

MODELO DE DEFORMAÇÃO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL EM SECÇÕES TUBULARES

Elza M. Fonseca^{1*}, Luísa M. Barreira² Robertt A. Valente³ e Francisco Q. Melo³

1: CENUME-IDMEC
Instituto Politécnico de Bragança
5301-857 Bragança
e-mail: efonseca@ipb.pt web: <http://www.ipb.pt>

2: Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
5301-857 Bragança
web: <http://www.ipb.pt>

3: Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro
3810-193 Aveiro
web: <http://www.ua.pt>

Palavras-chave: tubagem, deflexão, colapso, ovalização.

Resumo. Neste artigo apresenta-se um modelo numérico e experimental para a análise de secções tubulares quando submetidas a carregamentos transversais. O objectivo consiste na avaliação da integridade estrutural destes elementos função da sua resistência à deflexão através do seu comportamento para além do domínio elástico. O modelo numérico baseia-se na utilização de elementos sólidos com características de não linearidade geométrica e material utilizando o programa Ansys. O modelo experimental resulta de ensaios efectuados em componentes com as mesmas características para a comparação de resultados.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas tubulares têm elevada importância tecnológica em aplicações variadas: instalações de água, redes de segurança, ar comprimido, distribuição de gás. Uma tubagem submetida a uma pressão externa suficientemente elevada pode vir a traduzir-se num problema de estabilidade ou mesmo no seu colapso estrutural através das grandes deformações ocorridas. Este tipo de problemas podem surgir em tubagens submersas por água, em tubagens soterradas, em tubagens em contacto com outros materiais ou ainda durante o transporte ou instalação destes sistemas. Quando a tensão limite de resistência do material é ultrapassada podem ocorrer diferentes modos de falha ou deformações permanentes traduzindo-se na ovalização da secção recta tubular. No projecto de estruturas submetidas a este tipo de solicitação externa são necessários dois tipos de análises respeitantes ao limite de resistência do material e à sua deflexão. A deformação numa secção tubular ocorre para qualquer carregamento e o colapso da estrutura verifica-se por vezes mesmo quando o estado de tensão não atingiu o limite de resistência do material. Assim para a análise dos modos de falha na secção tubular é necessário uma avaliação da sua forma deformada. A utilização de técnicas experimentais e numéricas torna possíveis estudos neste tipo de geometrias, com os problemas decorrentes da ovalização e empenamento quando estes componentes são solicitados. Salientam-se alguns trabalhos realizados por investigadores nestas áreas: [Bathe e Almeida (1982)], [Wilczek (1984)], [Thomson (1980)], [Melo (1992-1997)] e mais recentemente [Fonseca (2002-2006)] entre outros autores. A motivação do estudo e da análise deste tipo de estruturas traduz-se na verificação dos fenómenos de ovalização decorrentes do comportamento não linear e geométrico do material, em função de uma solicitação externa incremental, utilizando um modelo numérico e experimental com características similares.

2. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi efectuado através do programa Ansys. O elemento finito sólido utilizado é o Solid45, elemento estrutural 3D com 8 nós e três graus de liberdade por nó. Este elemento está preparado para modelação plástica, grandes deformações e grandes deslocamentos.

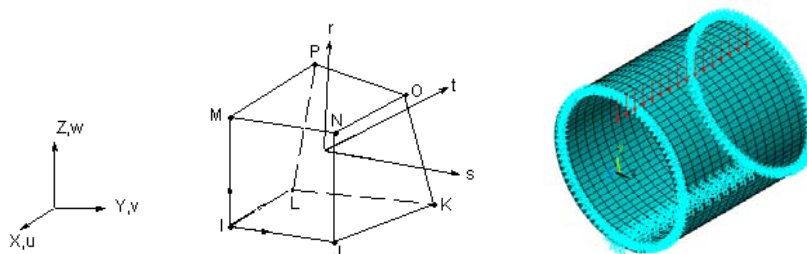


Figura 1. Elemento Solid45 do Ansys e geometria em estudo.

Esta análise foi efectuada com base na modelação não-linear do material, através da utilização da curva tensão-deformação do material, verificada previamente em ensaios. Implementou-se uma relação incremental da carga para que o modelo aguentasse a maior solitação possível até manter o equilíbrio e se pudesse observar o comportamento plástico da estrutura com grandes deslocamentos.

3. MODELO EXPERIMENTAL

Foram efectuados ensaios em tubos de aço soldados longitudinalmente, com extremidades lisas, galvanizados e da série média, cujo diâmetro exterior é de 165 mm e a espessura da parede igual a 5 mm, conforme a norma DIN 2440. Na realização dos ensaios previstos neste trabalho, foram necessárias duas etapas distintas: a análise das propriedades do material e a medição dos valores de deslocamentos e tensões nos tubos solicitados incrementalmente.

3.1. Análise das propriedades mecânicas do material

Para a verificação das propriedades mecânicas do material foram efectuados vários ensaios de tracção em provetes normalizados à temperatura ambiente segundo a norma NP EN 10 002-1. A figura 2 representa as fases de execução dos ensaios de tracção.

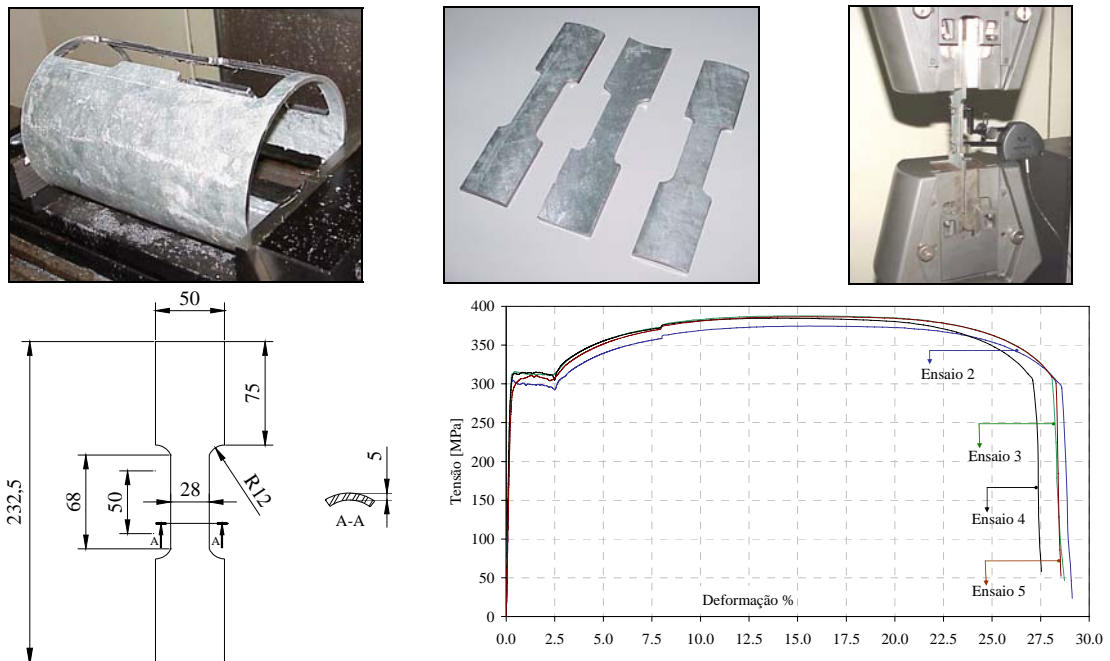


Figura 2. Sistema experimental utilizado na análise das propriedades mecânicas.

Em função dos resultados obtidos, as propriedades mecânicas dos provetes foram

resumidas na tabela 1. Os valores médios obtidos nestes ensaios são utilizados na análise numérica.

Nº Provede	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão Última [MPa]
2	112.05	297.34	374.30
3	109.26	311.39	387.53
4	109.63	302.73	384.46
5	103.13	271.60	386.38
Média	108.52	295.77	383.17

Tabela 1. Resultados dos ensaios.

3.2. Análise da deformação tubular

O caso em estudo é representado na figura 3, um componente tubular de aço submetido a uma carga distribuída F por unidade de comprimento, com as extremidades livres.

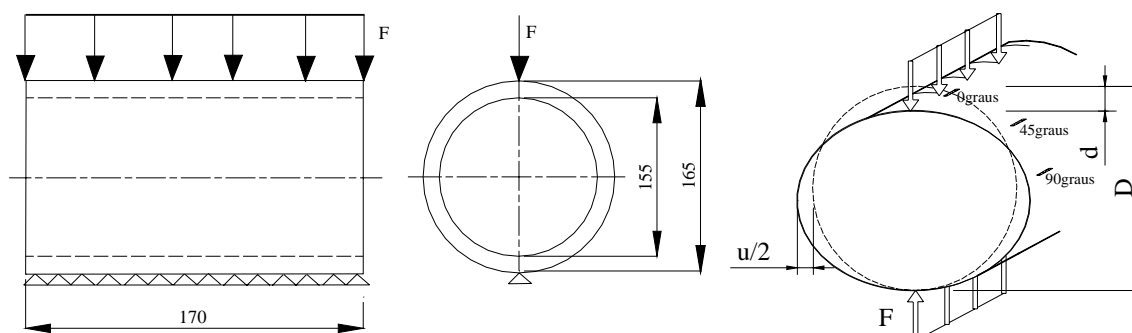


Figura 3. Parâmetros geométricos da estrutura tubular.

Para a verificação da integridade estrutural realizaram-se ensaios de forma a avaliar o comportamento para além do domínio elástico. O procedimento experimental está representado na figura 4. Utilizou-se uma célula de carga para a medição da carga, através de um sistema hidráulico. Os deslocamentos foram obtidos recorrendo a um sistema de aquisição de dados utilizando transdutores de deslocamentos. Para a medição das deformações utilizou-se a extensometria em direcções definidas na secção recta do tubo.

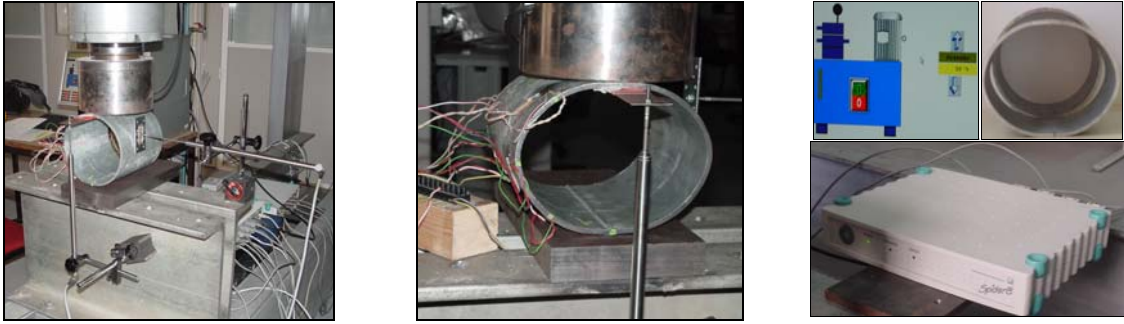


Figura 4. Sistema experimental utilizado na análise da deformação tubular.

4. RESULTADOS

Pretende-se obter o valor do deslocamento vertical d no topo da secção recta do tubo e o deslocamento lateral u , função de uma carga F aplicada conforme figura 3. O valor teórico para o cálculo dos deslocamentos pode ser obtido em função de uma força concentrada P transversal, utilizando o teorema de Castigliano, conforme enunciado por [Gobetti (2001)]:

$$d = - \left[\frac{\text{Pr}^3(\pi^2 - 8)}{8\pi EI} + \frac{\text{Pr} \pi}{8GAm} + \frac{\text{Pr} \pi}{8EA} \right] \quad (1)$$

$$u = - \left[\frac{\text{Pr}^3(4 - \pi)}{4\pi EI} + \frac{\text{Pr}}{4GAm} - \frac{\text{Pr}}{4EA} \right] \quad (2)$$

Neste caso considerou-se: $I = Lt^3/12$, $A = tL$, $G = E/[2(1+\nu)]$ e $m = 9/10$ que é o factor de correcção para a carga P .

A ovalização da secção tubular é calculada em função do resultado da modificação de um círculo perfeito numa elipse através da expressão:

$$ov = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% = \frac{(D + 2u/2) - (D - d)}{D} \times 100\% \quad (3)$$

Na figura 5 representa-se o deslocamento vertical obtido, função da carga F . Os resultados obtidos para a parte linear dos ensaios realizados, são comparados com os resultados obtidos utilizando a solução analítica equação 1. É possível verificar que os tubos ensaiados possuem uma rigidez tubular igual a $F/d = 29.5$ [kN/m²], verificada em função da zona elástica da curva F-d, como proposto por [Watkins (2000)]. Dado o incremento de carga foi possível registar-se a evolução dos deslocamentos para além do regime elástico até um valor máximo de carregamento. Estes foram comparados com o modelo numérico proposto.

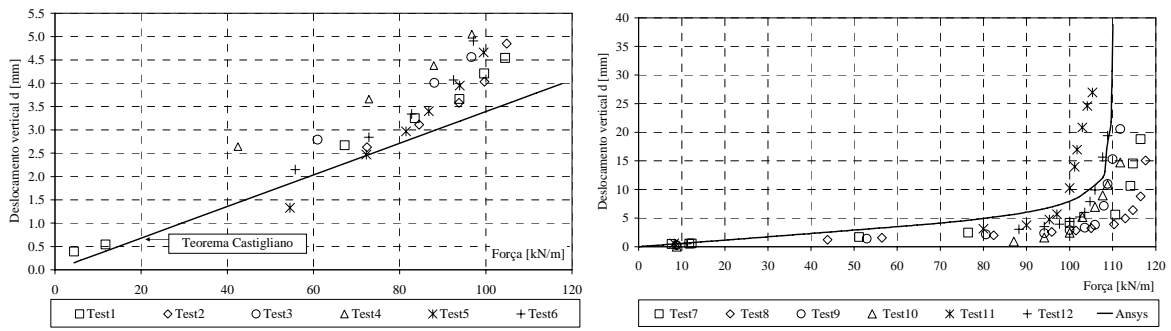


Figura 5. Deslocamento vertical no tubo, em regime linear e não linear.

Na figura 6 representa-se o deslocamento horizontal função da carga F . Na parte linear os ensaios realizados são comparados com os obtidos utilizando a solução analítica equação 2. Na solução não linear verifica-se que o comportamento é semelhante à curva analisada anteriormente.

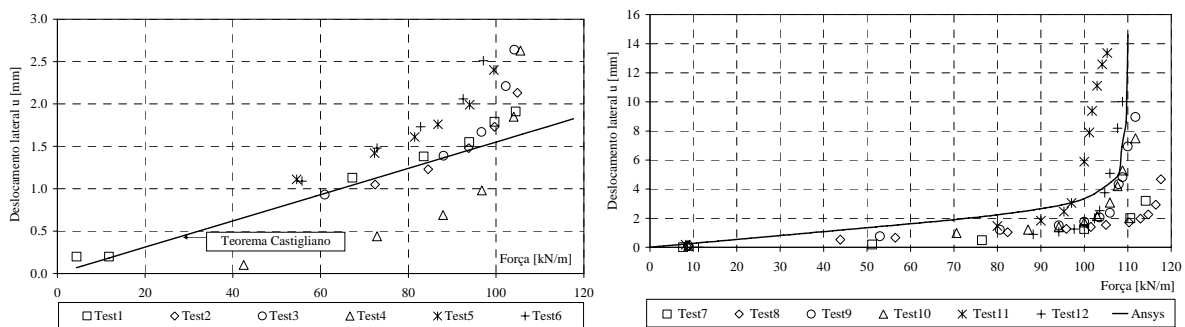


Figura 6. Deslocamento lateral no tubo, em regime linear e não linear.

Os resultados apresentados permitem concluir que existe uma concordância entre os valores experimentais e os valores numéricos. Verifica-se também que a lei de Castigliano só deve ser utilizada para valores muito baixos do deslocamento. A partir de uma carga de 100kN/m, imposta em componentes deste tipo, o sistema torna-se instável e os deslocamentos aumentam muito rapidamente. Em função dos deslocamentos obtidos é possível verificar-se o fenómeno de ovalização (equação 3) da secção recta do tubo, função do carregamento imposto, para todos os ensaios efectuados e comparação com os resultados obtidos no modelo numérico.

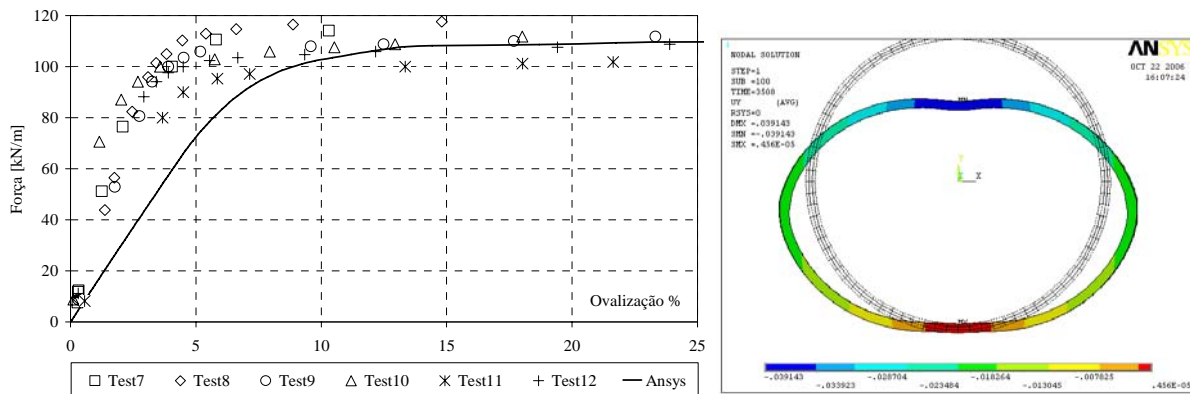


Figura 7. Ovalização no tubo, função da carga aplicada.

Verifica-se que na zona elástica a secção recta do tubo tem tendência a ovalizar muito pouco. A partir do valor de carga considerado crítico, no sistema em análise, verifica-se uma elevada tendência na ovalização da secção tubular. Esta tendência observa-se a partir do momento em que se analisa o comportamento plástico da estrutura, decorrente do seu comportamento não linear material. Na figura 8 observam-se os valores da deformação na superfície do tubo, para duas direcções angulares diferentes, com o programa Ansys e com a utilização da extensometria. Estes resultados permitem verificar que o nível de deformações na direcção a 45° é inferior à da direcção de 90°, como seria de esperar.

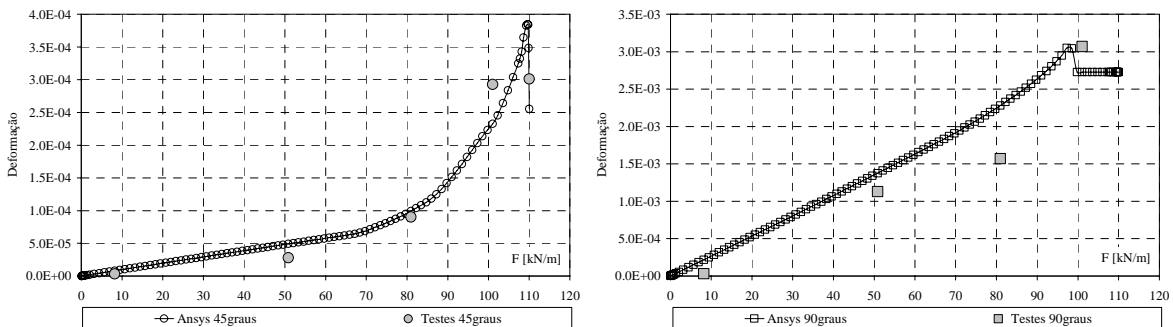


Figura 8. Deformações obtidas na secção tubular função do carregamento imposto.

12. CONCLUSÕES

A complexidade na análise de componentes do tipo mencionado exige o recurso a métodos numéricos de elevado desempenho, pelo que se recorreu à utilização do método dos elementos finitos. Na análise numérica efectuada verificou-se a necessidade da utilização de um modelo com características não lineares materiais e de grandes deslocamentos. Este modelo numérico tornou possível simular e aproximar os resultados obtidos no domínio

experimental. A técnica experimental utilizada é baseada em soluções não muito complexas pelo que se traduzem numa metodologia possível de ser utilizada. Este trabalho permitiu calcular a carga crítica a partir do qual o componente permanece em regime instável, a rigidez tubular através da resistência à deflexão e verificar o fenómeno de ovalização que acontece neste tipo de solicitações. Estes parâmetros são importantes na concepção de estruturas deste tipo, tendo em vista as suas aplicações.

AGRADECIMENTOS

E.M.M. Fonseca agradece o apoio da Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia (SFRH/BPD/26172/2005).

REFERÊNCIAS

- [1] Bathe K.J., Almeida C.A., *A Simple and Effective Pipe Elbow Element – Pressure Stiffening Effects*, Journal of Applied Mechanics, Vol.49, pp.914-916, (1982).
- [2] Wilczek E., *Statische Berechnung eines Rohrkrümmers mit Realen Randbedingungen*, Ph.D. thesis, Technischen Hochschule Aachen, Aachen, (1984).
- [3] Thomson G., *The Influence of End Constraints on Pipe Bends*, PhD Thesis, University of Strathclyde, Scotland, UK, (1980).
- [4] Melo F.J.M.Q., Castro P.M.S.T., *A Reduced Integration Mindlin Beam Element for Linear Elastic Stress Analysis of Curved Pipes Under Generalized In-Plane Loading*, Computers & Structures, Vol.43/4, pp.787-794, (1992).
- [5] Melo F.J.M.Q., Castro P.M.S.T., *The Linear Elastic Stress Analysis of Curved Pipes Under Generalized Loads Using a Reduced Integration Finite Ring Element*, Journal of Strain Analysis, Vol.32/1, pp 47-59, (1997).
- [6] Fonseca E.M.M., Melo F.J.M.Q., Oliveira C.A.M, *Determination of Flexibility Factors on Curved Pipes with end Restraints Using a Semi-Analytic Formulation*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.79/12, pp 829-840, (2002).
- [7] Elza M.M. Fonseca, Carlos A.M. Oliveira, Francisco Q. Melo, *Desenvolvimento de novos modelos para a análise de tensões e de deformações em estruturas tubulares*, Revista da APAET - Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, ISSN-122922, Vol.12, pp.155-161, (2006).
- [8] E.M.M. Fonseca, F.J.M.Q. de Melo and C.A.M de Oliveira, *Trigonometric function used to formulate a multi-nodal finite tubular element*, Journal Mechanics Research Communications, Vol.34, pp.54-62, (2006).
- [9] Gobetti, A., Nascimbene, R., *Elasto-plastic, nonlinear analysis of a locking-free shear/flexible curved beam element*, ECCM-European Conference on Computational Mechanics, Poland, (2001).
- [10] Watkins R.K., Anderson L.R., *Structural mechanics of buried pipes*, CRC Press, New York, (2000).