.3.

No que diz respeito ao contacto ente o indentador e a amostra, foi considerado que o atrito obedece à lei de Coulomb, com o respectivo coeficiente igual a 0.16, como foi efectuado em trabalhos anteriores (por exemplo: Antunes, 2006; Antunes *et al.*, 2006).

3. ESTUDO DAS CURVAS DE INDENTAÇÃO

Este capítulo refere-se ao estudo genérico das curvas de carga-descarga, obtidas com os indentadores utilizados (Tabela 2.1). As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram exemplos de curvas de indentação corrigidas, obtidas para materiais com diferentes valores da razão $h_{final}/h_{máx}$, até à mesma profundidade máxima de indentação. Para todos os materiais, qualquer que seja a profundidade de indentação, a carga aplicada aumenta à medida que o valor da razão R aumenta, porque a área de contacto é maior no caso dos maiores valores de R .

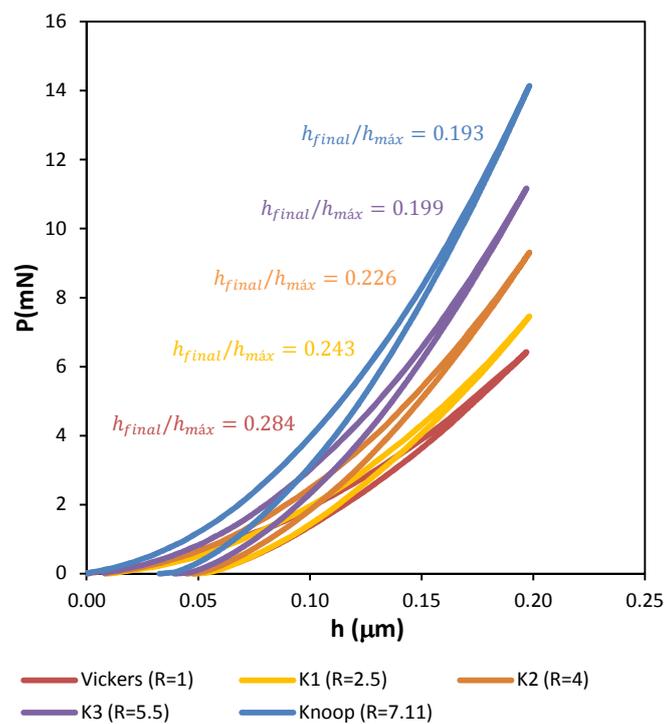


Figura 3.1. Curvas de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ relativamente pequenos ($E=70\text{GPa}$, $n=0.01$, $\sigma_y=10$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).

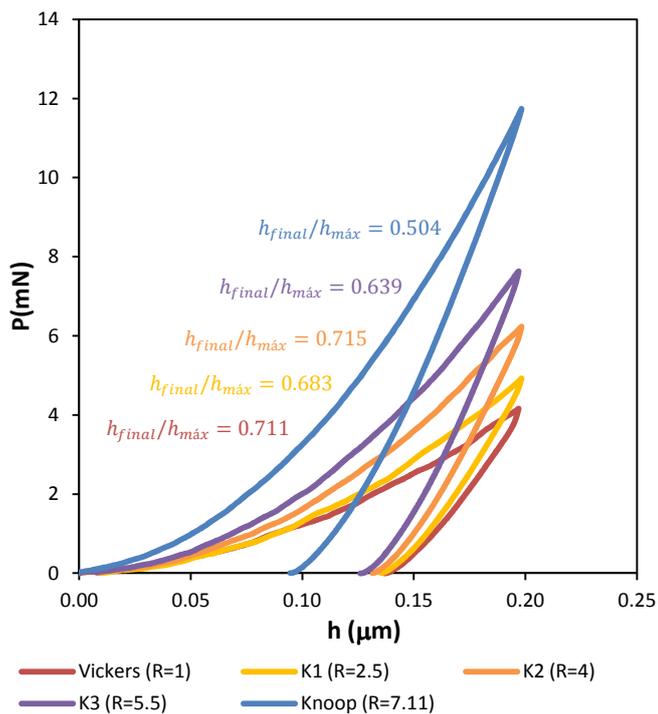


Figura 3.2. Curvas de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ intermédios ($E=70GPa$, $n=0.05$, $\sigma_y=2$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).

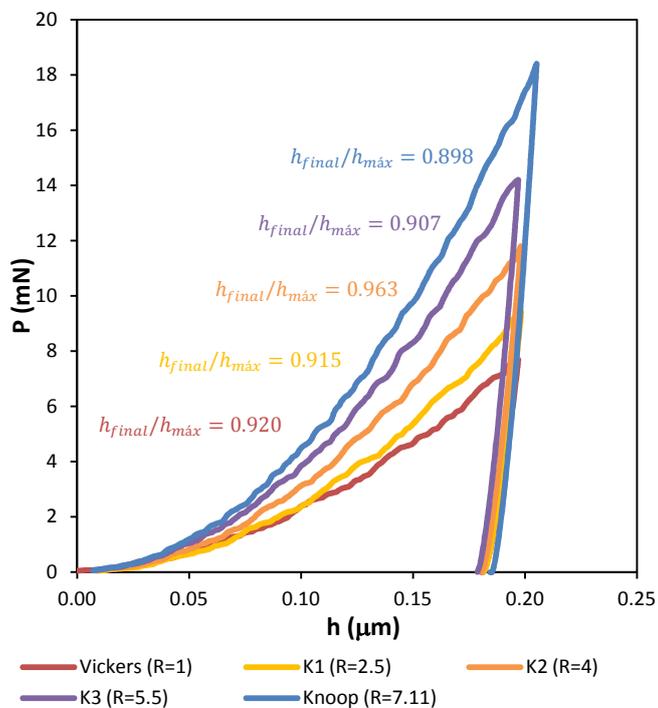


Figura 3.3. Curva de carga-descarga obtidas para um material, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ relativamente elevados ($E=400GPa$, $n=0.01$, $\sigma_y=2$), utilizando os indentadores Vickers, Knoop e os intermédios (K1, K2, K3).

Na Figura 3.4 comparam-se as curvas de indentação, fazendo a equivalência entre áreas, isto é de modo a que à mesma profundidade de indentação corresponda a mesma área de secção transversal da pirâmide. Por exemplo, para os indentadores Vickers e Knoop, utiliza-se a equação (1.7) ($h_K = 0.612h_V$), para proceder a esta equivalência. Nestas condições, as curvas de carga aproximam-se, como se constata nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, que correspondem às situações das Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. A sobreposição das curvas não é perfeita porque a “equivalência” entre profundidades de contacto não é traduzida pelas mesmas equações que a equivalência entre profundidades de indentação (por exemplo, a recuperação do indentador Vickers é diferente da do indentador Knoop, como já referido anteriormente). Além disso, a distribuição de deformações e tensões equivalentes, nas regiões deformadas depende do indentador, como se mostra na subsecção 5.3.3.2., embora para profundidades de indentação “equivalente” diferentes. Mesmo assim, a semelhança entre as curvas de carga “equivalentes” dos cinco indentadores é apreciável, em particular para o caso do material com valores da razão $h_{final}/h_{máx}$ mais elevados (Figura 3.6).

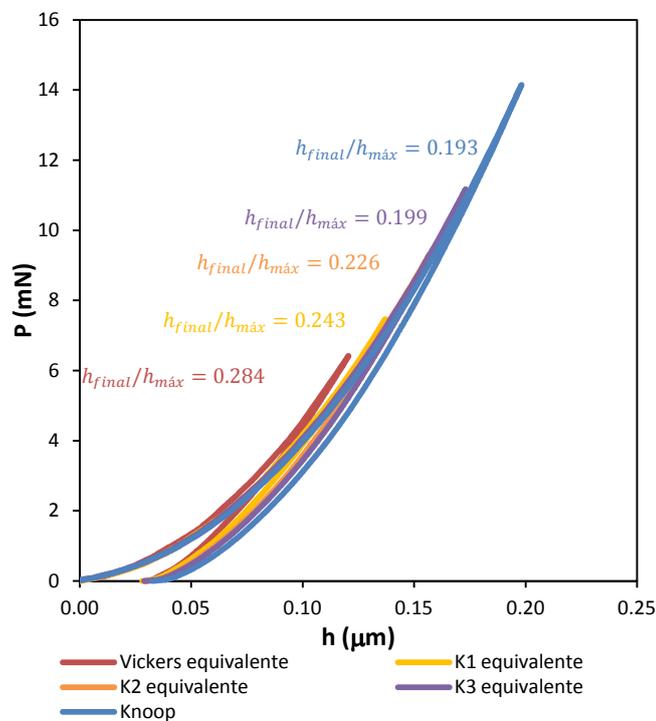


Figura 3.4. Como a Figura 3.1, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=70\text{GPa}$, $n=0.01$ e $\sigma_y=10\text{GPa}$.

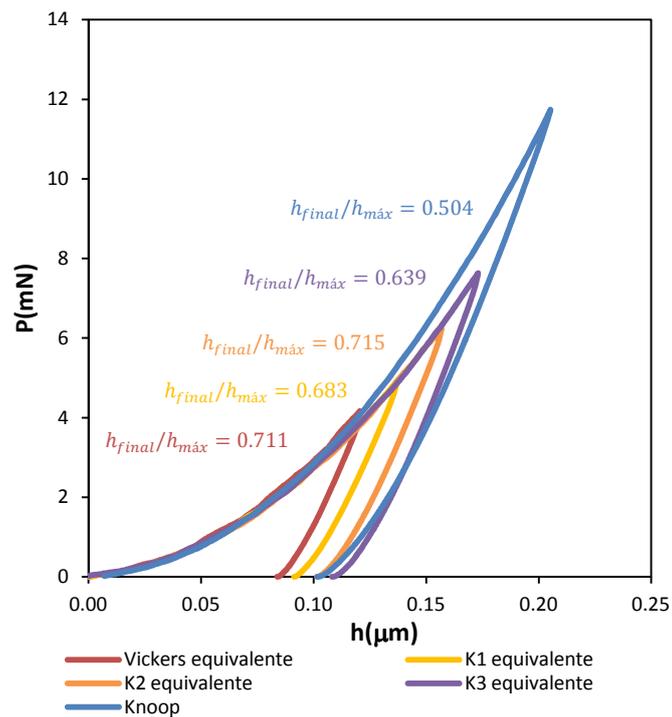


Figura 3.5. Como a Figura 3.2, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=70\text{GPa}$, $n=0.05$ e $\sigma_y=2\text{GPa}$.

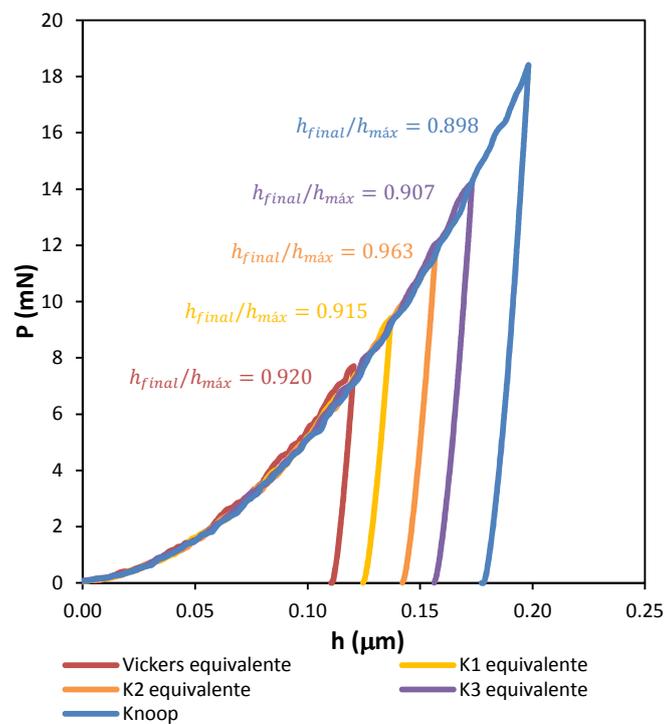


Figura 3.6. Como a Figura 3.3, mas procedendo à “equivalência” de curvas para o indentador Knoop. Material com $E=400\text{GPa}$, $n=0.01$ e $\sigma_y=2\text{GPa}$.

3.1. Curva de carga

Para todos os indentadores da Tabela 2.1 e todos os materiais da Tabela 2.2, fez-se um estudo da curva de carga que consistiu na determinação dos parâmetros k e n da equação (1.10), associados a esta curva. Para tal utilizou-se o programa comercial *CurveExpert*[®].

Para os diversos materiais fictícios aqui estudados, no caso do indentador Knoop, a média dos valores de n é de 1.96, e no caso do indentador Vickers, a média de n é de 1.94. Estes valores são um pouco diferentes dos esperados, uma vez que não sendo considerado nas simulações numéricas o efeito de tamanho de indentação, o valor de n deve ser igual a 2, pelo menos para indentadores com a simetria do Vickers. Para os diversos indentadores, a Tabela 3.1 mostra os valores médios de n obtidos, que se aproximam de 2 à medida que R aumenta (o indentador K3 é a única exceção).

Tabela 3.1. Valores de n em relação a R .

<i>Indentador</i>	<i>R</i>	<i>n</i>
<i>V (Vickers)</i>	1	1.94
<i>K1</i>	2.5	1.95
<i>K2</i>	4.0	1.95
<i>K3</i>	5.5	1.93
<i>K (Knoop)</i>	7.11	1.96

3.2. Curva de descarga

Uma lei de potência foi também ajustada à curva de descarga. Foram determinados os valores de k e m , respeitantes ao ajuste de 70% dos pontos desta curva, os mais próximos da carga máxima, utilizando a equação (1.11) e o programa comercial *CurveExpert*[®]. Este ajuste serviu para determinar a rigidez, S , da curva de descarga e a respectiva complacência, C ($= 1/S$), com o intuito de estimar o módulo de elasticidade dos materiais, com recurso à equação (1.16). Assim, a rigidez na carga máxima é dada pela equação seguinte:

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{P_{m\acute{a}x}} = Km(h_{m\acute{a}x} - h_0)^{m-1}, \quad (3.1)$$

em que h_0 é o último ponto de ajuste, que corresponde à carga P_0 , ou seja é a profundidade de indentação correspondente ao último ponto da fracção de 0.7 da curva de descarga.

Para o conjunto dos materiais estudados, a média dos valores de m é de 1.19, no caso do indentador Knoop, e 1.14, no caso do indentador Vickers, como se mostra na Tabela 3.2. Os valores de m crescem ligeiramente à medida que R aumenta. Isto significa que também a recuperação elástica aumenta à medida que o valor de R aumenta, para um dado material e profundidade de indentação. Ou seja, esta recuperação elástica é mais intensa no Knoop do que no Vickers, por exemplo.

Tabela 3.2. Valores de m em relação a R .

<i>Indentador</i>	<i>R</i>	<i>m</i>
<i>V (Vickers)</i>	1	1.14
<i>K1</i>	2.5	1.17
<i>K2</i>	4.0	1.18
<i>K3</i>	5.5	1.18
<i>K (Knoop)</i>	7.11	1.19

4. INDENTADORES PLANOS

Foram também realizadas simulações numéricas com indentadores planos que permitiram realizar estudos relacionados com a geometria do indentador, nomeadamente a determinação do parâmetro β das equações (1.15) e (1.17). As geometrias dos indentadores planos estão indicadas na Tabela 2.1, ou seja possuem valores de $R = L/m$ (razão entre as diagonais do indentador), entre 1 e 7.11, correspondendo, respectivamente, à secção transversal do indentador Vickers e Knoop. Na Tabela 2.1 refere-se também a área dos indentadores, igual a $7.21\mu m^2$, para todos eles.

A Figura 4.1 mostra a evolução linear elástica da carga P com a profundidade de indentação elástica, h_e , obtida com indentadores planos, para 5 valores distintos do módulo de Young, compreendidos entre 30 e $800GPa$. Foi imposta uma profundidade máxima de indentação de $0.025\mu m$ (de forma a garantir que ocorre apenas deflexão elástica).

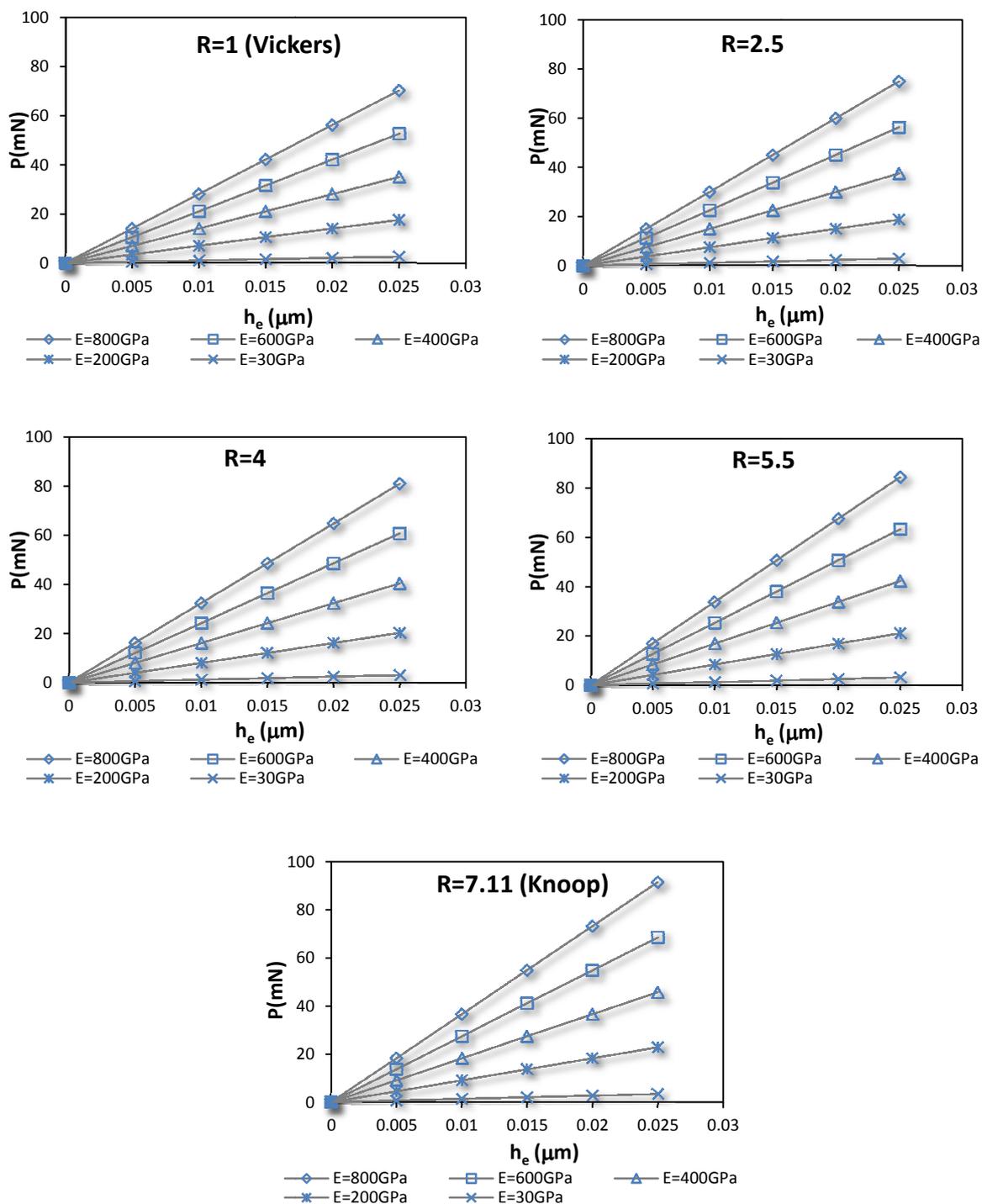


Figura 4.1. Carga versus profundidade de indentação, em regime elástico, para simulações com indentadores planos de materiais com diferentes valores para o módulo de Young.

A Tabela 4.1 resume os resultados obtidos em todos os ensaios para o factor de correcção geométrico β . Os resultados desta permitem concluir que o factor de correcção

geométrico β não depende do valor do módulo de Young. O valor de $\beta = 1.054$ corresponde à média dos valores de β obtidos para $R = 1$ (relativo ao indentador Vickers) e o valor de $\beta = 1.372$ corresponde à média dos valores de β obtidos para $R = 7.11$ (referente ao indentador Knoop). O resultado de β para o indentador Vickers é muito próximo do anteriormente obtido por Antunes *et al.* (2006), ou seja cerca de 1.05, e o do indentador Knoop é idêntico ao que pode ser deduzido dos resultados de Giannakopoulos *et al.* (2006), ou seja, 1.331. Porém, estes autores encontram um valor de β referente à geometria do indentador Vickers igual a 1.012.

Tabela 4.1. Valores obtidos para o factor de correcção β nos ensaios numéricos com indentadores planos.

Factor de correcção geométrico β							
<i>R</i> <i>(L/m)</i>	<i>E = 30</i> <i>(GPa)</i>	<i>E = 200</i> <i>(GPa)</i>	<i>E = 400</i> <i>(GPa)</i>	<i>E = 600</i> <i>(GPa)</i>	<i>E = 800</i> <i>(GPa)</i>	<i>Média</i>	<i>m/L</i>
1	1.055	1.054	1.053	1.054	1.054	1.054	1.00
2.5	1.125	1.123	1.124	1.125	1.124	1.124	0.40
4	1.215	1.214	1.214	1.214	1.215	1.214	0.25
5.5	1.269	1.266	1.267	1.267	1.266	1.267	0.18
7.11	1.374	1.372	1.371	1.371	1.372	1.372	0.14

A Figura 4.2 resume a evolução dos valores médios de β em função da razão R , permitindo constatar que o valor de β aumenta linearmente com aquela razão (Simões *et al.*, 2011).

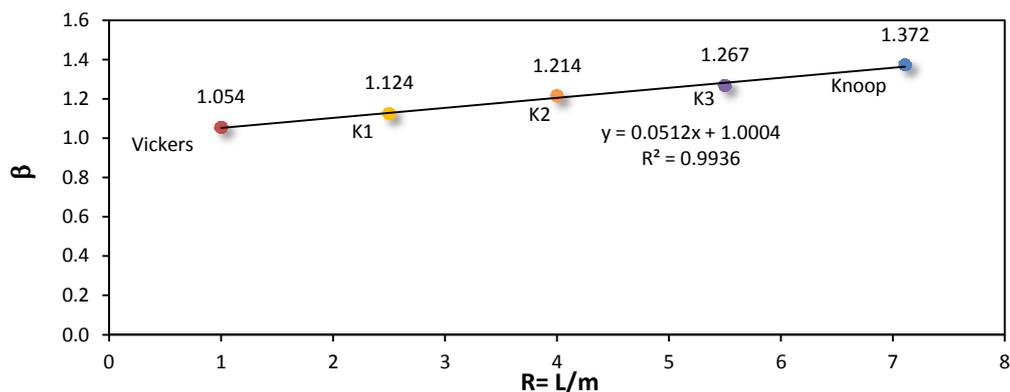


Figura 4.2. Evolução dos valores médios de β em função do rácio R .

O aumento de β com R , está associado à perda de simetria geométrica do indentedor, que envolve diferenças na distribuição de tensões ao longo dos dois eixos de simetria do indentedor.

Na Figura 4.3, mostra-se esquematicamente a evolução atrás descrita, incluindo o indentedor plano circular, para o qual o valor de β é igual a 1.

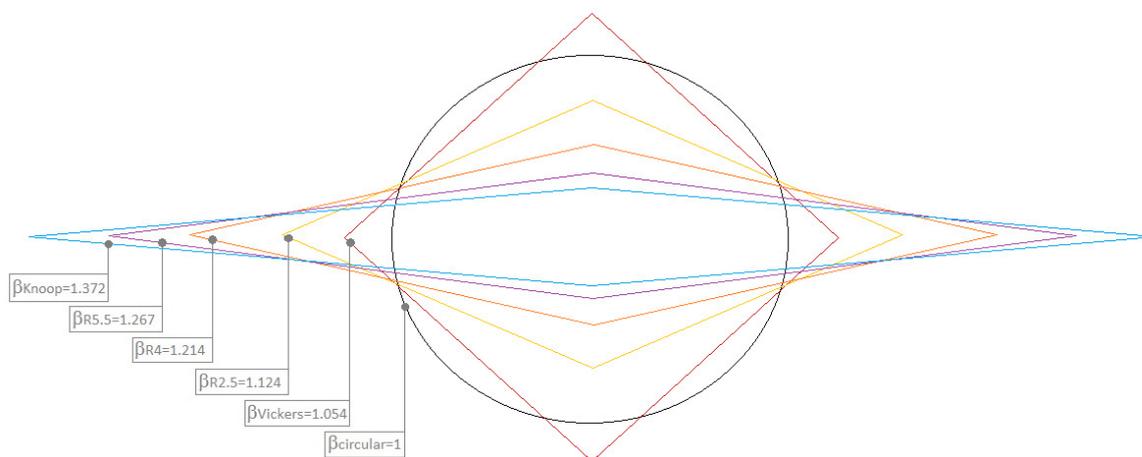


Figura 4.3. Valores de β correspondentes às várias geometrias dos indentedores planos.

Na Figura 4.4 mostra-se exemplos de distribuições de tensão equivalente obtidas para um módulo de Young, $E = 200\text{GPa}$, no caso de indentedores planos, após uma profundidade de indentedação de $0.025\mu\text{m}$. Para o caso de $R = 1$ (Vickers), a distribuição de tensões ao longo dos eixos $0x$ e $0y$ é idêntica, mas para valores de R superiores a 1 deixa de existir simetria, como é o caso do indentedor com $R = 7.11$

(Knoop). De facto, no caso do indentador Vickers, o valor máximo de tensão equivalente ocorre em ambas as diagonais, relativamente próximo do bordo do indentador, enquanto que no caso do indentador Knoop, o valor máximo de tensão equivalente ocorre na diagonal maior a cerca de $2/3$ do centro da indentação.

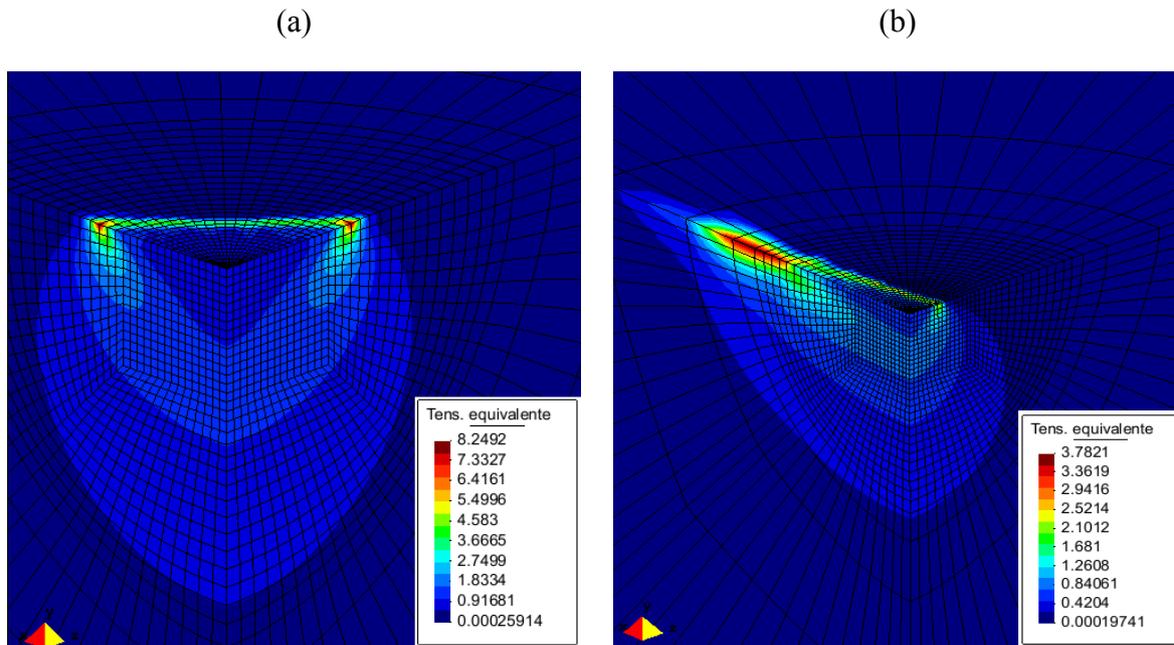


Figura 4.4. Distribuições de tensão equivalente (GPa) obtida com os indentadores planos para o material com $E=200\text{GPa}$: (a) $R=1$ (Vickers); (b) $R=7.11$ (Knoop).

5. INDENTADORES PIRAMIDAISS

Todos os 48 materiais da Tabela 2.2 foram testados com os cinco indentadores piramidais (valores da razão R entre 1 e 7.11).

5.1. Área de contacto da indentação

Os resultados da área de contacto das indentações efectuadas com os indentadores Vickers, Knoop e o indentador K2 ($R = 4$), normalizados pela área obtida pela função de área do indentador, A_{ideal} , (A_{ideal} é a área de referência, isto é quando a indentação não apresenta lábio ou depressão) são apresentados na Figura 5.1 em função da razão $h_{final}/h_{máx}$. Na Figura 5.1(a), a área de contacto (A_c) é determinada recorrendo ao valor da complacência da curva de descarga à carga máxima e na Figura 5.1(b), a área de contacto (A_{fe}) é determinada com base no contorno da indentação em contacto com o indentador à carga máxima (método dos trapézios). Em ambos os casos, as evoluções da área de contacto normalizada com $h_{final}/h_{máx}$ indiciam não depender do módulo de elasticidade. Para os três indentadores a que se referem os resultados da Figura 5.1, e também K1 e K3 (ver Tabela 2.1), a área de contacto A_{fe} é, em geral, inferior à ideal, mas quando a razão $h_{final}/h_{máx}$ apresenta valores superiores a cerca de 0.85, a área de contacto A_{fe} é superior à ideal, devido à formação de lábio (depende do coeficiente de encruamento). Este resultado já foi referido no caso de ensaios com indentadores Vickers, em materiais sem encruamento, $n = 0$, (Antunes *et al.*, 2006; Antunes *et al.*, 2007). A área de contacto A_c é inferior à área ideal qualquer que seja a razão $h_{final}/h_{máx}$, ou seja, a formação de lábio no bordo da indentação não influencia estes resultados (a determinação de h_c inerente ao cálculo de A_c não é sensível à formação de lábio). Esta evolução da área de contacto normalizada, A_c/A_{ideal} , em função da razão $h_{final}/h_{máx}$ está de acordo com resultados anteriores, que além disso mostraram não depender do coeficiente de encruamento (Antunes *et al.*, 2007).

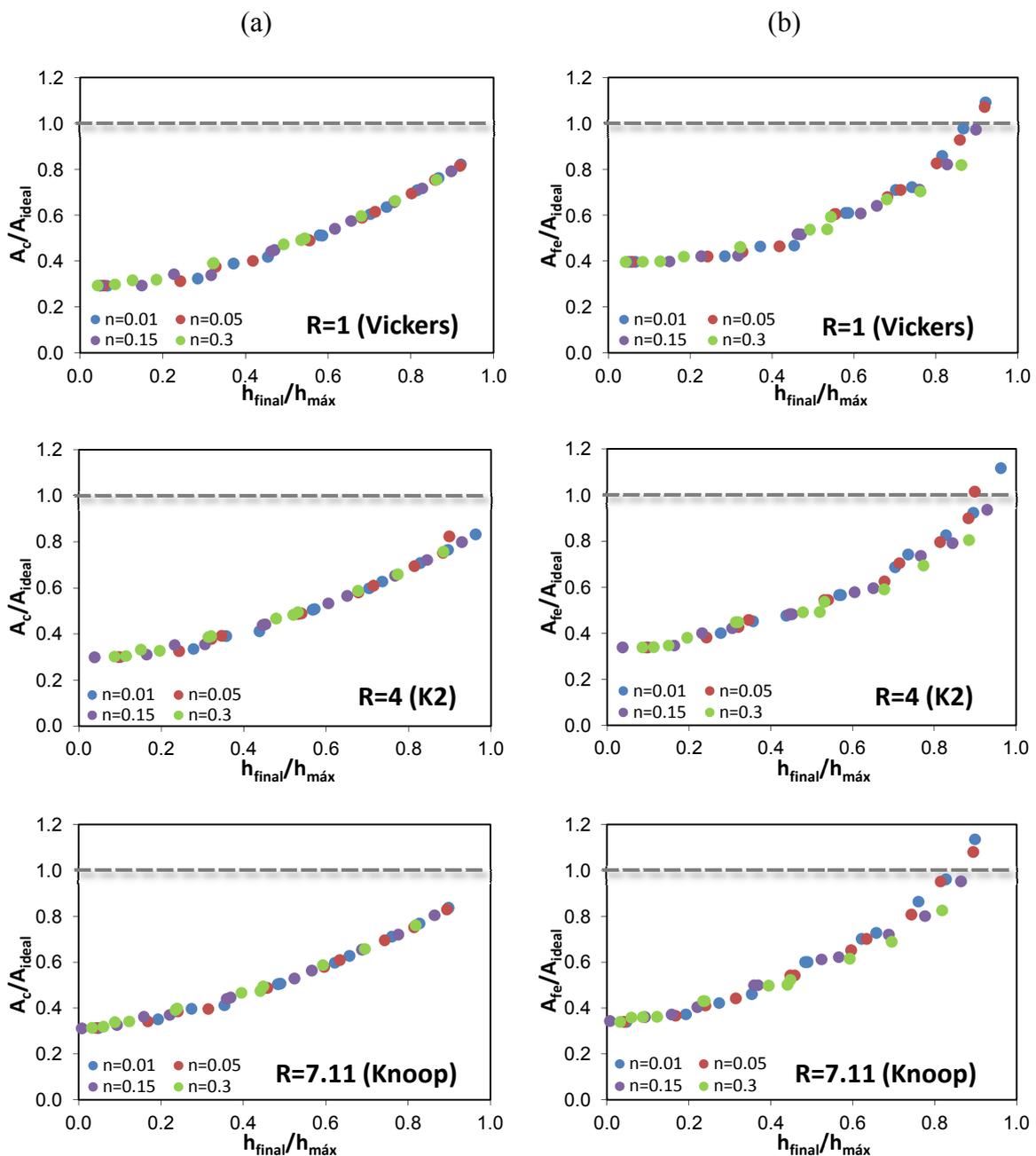


Figura 5.1. Área de contacto normalizada em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com o indentador Vickers, K2 ($R=4$) e Knoop, isto é, com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade: (a) A_c/A_{ideal} ; (b) A_{fe}/A_{ideal} .

Nas Figuras 5.2 e 5.3 mostra-se a sobreposição das curvas da Figura 5.1, para as áreas de contacto A_{fe}/A_{ideal} e A_c/A_{ideal} , respectivamente. A evolução das áreas de contacto normalizadas é muito idêntica, para os três indentadores. Porém, o indentador Knoop apresenta valores das razões A_{fe}/A_{ideal} e A_c/A_{ideal} ligeiramente superiores aos

indentadores K2 e Vickers. O indentador Knoop apenas apresenta valores da razão A_{fe}/A_{ideal} inferiores aos do indentador Vickers no caso de $h_{final}/h_{máx} < 0.3$. Isto significa que, no caso do indentador Knoop quando comparado com o Vickers, a deflexão da superfície da indentação (“*sink-in*”) é mais acentuada para valores de $h_{final}/h_{máx}$ pequenos e a formação de lábio (“*pile-up*”) é mais acentuada para valores elevados de $h_{final}/h_{máx}$. Este resultado não é visível na evolução da razão A_c/A_{ideal} . Neste caso, os resultados não traduzem a formação de lábio em qualquer indentador, para valores elevados de $h_{final}/h_{máx}$, nem que a deflexão da superfície é superior no indentador Knoop do que no Vickers.

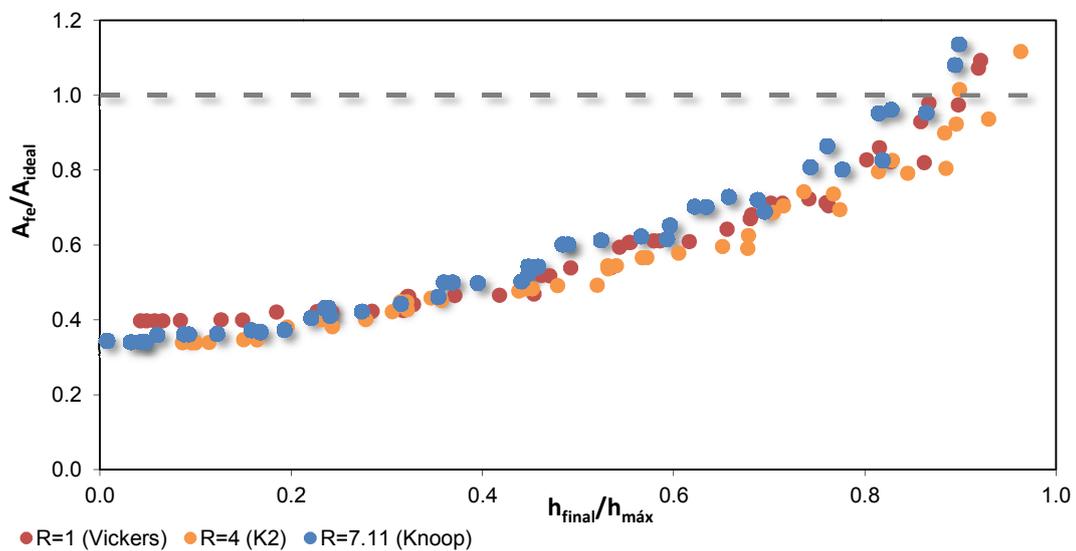


Figura 5.2. Comparação da área de contacto normalizada, A_{fe}/A_{ideal} , em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com os indentadores Vickers, K2 e Knoop (com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade).

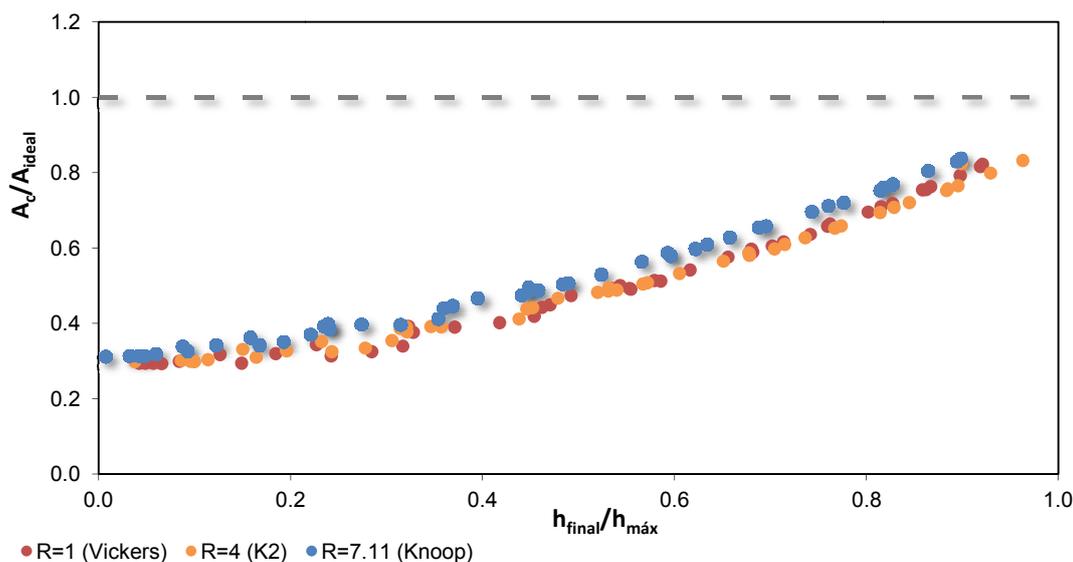


Figura 5.3. Comparação da área de contacto normalizada, A_c/A_{ideal} , em função de $h_{final}/h_{máx}$, para todos os materiais testados numericamente com os indentadores Vickers, K2 e Knoop (com diferentes valores de módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento e tensão limite de elasticidade).

5.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado, utilizando as equações (1.17) e (1.18), com base nos valores da área de contacto estimados pelos dois procedimentos referidos na secção anterior, ou seja, recorrendo à área de contacto avaliada com base na curva de descarga, A_c , e à avaliada pelo contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima, A_{fe} (estimada pelo método dos trapézios).

Na Figura 5.4 são apresentadas, para os cinco indentadores estudados, as evoluções das razões E_c/E_{in} e E_{fe}/E_{in} (correspondendo às estimativas de áreas de contacto A_c e A_{fe} , respectivamente) em função da razão $h_{final}/h_{máx}$, para os três valores do módulo de elasticidade de entrada, E_{in} , de 70, 200 e 400 *GPa* (dados de entrada no programa de elementos finitos – ver Tabela 2.2). Os resultados da Figura 5.4 foram obtidos considerando o factor de correcção geométrico β igual a 1, ou seja sem considerar correcção da geometria do indentador.

No que diz respeito aos resultados do módulo de elasticidade avaliado a partir da curva de descarga, E_c , os valores obtidos para cada indentador quase não dependem, da razão $h_{final}/h_{máx}$, com excepção de uma região para a qual esta razão é superior a 0.85.

No caso de valores da razão $h_{final}/h_{máx}$ superiores a 0.85, os valores do módulo de elasticidade aumentam à medida que $h_{final}/h_{máx}$ se aproxima de 1, devido à formação de lábio no contorno da indentação que não é considerado na determinação de área de contacto A_c . O valor médio de E_c/E_{in} , obtido para todo o intervalo da razão $h_{final}/h_{máx}$, aumenta à medida que R aumenta, ou seja é menor para o Vickers e maior para o Knoop. Este aspecto será analisado em detalhe na próxima subsecção.

No caso dos resultados do módulo de elasticidade, avaliado a partir do contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima, E_{fe} , os valores obtidos para o indentador Vickers contrariam resultados anteriores (Antunes *et al.*, 2007), devido ao problema da discretização da malha de elementos finitos utilizada no presente trabalho. De facto, estes autores encontraram, para este indentador, valores da razão E_{fe}/E_{in} quase independentes de $h_{final}/h_{máx}$ e próximos de 1.05. No caso presente, o valor da razão E_{fe}/E_{in} depende da razão $h_{final}/h_{máx}$, e é mesmo inferior a 1 para valores da razão $h_{final}/h_{máx}$ inferiores a 0.6. Também no caso dos restantes indentadores se observa que a razão E_{fe}/E_{in} depende de $h_{final}/h_{máx}$.

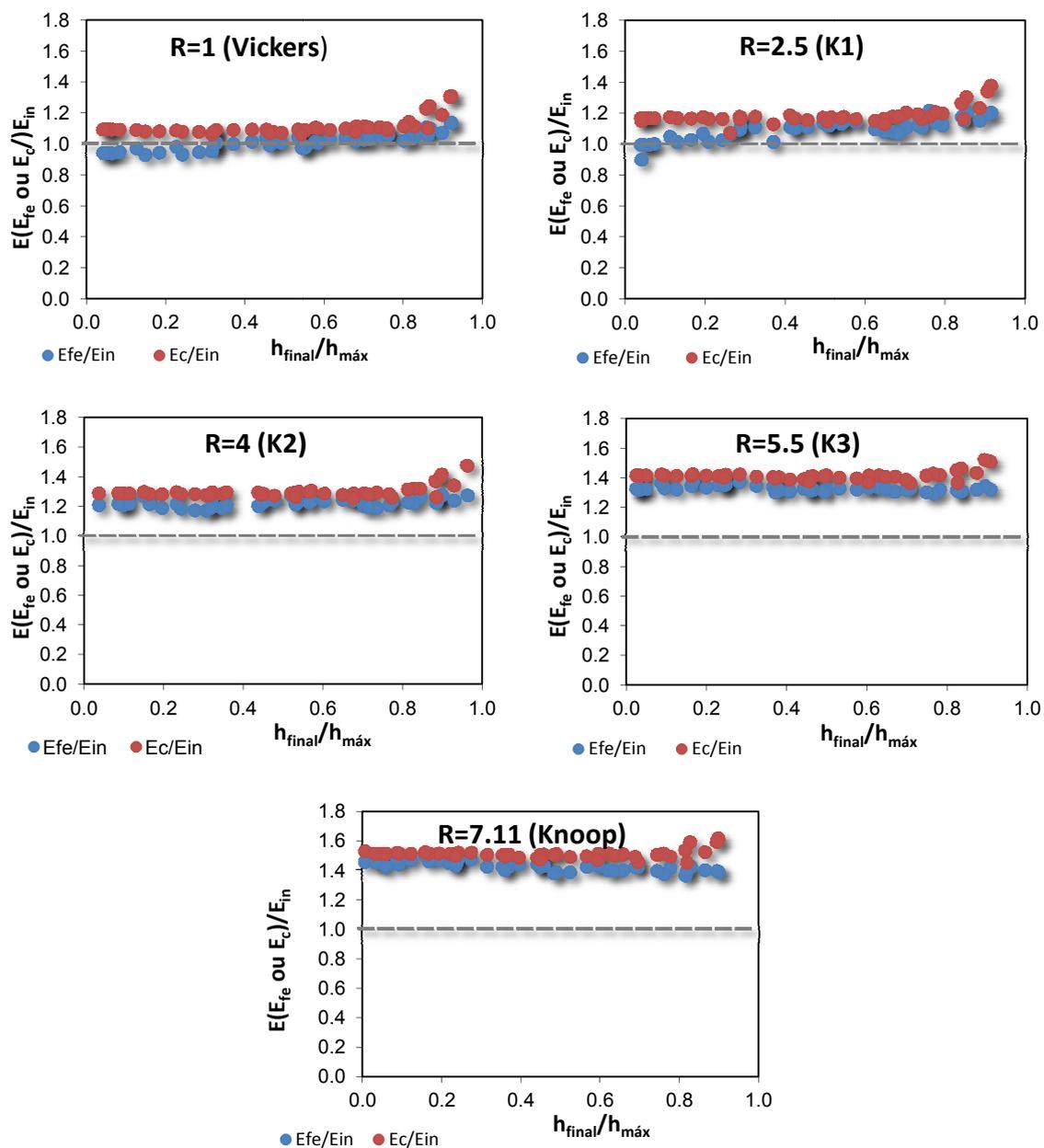


Figura 5.4. Evolução das razões E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referentes aos cinco indentadores estudados.

A dependência do valor da razão E_{fe}/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$, para o caso do indentador Vickers, contrariando resultados anteriores, levou-nos a questionar a adequação do refinamento e geometria da malha de elementos finitos utilizada. De facto, a malha de elementos finitos foi limitada no que respeita ao número de nós utilizados (o programa utilizado só suporta até 20 000 elementos), o que a pode tornar relativamente grosseira neste tipo de ensaios, para áreas de indentação relativamente pequenas. Deste

modo, a precisão da determinação da área de contacto à carga máxima com base no contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador é provavelmente afectada, especialmente no caso de indentadores com menores valores da razão R , uma vez que as profundidades de indentação foram iguais para todos os indentadores ($0.2\mu m$). De facto, quanto menor for o valor de R menor é a área de contacto para a mesma profundidade de indentação.

A Figura 5.5 ilustra os contornos de uma indentação efectuada com o indentador Vickers ($R = 1$). O contorno interior corresponde aos últimos nós que têm contacto com o indentador, enquanto o contorno exterior corresponde aos primeiros nós sem contacto com o indentador (isto é, nós imediatamente exteriores aos últimos com contacto). A área de contacto a considerar é definida por um contorno médio entre os dois precedentes. Assim, para este indentador, a diferença de áreas entre os contornos exterior e interior, que representa uma incerteza na determinação do respectivo valor da área, tem um significado importante quando comparada com o valor da área definida pelo contorno interior, por exemplo. Outro aspecto que também deve influenciar a precisão da determinação do valor da área em contacto à carga máxima é a orientação da malha relativamente ao bordo da indentação, uma vez que é utilizado o método dos trapézios.

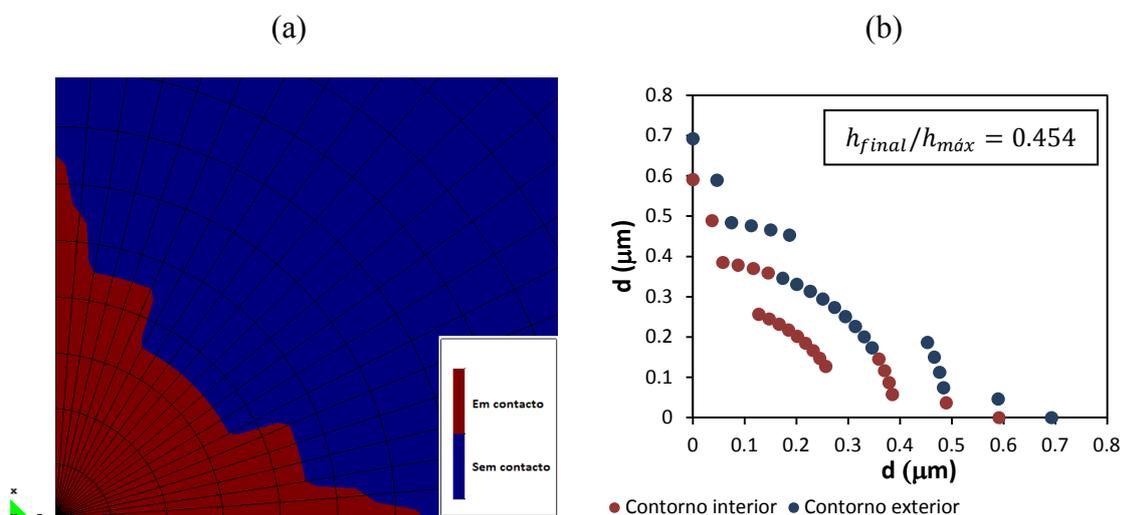


Figura 5.5. Contornos de uma indentação com indentador Vickers à carga máxima (amostra com $E=70GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6GPa$): (a) Contorno médio; (b) Contornos interior e exterior.

Como os ensaios foram todos realizados à mesma profundidade de indentação ($0.2\mu\text{m}$), à medida que R aumenta, a área de contacto à carga máxima também aumenta. Por exemplo, a razão entre as áreas de contacto ideais (sem formação de depressão e lábio) à mesma profundidade de indentação dos indentadores Knoop e Vickers é 2.67 ($= 65.44/24.5$). Assim, no caso do indentador Knoop ($R = 7.11$), a precisão na determinação da área é certamente maior do que a do Vickers. Na Figura 5.6 ilustram-se os contornos de uma indentação efectuada pelo indentador Knoop.

Embora não tenha havido a possibilidade de comparar os nossos resultados com os de outros autores, por falta de resultados na bibliografia sobre o indentador Knoop, a malha de elementos finitos é provavelmente aceitável, para o caso deste indentador e mesmo para os indentadores K2 e K3. Para o caso de Vickers e K1, a malha deveria ser mais refinada para a obtenção de resultados consistentes, sendo recomendável repetir novamente as simulações para estes dois indentadores em futuros trabalhos. Esta hipótese é justificada na subsecção seguinte, a propósito dos valores do coeficiente de correcção geométrica determinados por metodologias diferentes.

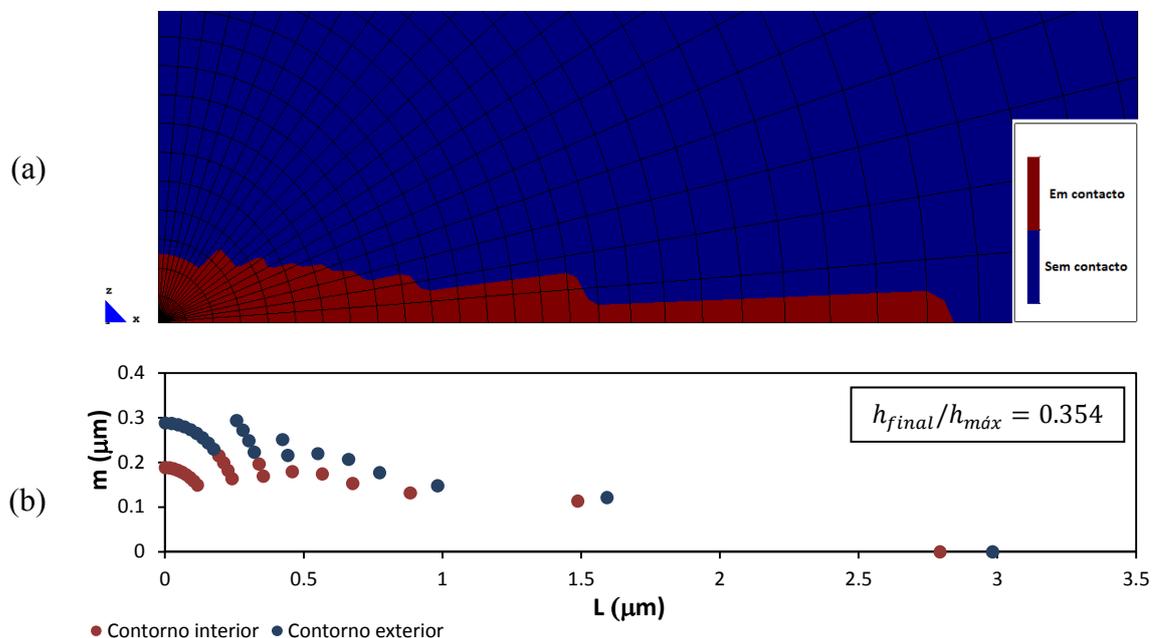


Figura 5.6. Contornos de uma indentação com indentador Knoop à carga máxima (amostra com $E=70\text{GPa}$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6\text{GPa}$): (a) Contorno médio; (b) Contornos interior e exterior.

5.3. Factor de correcção geométrico β

Na Figura 5.4 observa-se, uma geral sobreavaliação dos valores do módulo de elasticidade, tanto maior quanto maior o valor da razão R . À semelhança do que acontece com os indentadores Vickers e Berkovich, é imperativo utilizar um factor de correcção geométrico β de modo a que os valores do módulo de elasticidade surjam bem estimados, isto é que os valores das razões E_c/E_{in} e E_{fe}/E_{in} oscilem em torno de 1. Quanto maior o valor de R , mais elevado terá de ser o valor do factor de correcção geométrico β . Para valores de $h_{final}/h_{máx}$ superiores a 0.85, os valores do módulo de elasticidade, como analisado na subsecção anterior, aumentam à medida que $h_{final}/h_{máx}$ se aproxima de 1 (devido à formação de lábio). Assim, na determinação do factor de correcção geométrico β , realizada nesta secção, são excluídos todos os resultados obtidos para materiais com valores de $h_{final}/h_{máx} > 0.85$.

Para calcular os valores de β , são utilizados dois métodos, descritos e comparados a seguir:

5.3.1. Método I

Neste método, são calculadas as médias ($E_{médio c}$ e $E_{médio fe}$) dos valores obtidos para o módulo de elasticidade, E_c e E_{fe} , que depois são divididas pelo valor do módulo de elasticidade dado como entrada nas simulações numéricas, E_{in} . Os respectivos valores de β , são então: $\beta_c = E_c/E_{in}$ e $\beta_{fe} = E_{fe}/E_{in}$.

5.3.2. Método II

Neste método determina-se os valores de β (β_c e β_{fe}) recorrendo a uma equação deduzida a partir das equações (1.12) e (1.17), procedendo ao quociente entre os valores da dureza e do quadrado do módulo de elasticidade:

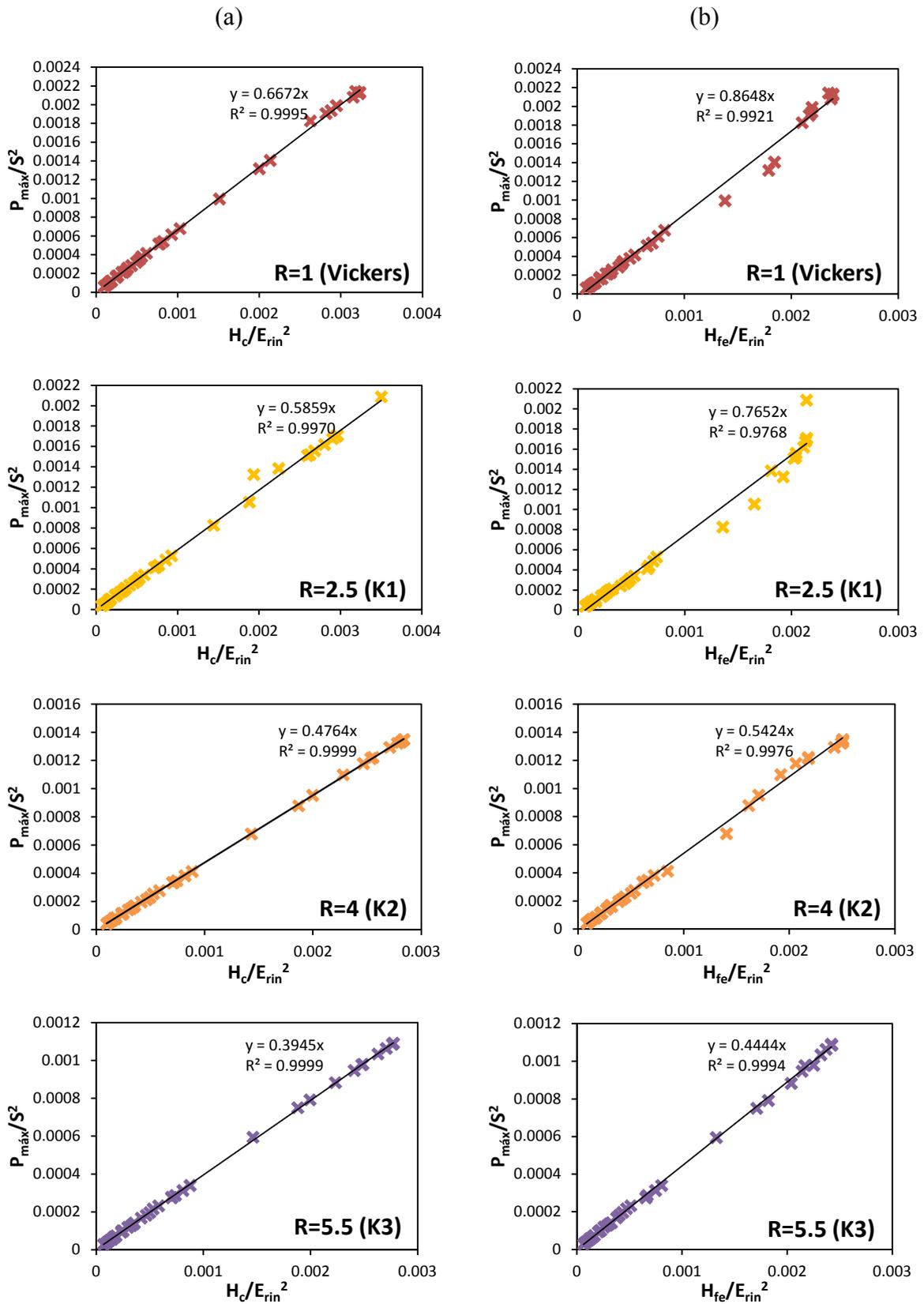
$$\frac{P_{máx}}{S^2} = \frac{\pi}{4} \frac{H}{E_{rin}^2} \frac{1}{\beta^2}, \quad (5.1)$$

onde $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima aplicada, S a rigidez da curva de descarga do material na carga máxima, H a dureza e E_{rin} o módulo de elasticidade reduzido (utilizado como dado de entrada no programa de elementos finitos).

Procedendo ao ajuste linear (do tipo: $y = mx$) dos pontos que descrevem a evolução da relação P/S^2 em função da relação H/E_{rin}^2 , o valor de β é determinado a partir da equação seguinte:

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{m}}, \quad (5.2)$$

A Figura 5.7 ilustra a relação traduzida pela equação (5.1) respeitante aos materiais, para valores de $h_{final}/h_{m\acute{a}x} < 0.85$, testados com os cinco indentadores.



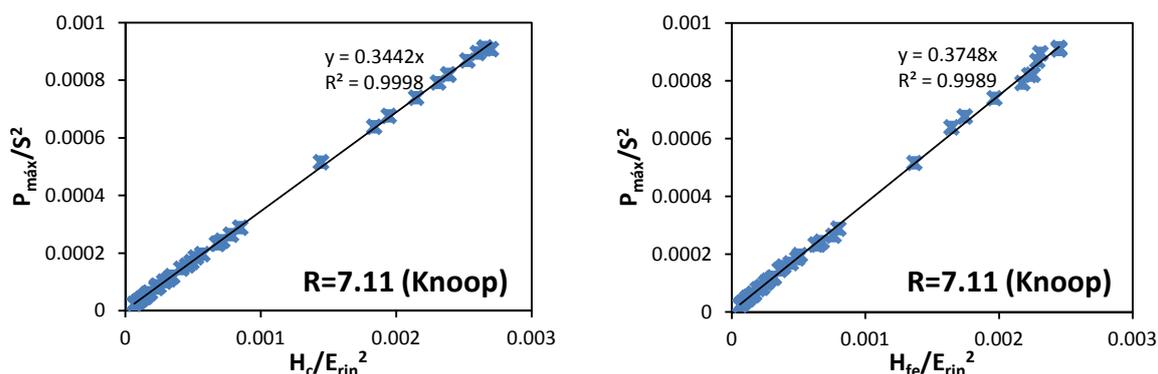


Figura 5.7. Evolução da razão P/S^2 em função da razão H/E_{rin}^2 para valores de $h_{final}/h_{máx} < 0.85$: (a) Dureza H_c obtida em função de A_c ; (b) Dureza H_{fe} obtida em função de A_{fe} .

Nesta figura observa-se dispersão de resultados em torno das rectas de ajuste, em particular nos casos dos indentadores Vickers, K1 e K2, quando a dureza é calculada com base na área de contorno A_{fe} . Estes resultados estão certamente relacionados com a falta de adequação do refinamento e geometria da malha de elementos finitos para estes indentadores e profundidades de indentação. Este aspecto já foi referido na subsecção anterior, a propósito dos resultados do módulo de elasticidade.

5.3.3. Resultados de β

Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados para os valores do factor de correcção geométrico β , obtidos para os cinco indentadores estudados utilizando os dois métodos atrás descritos. Nesta tabela, β_c é o factor geométrico necessário para corrigir o valor do módulo de elasticidade obtido com base na área de contacto determinada a partir da curva de descarga, A_c , e β_{fe} é o factor geométrico necessário para corrigir o valor do módulo de elasticidade obtido com base na área do contorno definido da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima, A_{fe} . Estes valores de β_c e β_{fe} foram determinados não considerando os resultados em que $h_{final}/h_{máx}$ é superior a 0.85. Evita-se assim a região de sobreavaliação do módulo de elasticidade, para valores de $h_{final}/h_{máx}$ próximos de 1, como já tinha sido efectuado por Antunes *et al.* (2007).

Tabela 5.1. Valores de β em função de R , para os indentadores piramidais. Para comparação, mostram-se também os valores de β obtidos para os indentadores planos.

<i>Indentador piramidal</i>	<i>R</i>	<i>Método I</i>		<i>Método II</i>		<i>Diferença β_c [%]</i>	<i>Diferença β_{fe} [%]</i>	<i>Indentador plano – β</i>
		β_c	β_{fe}	β_c	β_{fe}			
<i>V (Vickers)</i>	1	1.090	0.995	1.085	0.953	0.5	4.2	1.054
<i>K1</i>	2.5	1.165	1.081	1.158	1.013	0.6	6.3	1.124
<i>K2</i>	4.0	1.286	1.215	1.284	1.203	0.1	1.0	1.214
<i>K3</i>	5.5	1.405	1.326	1.411	1.329	0.4	0.3	1.267
<i>K (Knoop)</i>	7.11	1.501	1.427	1.511	1.448	0.6	1.4	1.372

Em geral, os valores de β_{fe} são inferiores aos de β_c . Este resultado está de acordo com resultados anteriores (Antunes et al., 2007), obtidos com o indentador Vickers para materiais com valores de coeficientes de encruamento iguais a zero. Porém, no caso deste indentador, para materiais com valor elevado do coeficiente de encruamento ($n = 0.6$), o valor de β_c pode ser inferior ou superior ao de β_{fe} , dependendo do valor de $h_{final}/h_{máx}$ (Antunes et al., 2007). Os valores de β obtidos segundo os dois métodos (I e II) são idênticos (diferença igual ou inferior a 0.6%), no caso de β_c . Porém, no caso de β_{fe} os valores obtidos pelos dois métodos atingem diferenças relativamente elevadas no caso dos indentadores Vickers (4.2%) e K1 (6.3%). Isto está certamente relacionado com a constatação referida em subsecções anteriores de que a malha de elementos finitos não é aceitável, para os casos dos indentadores Vickers e K1.

Os valores de β obtidos para os indentadores piramidais são, em geral, superiores aos obtidos no caso dos indentadores planos. Mas, à semelhança dos indentadores planos, os valores de β dos indentadores piramidais mostram tendência a aumentar com o aumento de R , ou seja do indentador Vickers para o Knoop. No caso de Vickers, o valor de β_{fe} é mesmo inferior a 1, certamente devido à imprecisão na avaliação da área de contacto.

Aplicando a média dos factores de correcção β_c e β_{fe} obtidos pelo método II, referentes a cada indentador piramidal e voltando a traçar os resultados da Figura 5.4,

observa-se na Figura 5.8, que os valores do módulo de elasticidade normalizado se dispõem em torno de 1 para valores de $h_{final}/h_{máx}$ inferiores a 0.85, especialmente nos casos dos indentadores K2, K3 e Knoop. Isto significa que os valores do módulo de elasticidade são bem estimados pelos referidos β , para estes indentadores.

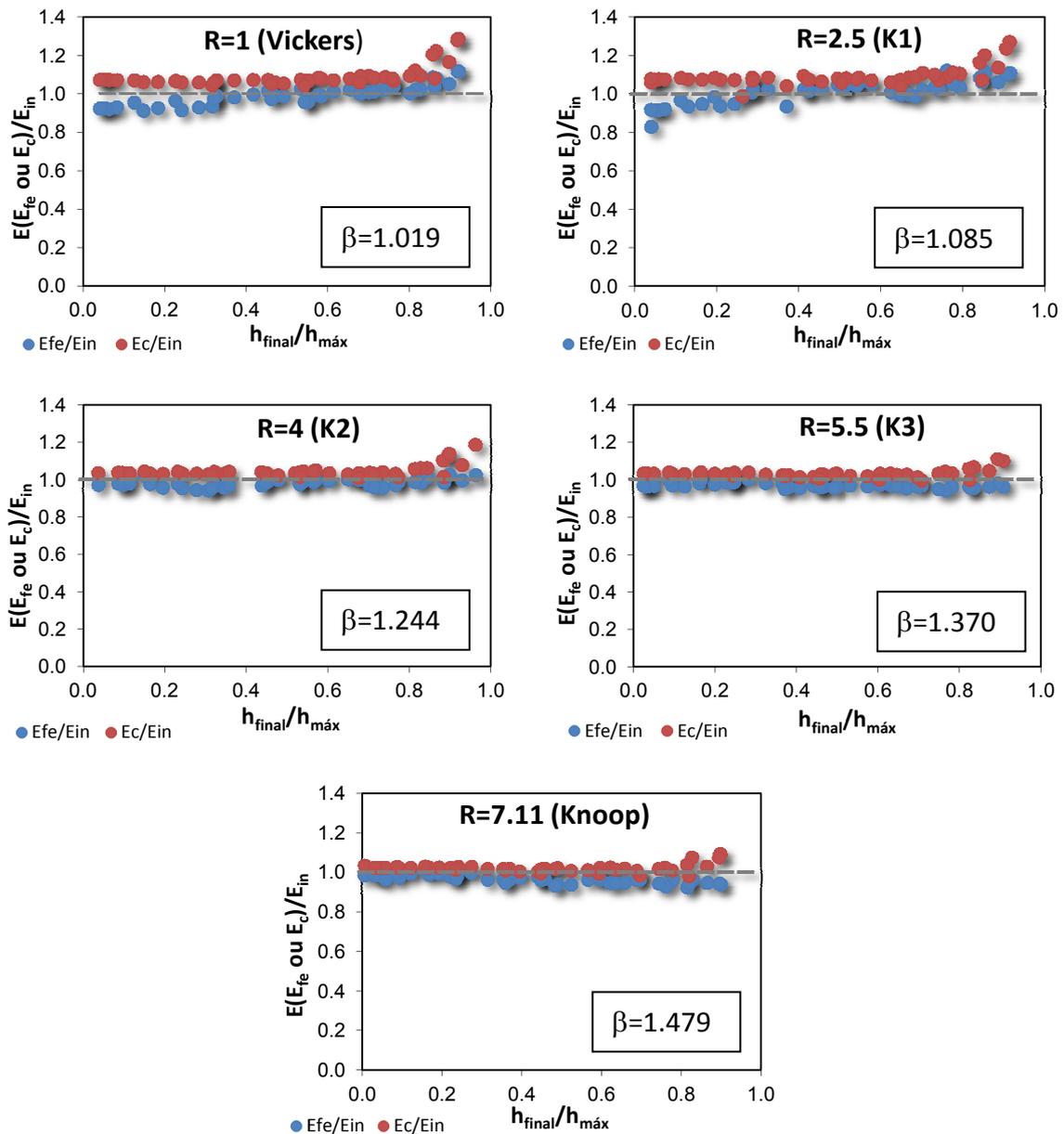


Figura 5.8. Evolução das razões normalizadas E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao estudo de cada um dos cinco indentadores. Em cada figura indica-se o valor do respectivo factor de correcção geométrico utilizado.

Na Figura 5.9 observa-se em detalhe a evolução das razões E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função da razão $h_{final}/h_{máx}$ referente ao indentador Knoop, no qual se foca o presente estudo, utilizando o valor médio (de β_c e β_{fe} obtidos pelo método II) do factor de correcção geométrico $\beta = 1.479$.

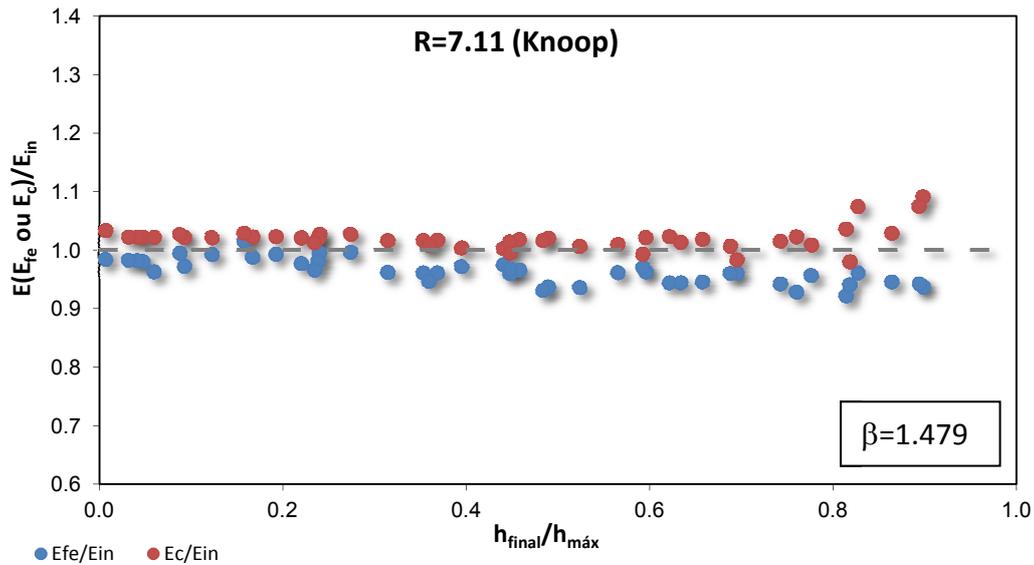


Figura 5.9. Evolução das razões normalizadas E_{fe}/E_{in} e E_c/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao indentador Knoop, corrigido com $\beta=1.479$.

5.3.3.1. Resultados obtidos com o método de Riester

O módulo de elasticidade foi também determinado pelo método proposto por Riester *et al.* (2001), que pressupõe a realização de um processo iterativo a partir dos resultados dos valores da dureza, H_c , e do módulo de elasticidade, E_c , obtidos utilizando a área de indentação avaliada com base na complacência da curva de descarga à carga máxima. Como é proposto por estes autores, o valor do factor de correcção geométrico β utilizado é de 1.034. Neste caso, a razão entre o módulo de elasticidade no final do processo iterativo, E_{CR} , e o módulo de elasticidade de entrada, E_{in} , evolui com a razão $h_{final}/h_{máx}$ conforme ilustrado na Figura 5.10. Sendo o módulo de elasticidade, significativamente sobreavaliado em toda gama de valores da razão $h_{final}/h_{máx}$.

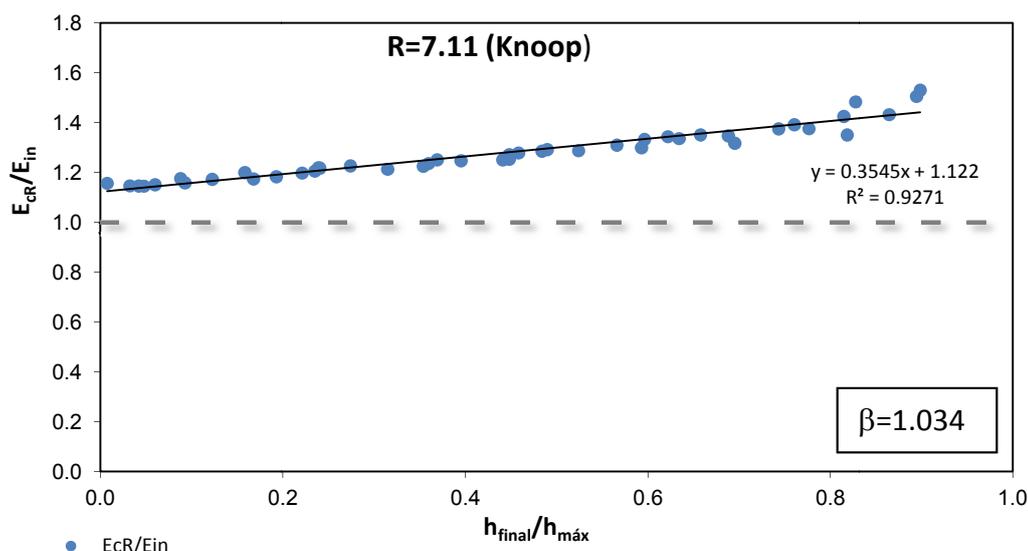


Figura 5.10. Evolução da razão E_{cr}/E_{in} em função de $h_{final}/h_{máx}$ referente ao estudo pelo método de Riester.

Segundo os resultados da Figura 5.10, o método proposto por Riester *et al.* (2001), aplicado aos ensaios efectuados pelo indentador Knoop presentes neste trabalho, solicita a utilização de um factor de correcção (adicional ao factor de correcção geométrico β) para corrigir a evolução apresentada, ou seja esse factor assumiria um valor mínimo para o menor valor da razão $h_{final}/h_{máx}$ e um valor máximo para o maior valor da razão $h_{final}/h_{máx}$ determinados a partir da equação de ajuste da Figura 5.10.

5.3.3.2. Distribuições da tensão e da deformação plástica equivalentes

Para os diferentes materiais estudados neste trabalho, foi analisada a influência da geometria do indentador, para os casos Knoop e Vickers, na distribuição da deformação plástica e da tensão equivalentes. Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são ilustradas essas distribuições, obtidas à carga máxima para três materiais distintos, com valores de $h_{final}/h_{máx}$ relativamente pequenos, intermédios e elevados. Nos casos escolhidos, o coeficiente de encruamento é sempre igual a 0.01, e os valores do módulo de elasticidade e da tensão limite de elasticidade variam.

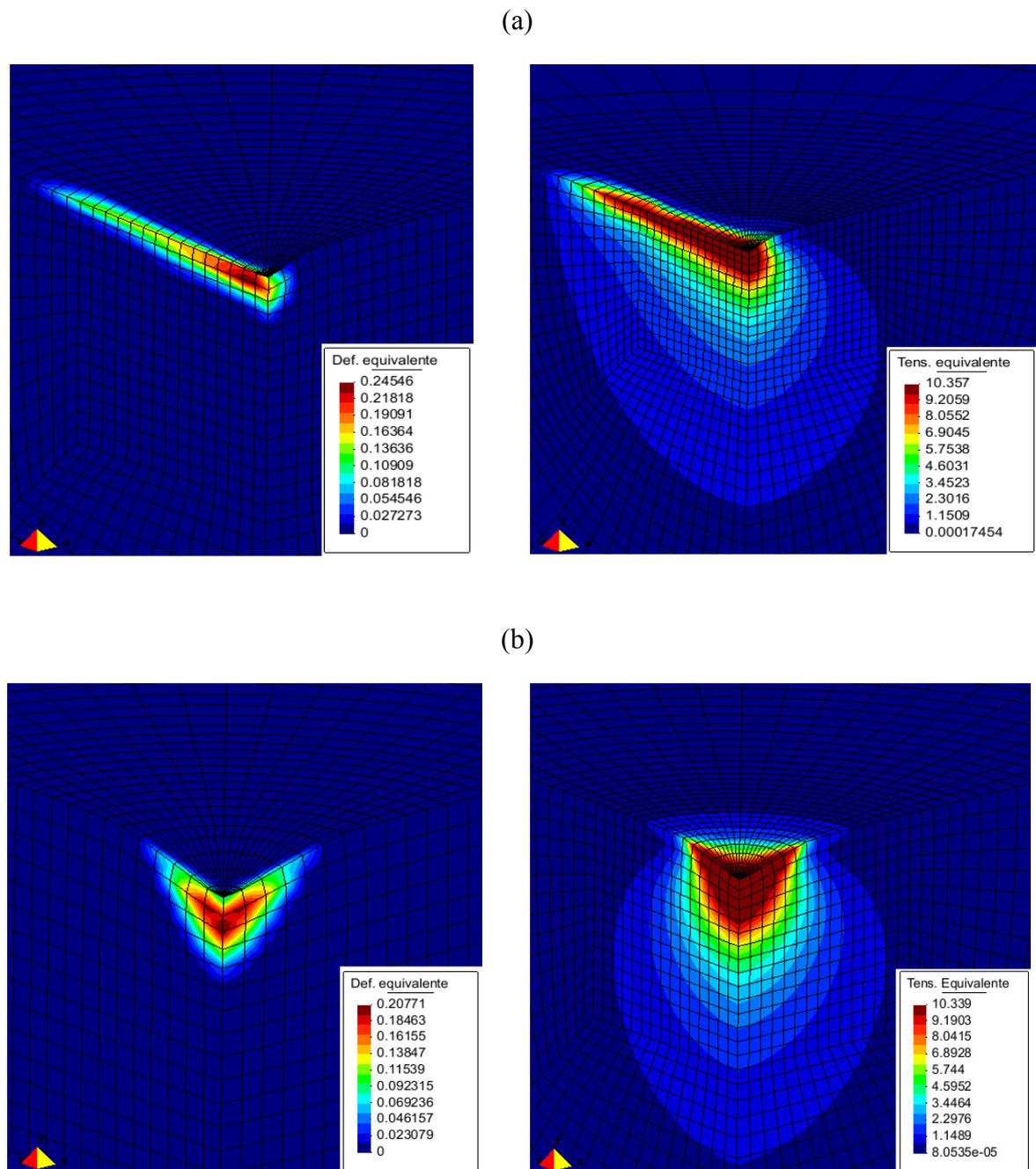


Figura 5.11. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes, obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=70\text{GPa}$, $n=0.01$ e $\sigma_y=10\text{GPa}$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{m\acute{a}x}=0.1926$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{m\acute{a}x}=0.2844$).

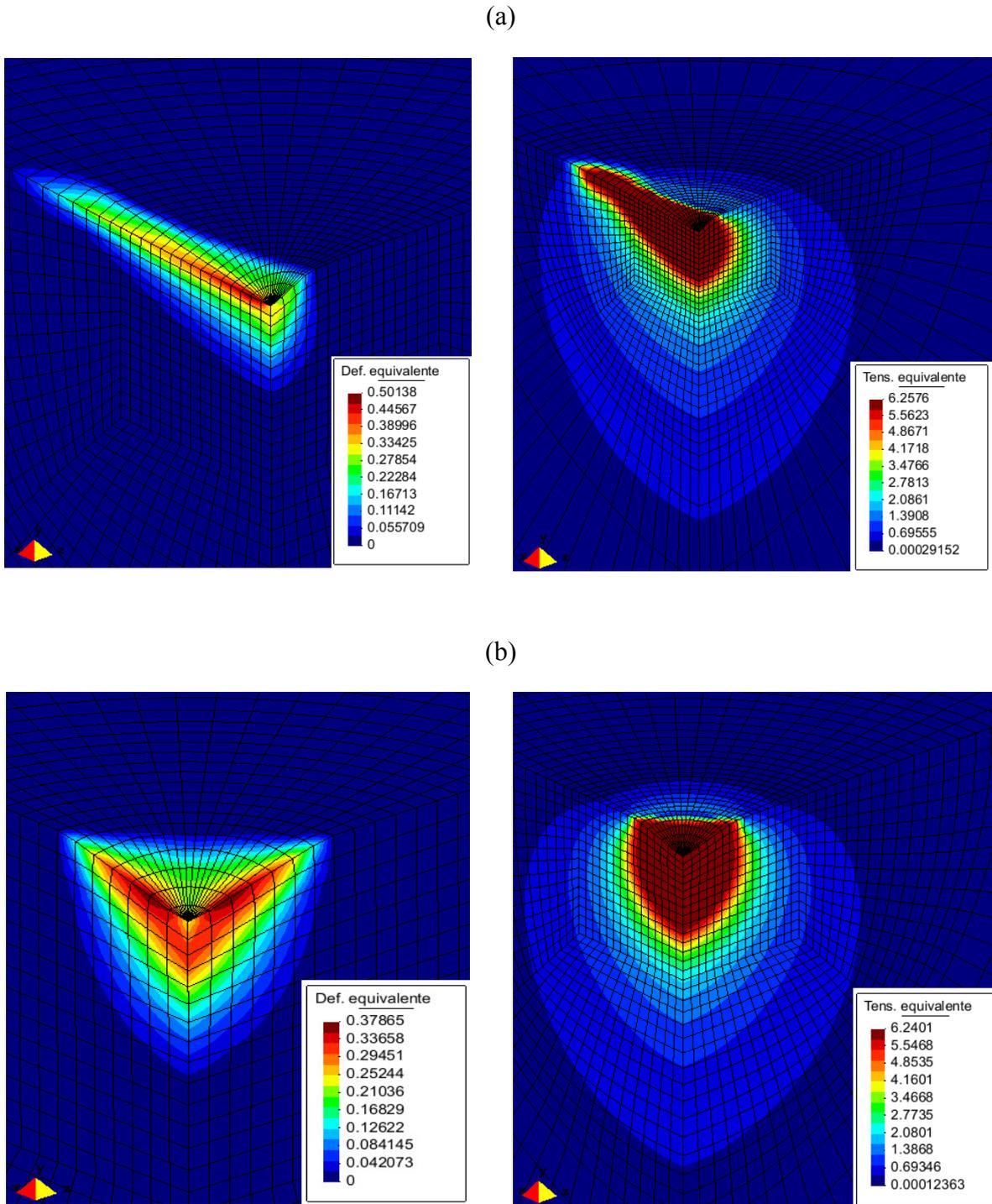
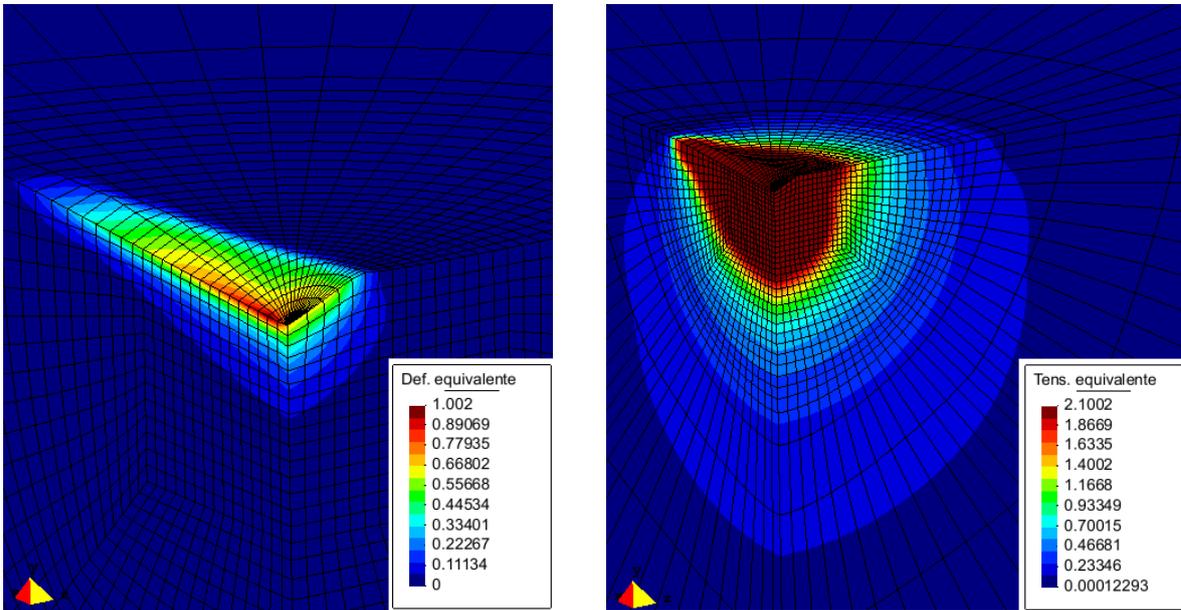


Figura 5.12. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=200\text{GPa}$, $n=0.01$ e $\sigma_y=6\text{GPa}$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{m\acute{a}x}=0.622$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{m\acute{a}x}=0.702$).

(a)



(b)

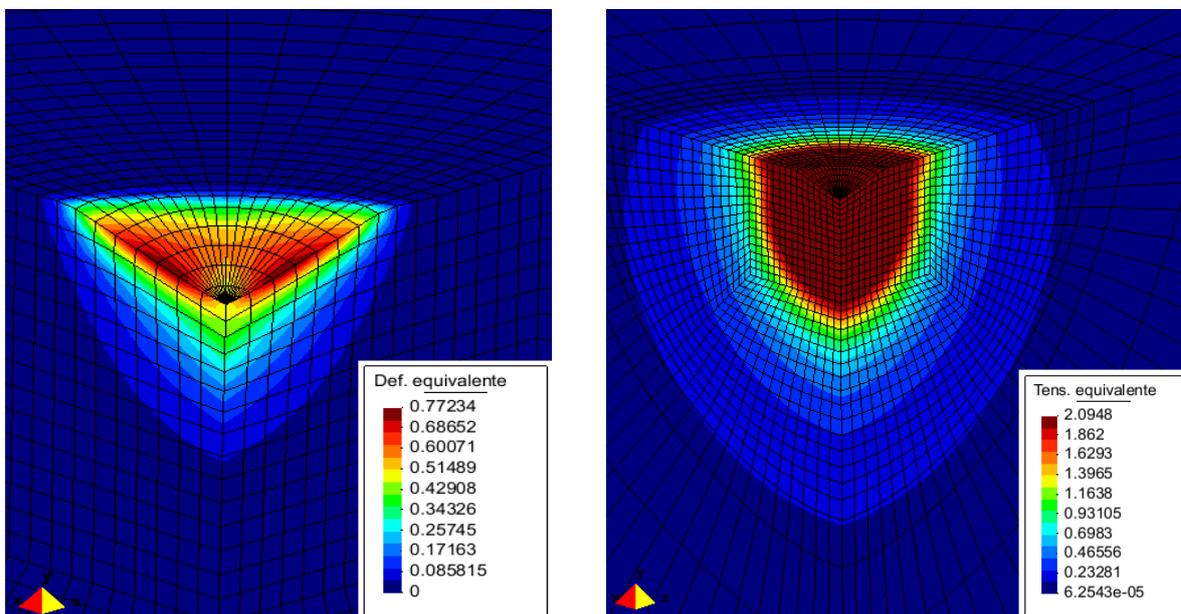


Figura 5.13. Distribuições da deformação plástica e da tensão equivalentes obtidas à carga máxima, relativas ao material com $E=400GPa$, $n=0.01$ e $\sigma_y=2GPa$: (a) Indentador Knoop ($h_{final}/h_{máx}=0.898$); (b) Indentador Vickers ($h_{final}/h_{máx}=0.921$).

Nos três casos ilustrados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, os valores máximos de deformação equivalente, são maiores para o indentador Knoop do que no Vickers, o que está de acordo com o facto de a área de contacto ser mais elevada no primeiro caso (as indentações foram realizadas a valores de profundidade iguais para os dois indentadores e, nestas condições, a área de contacto é maior no Knoop do que no Vickers, como já referido anteriormente). Em ambos os indentadores, os valores máximos de deformação equivalente aumentam com o aumento do valor de $h_{final}/h_{máx}$. As áreas das regiões deformadas também aumentam com o aumento do valor de $h_{final}/h_{máx}$, embora este aumento não seja significativo da Figura 5.12 para a Figura 5.13. A principal diferença entre estas figuras consiste no aumento significativo dos valores máximos de deformação equivalente da primeira para a segunda destas duas figuras. Na Figura 5.13, a que correspondem valores de $h_{final}/h_{máx}$ próximos de 0.9, são visíveis os lábios das indentações Knoop e Vickers.

As distribuições da tensão equivalente também apresentadas nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 permitem visualizar as regiões deformadas elasticamente, isto é apenas em regime elástico e em regime elasto-plástico. Em cada figura, os valores máximos da tensão equivalente são muito próximos, como é natural, uma vez que os materiais não possuem encruamento ($n = 0.01$). É de realçar o facto de que para materiais com o valor da razão $h_{final}/h_{máx}$ relativamente pequena (Figura 5.11), a fronteira da região deformada elasticamente apresentar a forma de pêra, tanto no caso do indentador Vickers como no caso de indentador Knoop; neste último caso, a forma de pêra é mais evidente na direcção da diagonal menor do indentador. Nos outros dois casos, isto é nas Figuras 5.12 e 5.13, a fronteira da região deformada elasticamente é mais arredondada.

6. DUREZA

Como foi referido no início deste trabalho, a dureza representa o quociente entre os valores da carga máxima aplicada e da área de contacto de indentação. Na Figura 6.1 mostra-se a evolução da dureza H_c (avaliada com base na curva de descarga) para os diversos materiais estudados pelo método convencional, em função dos valores da razão $h_{final}/h_{máx}$ para os indentadores Vickers, K2 e Knoop. Nesta figura, os valores de $h_{final}/h_{máx}$ são referentes ao mesmo indentador, o indentador Knoop, para facilitar a comparação dos valores de dureza obtidos com os três indentadores. As evoluções de dureza H_c surgem agrupadas por valor de módulo de elasticidade dos materiais. Dentro de cada grupo, para cada material, isto é, valor de $h_{final}/h_{máx}$, os valores de H_c diminuem com o aumento da razão R entre diagonais do indentador. Ou seja, o valor de H_c é menor para o Knoop ($R = 7.11$) do que para o Vickers ($R = 1$), por exemplo. Além disso, esta diferença acentua-se à medida que a razão $h_{final}/h_{máx}$ diminui. O indentador intermédio, K2, assume valores de H_c mais próximos dos obtidos com o indentador Knoop do que com o Vickers. O facto dos valores de dureza Vickers serem maiores do que os de dureza Knoop está de acordo com resultados de outros autores (Chicot *et al.*, 2007) que apontam no mesmo sentido, sobretudo quando o valor da dureza é elevado. Este aspecto será de novo analisado e discutido mais à frente.

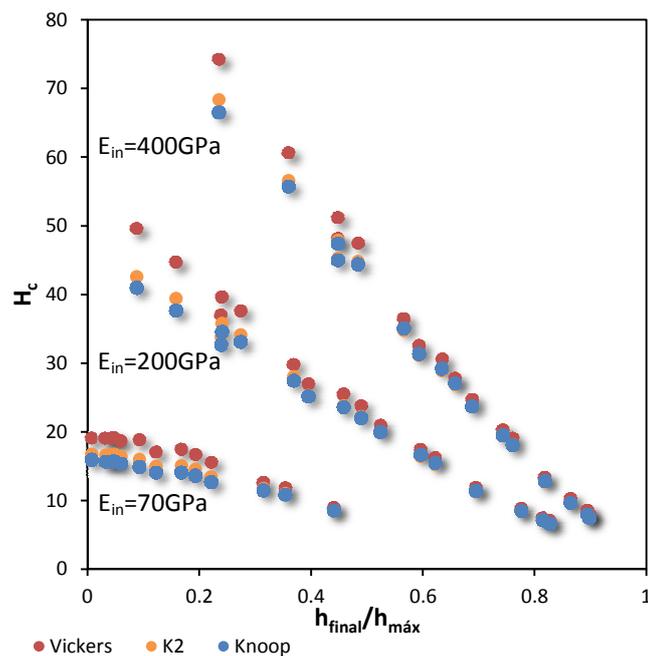


Figura 6.1. Evolução da dureza H_c em função da razão $h_{final}/h_{máx}$ (indentador Knoop), para os indentadores Vickers, K2 e Knoop.

A Figura 6.2 é idêntica à anterior e mostra a evolução da dureza H_{fe} (avaliada com base na área do contorno definido pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima) em função dos valores da razão $h_{final}/h_{máx}$ para os indentadores Vickers, K2 e Knoop. Observa-se uma evolução idêntica à de H_c (Figura 6.1), ainda que os valores de dureza obtidos com os três indentadores sejam mais próximos. Por exemplo, no caso dos materiais com o menor valor do módulo de elasticidade ($E = 70 \text{ GPa}$), os valores de H_{fe} são quase iguais para os três indentadores, qualquer que seja a razão $h_{final}/h_{máx}$. Esta evolução pode estar relacionada com o facto da malha de elementos finitos necessitar de refinamento, no caso dos indentadores com menor valor da razão R (Vickers e K1), embora também possa estar simplesmente relacionada com aspectos da metodologia para a sua determinação.

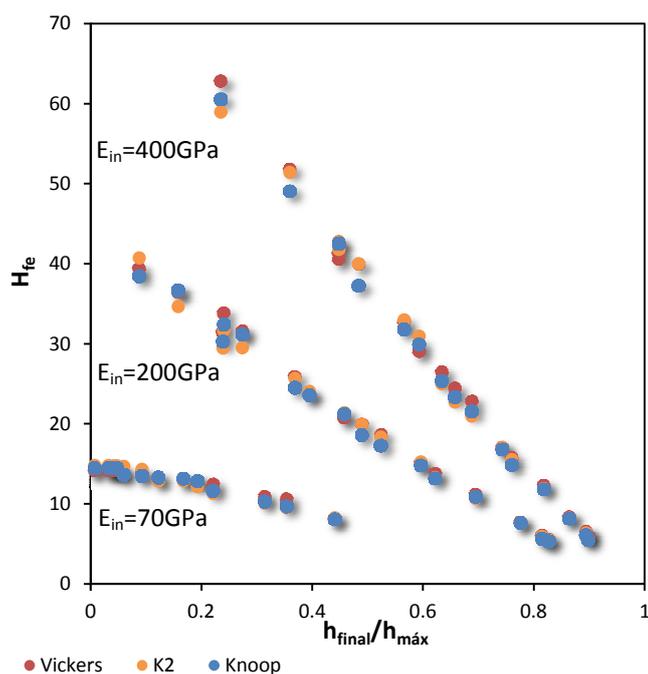


Figura 6.2. Semelhante à Figura 6.1, mas referente à evolução da dureza H_{fe} .

A Figura 6.3 é idêntica às duas figuras anteriores, mas respeitante apenas às durezas Knoop, de modo a permitir comparar os valores de H_c , H_{fe} e H_{cR} , esta última obtida pelo método proposto por Riester *et al.* (2001). Esta figura mostra que, para cada material, o valor de H_c , é sempre maior do que o de H_{fe} , o que indica diferenças na avaliação da área de contacto, segundo os dois métodos. Também os valores de dureza obtidos com o método proposto por Riester *et al.* (2001) são sempre inferiores a H_c , e H_{fe} , com excepção dos valor da razão $h_{final}/h_{máx}$ mais elevados.

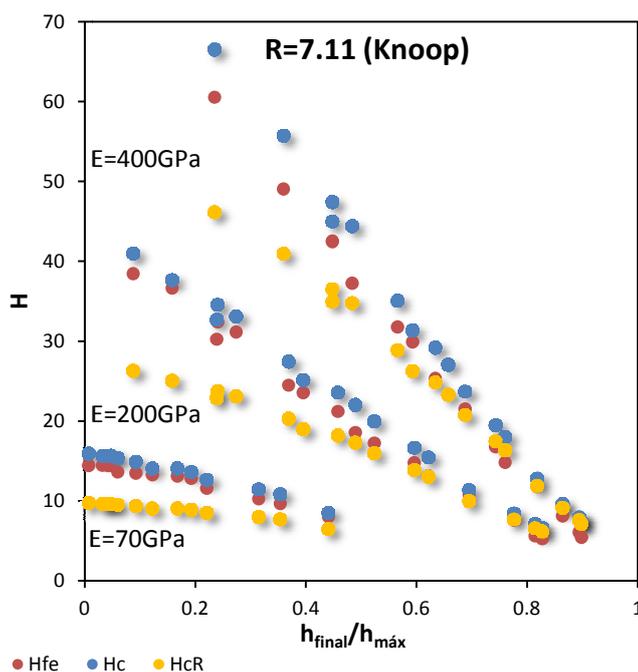


Figura 6.3. Evolução da dureza H_c , H_{fe} , e H_{cR} , em função da razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais com o indentador Knoop.

Nas Figuras 6.4 e 6.5, apresentam-se os resultados de dureza normalizados pelo valor do módulo de elasticidade de entrada nas simulações numéricas, E_{in} , em função da razão $h_{final}/h_{máx}$. Isto é, recuperam-se alguns dos gráficos traçados nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, normalizando os valores de dureza por E_{in} . Ao contrário das figuras precedentes, nas figuras seguintes, os valores de $h_{final}/h_{máx}$ correspondem ao do respectivo indentador. A Figura 6.4 mostra as evoluções de H_{fe}/E_{in} e H_c/E_{in} em função da razão $h_{final}/h_{máx}$, obtidas na simulação numérica do ensaio de dureza Vickers. A Figura 6.5 refere-se aos resultados obtidos com o indentador Knoop, mostrando as evoluções de H_{fe}/E_{in} , H_c/E_{in} e H_{cR}/E_{in} em função da razão $h_{final}/h_{máx}$.

Os resultados do indentador Vickers mostram, para cada material, valores da razão H_c/E_{in} maiores do que os da razão H_{fe}/E_{in} , e tanto maiores quanto menor for o valor de $h_{final}/h_{máx}$. A evolução de H_{fe}/E_{in} é idêntica à já obtida noutros estudos (por exemplo: Antunes, 2006; Bolshakov *et al.*, 1997), nomeadamente no que diz respeito ao valor de H_{fe}/E_{in} quando $h_{final}/h_{máx}$ se aproxima de zero ($H_{fe}/E_{in} \cong 0.201$, no presente trabalho, e $H_{fe}/E_{in} \cong 0.207$, segundo Antunes (2006)). Isto significa que, apesar das

considerações atrás efectuadas sobre a adequação da geometria da malha de elementos finitos aos ensaios com o indentador Vickers, a imprecisão de resultados daí decorrente não é provavelmente tão acentuada quanto os resultados discutidos em secções anteriores pode deixar perceber. Convém ainda mencionar que no caso de Antunes (2006), os resultados referem-se aos valores de dureza, determinada com base na área avaliada pelo contorno dos nós da malha de elementos finitos, o que invalida a comparação com o caso presente para a evolução de H_c/E_{in} .

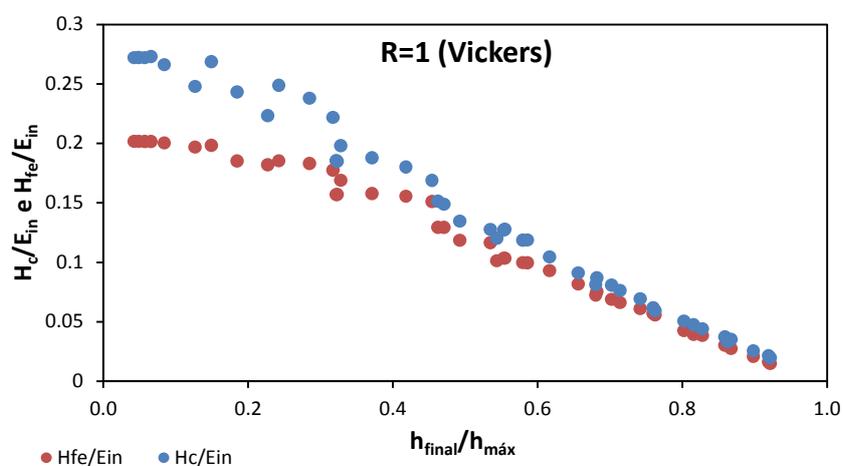


Figura 6.4. Evolução de H_{fe}/E_{in} e H_c/E_{in} com a razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais com o indentador Vickers.

Os resultados do indentador Knoop são mais próximos entre si do que os do indentador Vickers, quando se comparam as evoluções de H_c/E_{in} e H_{fe}/E_{in} , sendo a razão H_c/E_{in} ligeiramente superior à razão H_{fe}/E_{in} , particularmente para pequenos valores de $h_{final}/h_{máx}$. A evolução de H_{fe}/E_{in} é idêntica à anteriormente obtida por Giannakopoulos e Zisis (2011), nomeadamente no que diz respeito ao valor de H_{fe}/E_{in} quando $h_{final}/h_{máx}$ se aproxima de zero ($H_{fe}/E_{in} \cong 0.207$, no presente trabalho, e $H_{fe}/E_{in} \cong 0.202$, correspondente ao valor de $H_{fe}/E_{rin} = 0.184$, para o coeficiente de Poisson $\nu = 0.30$, segundo Giannakopoulos e Zisis (2011)). Porém, estes autores não esclarecem convenientemente como determinam a área de contacto.

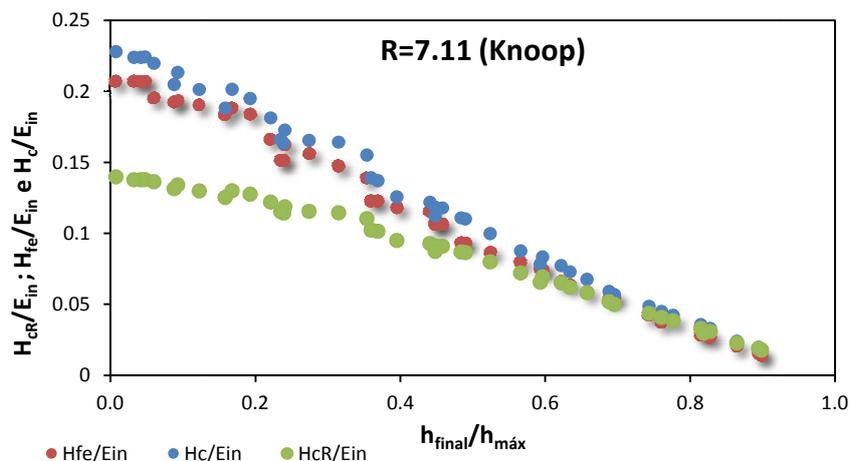


Figura 6.5. Evolução de H_{fe}/E_{in} , H_c/E_{in} e H_{CR}/E_{in} com a razão $h_{final}/h_{máx}$, obtida na simulação numérica dos 48 materiais, com o indentador Knoop.

Os resultados da Figura 6.5 mostram também que os valores de dureza obtidos pelo método proposto por Riester *et al.* (2001) são subavaliados, tanto mais quanto a razão $h_{final}/h_{máx}$ se aproxima de zero. De facto, o valor máximo de H_{CR}/E_{in} não ultrapassa 0.14, o que o coloca muito distante do valor da literatura acima referido (Giannakopoulos e Zisis, 2011), ou seja é cerca de 31% inferior.

Na Figura 6.6 são representadas as evoluções da dureza Knoop (H_c agora designada por $H_{c-Knoop}$ e H_{fe} , agora designada por $H_{fe-Knoop}$) em função dos respectivos valores da dureza Vickers (H_c , agora designada por $H_{c-Vickers}$ e H_{fe} , agora designada por $H_{fe-Vickers}$). Embora não se afastando muito da linearidade, estas evoluções são melhor descritas por um polinómio do 2º grau, indicando que o valor de dureza Vickers é sempre maior do que o respectivo valor de dureza Knoop. O afastamento entre estes valores de dureza aumenta quando a dureza do material aumenta. Os polinómios de 2º grau que traduzem as relações entre a dureza knoop e Vickers são (ver também na Figura 6.6):

$$H_{c-Knoop} = 0.9091H_{c-Vickers} - 0.0001(H_{c-Vickers})^2, \quad (6.1)$$

$$H_{fe-Knoop} = 0.9889H_{fe-Vickers} - 0.0003(H_{fe-Vickers})^2, \quad (6.2)$$

A relação entre dureza Knoop e Vickers já anteriormente foi traduzida por este tipo de polinómio (Chicot *et al.*, 2007), embora com parâmetros de ajuste diferente:

$$H_{Knoop} = 1.0223H_{Vickers} - 0.0114(H_{Vickers})^2, \quad (6.3)$$

Esta equação foi deduzida com base em valores de dureza Knoop e Vickers obtidas a partir da medição directa, por meios ópticos, da diagonal maior da indentação Knoop e das diagonais da indentação Vickers. De acordo com esta equação, o valor a dureza Vickers só é maior do que o da Knoop para valores superiores a cerca de 8 GPa. Para valores inferiores, a dureza Knoop é ligeiramente superior à Vickers. Este resultado foi explicado pelo facto do comprimento da diagonal menor da indentação Knoop ser inferior ao que deveria ter considerando a geometria do indentador (valor ideal: $m/L = 0.1406$, ou seja $L/m = 1/7.11$).

A relação entre durezas Knoop e Vickers deduzidas no presente trabalho, traduzidas pelas equações (6.1) e (6.2), que se aproximam mais da linearidade, é claramente diferente das traduzidas pela equação (6.3) (ver também Figura 6.6). Para testar se, no estudo presente, a relação entre diagonais também afastava do valor ideal, a Figura 6.7 ilustra a evolução da razão R (L/m) em função de $h_{final}/h_{máx}$ à carga máxima. Nesta figura, a razão $L/m_{interior}$ é avaliada pelo contorno obtido pelos nós em contacto com o indentador (últimos em contacto com o indentador) à carga máxima, $L/m_{exterior}$ é relativo ao contorno obtido pelos nós imediatamente a seguir aos últimos com contacto com o indentador e $L/m_{médio}$ é a média de $L/m_{interior}$ e $L/m_{exterior}$. Apesar da pouca precisão na avaliação do comprimento das diagonais, por certo relacionado com a geometria da malha de elementos finitos, é possível concluir que a razão entre diagonais, L/m , à carga máxima, depende de $h_{final}/h_{máx}$, com o valor de L/m maior de 7.11 para valores pequenos de $h_{final}/h_{máx}$. Nestas condições, é importante esclarecer futuramente porque razões o comportamento descrito pelas equações (6.1) e (6.2) se afastam do descrito na literatura, como por exemplo o traduzido pela equação (6.3) (Chicot *et al.*, 2007).

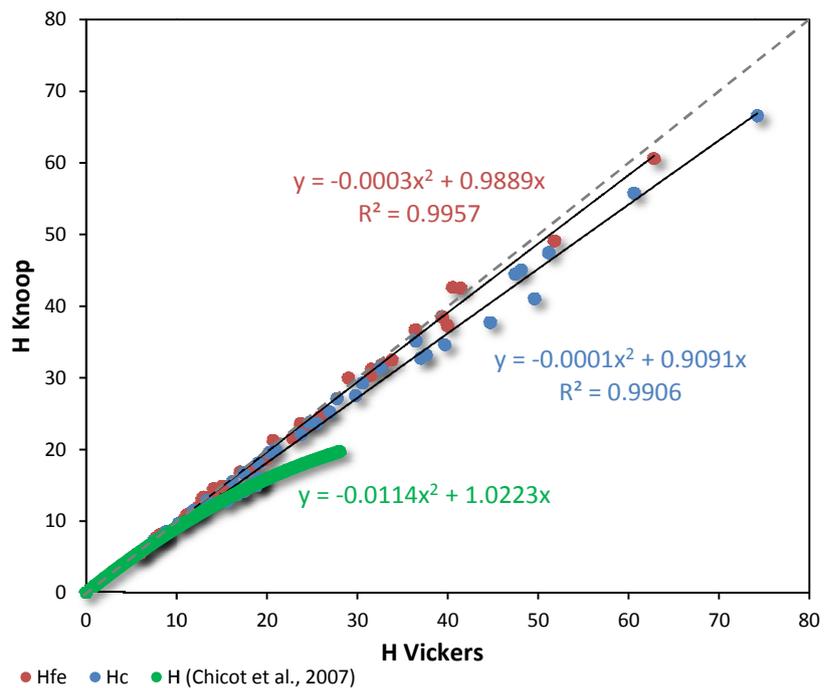


Figura 6.6. Evoluções da dureza Knoop em função da dureza Vickers, para os casos de H_c e H_{fe} ; a equação (6.3) está representada a verde.

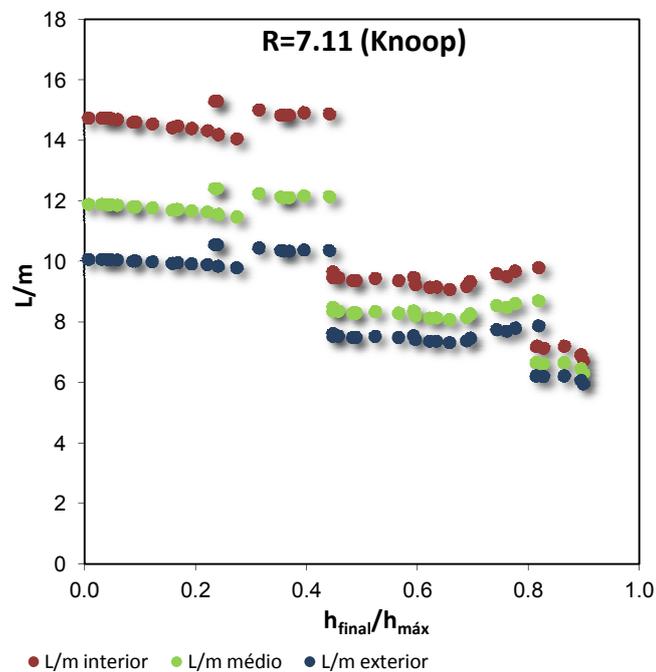


Figura 6.7. Evolução da razão L/m , à carga máxima, em função de $h_{final}/h_{máx}$.

Neste contexto, convém ainda analisar a relação entre a dureza Vickers e a dureza Knoop determinada pelo método proposto por Riester *et al.* (2001). Na Figura 6.8 mostra-se esta última dureza em função da dureza Vickers, H_c . É possível distinguir três andamentos diferentes, agrupados pelo valor do módulo de elasticidade. Os diferentes comportamentos, traduzidos pelas equações de ajuste indicadas na figura, são compreensíveis à luz do acima referido, isto é, relativamente ao facto da relação entre diagonais do indentador Knoop se afastar do valor que deveria ter idealmente ($L/m = 7.11$), considerando a geometria deste indentador. Porém, não existem resultados anteriores que atestem este tipo de comportamento, dependente do módulo de elasticidade, pelo menos que seja de nosso conhecimento.

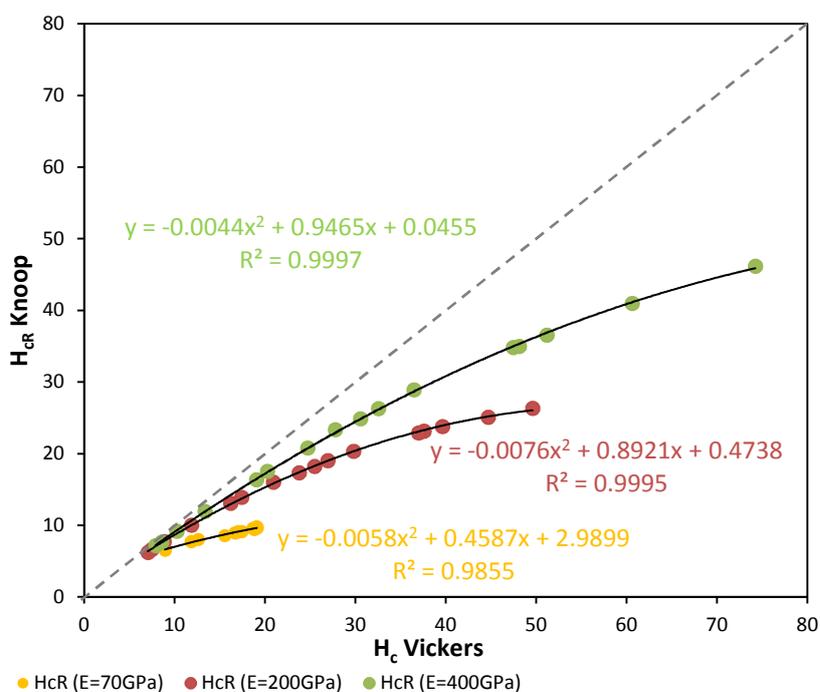


Figura 6.8. Evolução da dureza Knoop obtida pelo método proposto por Riester *et al.* (2001), H_{cR} , em função da Vickers H_c .

7. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu abordar vários aspectos relacionados com ensaios dinâmicos de dureza. Utilizou cinco indentadores, cuja relação entre diagonais, R , se situa entre a do Vickers ($R = 1$) e Knoop ($R = 7.11$), com particular relevo para estes dois indentadores. Recorreu-se à simulação numérica de materiais fictícios com propriedades mecânicas que permitiram explorar numa vasta gama de valores da razão entre a dureza e o módulo de elasticidade.

Indicam-se a seguir as principais conclusões:

• Curvas de indentação

Nos diversos materiais testados com os cinco indentadores, o parâmetro n da lei de potência ajustada às curvas de carga tem valores ligeiramente inferiores a 2, crescendo ainda que ligeiramente, do Vickers ($n = 1.94$) para o Knoop ($n = 1.96$). No caso do indentador Vickers, o valor do parâmetro n esperado é 2, pois não foram considerados efeitos de tamanho de indentação.

Fazendo a equivalência entre áreas, isto é, de modo a que à mesma profundidade de indentação corresponda a mesma área de secção transversal da pirâmide, as curvas de carga dos diversos indentadores, para cada material, aproximam-se, podendo mesmo quase sobrepor-se no caso de materiais com valores da razão entre a dureza e o módulo de elasticidade relativamente pequenos (valores de $h_{final}/h_{máx}$ próximos de 0.9). Para valores elevados da razão entre a dureza e o módulo de elasticidade (valores de $h_{final}/h_{máx}$ próximos de 0.2), o nível das curvas de carga diminui do Vickers para o Knoop.

• Factor de correcção geométrico β

Os valores obtidos para o factor geométrico β , para correcção do valor do módulo de elasticidade, obtidos com os indentadores piramidais e planos aumentam de forma linear com o aumento da razão entre diagonais, R . No caso dos indentadores com a razão entre diagonais elevada, como o Knoop ($R = 7.11$) e o indentador com $R = 5.5$, os

valores de β dos indentadores piramidais são significativamente mais elevados do que os dos indentadores planos correspondentes. No caso do Knoop, os valores de β são iguais a 1.372, para o indentador plano e situam-se entre 1.427 e 1.511, para o indentador piramidal, dependendo do método de análise dos resultados e do procedimento de cálculo da área de contacto. Os valores médios (dos obtidos pelos dois métodos e por cada um dos processos de cálculo da área de contacto) obtidos para os indentadores piramidais, Vickers e Knoop, foram $\beta = 1.031$ e $\beta = 1.472$, respectivamente.

• Dureza

Para cada material, o valor de dureza obtido no ensaio com o indentador Knoop é, geralmente, menor do que o obtidos com o indentador Vickers, ou seja a dureza de um dado material diminui, ainda que ligeiramente com o aumento da razão R . Porém, esta diferença entre valores de dureza Knoop e Vickers não é tão acentuada como indicado na literatura, para os valores de dureza mais elevados. Para todos os indentadores, os valores de dureza H_c são mais elevados do que os da dureza H_{fe} .

• Método de “Riester”

A aplicação do método proposto por Riester *et al.* (2001), para o cálculo da dureza e do módulo de elasticidade utilizando o indentador Knoop, mostrou resultados pouco aceitáveis quando comparado aos obtidos pelo método convencionalmente utilizado para analisar os resultados do indentador Vickers. Por exemplo, quando se comparam os resultados de dureza Knoop obtidos por este método com os resultados de dureza Vickers dos mesmos materiais, a relação entre as duas durezas depende do módulo de elasticidade do material. Este resultado, não foi reportado por outros autores. Também, o módulo de elasticidade utilizado como entrada nas simulações numéricas não é recuperado quando se aplica o método de Riester *et al.* (2001), sendo a diferença entre os dois valores significativa. De facto, os módulos de elasticidade determinados com este método vêm significativamente sobreavaliados em toda gama de valores da razão $h_{final}/h_{máx}$.

• Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos utilizada neste trabalho (igual para todos os indentadores) levanta, nalguns casos, dúvidas quanto à precisão de alguns resultados deste

trabalho, nomeadamente, referentes ao indentador Vickers e K1. A área avaliada pelo contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com estes indentadores à carga máxima, A_{fe} , não apresenta o mesmo rigor, quando comparada com a obtida com os indentadores K2, K3 e Knoop. Deste modo, os resultados obtidos, com estes indentadores, para o módulo de elasticidade e a dureza, não deverão possuir o rigor necessário, o que dificulta a comparação, com os obtidos com os outros indentadores. Para contornar este problema, é oportuno que em futuros trabalhos se optimize a malha de elementos finitos, nomeadamente se proceda ao refinamento dos elementos na zona da indentação. Também, o facto de os ensaios terem sido realizados à mesma profundidade de indentação, tornou mais imprecisos os resultados de medição de área, no caso dos indentadores Vickers e K1, pois a área de contacto é relativamente pequena (comparativamente com as dos restantes indentadores aqui estudados). Assim, a realização de ensaios com estes indentadores (Vickers e K1) até à mesma carga que a utilizada com o indentador Knoop (a que correspondem áreas de contacto próximas) conduzirá também a uma diminuição do erro obtido no cálculo da área avaliada através do contorno formado pelos nós da malha de elementos finitos em contacto com o indentador à carga máxima.

Em suma, este trabalho introdutório, respeitante ao indentador Knoop, permitiu propor e validar a utilização do método convencional (“*Oliver and Pharr*”) em ensaios de dureza realizados com este indentador, sendo os resultados suficientemente precisos, nomeadamente quando comparados com os obtidos pelo método proposto por Rieister *et al.* (2001). A determinação do módulo de elasticidade pela aplicação do método convencional aos indentadores Knoop, como aqui proposto, necessita da utilização de um valor do factor de correcção geométrico relativamente elevado (β acima de 1.4), cujo valor foi legitimado pelos resultados do factor β obtido em ensaios com indentadores de fundo plano ($\beta = 1.372$). Finalmente, deve ser referido que a importância deste trabalho sobre a metodologia de análise dos resultados de ensaios dinâmicos de dureza Knoop, deve-se ao facto deste indentador poder ser utilizado com vantagem em situações nas quais os restantes indentadores são menos adequados como, por exemplo, materiais duros e filmes finos. Assim, é importante divulgar este ensaio, pouco utilizado até agora para estes fins, e simultaneamente oferecer uma metodologia de análise conveniente para utilização em ensaios dinâmicos de dureza.

Finalmente, no que diz respeito ao prosseguimento imediato deste trabalho, após resolução das questões relacionadas com a malha de elementos finitos atrás mencionadas, é importante a confrontação mais aprofundada com resultados experimentais e numéricos, de outros autores. Embora estes resultados sejam parcos na literatura, para o ensaio dinâmico de dureza com o indentador Knoop, alguns dos trabalhos mencionados na bibliografia desta dissertação poderão permitir uma comparação mais minuciosa do que a que foi aqui iniciada, por exemplo, no que diz respeito à confrontação dos resultados de dureza Knoop e Vickers.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, J.M. (2006), “A Indentação de Materiais Maciços e Filmes Finos: Modelação e Análise Inversa”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Antunes, J.M., Menezes, L.F. e Fernandes, J.V., (2006), “Three-dimensional numerical simulation of Vickers indentation tests”, *International Journal of Solids and Structures* 43, 784–806.
- Antunes, J.M., Cavaleiro, A., Menezes, L.F., Simões, M.I. e Fernandes, J.V., (2002), “Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter”, *Surface and Coatings Technology* 149, 27-35.
- Antunes, J.M., Menezes, L.F. e Fernandes, J.V., (2007), “Influence of Vickers tip imperfection on depth sensing indentation tests”, *International Journal of Solids and Structures* 44, 2732–2747.
- Antunes, J.M., Menezes, L.F., Fernandes, J.V. e Chaparro, B.M., (2007), “A New Approach for Reverse Analyses in Depth-sensing Indentation Using Numerical Simulation”, *Acta Materialia*, 55, 69-81.
- Bücle, H., (1973), Em: “The science of hardness testing and its research applications”, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 453-494.
- Bolshakov, A., Oliver, W.C., Pharr, G.M., (1997), “Finite element studies of the influence of pile-up on analysis of nanoindentation data”, *Proceedings of Materials Research Society Symposium*, 436, 141-146.
- Chicot, D., Mercier, D., Roudet, F., Silva, K., Staia, M.H. e Lesage, J., (2007), “Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurements on various soft materials and hard ceramics”, *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 1905-1911.
- Giannakopoulos, A.E., (2006), “Elastic and viscoelastic indentation of flat surfaces by pyramid indenters”, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 54, 1305-1332
- Giannakopoulos, A.E. e Zisis, Th., (2011), “Analysis of Knoop indentation”, *International Journal of Solids and Structures*, 48, 175-190.
- Güder, H.S., Şahin, E., Şahin, O., Göçmez, H., Duran, C. e Ali Çetinkara, H., (2011), “Vickers and Knoop Indentation Microhardness Study of b-SiAlON Ceramic”, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, VOL.120, 6, 1026-1033.
- ISO 14577, (2002). *Metallic materials, “Instrumented indentation tests for hardness and materials parameters”*. ISO Central Secretariat, Genebra, Suíça.
- Kick, F., (1885), “Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen”, Felix-Verlag, Leipzig.

- Knoop, F., Peters, C.G. e Emerson W.B., (1939), “Sensitive pyramidal-diamond toll for indentation measurements”, U.S. National Bureau of Standards, Research Paper No RP1220; the Bureau’s Journal of Research, 23, July, 39-61.
- Marshall, D.B., Noma, T. e Evans, A.G., (1982), “A simple method for determining elastic modulus to hardness ratios using Knoop indentation”, Int. J. Am. Ceram. Soc. A65, C175-C176.
- Meyer, E., (1908), V.D.I. Zeitschrift, Volume 52.
- Oliver, W.C. e Pharr, G.M., (1992), “An improved technique for determining hardness and elastic-modulus using load and displacement sensing indentation experiments”, Journal of Materials Research, 7, 1564-1583.
- Riester, L., Bell, T.J. e Fischer-Cripps, A.C., (2001), “Analysis of depth-sensing indentation tests with a Knoop indenter”, Oak Ridge Laboratory, MS 6069, P.O. Box 2008, Oak Ridge, Tennessee 37831 e CSIRO Division of Telecommunications and Industrial Physics, P.O. Box 218, Lindfield, NSW 2070, Australia.
- Sakharova, N.A., Fernandes, J.V., Antunes, J.M. e Oliveira, M.C., (2009), “Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests: A three-dimensional numerical simulation study”, International Journal of Solids and Structures 46, 1095–1104.
- Simões, M.I., Martins, A.X., Antunes, J.M., Oliveira, M.C., Sakharova, N.A. e Fernandes, J.V., (2011), “Comparative numerical simulation study of Knoop and Vickers indentation tests”, Actas CMNE 2011, Congresso de Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia, Ed. A. Tadeu, I.N. Figueiredo, L.F. Menezes, P.A. Mendes, A. Rodríguez-Ferran, I. Arias, J.M. Blanco, p. 252, Integral version of the article is in an electronic format, 2011.
- Sneddon, I.N., (1965), “The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile”, International Journal of Engineering and Science, 3, 47-57.
- Swift, H.W., (1952), “Plastic instability under plane stress”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1, 1, 1-18.

Erro! A origem da referência não foi encontrada.
