

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS USANDO O ENSAIO DE EXPANSÃO BIAxIAL HIDRÁULICO

## DEVELOPMENT OF NA EXPERIMENTAL SYSTEM FOR CHARACTERIZATION OF METALIC MATERIALS USING HYDRAULIC BULGE TEST

Hugo Campos<sup>1</sup>, Abel D. Santos<sup>1,2</sup>, Rui Amaral<sup>1</sup>, J. Bessa Pacheco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Universidade do Porto

<sup>2</sup> FEUP - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto



### RESUMO

*A formabilidade dos materiais metálicos em chapa pode ser avaliada recorrendo ao ensaio hidráulico de expansão biaxial que tem a capacidade de obter maiores valores de deformação face aos obtidos no ensaio de tração uniaxial. Assim, podemos obter um maior rigor nos parâmetros usados nas equações constitutivas para a caracterização do material, em virtude da maior quantidade de informação existente, pois a lei de encruamento possui valores mais elevados de extensão. Apresenta-se neste artigo o desenvolvimento e a aperfeiçoamento de um sistema de medição mecânico numa máquina hidráulica “bulge”, que permite uma obtenção contínua da pressão, da curvatura e da extensão no plano da chapa. Com estes dados é possível a obtenção da evolução da curva tensão-extensão do material, em condições controladas de velocidade de extensão e até maiores níveis de deformação plástica. São apresentados resultados de simulações numéricas por elementos finitos para a análise de sensibilidades de algumas das variáveis influentes nas medições, as quais têm um peso importante no rigor dos dados obtidos de comportamento do material. Com o sistema experimental desenvolvido são ainda apresentados resultados experimentais correspondentes a ensaios com diferentes materiais.*

### ABSTRACT

*The biaxial hydraulic bulge test allows determination of formability of sheet metal materials as well as determination of hardening laws at higher strains, when compared to uniaxial tensile results. Therefore, better accuracy can be obtained in constitutive equations used in numerical simulation. This paper presents the development and improvement of a mechanical measuring system for a hydraulic bulge test, which allows continuous data acquisition of pressure, curvature and strain. With this data it is possible to obtain the evolution of the stress-strain curve under controlled conditions of speed and strain to higher levels of plastic deformation. Results of numerical finite analysis are presented for sensitivity studies of some of the influential variables in stress/strain determination. This paper also presents experimental results for different materials, obtained with the developed data acquisition system.*

## 1. INTRODUÇÃO

A correta caracterização mecânica dos materiais metálicos em chapa é um aspeto importante para a obtenção de um maior rigor nos resultados numéricos. Um método convencional de caracterização de materiais é o ensaio de tração uniaxial, método amplamente aceite, embora tenha uma limitada extensão uniforme devido ao aparecimento de estrição.

Por outro lado, a otimização dos processos de conformação plástica de chapa, através de simulações numéricas, tornou-se um fator-chave na melhoria de qualidade e redução de tempo e custos.

Dada a necessidade de informação sobre o comportamento do material para deformações superiores, são usados diferentes modelos constitutivos para extrapolação e, como diferentes modelos levam a diferentes resultados, tal facto origina dispersão na previsão do comportamento do material.

Uma alternativa é o uso do ensaio hidráulico de expansão biaxial (*bulge test*) para a obtenção de informação adicional sobre o comportamento mecânico do material. Este ensaio tem sido usado para avaliar a formabilidade dos materiais em chapa metálica, dado que o tipo de solicitação no material permite gamas superiores de deformação.

O ensaio *bulge* tem como vantagens a inexistência de interações de contacto com ferramentas, simplicidade de preparação de amostras e a obtenção de uma curva tensão-extensão da gama das encontradas em operações de conformação plástica. Com mais informação sobre a extensão do material, menor será a dispersão em consequência da extrapolação entre modelos constitutivos e assim menor incerteza existirá na previsão do comportamento do mesmo.

Para a obtenção da curva tensão-extensão obtida pelo ensaio *bulge* existe um conceito comum, que implica a necessidade de medição contínua de certas variáveis e o uso da teoria da membrana. As variáveis necessárias são a pressão hidráulica do

ensaio, o raio de curvatura da amostra e a sua espessura. A pressão hidráulica é obtida diretamente da máquina, enquanto a determinação do raio de curvatura e a espessura podem ter diferentes procedimentos para a sua avaliação. Uma abordagem simplificada recorre a métodos indiretos baseados no uso de expressões analíticas (Slota J., 2008, Stachowicz F., 2003). A aquisição contínua de dados da geometria da amostra com recurso a sistemas óticos ou mecânicos representam os designados métodos diretos de medição (Keller S., 2009, Mutrux A., 2008, Ranta-Eskola, A. 1978, Young, R. *et al.* 1981 e Gutscher G. *et al.* 2004, Santos, A. *et al.* 2010).

Os métodos diretos com recurso a técnicas óticas de medição, usam um sistema de vídeo e um *software* de correlação digital de imagem, possibilitando a contínua análise da deformação das amostras. Os sistemas diretos de medição mecânicos recorrem a dispositivos de contacto que permitem a aquisição de dados e avaliação quer da curvatura quer da espessura.

Embora o sistema de correlação digital de imagem permita a gravação do ensaio, o que é importante obter são os dados para a tensão-extensão. O sistema mecânico representa uma forma mais eficiente e imediata de cálculo, permitindo dessa forma o controlo da velocidade de ensaio para obter uma taxa de deformação constante. Quando comparado com o sistema ótico, a aquisição de resultados apresenta menor ruído e sem necessidade de pós-processamento.

Assim, este artigo centra-se no desenvolvimento de um sistema mecânico de caracterização do material para implementação numa máquina hidráulica de expansão biaxial, assim como em análises de sensibilidade das variáveis do sistema de medição.

### 1.1. Enquadramento teórico

Para a obtenção da curva de encruamento a partir do ensaio de *bulge* é usada a teoria da membrana (Atkinson, M. 1997). Dada a reduzida relação entre a espessura da chapa e

o diâmetro da matriz, as tensões de flexão são desprezadas, assim como  $\sigma_3 = 0$ , logo:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{t} \quad (1)$$

onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais no plano da chapa, e  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são os respectivos raios de curvatura,  $p$  é a pressão hidráulica e  $t$  é a espessura da chapa. Atendendo à axi-simetria da chapa do ensaio pode considerar-se que no polo as tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  iguais à tensão de membrana (Mutrux, A. *et al.* 2008, Slota J. e Spišák E. 2008 e Stachowicz F. 2003). A mesma consideração pode ser feita para o raio de curvatura ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ) e assim define-se:

$$\sigma_b = \frac{p \cdot \rho}{2 \cdot t} \quad (2)$$

sendo  $\rho$  determinado por:

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

$D_{cv}$  é o diâmetro usado para a determinação da curvatura,  $h$  é a altura do polo e  $t$  é dado por:

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

A extensão em espessura,  $\varepsilon_t$ , é obtida tendo em conta a incompressibilidade do material e assim:

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

Retomando as considerações de geometria, considera-se que as deformações no plano da chapa são iguais, logo a extensão em espessura vem:

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

onde  $\varepsilon$  é a extensão da membrana. Para a sua determinação é medida a expansão de um círculo de diâmetro inicial  $D_{st0}$  que durante o ensaio se expande  $D_{st}$ , sem variação do volume. Assim a extensão é conseguida por:

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

Na Fig. 2 é apresentada a relação global entre as diferentes variáveis do ensaio bulge e a obtenção da curva real de encruamento do material.

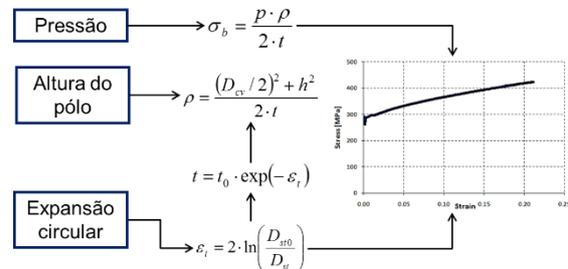


Fig. 1 - Relação entre as variáveis de bulge.

## 2. SISTEMA MECÂNICO DE CARATERIZAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS EM CHAPA

Para a aplicação dos conceitos teóricos e equações estabelecidas, foi idealizado um sistema de caracterização mecânica conforme mostra a Fig. 2. Este sistema é composto por dois componentes: principais:

- componente de medição da curvatura/esfericidade, designado por esferómetro;
- componente de medição da expansão circular do provete, aqui designado por extensómetro.

Tendo estes conceitos por base, nas subsecções seguintes apresentam-se as diversas evoluções do desenvolvimento do sistema de caracterização mecânica ligada ao ensaio bulge.

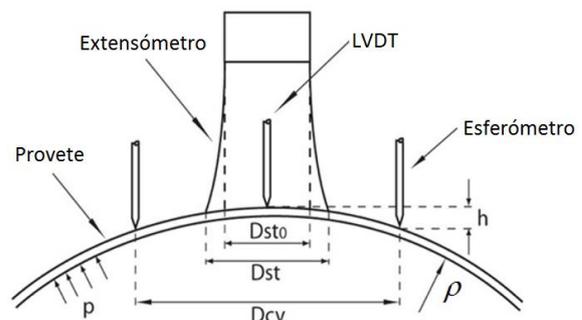


Fig. 2 – Esquema simplificado do sistema de caracterização.

## 2.1. 1º Protótipo

O primeiro protótipo desenvolvido, conforme mostra a Fig. 3 e Fig. 4, sendo um sistema simples, é constituído apenas pelos componentes de medição: esferómetro e extensómetro.

Com este desenvolvimento verifica-se que:

- o extensómetro apresentava problemas de escorregamento dos apalpadores quando acompanha a expansão circular do provete;
- o esferómetro tinha falta de rigidez porque apresentava flexão das hastes;
- o guiamento geral do conjunto não garantia a concentricidade dos componentes de caracterização com o provete a ensaiar ao longo do ensaio;
- na rotura do provete, o protótipo não protege os componentes de caracterização, podendo estes sofrerem dano com a “explosão” do óleo.

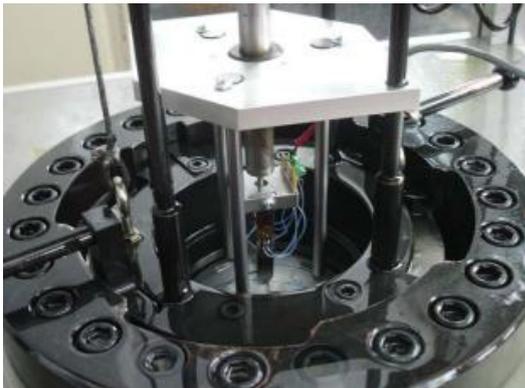


Fig. 3 - Primeiro protótipo de caracterização.

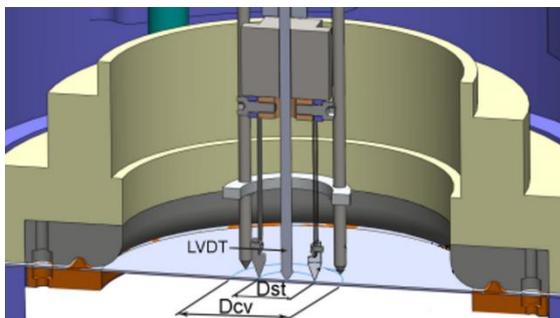


Fig. 4 - Vista em corte do primeiro protótipo.

## 2.2. 2º Protótipo

Este segundo desenvolvimento do protótipo teve como características:

- a baixa rigidez das hastes do esferómetro ter sido corrigida através do aumento do seu diâmetro e com adição de um disco na parte inferior do protótipo, como se pode ver nas Fig. 5 e Fig. 6;
- o disco na parte inferior serve também como proteção aos componentes, bem como permite a possibilidade de variar o diâmetro do esferómetro ( $D_{cv}$ );
- o protótipo continua com boa acessibilidade aos componentes, permitindo observar a evolução das condições de ensaio;

Por outro lado, este desenvolvimento manteve questões de escorregamento dos apalpadores do extensómetro, não sendo garantido o guiamento geral dos componentes.

Uma necessidade adicional desejada para o protótipo foi a capacidade de realizar a aquisição da altura total da calote do provete.

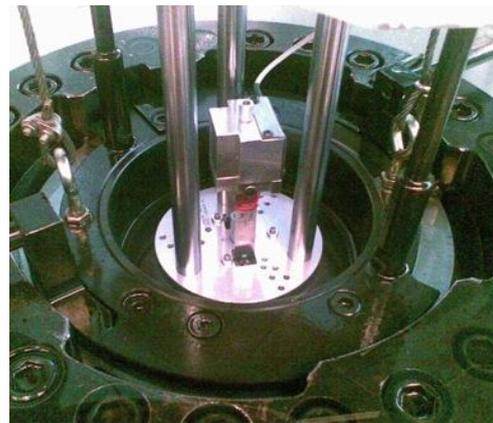


Fig. 5 - Segundo protótipo de caracterização.

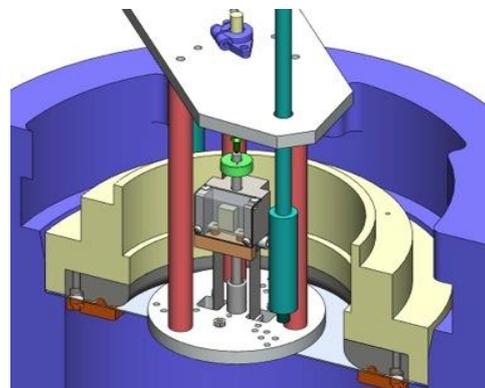


Fig. 6 - Vista em corte do segundo protótipo.

### 2.3. Estado atual

Incorporando toda a experiência adquirida com os protótipos anteriores e com o objetivo de melhorar as características dos protótipos anteriores, surge o desenvolvimento atual para o sistema de caracterização de chapas metálicas de acordo com a Fig. 7 e Fig. 8.

Este protótipo já resolve as questões relacionadas com o guiamento geral dos componentes e com a concentricidade com o provete através de um tubo com guiamento de esferas que encaixa no centro da matriz. Também já é possível o registo do deslocamento da calote do provete durante o ensaio.



Fig. 7 - Sistema de caracterização atual.

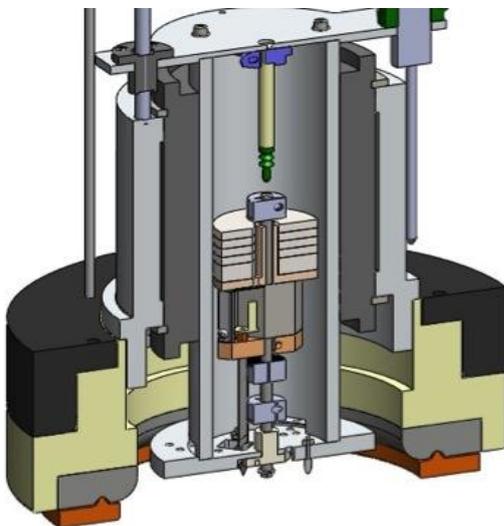


Fig. 8 - Vista em corte do sistema de caracterização atual.

### 3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADES

O desenvolvimento dos diversos protótipos para a aquisição foi acompanhado de análises numéricas das variáveis do ensaio bulge. Durante o ensaio são obtidos o raio de curvatura e a expansão da chapa através da medição de dois diâmetros, conforme mostra a Fig. 2.

A escolha destes dois diâmetros,  $D_{cv}$  e  $D_{st0}$  é importante porque diferentes diâmetros originam curvas de encruamento diferentes. Com o objetivo de encontrar os diâmetros que originam a melhor caracterização foi efetuado um estudo que consiste em variar um dos diâmetros enquanto o outro é deixado constante.

Tendo por base estudos anteriores (Keller S. et al. 2009, Santos, A. et al. 2011 and Santos, A. et al. 2012), foram realizadas análises para a verificação da influência do uso de diferentes diâmetros de medição ( $D_{cv}$  e  $D_{st0}$ ). Os resultados correspondentes estão apresentados nas figuras Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 que sugerem o uso do  $D_{st0}=25\text{ mm}$  e o  $D_{cv}$  entre 40 e 45 mm, reproduzindo-se com melhor qualidade os resultados obtidos experimentalmente.

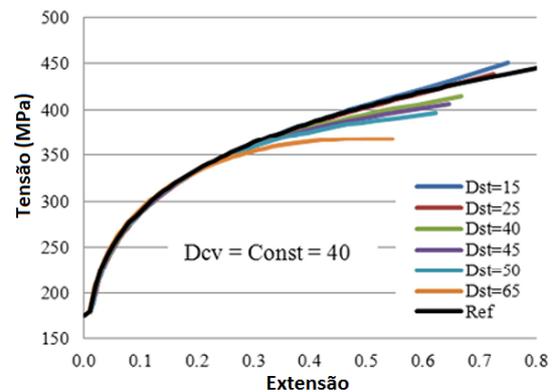


Fig. 9 - Curva de tensão-extensão,  $D_{cv}$  constante.

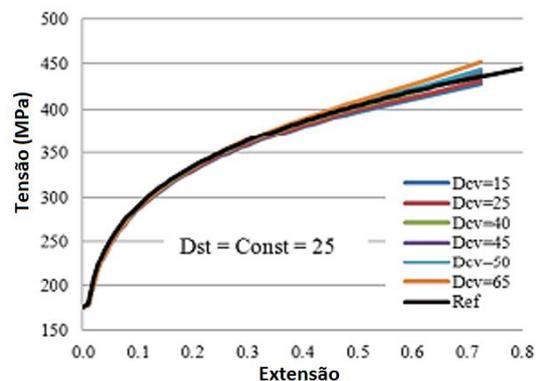


Fig. 10 - Curva de tensão-extensão,  $D_{st0}$  constante.

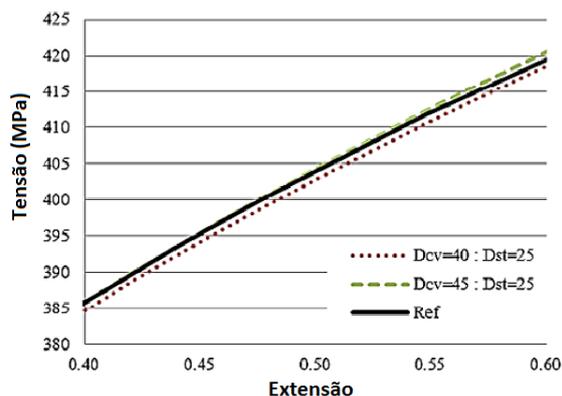


Fig. 11 - Comparação entre os resultados escolhidos.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o sistema de caracterização desenvolvido foram realizados ensaios bulge com o objetivo de aferir a qualidade dos resultados obtidos. Foram comparados os resultados (FEUP/INEGI) com os de outro laboratório (GIFT/POSTECH – Coreia do Sul) que usa uma máquina de ensaios similar bem como um sistema de caracterização semelhante.

Foram testados e comparados 4 tipos diferentes de aço. Na Fig. 12, à esquerda trata-se de um aço *Draw Quality* (DQ) e à direita é um aço *Dual-Phase* (DP590). Na Fig. 13 são mostrados 2 tipos diferentes de aço inoxidável, onde o provete à esquerda representa o AISI304 (aço austenítico) e o provete à direita é o AISI430 (aço ferrítico).



Fig. 12 - Provetes DQ e DP590 após rotura.



Fig. 13 – Provetes AISI 304 e 430 após rotura.

As curvas de encruamento obtidas com o ensaio *bulge* para os 4 tipos de aço, bem como as respectivas curvas de aquisição de cada componente do sistema de caracterização, são mostradas da Fig. 14 à Fig. 21.

Nestas figuras podemos ver os dados do ensaio de tração e os resultados dos ensaios *bulge* obtidos com o sistema de caracterização desenvolvido (Lab. 1: FEUP-INEGI) e os resultados de outro laboratório (Lab. 2: GIFT-POSTECH – Coreia do Sul) para comparação.

Para todos os materiais há uma boa correspondência entre os dois laboratórios, isto é, as curvas de encruamento de *bulge* têm um comportamento similar. Para cada ensaio também foram retirados dados para aferir da qualidade das curvas de encruamento, isto é, avaliar a quantidade de ruído presente em cada um dos componentes de medição do sistema de caracterização. Neste campo, podemos ver que os dados adquiridos apresentam uma boa estabilidade ao longo do ensaio. Este fator é de grande importância pois assegura a possibilidade de obtenção de curvas de encruamento suaves e sem interferências de sinal.

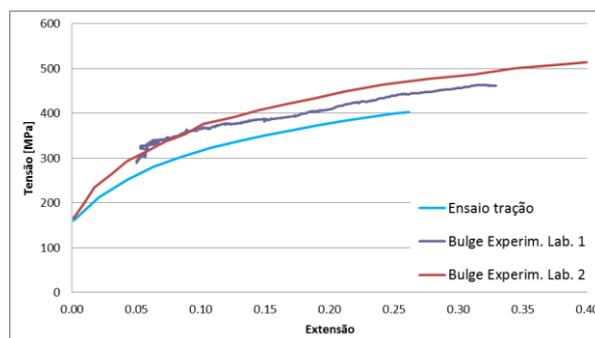


Fig. 14 - Curva de encruamento de *bulge* do DQ.

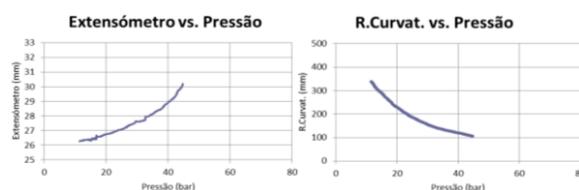


Fig. 15 – Qualidade associada à curva de encruamento do aço DQ.

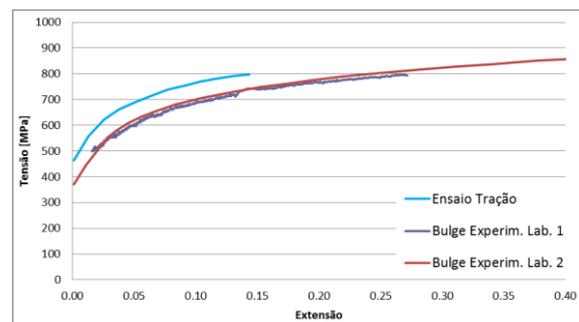


Fig. 16 - Curva de encruamento de *bulge* do DP590.

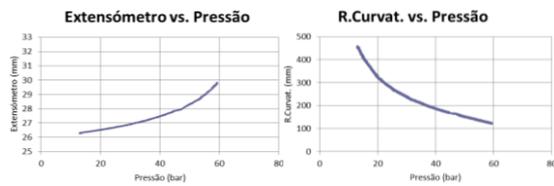


Fig. 17 - Qualidade associada à curva de encruamento do aço DP590.

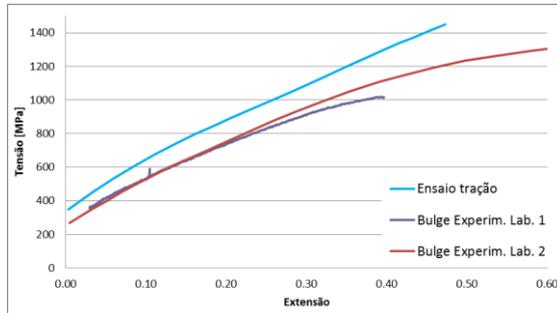


Fig. 18 - Curva de encruamento de bulge do AISI 304.

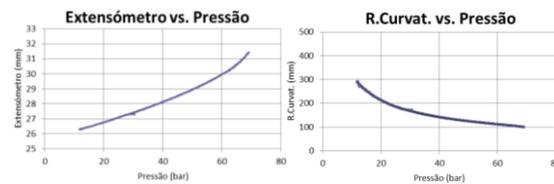


Fig. 19 - Qualidade associada à curva de encruamento do aço AISI 304

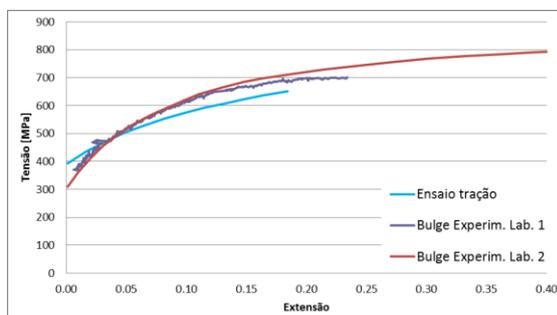


Fig. 20 - Curva de encruamento do aço AISI 430

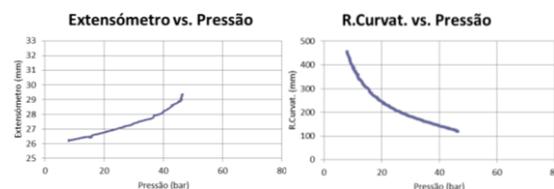


Fig. 21 - Qualidade associada à curva de encruamento do aço AISI 430.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se o desenvolvimento de um sistema experimental de caracterização de materiais metálicos em

chapa, incorporado numa máquina de ensaios *bulge*, para a obtenção de curvas de encruamento de materiais metálicos em chapa. Os resultados obtidos indicam que o sistema é eficiente e estável durante todo o ensaio, característica essencial para a obtenção dos resultados desejados.

As análises de sensibilidade realizadas, com recurso a simulações numéricas, mostram que o uso de diferentes diâmetros para obtenção da curvatura e extensão têm grande influência nas curvas de encruamento. Os resultados sugerem 25 mm de diâmetro para a medição do extensómetro e 45 mm para o diâmetro do esferómetro.

Os resultados experimentais obtidos mostram boa reprodutibilidade e estão em consonância com os resultados de um sistema mecânico semelhante de um laboratório internacional.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer financiamento deste trabalho por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito dos projetos PTDC/EMS-TEC/2404/2012 e PTDC/EMS-TEC/1805/2012. Os autores agradecem também à empresa “POSCO steel company” e ao instituto “GIFT – Graduate Institute of Ferrous Technology” da Coreia do Sul, a disponibilização de resultados e materiais para os ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS

- Atkinson M., 1997. Accurate determination of biaxial stress-strain relationships from hydraulic bulging tests of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences* 39(7): p. 761-769.
- Gutscher G., Wu H., Ngaile G., Altan T. 2004. Determination of flow stress for sheet metal forming using viscous pressure bulge test. *Journal Mat. Processing Tech.* 146 1-7.
- Keller S., Hotz W., Friebe H. 2009. Yield curve determination using the bulge test combined

- with optical measurement. IDDRG 2009 congress pp.319-330.
- Muttrux, A., B. Hochholdinger, e P. Hora 2008. Procedure for evaluation and validation of hydraulic biaxial experiment. Numisheet2008: Switzerland Numisheet p. 67-71.
- Ranta-Eskola A. J. 1979. Use of the hydraulic bulge test in biaxial tensile testing. International Journal of Mechanical Sciences 21 (8): p. 457-465.
- Santos, A., Mendes, J., Almeida, F., Reis, J., Teixeira, P. e Rocha, A. 2010. Desenvolvimento de um sistema de determinação da curva de tensão-deformação através do ensaio “bulge”. 8º CNME p. 185-186.
- Santos, A.D., P. Teixeira, and F. Barlat 2011. Flow Stress Determination Using Hydraulic Bulge Test and a Mechanical Measurement System. IDDRG2011. p. 91.
- Santos, A.D., P. Teixeira, A.B.d. Rocha, and F. Barlat 2010. On the Determination of Flow Stress Using Bulge Test and Mechanical Measurement. NUMIFORM 2010 – 10th International Conference in Numerical Methods in Industrial Forming Processes, AIP Conference Proceedings: pp.845-852
- Slota J. and Spišák E. 2008. Determination of Flow Stress by the Hydraulic Bulge Test. Metalurgia 47, 13-17.
- Stachowicz F. 2003. Biaxial stress-strain relationship of sheet metal from hydraulic bulging test. 5<sup>th</sup> Int. multidiscipl. Conf., Vancouver, Canada, 469-474.
- Young, R., J. Bird, and J. Duncan 1981. An automated hydraulic bulge tester. Journal of Applied Metalworking 2(1): p.11-18.