

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO ATRAVÉS DO ENSAIO “BULGE”

Abel Santos¹, Joaquim Mendes¹, F. Gomes Almeida¹, Jorge Reis¹, Pedro Teixeira², A. Barata Rocha^{1,2}

¹DEMec/FEUP, Dep. Eng. Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

²INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Porto



RESUMO

Actualmente o ensaio “bulge” está a merecer um interesse acrescido pelos seus níveis de deformação superiores, em virtude da amplitude de deformação limitada obtida no ensaio de tracção necessitar de extrapolação dos dados obtidos do comportamento do material quando fazemos a simulação numérica de processos de conformação plástica. Neste artigo é apresentado 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 (“esferómetro”) e da deformação no plano da chapa. Com estes dados é possível a obtenção da evolução da curva tensão-deformação do material, em condições controladas de velocidade de deformação e até elevados 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.

1. INTRODUÇÃO

Diferentes métodos podem ser usados para a obtenção da curva tensão/deformação a partir do ensaio “bulge”, mas existe um conceito comum a todos eles: a necessidade de medir continuamente a pressão do ensaio, da espessura no pólo da chapa ensaiada e da aplicação da teoria da membrana. Relativamente às medições e ao seu modo de obtenção, actualmente existem e são usados métodos ópticos e sistemas de processamento de imagem (Keller S. et al. 2009), mas os métodos mecânicos clássicos (Gutscher G. et al. 2004), 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/deformação de comportamento do material que pretendemos ensaiar.

1.1 - 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 neste 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 σ_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 σ_1 e σ_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 teremos 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 deformação em espessura através da expressão:

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

A deformação 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 deformação em espessura vem:

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

sendo ε a deformação 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 deformação é calculada por:

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

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

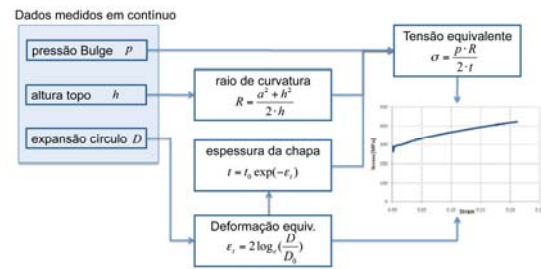


Fig. 1 – Fluxo para a determinação da curva tensão-deformação.

2 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO MECÂNICO

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 deslocamentos (LVDT) colocados sobre a chapa a ser ensaiada. A determinação da curvatura é medida pelo LVDT (RDP, ref. ACT500C com limites de ± 12.5 mm e uma não-linearidade de ± 0.1 %), através de deslocamento vertical relativo, tendo como referência os elementos do tripé, todos apoiados na superfície da chapa.

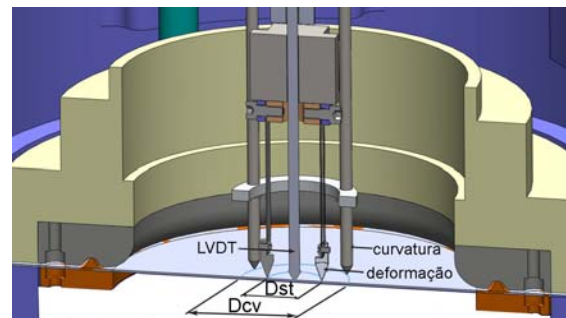


Fig. 2 – Configuração do aparelho para obtenção da curva tensão/deformação de chapas metálicas no ensaio “bulge” e diâmetros usados para medição da deformação (Dst) e curvatura (Dcv).

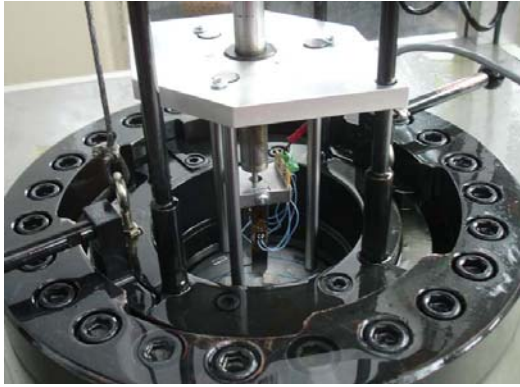


Fig. 3 – Equipamento experimental de medição de tensões e deformações.

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 do tipo 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 factor k de 2.07 com tolerância de 1%, com variação de $10E-6$ por $^{\circ}C$. O material das lâminas de deformação é um aço de alta resistência (aço de mola DIN C70) com 0.35 mm de espessura.

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. 4 – (a) Fonte de alimentação, amplificador e dispositivo desenvolvido de medição de deformações (b) pormenor da colocação dos extensómetros nas lâminas de deformação.

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

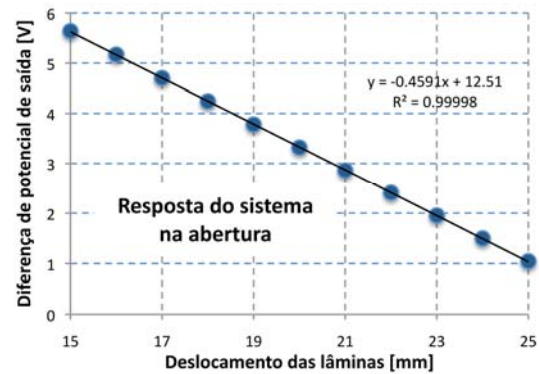


Fig. 5 – Resposta do sinal eléctrico do extensómetro vs. deslocamento das lâminas.

Para além da deformação é necessário dispormos 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, 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.

3 - MODELAÇÃO NUMÉRICA

A modelação numérica do ensaio teve como objectivos 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 respectivas evoluções, enquanto a análise de sensibilidades aborda a influência de uso de diferentes diâmetros D_{st} e D_{cv} (ver Fig. 1 ou 2) para obtenção de resultados da curva tensão/deformação e o seu peso no rigor dos dados obtidos de comportamento do material.

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 175 MPa. O encruamento isotrópico é descrito por uma série de segmentos lineares unindo pontos que seguem a equação de Hollomon com $k=465$ MPa e $n=0,21$. A espessura inicial da chapa é de 1,0 mm. O modelo numérico com resultados da deformada final está apresentado na Fig.6.

3.1 - Variação da espessura e curvatura ao longo da secção

Antes do estudo paramétrico sobre os resultados obtidos usando diferentes diâmetros de cálculo da deformação e raio de cur-

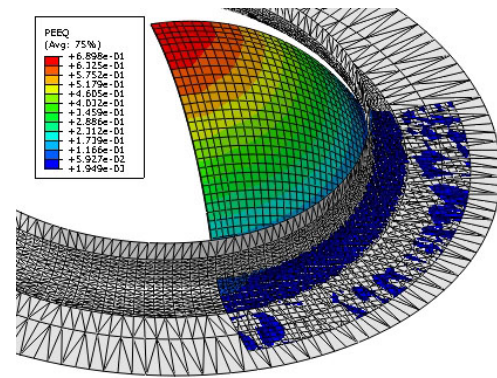


Fig. 6 – Modelo usado na simulação numérica e contorno de deformação equivalente.

vatura, é importante entender como se comportam as duas variáveis com mais influência nos resultados da obtenção da tensão e deformação: a espessura (directamente relacionada com o cálculo da deformação) e a curvatura (influencia directamente o cálculo da tensão).

Tal como se apresenta na Fig. 7, à medida que o ensaio decorre, o diferencial de deformação vai sendo sucessivamente maior ao passarmos do pólo para a periferia do “bulge” e assim a espessura ao longo da secção reflecte essa evidência experimental. Essa evolução está apresentada na Fig.8 e como se vê nas últimas etapas esse diferencial pode ser significativo.

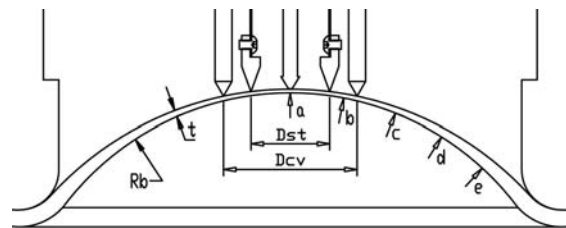


Fig. 7 – Modelo para visualização da variação de espessura ao longo da secção do “bulge” e variáveis usadas.

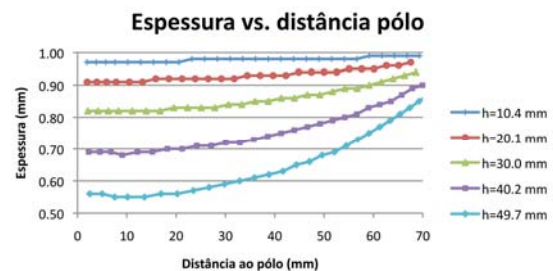


Fig. 8 – Evolução do diferencial de espessuras ao longo da secção do “bulge” (h-altura do pólo).

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 apresentado na Fig.9. 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 vamos da periferia para o pólo do “bulge”.

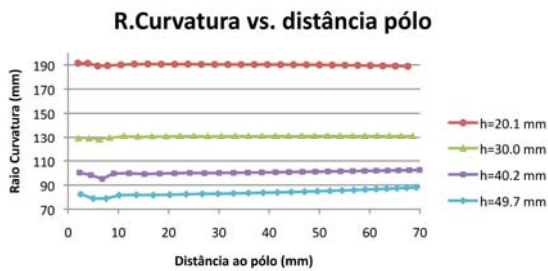


Fig. 9 – Evolução do diferencial de curvatura ao longo da secção do “bulge” (h-altura do pólo).

3.2 - Estudo paramétrico relativo ao uso de diferentes diâmetros para cálculo de deformação e curvatura

O protótipo realizado do sistema de medição mecânico utiliza diferentes diâmetros para a medição da curvatura e deformação. No estudo deste parágrafo pretende-se compreender a influência que o uso de diferentes diâmetros poderão 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 (Dst ou Dcv) de 25mm, o qual corresponde a um valor de referência para este tipo de ensaios [Keller 2009; Guner 2009; Young 1981].

Na Fig. 10 apresentam-se os resultados das curvas obtidas quando variamos o diâmetro para a determinação da deformação, mantendo constante o diâmetro da determinação da curvatura ($Dcv=25$ 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/deformação equivalentes para o elemento do pólo.

Como se vê diferentes diâmetros correspondem a diferentes comportamentos para a curva obtida. As diferenças iniciam-se a partir da deformação de cerca de 0.3 e o valor que mais se aproxima da curva de referência corresponde ao diâmetro (deformação) de 40 mm ($Dst=40$ mm e $Dcv=25$ mm).

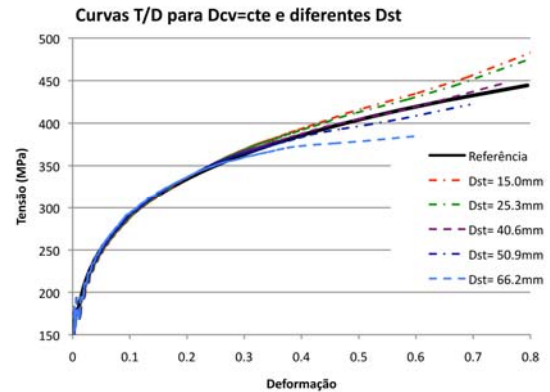


Fig. 10 – Curvas tensão/deformação para $Dcv=cte=25$ mm e diferentes diâmetros para o cálculo da deformação (Dst).

Se variarmos o diâmetro de cálculo da curvatura mantendo constante o diâmetro para o cálculo de deformação teremos como resultado o que vem apresentado na Fig.11. É possível perceber que agora todas as curvas começam a divergir a partir de cerca de 0.2 de deformação, excepto a correspondente aos 15 mm, que só diverge a partir dos 0.5.

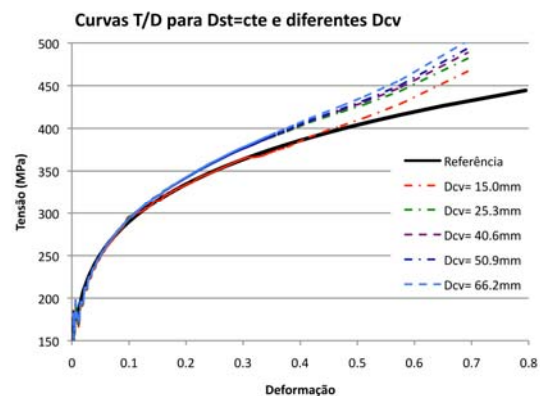


Fig. 11 – Curvas tensão/deformação para $Dst=cte=25$ mm e diferentes diâmetros para o cálculo da curvatura (Dcv).

É interessante verificar que estas tendências definidas pelas figuras anteriores, são em

tudo semelhantes às apresentadas por (Keller 2009) em estudo idêntico, mas com resultados experimentais e fazendo uso de métodos ópticos para a determinação de curvas tensão/deformação.

Como complemento a este estudo decidiu-se verificar as curvas tensão/deformação obtidas numericamente para diferentes pontos ao longo da secção do “bulge”. Os resultados correspondentes estão apresentados na Fig. 12 e os pontos considerados correspondem a pontos como os indicados por a, b, c, d na Fig. 8. É possível verificar que todas as curvas são coincidentes e a única diferença entre elas está no limite do valor de tensão/deformação atingido. Assim, para o pólo o limite é o valor de 0.8 de deformação e à medida que nos afastamos do pólo esse limite vai diminuindo, tendo para a distância de 46 mm do pólo, o valor 0.5 de deformação. Esta observação está em tudo adequada ao que se observa na secção do “bulge”, Fig.8, pois a variação de espessura vai sendo menor à medida que nos afastamos do pólo e o mesmo acontecerá necessariamente à deformação. Complementarmente, o que a Fig.13 nos indica também é que se quisermos obter com rigor a curva de comportamento do material teremos, tanto quanto possível, de considerar o mesmo ponto para a determinação da tensão e esse mesmo ponto para a determinação da deformação, já que eles estão em correspondência um para o outro. Em consequência, o que devemos procurar fazer é não usar diâmetros diferenciados (pontos diferentes) para a obtenção de resultados de deformação e curvatura.

Curvas T/D para diferentes pontos ao longo da secção

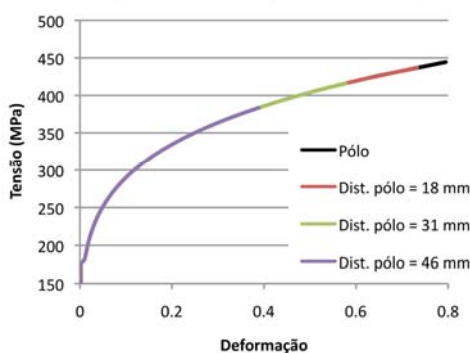


Fig. 12 – Curvas tensão/deformação para diversos pontos ao longo da secção; o ponto usado para o cálculo da tensão e o ponto da deformação são o mesmo.

Tendo em consideração o referido acima fez-se a obtenção de resultados em que os diâmetros usados para cálculo da deformação e curvatura sejam o mesmo. Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 13. Pode ver-se que os resultados se situam à volta da curva de referência, mas os melhores resultados correspondem aos diâmetros de 40 e 50 mm, estando mesmo o de 50 mm quase perfeitamente a coincidir com a curva de referência em toda a sua extensão.

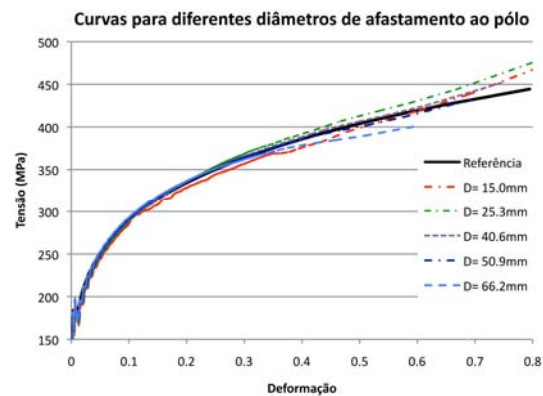


Fig. 13– Curvas tensão/deformação calculadas usando o mesmo diâmetro para obtenção da curvatura e deformação.

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.14, que depois da medição permitem obter os correspondentes valores de curvatura. A comparação desses valores discretos com os obtidos pelo “esferómetro” do sistema de medição está apresentada na Fig.15. Como se pode constatar, existe uma grande coincidência entre esses resultados, o que valida os valores calculados pelo sistema desenvolvido.

Os primeiros resultados da curva tensão/deformação obtidos com o sistema desenvolvido estão apresentados na Fig. 16. Os valores de tensão e deformação são cal-



Fig. 14 – Medição 3D dos provetes obtidos para diferentes pressões de “bulge”.

Tabela 1 – Resultados de medição de curvatura 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

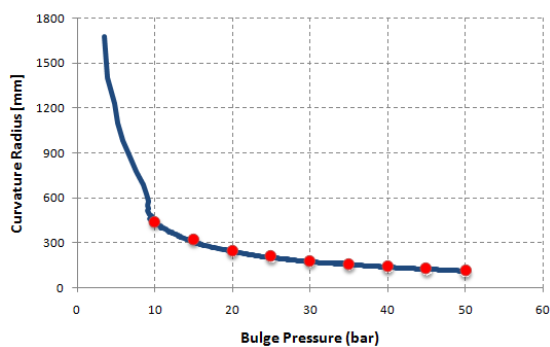


Fig. 15 – Evolução da curvatura com a pressão; comparação entre resultados obtidos com sistema desenvolvido e os pontos discretos obtidos na máquina 3D.

culados 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 da curva obtida, sendo esta ausência de ruído um dos aspectos 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 “amacramento” 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 deformação constante, um aspecto fundamental no ensaio para alguns materiais.

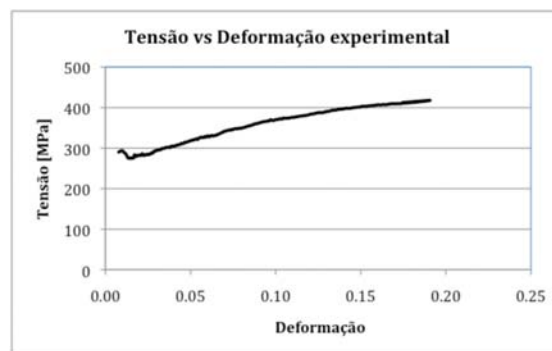


Fig. 16 – Curva tensão/deformação obtida com o sistema experimental desenvolvido.

5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi desenvolvido um sistema experimental de aquisição de dados, incorporado numa máquina de ensaios “bulge”, para a obtenção de resultados da curva tensão/deformação e caracterização de materiais metálicos. Os primeiros resultados indicam um método eficiente de ensaio e uma estabilidade de resultados que permitem a sua utilização em tempo real, uma característica que pode ser fundamental neste tipo de ensaios.

Em termos de perspectivas futuras, será de considerar a realização de ensaios experimentais que permitam validar as orientações numéricas obtidas com os estudos efectuados, o desenvolvimento de um protótipo que faça uso do mesmo diâmetro para leitura de deformações e leitura de curvatura, o estudo numérico de resultados obtidos para diferentes materiais com diferente taxa de encruamento e consideração de anisotropia e ainda a verificação dos resultados considerando correcções nas expressões usadas para determinação de curvatura (uso de arco em vez da respectiva corda, no cálculo da curvatura e cálculo da tensão equivalente considerando a existência de pressão interna).

6- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng. Daniel Soares, à Eng. Mariana Azevedo e ao Eng. Pedro Portela as suas importantes participações no desenvolvimento do sistema, assim como ao estudante de

mestrado José Esteves pela sua participação no estudo numérico. Agradece-se ainda o material das lâminas do dispositivo de medição de deformações, gentilmente disponibilizado pela empresa F. Ramada.

7- REFERÊNCIAS

- Guner A., Brosius A., Tekkaya A.E., "Experimental and numerical investigation of the hydraulic bulge test for accurate flow curve determination", IDDRG 2009 congress, pp.331-341.
- 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.
- Young, R. F., Bird, J. E. and Duncan, J. L. (1981) An Automated Hydraulic Bulge Tester. Journal of Applied Metalworking 2, 11-18.