



## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO EXPERIMENTAL A UTILIZAR NO ENSAIO *BULGE* PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS EM CHAPA METÁLICA

ABEL D. SANTOS<sup>1,2</sup>, F. GOMES ALMEIDA<sup>1,3</sup>, JOAQUIM MENDES<sup>1,3</sup>, PEDRO  
TEIXEIRA<sup>3</sup>, J. BESSA PACHECO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Porto  
DEMec, Faculdade de Engenharia  
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup>Universidade do Porto  
INEGI, Faculdade de Engenharia  
Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup>Universidade do Porto  
IDMEC, Faculdade de Engenharia  
Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal

(Recibido 10 de diciembre de 2011, para publicación 26 de abril de 2012)

**Resumo** – A obtenção com sucesso de componentes nas operações de conformação plástica está fortemente dependente do material utilizado sendo a sua caracterização de grande importância para a previsão do seu comportamento. Uma das caracterizações fundamentais do material é a curva de cedência plástica que relaciona a tensão com a extensão e é usualmente obtida pelo ensaio de tração. No entanto a amplitude de deformação limitada obtida neste ensaio tem feito com que o ensaio *bulge* mereça atualmente um interesse crescente, em virtude dos seus níveis de deformação superiores. Esta necessidade é evidente quando se realiza a simulação numérica de processos de conformação plástica, dado que o comportamento do material pode ser descrito com maior rigor e com menor extrapolação dos dados obtidos experimentalmente. Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento e a incorporação de um sistema de medição mecânico numa máquina hidráulica *bulge*, que permite uma obtenção contínua da pressão, da curvatura da chapa e da extensão no plano da chapa. Com estes dados é possível a obtenção da evolução da curva tensão-extensão do material até elevados níveis de extensão plástica. São apresentados resultados de simulações numéricas por elementos finitos para a análise de sensibilidades de alguns dos parâmetros influentes nas medições, os quais têm um peso importante no rigor dos dados obtidos de comportamento do material. São ainda apresentados resultados experimentais correspondentes a diferentes materiais, cujos ensaios são obtidos com o sistema experimental desenvolvido.

**Palavras-chave** – Ensaio *bulge*, curva tensão/extensão, ensaios experimentais de caracterização de material.

### 1. INTRODUÇÃO

Na obtenção da curva tensão/extensão a partir do ensaio *bulge* diferentes métodos podem ser utilizados para essa caracterização. No entanto, existe um conceito comum a todos eles: a necessidade de medir continuamente a pressão do ensaio, a espessura no pólo da chapa ensaiada e com esses dados fazer aplicação da teoria da membrana para obter a tensão e a extensão. Relativamente às medições e ao seu modo de obtenção, atualmente existem e são usados métodos óticos e sistemas de processamento de imagem [1-3], mas os métodos mecânicos clássicos [4,5], como o que aqui se apresenta, são ainda uma boa alternativa e apresentam vantagens evidentes.

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de medição mecânico implementado numa máquina hidráulica *bulge*, assim como um estudo numérico sobre as variáveis a usar para a determinação com mais rigor da curva desejada tensão/extensão de comportamento do material que pretendemos ensaiar.

### 1.1. Variáveis e equações de base

Para a obtenção da deformação e tensão através dos dados experimentais do ensaio *bulge* é necessária a análise de valores que sejam mensuráveis e por isso a teoria da membrana é usualmente considerada nestes ensaios para esta determinação. Em virtude da baixa relação espessura da chapa/diâmetro do *bulge*, as tensões de flexão são ignoradas nesta teoria e assim, dado que  $\sigma_3$  é zero, a relação estabelecida entre tensões, espessura da chapa e pressão é:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \quad (1)$$

em que  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais no plano da chapa,  $R_1$  e  $R_2$  são os correspondentes raios da superfície curva,  $p$  é a pressão hidráulica e  $t$  é a espessura da chapa. Considerando o caso axi-simétrico, as tensões principais podem ser consideradas equivalentes e iguais à chamada tensão de membrana ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ ). O mesmo se pode considerar em relação ao raio de curvatura ( $R_1 = R_2 = R_b$ ) e assim ter-se-á para a equação (1):

$$\sigma = \frac{p \cdot R_b}{2 \cdot t} \quad (2)$$

Nesta equação é necessário obter o raio de curvatura  $R_b$  e a espessura no pólo  $t$  durante o ensaio. O raio de curvatura é obtido por uma construção geométrica simples, dada por:

$$R_b = \frac{(D_{cv}/2)^2 + h^2}{2 \cdot h} \quad (3)$$

em que  $D_{cv}$  é o diâmetro usado para medição da curvatura e  $h$  a altura do pólo. Quanto à espessura, ela pode ser obtida sabendo a espessura inicial  $t_0$  e a extensão em espessura através da expressão:

$$t = t_0 \exp(-\varepsilon_t) \quad (4)$$

A extensão em espessura é calculada tendo em consideração a incompressibilidade do material. Assim:

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (5)$$

Tal como as tensões e raios de curvatura as deformações no plano da chapa consideram-se iguais e por isso a extensão em espessura vem:

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = -2\varepsilon \quad (6)$$

sendo  $\varepsilon$  a extensão de membrana. A determinação deste valor é conseguida pela medição da expansão de um círculo com diâmetro inicial  $D_{st0}$ . Esta medição é feita com um dispositivo assente na chapa e solidária com ela durante a deformação. Durante o ensaio este círculo expande-se, sem variação de volume, para um círculo de diâmetro  $D_{st}$  e assim a extensão é calculada por:

$$\varepsilon_t = 2 \log_e \left( \frac{D_{st}}{D_{st0}} \right) \quad (7)$$

Na Fig. 1 apresenta-se de forma global o fluxo de procedimentos para a determinação da curva tensão/extensão de um material a ensaiar.

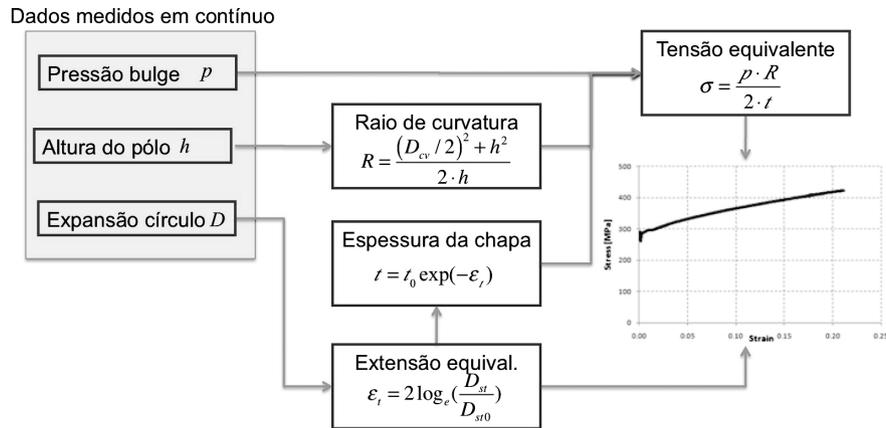
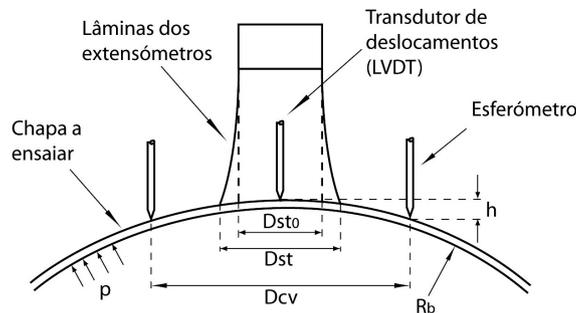


Fig. 1. Variáveis e fluxo de dados para a determinação da curva de comportamento do material.

Fig. 2. Configuração do aparelho para obtenção da curva tensão/extensão de chapas metálicas no ensaio *bulge* e diâmetros usados para medição da extensão ( $D_{st}$ ) e curvatura ( $D_{cv}$ ).

## 2. ESTUDO NUMÉRICO PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DIMENSIONAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A modelação numérica do ensaio teve como objetivos principais o estudo da evolução de variáveis fundamentais durante o ensaio e uma análise de sensibilidades de resultados com os parâmetros de leitura usados pelo sistema mecânico utilizado. No primeiro estudo incluem-se variáveis como a espessura e a curvatura e respetivas evoluções, enquanto a análise de sensibilidades aborda a influência de uso de diferentes diâmetros  $D_{st}$  e  $D_{cv}$  (ver Fig. 2) para obtenção de resultados da curva tensão/extensão e o seu peso no rigor dos dados obtidos de comportamento do material. Os resultados obtidos têm por base a leitura de valores na linha intermédia da espessura, um aspecto importante na determinação do raio de curvatura, em simultâneo com a consideração da variação da espessura do pólo para a periferia [6, 7].

O ensaio é modelado numericamente fazendo uso do “software” Abaqus/Explicit, usando 3046 elementos 3D sólidos de 8 nós com integração reduzida (C3D8R) e 84 elementos sólidos de 6 nós (C3D6), formando duas camadas de elementos segundo a espessura. Em virtude da existência de simetria, apenas um quarto do modelo é analisado. Considera-se ainda no modelo numérico a ferramenta em contacto com a parte superior da chapa a ensaiar. Para a discretização da ferramenta são usados 6080 elementos rígidos de 3 nós (R3D3 da biblioteca do Abaqus). Relativamente ao material, este é modelado como um material elasto-plástico de von Mises, com um módulo de elasticidade de 206 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e tensão de cedência inicial de 455 MPa. O encruamento isotrópico é descrito por uma série de segmentos lineares unindo pontos que seguem a equação de Hollomon com  $k=930$  MPa e  $n=0,12$ . A espessura inicial da chapa é de 1,0 mm. O modelo numérico com resultados da deformada final está apresentado na Fig. 3.

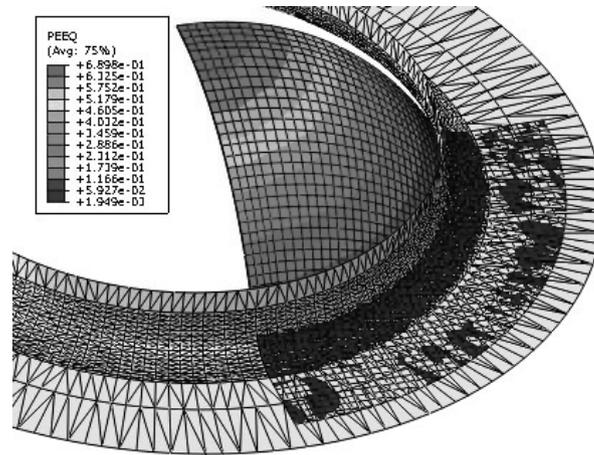


Fig. 3. Modelo usado na simulação numérica e contorno de extensão equivalente.

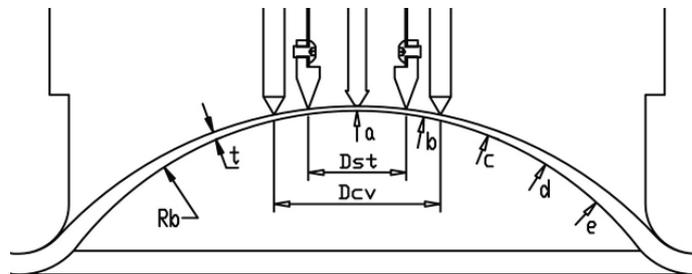


Fig. 4. Modelo para visualização da variação de espessura ao longo da secção do *bulge* e variáveis usadas.

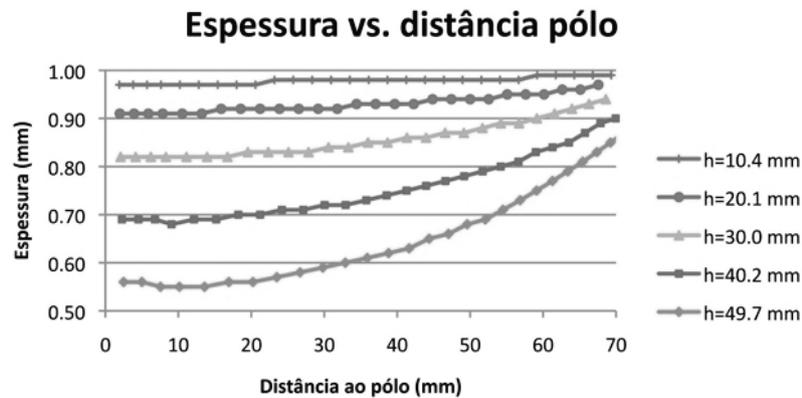


Fig. 5. Evolução do diferencial de espessuras ao longo da secção do *bulge* (*h*-altura do pólo).

### 2.1. Variação da espessura e curvatura ao longo da secção

Antes do estudo paramétrico sobre os resultados obtidos usando diferentes diâmetros de cálculo da extensão e raio de curvatura, é importante entender como se comportam as duas variáveis com mais influência nos resultados da obtenção da tensão e extensão: a espessura (diretamente relacionada com o cálculo da extensão) e a curvatura (influencia diretamente o cálculo da tensão).

Tal como se apresenta na Fig. 4, à medida que o ensaio decorre, o diferencial de extensão vai sendo sucessivamente maior ao passarmos do pólo para a periferia do *bulge* e assim a espessura ao longo da secção reflete essa evidência experimental. Essa evolução está apresentada na Fig. 5 e, como se vê nas últimas etapas, esse diferencial pode ser significativo.

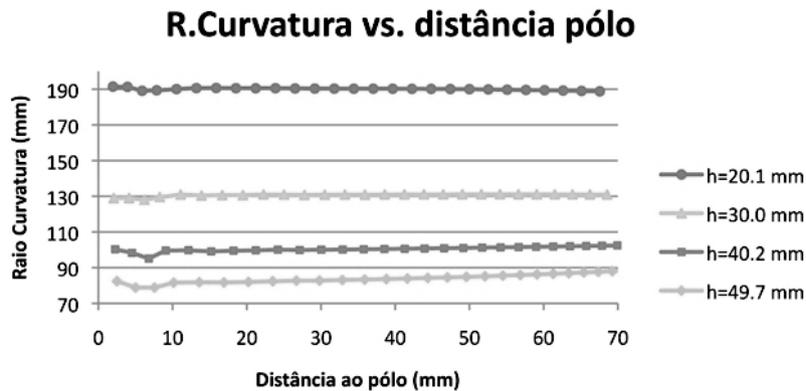


Fig. 6. Evolução do diferencial de curvatura ao longo da secção do *bulge* ( $h$  – altura do pólo).

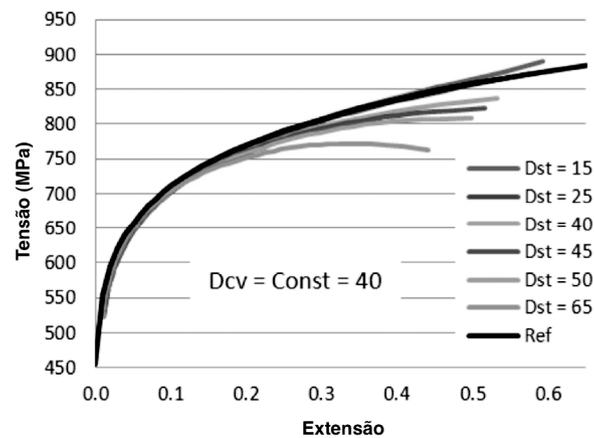


Fig. 7. Curvas tensão/extensão para  $D_{cv} = cte = 40$  mm e diferentes diâmetros  $D_{st}$ , para o cálculo da extensão.

O diferencial de espessura do pólo para a periferia do *bulge* vai ser responsável pela variação da curvatura ao longo da secção. A evolução desse diferencial está apresentada na Fig. 6. Pode observar-se que para as escalas usadas ele só é notório nas etapas finais e a tendência é para raios de curvatura menores à medida que se evolui da periferia para o pólo do *bulge*.

## 2.2. Estudo paramétrico relativo ao uso de diferentes diâmetros para cálculo de extensão e curvatura

O protótipo realizado do sistema de medição mecânico utiliza diâmetros diferentes para a medição da curvatura e extensão. No estudo deste parágrafo pretende-se compreender a influência que o uso de diferentes diâmetros poderá ter na qualidade dos resultados obtidos. Assim, fizeram-se os estudos correspondentes à variação independente de um dos diâmetros enquanto o outro se mantém constante. Considerou-se para o valor constante um diâmetro  $D_{st}$  de 25 mm e um diâmetro  $D_{cv}$  de 40 mm, os quais correspondem a valores de referência para este tipo de ensaios [1, 5, 8], assim como a valores a que pode corresponder uma boa disposição relativa do esferómetro e do extensómetro no dispositivo experimental.

Na Fig. 7, apresentam-se os resultados das curvas obtidas quando se varia o diâmetro para a determinação da extensão, mantendo constante o diâmetro da determinação da curvatura ( $D_{cv} = 40$  mm). O valor de referência apresentado corresponde ao modelo de material introduzido na modelação numérica para descrever o seu comportamento, curva esta que também corresponde à saída do resultado da tensão/extensão equivalentes para o elemento do pólo. Como se vê, a diferentes diâmetros correspondem diferentes comportamentos para a curva obtida. As diferenças iniciam-se a partir de uma extensão de cerca de 0.15 e a curva que mais se aproxima da curva de referência.

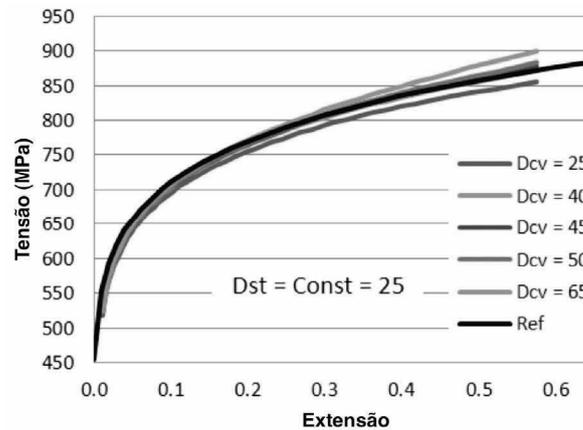


Fig. 8. Curvas tensão/alongamento para  $D_{st}=cte=25$  mm e diferentes diâmetros  $D_{cv}$ , para o cálculo da curvatura.

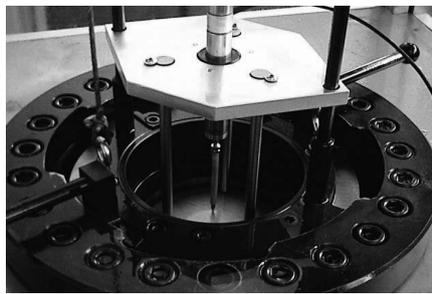


Fig. 9. Primeiro protótipo do equipamento experimental de medição de tensões e deformações.

Se se variar o diâmetro de cálculo da curvatura mantendo constante o diâmetro para o cálculo da alongamento obtém-se o resultado que se apresenta na Fig. 8. É possível perceber-se que agora todas as curvas começam a divergir mais cedo que anteriormente e que a curva que mais se aproxima da curva de referência corresponde à obtida com o diâmetro  $D_{cv}$  (curvatura) de 40 mm.

É interessante verificar que estas tendências, definidas pelas figuras anteriores, são em tudo semelhantes às apresentadas por Keller [1] em estudo idêntico, mas com resultados experimentais e fazendo uso de métodos óticos para a determinação de curvas tensão/alongamento.

### 3. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO MECÂNICO E SUA CONFIGURAÇÃO

A obtenção da curvatura da chapa metálica durante o ensaio é conseguida por um “esferómetro”, o qual consiste num tripé em que está incluído um transdutor de deslocamento (LVDT) colocado sobre a chapa a ser ensaiada (Fig. 9 e 10). A determinação da curvatura é medida pelo LVDT (RDP, ref. ACT500C com limites de  $\pm 12.5$  mm e uma não-linearidade de  $\pm 0.1\%$ ), através do deslocamento vertical relativo, tendo como referência os elementos do tripé, todos apoiados na superfície da chapa.

A medição da deformação no plano da chapa é realizada por um sistema de medição mecânico de deformações, desenvolvido pelos autores, instrumentado com quatro extensómetros montados sob a forma de uma ponte completa de Wheatstone, distribuídos em conjuntos de dois elementos sobre cada lâmina de deformação. Os extensómetros utilizados são do tipo HBM 1-LY11-6/350, têm uma resistência interna de 350 Ohm com uma tolerância de 0.35%, e um fator GF de 2.07, com uma tolerância de 1% e uma variação de 10 ppm por K. O material das lâminas de deformação é um aço de alta resistência (aço de mola DIN C70) com 0.35 mm de espessura (Fig. 11a).

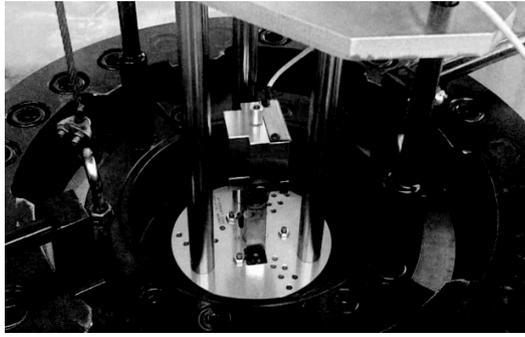


Fig. 10. Versão atual do equipamento experimental de medição de tensões e deformações.

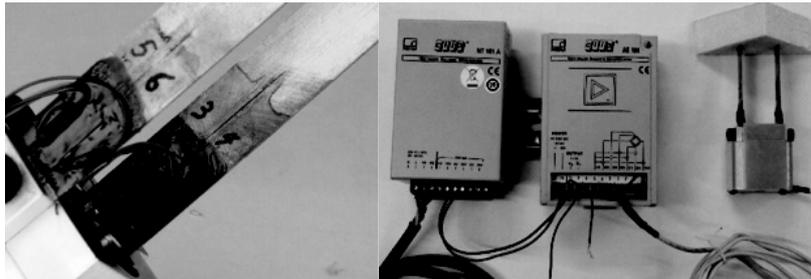


Fig. 11. (a) Pormenor da colocação dos extensómetros nas lâminas de deformação; (b) Fonte de alimentação, amplificador e dispositivo desenvolvido de medição de deformações.

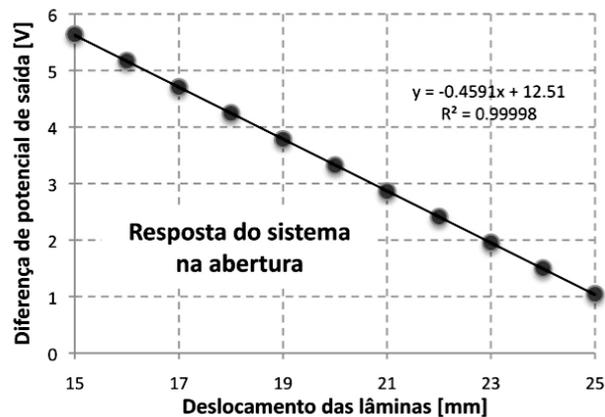


Fig. 12. Resposta do sinal elétrico do extensómetro vs. deslocamento das lâminas

O sistema de medição compreende ainda uma fonte de alimentação e um amplificador (HBM AE101), o qual promove tanto o tratamento de sinal de deformação como fornece, de forma estável, a alimentação para a ponte extensométrica (Fig. 11b).

O cuidado no processo de colagem dos extensómetros e a qualidade e alinhamento simétrico dos elementos extensométricos, permitiram que se chegasse às centésimas do milivolt no ajuste de zero da ponte. Este é um excelente valor tendo em consideração que a gama de medida deve estender-se desde -10V a +10V, valores fim de escala, para a deslocação mecânica máxima previsível.

A caracterização do sistema de medição de deformações foi realizada numa escala de 10 mm e obteve-se uma relação linear entre o valor prescrito de deslocamento e o correspondente sinal elétrico obtido. Foi obtida uma sensibilidade de 0.4591 V/mm, com uma não-linearidade (BSL) de  $\pm 0.4\%$  da escala completa (Fig. 12). A configuração apresentada mostra assim que podemos obter medições rigorosas das deformações desejadas no ensaio a realizar.



Fig. 13. Medição 3D dos provetes obtidos para diferentes pressões de *bulge*.

Tabela 1. Resultados de curvatura obtidos com máquina 3D.

Pressão (bar)	Diâmetro (mm)	R. Curv (mm)
10	877.3	438.6
20	491.1	245.5
30	357.8	178.9
40	281.4	140.7
50	223.9	111.9

Para além da extensão é necessário dispor-se da curvatura e da pressão do *bulge*. Todas as variáveis obtidas do ensaio *bulge* são adquiridas por um computador equipado com uma placa de aquisição de dados National Instruments 6221, com uma resolução de 16 bit.

Para a aquisição de dados e controlo da máquina *bulge* foi desenvolvida uma aplicação com o *software* LabVIEW 8.2, que permite a obtenção, processamento e registo de dados dos diversos sensores do sistema *bulge* e controlar as diversas válvulas hidráulicas para a realização do ensaio em condições especificadas. Haverá desenvolvimentos adicionais para que o controlo da máquina seja feito em modo de tempo real e assim permitir, por exemplo, assegurar taxas de deformação constantes durante o ensaio.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Testes experimentais preliminares foram realizados com os resultados de curvatura. Assim, os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido foram comparados com os resultados obtidos pela leitura da geometria dos provetes numa máquina de medição de coordenadas 3D. Os provetes retirados do ensaio *bulge* para diferentes valores de pressão correspondem a diferentes geometrias, Fig. 13, que depois da medição permitem obter os correspondentes valores de curvatura, reunidos na tabela 1. A comparação desses valores discretos com os obtidos pelo “esferómetro” do sistema de medição está apresentada na Fig. 14. Como se pode constatar, existe uma grande coincidência entre esses resultados, o que valida os valores calculados pelo sistema desenvolvido.

Os primeiros provetes e resultados da curva tensão/extensão obtidos com o sistema desenvolvido estão apresentados nas Fig. 15, 16, 17 e 18 para diferentes tipos de aços. Os valores de tensão e extensão são calculados com base no sistema de leitura em tempo real dos dados de deslocamento das lâminas do dispositivo de medição de deformações e dos dados de curvatura do “esferómetro”. É possível verificar a grande estabilidade das curvas obtidas (Fig. 17), sendo esta ausência de ruído um dos aspetos críticos nos sistemas de obtenção de dados do ensaio *bulge*. A existência de dados não estáveis (com altos e baixos no sinal obtido) obriga ao “amaciamento” das curvas obtidas, o que só é possível por pós-processamento e não em tempo real. Sem dados em tempo real não é possível controlar a máquina de *bulge* durante o ensaio e portanto não é possível fazer o ensaio em condições de controlo de velocidade de extensão constante, um aspeto fundamental no ensaio para alguns materiais.

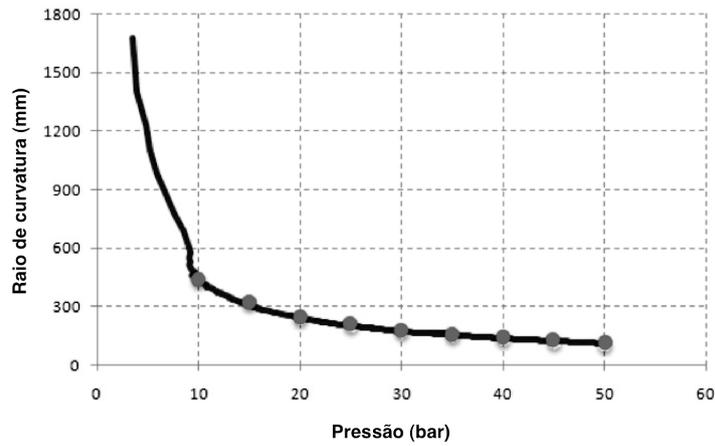


Fig. 14. Evolução da curvatura com a pressão; comparação entre resultados obtidos com sistema desenvolvido e os pontos discretos obtidos na máquina 3D.



Fig. 15. Componentes ensaiados até à rotura: aços DP590 (esquerda) e AISI 304 (direita).

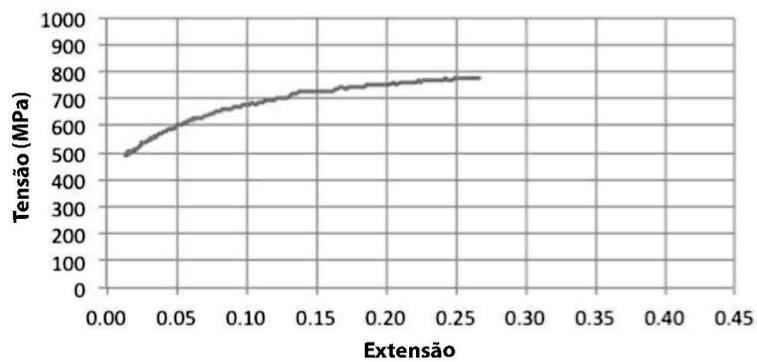


Fig. 16. Resultados da curva de caracterização do aço DP 590, obtidas com o sistema desenvolvido.

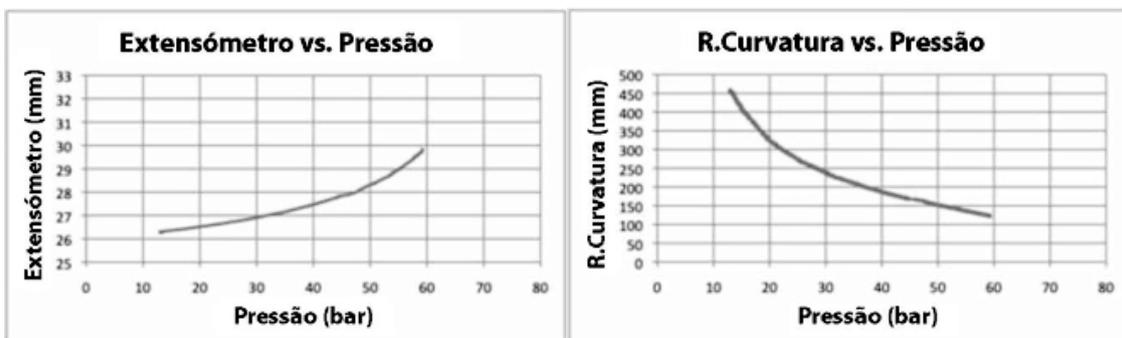


Fig. 17. Curvas de dados obtidas do extensômetro e esfêrometro em função da pressão, para o aço DP 590.

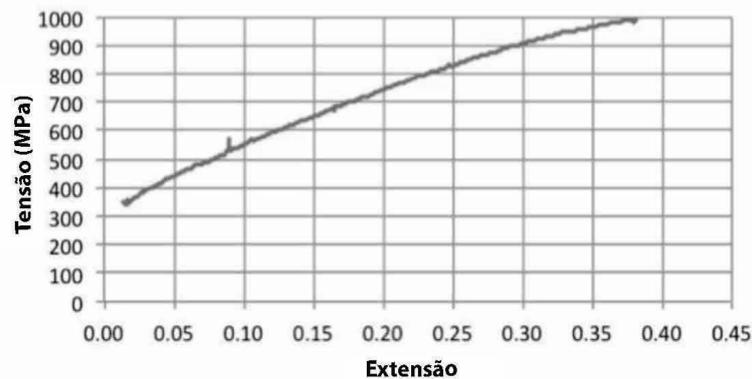


Fig. 18. Resultados da curva de caracterização do aço AISI 304, obtidas com aquisição de dados em tempo real.

## 5. CONCLUSÕES

Um sistema experimental que permite a obtenção de resultados da curva tensão/extensão para a caracterização de materiais metálicos foi desenvolvido e incorporado numa máquina de ensaios *bulge*. Este sistema mostra ser um método eficiente de ensaio de materiais, com grande estabilidade de resultados, que possibilita a sua utilização em tempo real, uma característica que pode ser fundamental neste tipo de ensaios.

Diversos estudos numéricos permitiram encontrar valores de referência para a variação da espessura e para a curvatura ao longo do raio do provete *bulge* e para diferentes alturas do ensaio. Outros estudos paramétricos foram realizados com o objetivo de avaliar os diâmetros ótimos de medição da curvatura e da extensão para a obtenção da curva tensão-extensão. Esses estudos sugeriram que o uso de valores próximos de  $D_{st}=25$  mm para a determinação da extensão e valores de cerca de  $D_{cv}=40$  mm para a determinação da curvatura podem conduzir a resultados muito próximos do comportamento do material.

Foram ainda realizados ensaios experimentais de caracterização de diferentes materiais como o aço de fase dupla (DP 590) e o aço inoxidável austenítico (AISI 304), que permitiram mostrar as capacidades do sistema desenvolvido.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng. Daniel Soares, as suas importantes participações no desenvolvimento do sistema, assim como à empresa F. Ramada pelo material das lâminas do dispositivo de medição de deformações. Agradece-se ainda o financiamento da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/EME-TME/105688/2008, PTDC/EME-TME/113410/2009 e SFRH/BPD/73097/2010) e também a disponibilização de materiais (magnésio e aços) para ensaios, pela empresa POSCO *steel company* e Instituto GIFT – *Graduate Institute of Ferrous Technology* da Coreia do Sul.

## REFERÊNCIAS

- [1] Keller, S., Hotz, W., Friebe, H., "Yield curve determination using the bulge test combined with optical measurement", IDDRG 2009 congress, 319-330 (2009)
- [2] Mutrux, A., Hochholdinger, B., Hora, P., "A procedure for the evaluation and validation of the hydraulic biaxial experiment", NUMISHEET 2008, Interlaken, Switzerland, 67-71 (2008)

- [3] Sigvant, M., Mattiasson, K., Vegter, H., Thilderkvist, P., “A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data”, *Int. J. Mater. Forming*, **2**, 235–242 (2009)
- [4] Gutscher, G., Wu, H., Ngaile, G., Altan, T., “Determination of flow stress for sheet metal forming using viscous pressure bulge test”, *Journal Mat. Processing Tech.*, **146**, 1-7 (2004)
- [5] Young, R.F., Bird, J.E., Duncan, J.L., “An Automated Hydraulic Bulge Tester”, *Journal of Applied Metalworking*, **2**, 11-18 (1981)
- [6] Ranta-Eskola, A.J., “Use of the hydraulic bulge test in biaxial tensile testing”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **21**(8), 457-465 (1979)
- [7] Atkinson, M., “Accurate determination of biaxial stress—strain relationships from hydraulic bulging tests of sheet metals”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **39**(7), 761-769 (1997)
- [8] Guner, A., Brosius, A., Tekkaya, A.E., “Experimental and numerical investigation of the hydraulic bulge test for accurate flow curve determination”, IDDRG 2009 congress, 331-341 (2009)

### **DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL MEASURING SYSTEM TO BE USED IN BULGE TEST FOR SHEET METAL MATERIAL CHARACTERIZATION**

**Abstract** – The success of forming components in sheet metal forming operations is strongly dependent on properties of raw material, being its characterization of great importance to predicting its behavior. A fundamental constitutive modeling of material is the plastic flow curve, relating stress with plastic strain, which is usually based from data obtained in uniaxial tensile testing. However, the limited range of deformation obtained in this test has motivated a growing interest in the bulge test due to its higher levels of attainable deformation. This need is evident when numerical simulation of metal forming processes is performed, because material's behavior can be described more accurately, with less extrapolation of experimentally obtained data. This work presents the development and integration of a mechanical measuring system into a hydraulic bulge machine, which allows the continuous data acquisition of pressure, sheet curvature and in-plane strain. With this data, it is possible to obtain the stress-strain curve of the material with higher levels of plastic strains. Results from numerical simulations by finite element analysis are presented and sensitivity studies are used for the definition of some fundamental measurement parameters in order to understand their influence and find their best balance to obtain an accurate flow curve. Additionally, experimental results are presented corresponding to different materials, using and validating the developed experimental system.

**Keywords** – Bulge test, Stress/strain curve, Experimental tests for material characterization.