

INVERSÃO EXTERNA DE TUBOS METÁLICOS DE PAREDE FINA

PEDRO A.R. ROSA, RUI M.S.O. BAPTISTA,
JORGE M.C. RODRIGUES E PAULO A.F. MARTINS*

Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
e-mail: pmartins@ist.utl.pt stm@ist.utl.pt

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo de natureza teórica-experimental da inversão de tubos metálicos de parede fina orientado para a compreensão da mecânica do processo e para um melhor entendimento dos modos de deformação que estão associados à definição dos limites de enformabilidade. A investigação teórica foi realizada com base em técnicas de prototipagem virtual assentes no método dos elementos finitos. O trabalho experimental utilizou tubo industrial da liga de alumínio Al6060 (normalizada e envelhecida naturalmente).

1. INTRODUÇÃO

A inversão externa de tubos metálicos de parede fina com auxílio de uma matriz é utilizada para produzir componentes tubulares de parede dupla, difíceis de obter por intermédio de outros processos tecnológicos. Este processo pode também ser utilizado em operações de acabamento ou fixação de extremidades de tubos, em aplicações destinadas a absorver energia de forma controlada (ex. absorvedores da energia de colisão na coluna de direcção automóvel), ou simplesmente na obtenção de pré-formas para outros processos de deformação plástica de tubos (ex. operações de “hydroforming”).

O processo é caracterizado pela compressão axial de um tubo sobre uma matriz apropriada, a qual condiciona o fluxo do material proveniente das paredes do tubo no sentido do interior para o exterior (fig. 1). A deformação plástica do tubo é o resultado de três mecanismos distintos; dobragem, expansão e atrito. A dobragem tem lugar no ponto B, onde o tubo contacta a matriz, e no ponto D (desdobragem) localizado na zona livre oposta a B. A influência do atrito tem lugar na interface tubo / ferramenta, na zona localizada entre os pontos B e C. A expansão vai ocorrendo de forma progressiva ao longo da direcção circunferencial, θ , à medida que o tubo percorre o raio da matriz.

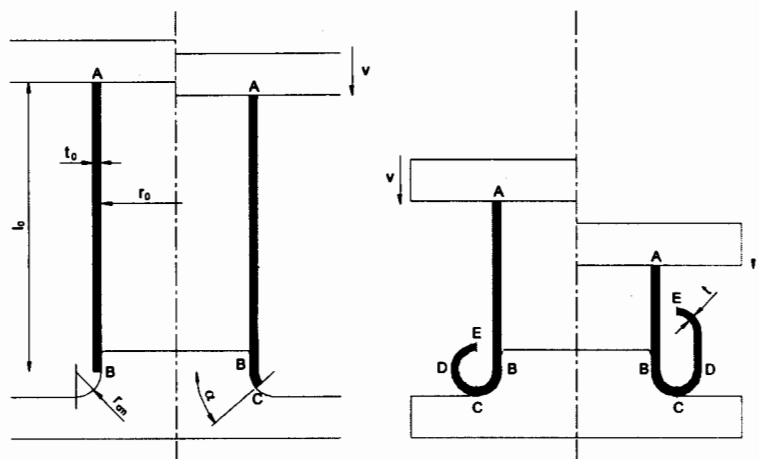


Fig. 1. Representação esquemática da inversão externa de tubos sobre uma matriz (AB - região não deformada, BD - região de deformação plástica, DE - região deformada).

* Autor para correspondência

Os fundamentos teórico-experimentais do processo, indispensáveis à obtenção de componentes de boa qualidade, podem ser obtidos em publicações da especialidade [1-14]. A maioria destas publicações apresenta estudos relacionados com a previsão de carga, com a identificação dos parâmetros que controlam o processo e com a classificação dos modos típicos de deformação que podem ocorrer durante a inversão externa de componentes tubulares (inversão, instabilidade local e fractura). A análise teórica é, consoante os autores, desenvolvida com base em vários métodos analíticos e numéricos. No entanto, podem ser facilmente identificadas lacunas de conhecimento ao nível da compreensão da influência do atrito na interface material / ferramenta, da influência das trajectórias de deformação e do valor do dano associado ao aparecimento de fracturas. Por outro lado, embora a explicação / quantificação da ocorrência de instabilidade em tubos de parede fina esteja facilmente acessível na literatura, não é muito habitual ter acesso à sua modelação numérica.

Este trabalho apresenta um estudo de natureza teórica-experimental da inversão externa de tubos metálicos de parede fina com auxílio de uma matriz, orientado para a compreensão da mecânica de deformação do processo e para um melhor entendimento dos modos de deformação que estão associados à definição dos limites de enformabilidade. A investigação de base foi realizada recorrendo a técnicas de prototipagem virtual assentes no método dos elementos finitos. O trabalho experimental foi desenvolvido com tubo industrial da liga de alumínio Al 6060 (normalizado e envelhecido naturalmente), tendo sido essencialmente utilizado para suporte e validação da investigação teórica.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Método dos Elementos Finitos: Formulação de Escoamento Plástico

As simulações numéricas que foram efectuadas no âmbito deste trabalho recorreram ao programa de elementos finitos I-FORM2, desenvolvido em torno da formulação de escoamento plástico. A formulação fraca do princípio extremo de Hill, no qual se baseia a formulação de escoamento plástico, determina a seguinte igualdade em termos da variação arbitrária da velocidade,

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon} \delta \dot{\epsilon} dV - \int_{S^F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

Na expressão anterior o símbolo V representa o volume de controlo limitado pelas superfícies S_U e S_F , onde a velocidade e a tensão estão prescritas e o símbolo K representa um número positivo, grande, que actua directamente sobre a velocidade de deformação volumétrica $\dot{\epsilon}_v$, de modo a forçar a incompressibilidade do material.

Os modelos de elementos finitos que foram utilizados na discretização da secção transversal dos componentes tubulares, recorrem a elementos quadriláteros (quatro pontos nodais), consideram que as matrizes são rígidas e tiram partido da simetria axial de revolução das montagens laboratoriais. A utilização de elementos sólidos representa uma boa alternativa ao caso computacionalmente mais eficiente dos elementos de membrana ou casca, uma vez que os elementos sólidos entram em linha de conta com todas as tensões e extensões presentes no tubo. Estes elementos permitem dum modo simples considerar os efeitos de dobragem e de desdobragem e possibilitam a análise de um maior número de variáveis segundo a direcção da espessura sempre que o número de elementos colocado segundo esta direcção for adequado.

A modelação da interacção física entre o material e a ferramenta é efectuada por intermédio da discretização do contorno das ferramentas através de elementos lineares de atrito. Admite-se que o valor do factor de atrito m é constante.

2.2 Instabilidade Plástica de Tubos

A primeira tentativa para resolver o problema de instabilidade plástica de uma coluna esbelta foi feita por Engesser [15] com base na teoria elástica de colunas devida a Euler e na fórmula do «módulo de tangência». De acordo com esta teoria o módulo de elasticidade da equação de Euler deve ser substituído pelo módulo de tangência do material, definido pelo declive $d\sigma/d\epsilon$, da curva tensão-extensão do material na

região plástica. Estes desenvolvimentos foram subsequentemente melhorados por Shanley [16], dando origem à seguinte expressão,

$$\sigma_{cr} = 0.5 C \pi^2 E_t \left(\frac{r_0}{l_0} \right)^2 \quad (2)$$

em que C é um parâmetro dependente das condições de fronteira ($C = 4$, para uma coluna com ambas as extremidades fixas) e E_t é o módulo de tangencia para o valor correspondente à tensão σ .

No caso de componentes tubulares (fig. 2) podem ser identificados dois modos típicos de instabilidade plástica. Porém no âmbito deste trabalho apenas foi possível obter o modo de instabilidade local representado na fig. 2.b), o qual pode ser analiticamente definido com base na tensão axial crítica, σ_{cr} , proposta por Timoshenko [17]:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} E_t \frac{t_0}{r_0} \quad (3)$$

em que ν é coeficiente de Poisson.



Fig. 2. Modos de instabilidade plástica de tubos sujeitos a compressão axial; a) Instabilidade, b) Instabilidade local.

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TRIBOLÓGICA

A caracterização mecânica do material utilizado nos ensaios experimentais (liga de Alumínio Al6060) foi obtida por intermédio de ensaios de tracção e de compressão uniaxiais (fig. 3). O material foi ensaiado para duas situações distintas, decorrentes do envelhecimento natural e de um tratamento térmico de normalização (estágio de 1 hora a 415°C seguido de arrefecimento ao ar).

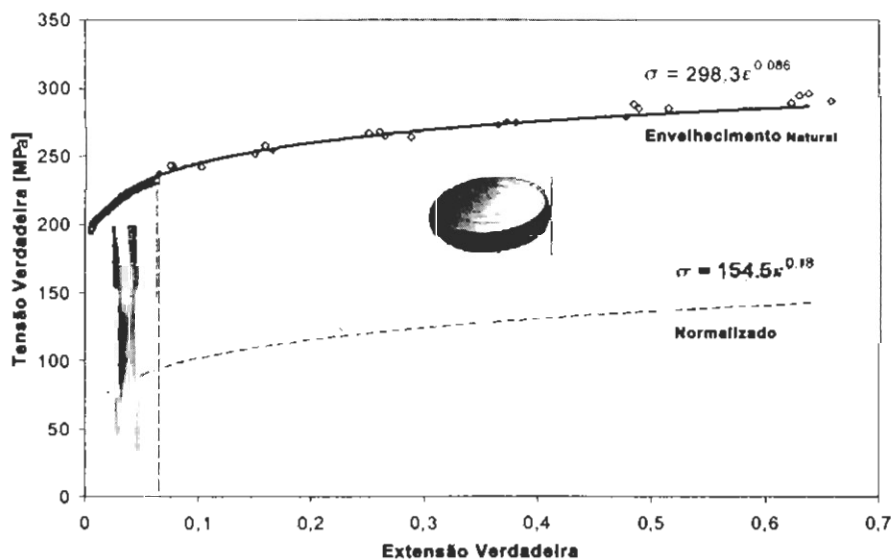


Fig. 3. Curva tensão-extensão, $\sigma - \epsilon$, obtida por combinação dos resultados dos ensaios de tracção e de compressão realizados a temperatura ambiente.

A caracterização experimental das condições de atrito nas interfaces de contacto entre o material e a ferramenta foi efectuada com base em ensaios de anel, suportados por ábacos construídos a partir da simulação numérica por elementos finitos (fig. 4).

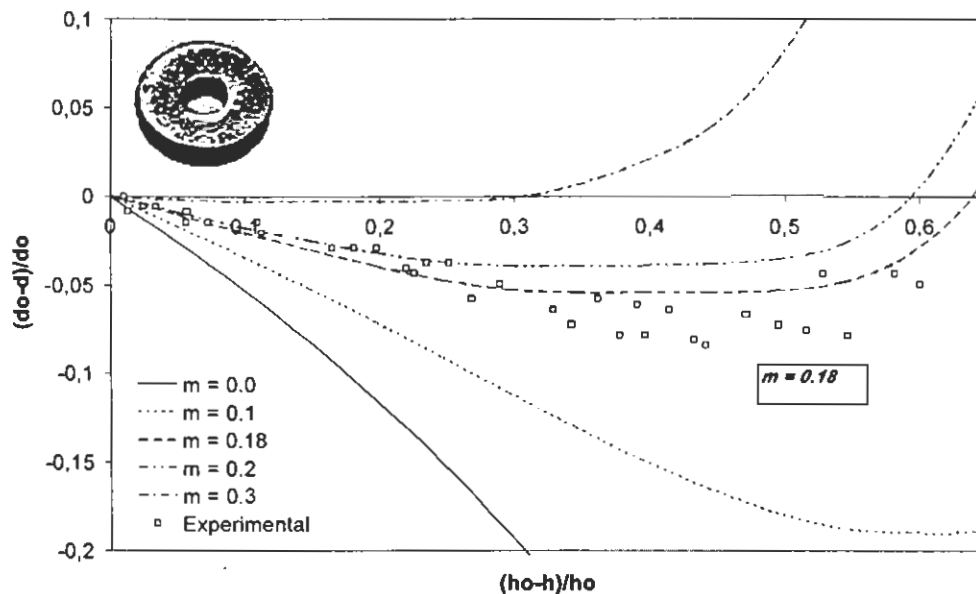


Fig. 4. Curvas de calibração teóricas do factor de atrito, e resultados experimentais do ensaio de anel lubrificado com PTFE.

A caracterização dos limites de enformabilidade foi efectuada com base em ensaios de compressão a seco até a rotura de provetes cilíndricos com uma relação entre altura e diâmetro $h/d = 2.5$ (fig. 5). Na fig. 5.a) é apresentada a distribuição dos valores de enformabilidade para o critério de Cockcroft-Latham no instante correspondente ao início de fissuração.

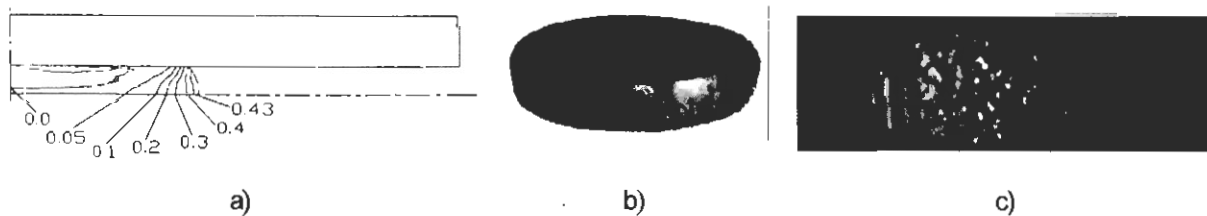


Fig. 5. Distribuição dos valores de enformabilidade obtidos com o critério de Cockcroft-Latham usando o programa de elementos finitos I-FORM2 a), para uma redução em altura igual a da verificação experimental de fracturas b). Ampliação de uma fractura verificada experimentalmente para a liga de alumínio 6060 envelhecida naturalmente c).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios experimentais foram estruturados de forma a contabilizar os principais parâmetros que controlam o processo de compressão axial de tubos entre pratos direitos e a inversão externa de tubos utilizando uma matriz. O plano experimental envolveu o fabrico de provetes tubulares com dimensões do raio interior de $r_0 = 18 \text{ mm}$, de comprimento $l_0 = 60, 70, 80 \text{ mm}$, com espessuras de parede $t_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$, e a utilização de lubrificação com PTFE (politetrafluoretileno).

4.1 Compressão axial de tubos entre pratos direitos

A compressão axial de tubos de parede fina entre pratos direitos foi realizada com o objectivo de validar as estimativas teóricas da carga crítica P_{cr} (ocorrência de instabilidade local) e de reforçar a compreensão sobre um dos modos de deformação característicos do processo. A simulação numérica foi realizada por intermédio da utilização do programa de elementos finitos I-FORM2.

A secção inicial do tubo, com simetria de revolução, foi discretizada por intermédio de elementos isoparamétricos lineares de quatro nós. Foram realizados vários testes numéricos com diferentes números de elementos segundo a direcção da espessura da parede do tubo tendo-se concluído que os efeitos da instabilidade local poderiam ser correctamente simulados, desde que fossem utilizados pelo menos três elementos segundo a direcção da espessura. Discretizações consistindo em apenas dois elementos não permitiram simular apropriadamente o processo de compressão axial de tubos entre pratos direitos.

Na fig. 6 estão incluídos detalhes das malhas de elementos finitos em vários estágios de deformação que adicionam uma contribuição à compreensão do mecanismo de colapso por instabilidade local proposto por Allan [18]. De facto, para além da prévia identificação de movimentos no sentido do interior / exterior do tubo, é também agora possível observar-se o contacto entre as 'pregas' de instabilidade, e as sucessivas alterações que têm lugar na região de contacto entre o tubo e a matriz. As cargas críticas de instabilidade apresentam uma boa correlação entre o valor experimental, $P_{cr} = 46 \text{ kN}$, e o valor teórico, $P_{cr} = 47.2 \text{ kN}$, com um desvio inferior a 3%.

Durante a realização dos ensaios experimentais com diferentes alturas de tubos observou-se, como seria de esperar, a total independência entre o comprimento do tubo e a carga crítica de instabilidade plástica local.

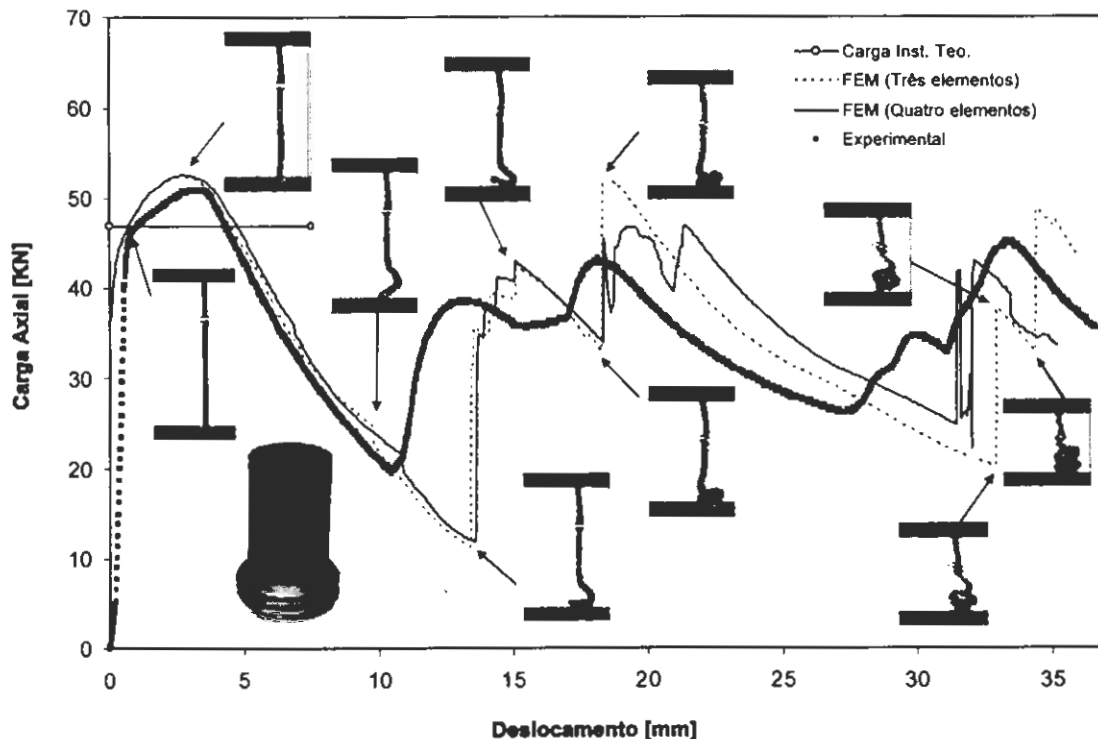


Fig. 6. Evolução teórica e experimental da carga com o deslocamento para a compressão axial de tubos de parede fina entre pratos direitos (A16060 envelhecido e). Foram inseridas na figura imagens obtidas a partir da modelação numérica com o intuito de identificar as diferentes fases da deformação.

4.2 Inversão externa de tubos

A evolução teórico-experimental da carga com o deslocamento para o processo de inversão externa de tubos metálicos (Al6060 envelhecido naturalmente) de parede fina é apresentada na fig. 7 para um dos casos de estudo onde se verifica uma inversão completa. A evolução das curvas compreende três fases distintas; a fase de compressão axial, a fase transiente e a fase correspondente ao regime estacionário. Na primeira fase a carga aumenta rapidamente à medida que o tubo vai sendo comprimido axialmente contra a superfície da matriz. Um valor de pico aproximadamente igual a 18 kN é obtido, após o qual o tubo começa a dobrar axialmente de modo a adaptar-se ao contorno da matriz. Posteriormente (segunda fase), a extremidade do tubo começa a contornar o canto da matriz com um aumento moderado da carga em consequência da expansão circunferencial. Após a extremidade do tubo completar uma rotação de 270° o processo entra em condições de regime estacionário e, consequentemente, o valor da carga de enformabilidade durante a inversão, P_i , permanece aproximadamente constante. Foram incluídos detalhes da malha de elementos finitos com o objectivo de identificar as diferentes fases da deformação (fig. 7).

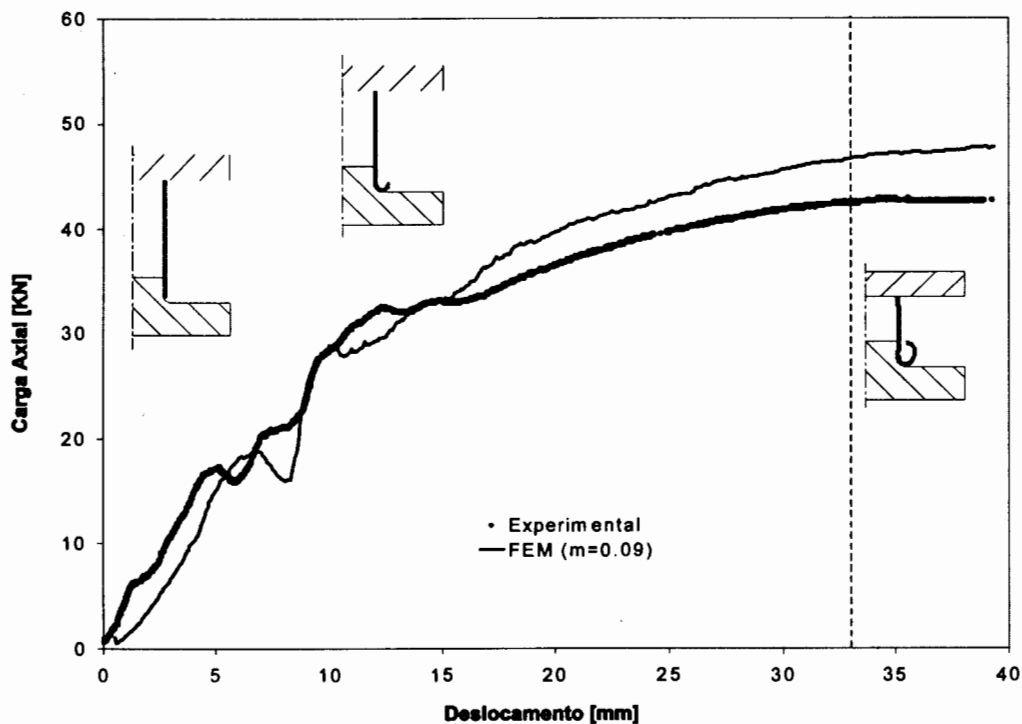


Fig. 7. Evolução teórica e experimental da carga com o deslocamento para o processo de inversão externa de tubos usando uma matriz (Al6060 envelhecido, $r_{cm}/r_0 = 0.278$, $t_0/r_0 = 0.11$, lubrificado com PTFE).

A estimativa teórica de evolução da curva ajusta-se melhor aos resultados experimentais para valores do factor de atrito na gama $m = 0.02-0.09$. Este valor é consideravelmente mais baixo do que aquele que foi obtido através do ensaio de anel e pode ser justificado com base no facto das condições de lubrificação que ocorrem no processo de inversão externa serem diferentes das que ocorrem durante o ensaio de anel [13].

A modelação numérica da evolução da carga com deslocamento para o regime de lubrificação a seco (caso 'sem lubrificante' da fig. 8) foi obtida por intermédio de uma técnica de identificação inversa usando o programa de elementos finitos I-FORM2 a qual revelou um factor de atrito $m = 0.40$. Em face de condições de atrito tão severas, é fácil compreender a ocorrência de instabilidade local em substituição do modo de inversão completo anteriormente obtido (sob condições lubrificadas).

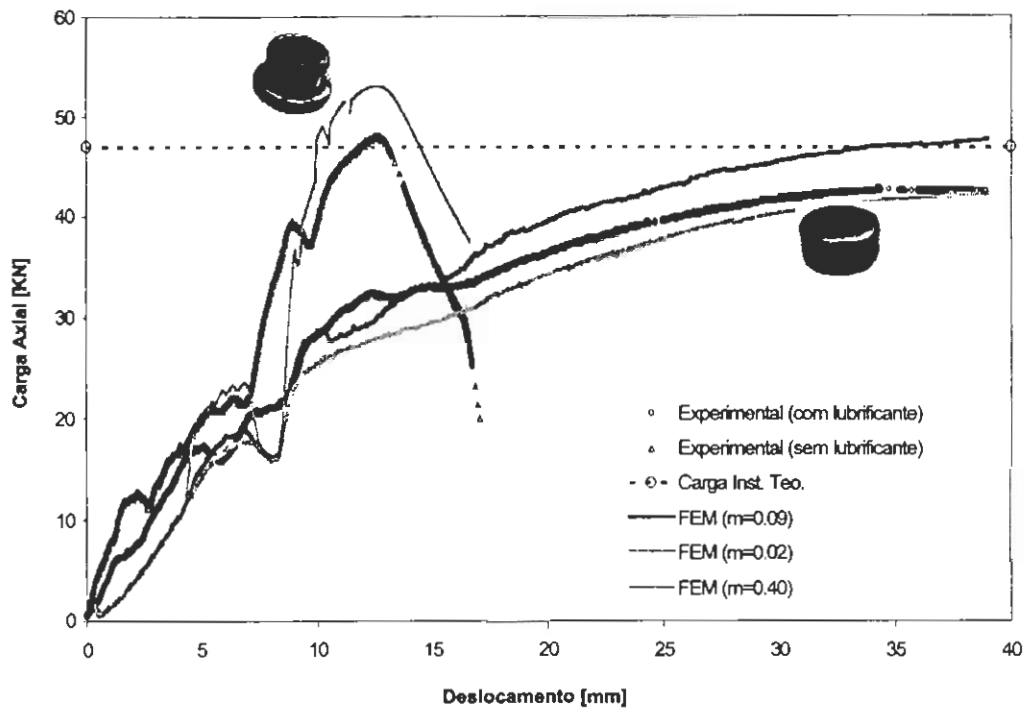


Fig. 8. Evolução teórica e experimental da carga com o deslocamento para o processo de inversão externa sobre diferentes condições de lubrificação, com PTFE e a seco (Al6060 envelhecido, $r_{cm} / r_0 = 0.278$, $t_0 / r_0 = 0.11$).

Uma outra explicação para justificar as diferenças entre os coeficientes de atrito pode estar relacionada com o aumento da pressão do ar que fica aprisionado no interior do tubo à medida que se vai efectuando o deslocamento do prato superior. De facto, a pressão interior actua sobre o lubrificante colocado à entrada da interface de contacto do tubo com a ferramenta podendo ajudá-lo a introduzir-se nessa zona e, portanto, contribuindo para que o filme de lubrificante possa ser mantido em boas condições. É pois admissível que o factor de atrito utilizado na modelação numérica da inversão externa de tubos possa estar sobrestimado e que o regime de lubrificação seja significativamente mais favorável.

O efeito da pressão do ar aprisionado no interior do tubo na geometria final dos componentes e na evolução da carga com o deslocamento foi analisado através de um conjunto adicional de matrizes redesenhadas por forma a permitir variações no regime de lubrificação (fig. 9).

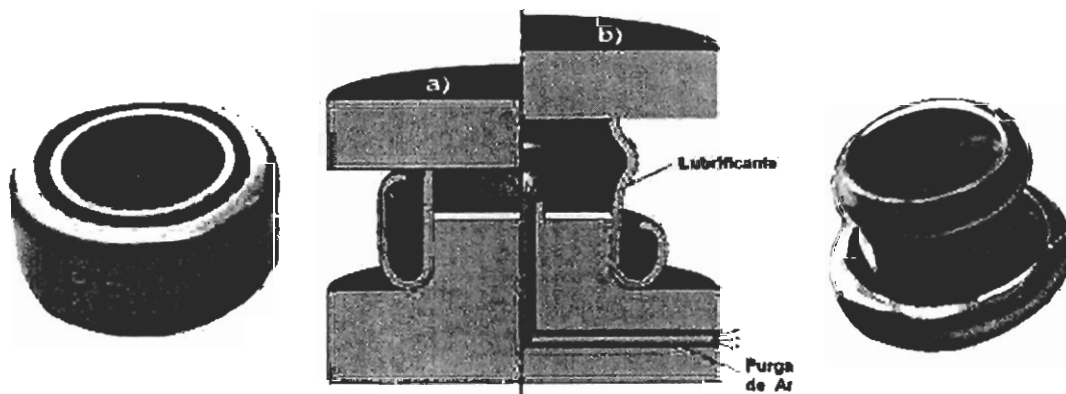


Fig. 9. Representação esquemática da ferramenta para inversão externa de tubos e fotografias de componentes obtidos (Al6060 envelhecido, $r_{cm} / r_0 = 0.278$, $t_0 / r_0 = 0.11$, lubrificado com PTFE); a) Ferramenta convencional, b) Ferramenta redesenhada (com purga de ar).

Em face das fig. 9 e 10, é possível afirmar-se que pode ocorrer um modo de instabilidade local indesejável para a relação geométrica $r_{cm}/r_0 = 0.278$, que sob condições adequadas de lubrificação, dariam sempre origem a uma inversão externa bem sucedida.

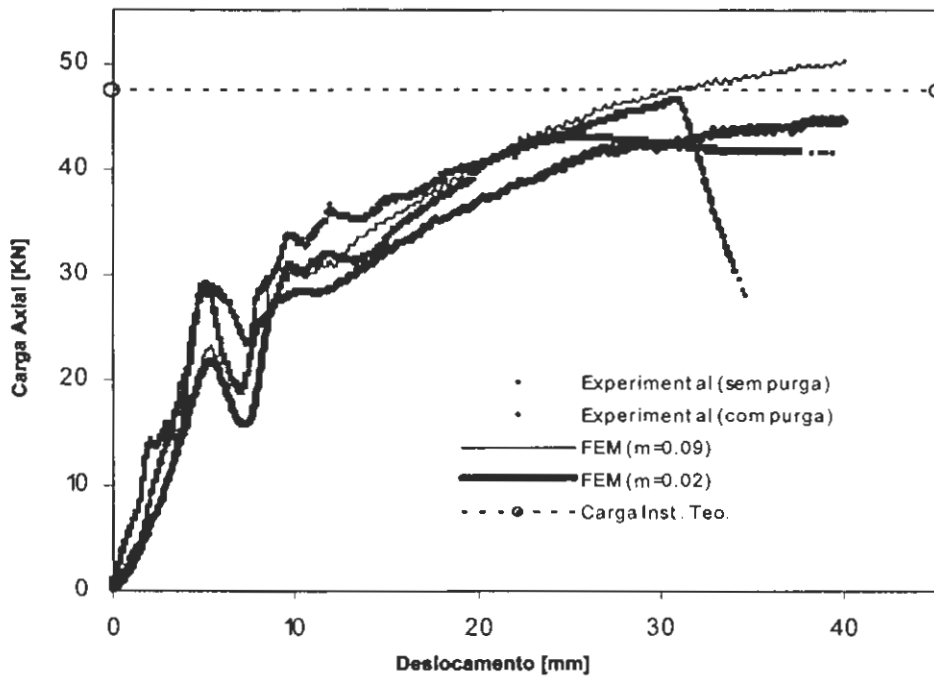


Fig. 10. Evolução experimental e teórica da carga com o deslocamento para o processo de inversão externa usando a matriz padrão e a matriz redesenhada que permite a extracção do ar aprisionado no interior do tubo (Al6060 envelhecido, $r_{cm}/r_0 = 0.278$, $t_0/r_0 = 0.11$).

Durante as experiências efectuadas com valores do raio do canto da matriz mais elevados foi possível observar que os provetes tubulares fissuravam. A distribuição do dano de acordo com o critério de Cockroft-Latham [19] normalizado para os casos representados na fig. 11, indicam na fig.12 valores mais elevados junto as extremidades, I e O, do tubo em estreita concordância com as observações experimentais. No caso da ferramenta que possui um maior rácio, $r_{cm}/r_0 = 0.556$, a previsão de natureza computacional não só confirma a localização (em torno da circunferência) como também o nível de deformação para o qual tem início a fractura.

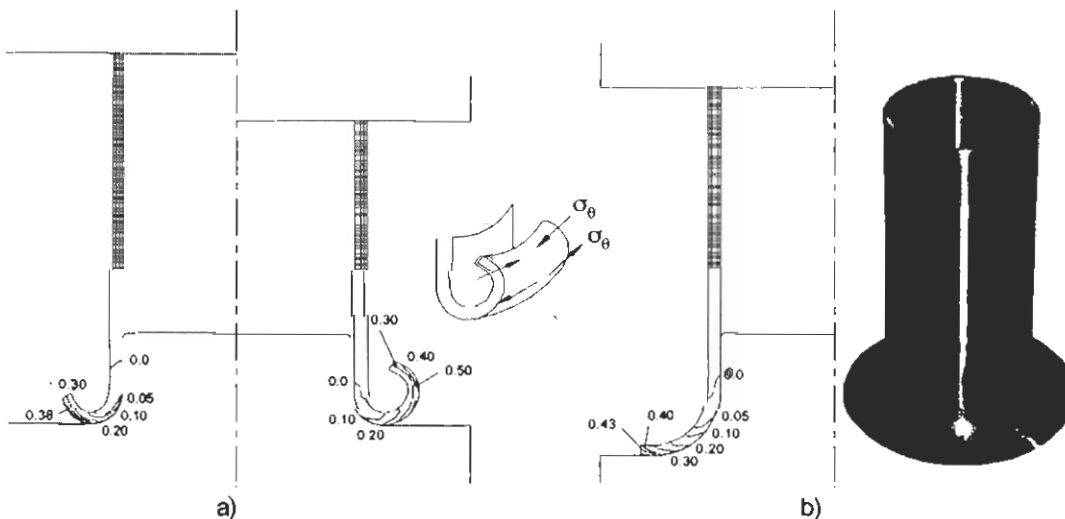


Fig. 11. Distribuição teórica de dano (Cockroft-Latham) em dois casos experimentais onde se verificam diferentes modos de deformação (Al6060 envelhecido $t_0/r_0 = 0.11$, lubrificado com PTFE); a) Inversão completa ($r_{cm}/r_0 = 0.278$), b) Fractura ($r_{cm}/r_0 = 0.556$).

Porém, o resultado indicado para $r_{cm} / r_0 = 0.278$, e a subsequente acumulação de dano que resultaria da continuação da simulação numérica pode ser mal interpretada e até indiciar conclusões erradas. De facto, não se observou qualquer fractura com as ferramentas que possuíam um rácio $r_{cm} / r_0 = 0.278$ (fig. 11 a). A origem deste problema fica a dever-se à inversão das tensões principais, σ_1 e σ_3 , que ocorre enquanto o tubo vira em torno do canto da matriz. Detalhes adicionais podem ser consultados nas seguintes referências [20, 21].

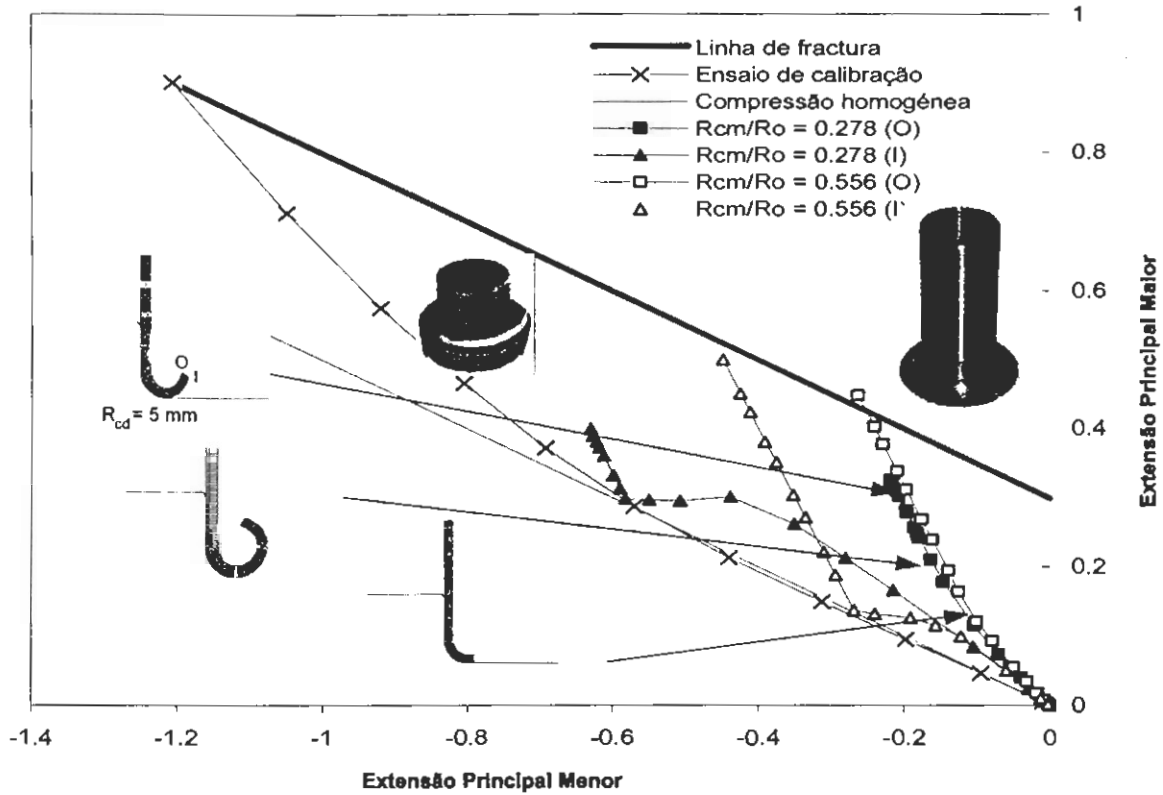


Fig. 12. Espaço bidimensional das extensões contendo os limites de enformabilidade definidos pelas extensões experimentais de fractura e representação das trajectórias de deformação para dois casos experimentais distintos; (Al6060 envelhecido, $t_0 / r_0 = 0.11$, lubrificado com PTFE) com $r_{cm} / r_0 = 0.278$ e $r_{cm} / r_0 = 0.556$.

Esta última conclusão reforça a necessidade da utilização de curvas limite de enformabilidade em conjunção com a análise de trajectórias de deformação de modo a determinar as condições de fractura (fig. 12). De facto, pela observação das trajectórias de deformação obtidas numericamente, para pontos seleccionados na extremidade do tubo, I e O, é possível confirmar se os seus valores permanecem, ou não, no interior da zona de segurança.

Considerando, por exemplo, a trajectória de carregamento para $r_{cm} / r_0 = 0.556$ e $r_{cm} / r_0 = 0.278$ é possível concluir que enquanto o primeiro caso sobe para além da linha de fractura (fig. 12), o segundo mantém-se sempre no interior da região segura devido a uma inversão na trajectória de deformação. Esta conclusão foi corroborada com base em observações experimentais.

A modelação por elementos finitos da inversão interna de tubos foi igualmente avaliada por intermédio da comparação entre os perfis geométricos experimental e teórico. As previsões geométricas experimentais e teóricas apresentam em geral uma boa correlação.

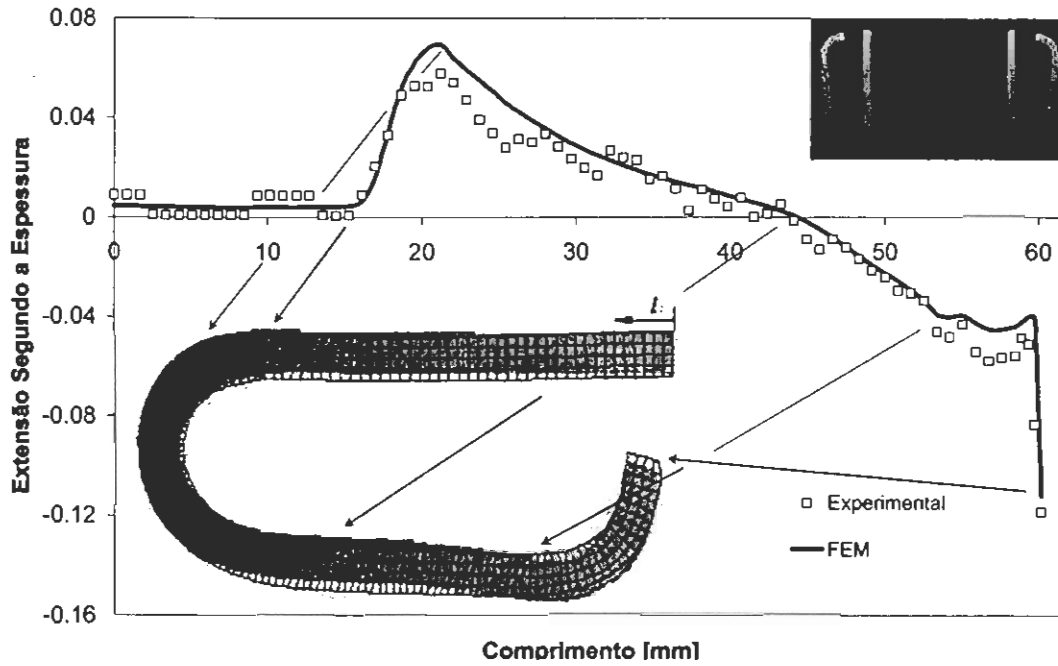


Fig. 13. Distribuição teórica da extensão segundo a espessura para um componente tubular (Al 6060 envelhecido, $r_{cm}/r_{ref} = 0.278$, $t_0/r_{ref} = 0.11$). Do lado esquerdo do gráfico foi acrescentada a malha de elementos finitos após deformação sobreposta à fotografia da secção transversal do componente experimental.

A extensão do estudo teórico-experimental que tem vindo a ser descrito para a totalidade das geometrias consideradas no plano de ensaios experimental permite efectuar a representação gráfica dos limites de enformabilidade do processo por combinação da carga adimensionalizada de enformabilidade após se atingirem condições de regime estacionário, P_i/P_{cr} , com o rácio, r_{cm}/r_0 , entre o raio da matriz e o raio interior do tubo (fig. 14).

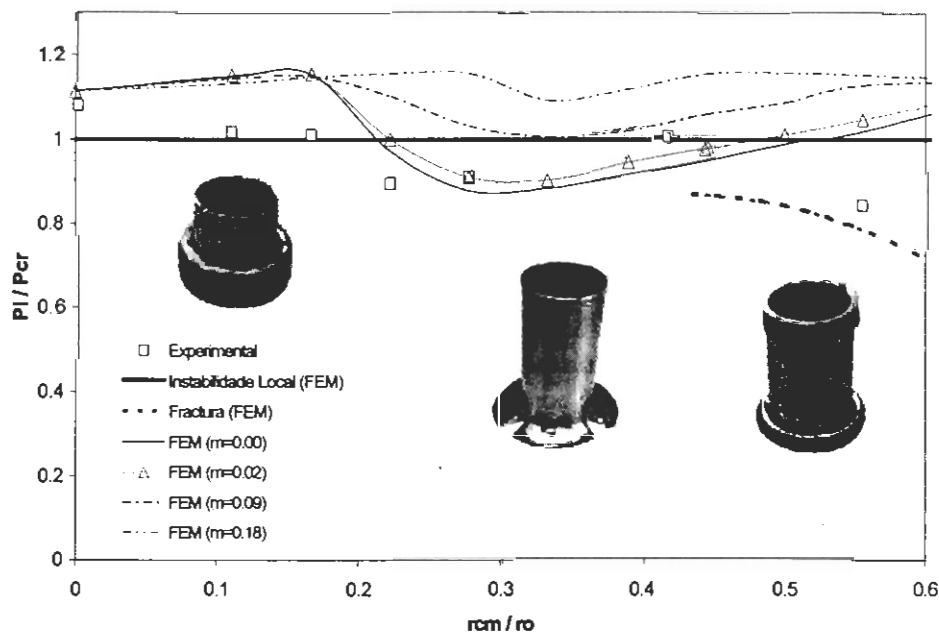


Fig. 14. Diagrama de enformabilidade do processo de inversão externa de tubos usando uma matriz. Apresentação dos modos de deformação obtidos e da carga adimensionalizada do processo, P_i/P_{cr} , em função do rácio r_{cm}/r_0 entre o raio de curvatura da matriz e o raio interior do tubo (Al6060 envelhecido, $t_0/r_0 = 0.11$).

Desenvolvimentos experimentais similares, utilizando provetes de alumínio Al6060 normalizado, permitiram concluir que não deverão ocorrer modos de deformação conducentes à obtenção de peças sem defeitos em toda a gama de valores ensaiados, na medida em que todos os ensaios experimentais deram origem à instabilidade local dos provetes. Este facto aponta para o papel negativo do coeficiente de encruamento do material na enformabilidade de tubos por inversão externa (quanto maior o valor do coeficiente de encruamento pior o comportamento do material).

5. CONCLUSÕES

A análise teórico-experimental da ocorrência de modos inadmissíveis de instabilidade e fractura e da influência do atrito na inversão externa de tubos de parede fina permite concluir que o ar aprisionado e progressivamente pressurizado no interior do tubo, devido ao deslocamento do punção superior, tem um papel muito importante no mecanismo de lubrificação. Também é possível concluir deste estudo que a modelação da ocorrência de fractura dúctil com base no modelo de dano não-acoplado de Cockcroft-Latham se revela inconsequente e até perigosa para o projecto de componentes tubulares de parede dupla. De facto, a fractura é essencialmente controlada pela perda de espessura da parede do tubo decorrente da expansão progressiva na direcção tangencial e, no estudo realizado, apenas a utilização de curvas limite de enformabilidade se revelou capaz de prever adequadamente a ocorrência de fractura.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Guist L. R. and Marble D. P., *Prediction of the inversion load of a circular tube*, NASA TND 3622 (1966).
- [2] Al-Hassani S., Johnson W. and Lowe W. T., «Characterization of inversion tubes under axial loading», *J. Mech. Engng. Sci.*, 14, 370, (1972).
- [3] Al-Qureshi H. A. and Morais G. A., «Analysis of multi-inversion of tube ends», *Design Engng. Conf., ASME Paper No. 77-DE-35*, (1977).
- [4] Reddy T. Y., «Tube inversion – an experiment in plasticity», *Int. J. Mech. Engng. Educ.*, 17, 277, (1989).
- [5] Reddy T. Y., «Guist and Marble revisited – On the natural knuckle radius in tube inversion», *Int. J. Mech. Sci.*, 34, 761, (1992).
- [6] Reid S. R., «Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers», *Int. J. Mech. Sci.*, 35, 1035, (1993).
- [7] Yang H. and Li S., «Process optimization of the inverting-forming of thin-walled tubes with radiused dies», *J. Mat. Proc. Techn.*, 52, 489, (1995).
- [8] El-Domiatiy A., «Curling of thin tubes: analytical and experimental study», *J. Mat. Engng. Perform.*, 6, 481, (1997).
- [9] Sekhon G. S., Gupta N. K. and Gupta P.K., 2003. «An analysis of external inversion of round tubes», *J. Mat. Proc. Techn.*, 133, 243.
- [10] Yang H, Zhichao S. and Yingjun J., «FEM analysis of mechanism of free deformation under dieless constraint in axial compressive forming process of tube», *J. Mat. Proc. Techn.*, 115, 367, (2001).
- [11] Sun Z. and Yang H, «Development of a finite element simulation system for the tube axial compressive precision forming process», *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 42, 15, (2002).
- [12] Rosa P.A.R., Baptista R.M.S.O., Rodrigues J.M.C., e Martins P.A.F., «An investigation on the external inversion of thin-walled tubes using a die», *International Conference Plasticity 2003, Canada*, 394-396 (2003).
- [13] Rosa P.A.R., Rodrigues J.M.C., e Martins P.A.F., «External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation», *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 35, 787-796, (2003).
- [14] Rosa P.A.R., Baptista R.M.S.O, Rodrigues J.M.C., e Martins P.A.F., «Internal inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation», *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 44, 775-784 (2004).
- [15] Jacob Lubliner, *Plasticity Theory*, Macmillan, 295-305 (1990)
- [16] F.R. Shanley, «Inelastic column theory», *J. Aerosol Sci.* 14 (1947) 261.
- [17] Ugural A.C., *Stresses in Plates and Shells*, MacGraw-Hill, 290-293, (1960)
- [18] Allan T., «Investigation of the behaviour of cylindrical tubes subject to axial compressive forces», *J. Mech. Engng. Sci.*, 10, 182, (1968).
- [19] Cockcroft, M. G., Latham, D. J., «Ductility and the Workability of Metals», *J. Inst. Met.*, 96, 33-39, (1968)
- [20] B.P.P.A. Gouveia, J.M.C. Rodrigues, P.A.F. Martins, «Ductility fracture in metalworking: experimental and theoretical research», *J. Mat. Proc. Techn.*, 101, 52-63, (2000).
- [21] B.P.P.A. Gouveia, J.M.C. Rodrigues, P.A.F. Martins, «Fracture predicting in bulk metal forming», *Int. J. Mech. Sci.*, 38, 361-372, (1996)

EXTERNAL INVERSION OF THIN-WALLED TUBES USING A DIE

Abstract: This work presents a comprehensive theoretical and experimental investigation of the external inversion of thin-walled tubes using a die with the purpose of understanding the influence of interface friction on the plastic deformation mechanisms and of the strain path and material damage on the occurrence of ductile fracture. Fundamental research was undertaken by using virtual prototyping modelling techniques based on the finite element method. The experimental work was performed on aluminium Al6060 (annealed and natural aged) industrial tubes.