



ASSOCIAÇÃO  
PORTUGUESA  
DE ANÁLISE  
EXPERIMENTAL  
DE TENSOES



**06**

**CONGRESSO NACIONAL mecânica experimental**  
**ponta delgada 27-29 julho 2005**

EDITORES

Mário A. P. Vaz (FEUP/INEGI) | José A. Simões (U Aveiro) | Paulo A. G. Piloto (IPB-ESTIG)  
Rui M. Guedes (FEUP/INEGI) | Arlindo Silva (IST) | M. João Barros (U Açores)

# 6.º CONGRESSO NACIONAL EM MECÂNICA EXPERIMENTAL

PONTA DELGADA 27 - 29 DE JULHO 2005  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

## RESUMO DAS COMUNICAÇÕES

### ORGANIZADO POR:



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE  
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES**

---

Sede: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

Tlp: 21 844 3225; Fax: 21 844 3021; e-mail: [apaet@lnec.pt](mailto:apaet@lnec.pt); <http://www-ext.lnec.pt/APAET/>

NIF 501 699 546

Contacto: Carolina Rego, Secretariado

**6.º CONGRESSO NACIONAL EM MECÂNICA EXPERIMENTAL  
PONTA DELGADA 27 A 29 DE JULHO DE 2005-07-04**

**DEPÓSITO LEGAL: 229793/05  
COPYRIGHT ©2005 POR INEGI  
ISBN: 972-8826-09-5**

**EDITORA: INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL  
RUA DO BARROCO, 174  
4465-591 LEÇA DO BALIO  
PORTUGAL  
TELF: +351 22 957 8714  
FAX: +351 22 953 7352  
E-MAIL: [INEGI@INEGLUP.PT](mailto:INEGI@INEGLUP.PT)  
URL: [WWW.INEGL.PT](http://WWW.INEGL.PT)**

**IMPRESSÃO E ACABAMENTO: GRÁFICOS REUNIDOS, LDA.**

**COMISSÃO ORGANIZADORA**

MÁRIO A. P. VAZ (FEUP/INEGI)  
JOSÉ A. SIMÕES (U AVEIRO)  
PAULO A. G. PILOTO (IPB-ESTIG)  
RUI M. GUEDES (FEUP/INEGI)  
ARLINDO SILVA (IST)  
M. JOÃO BARROS (U AÇORES)  
MARIA DE LURDES EUSÉBIO (LNEC)  
J. F. SILVA GOMES (FEUP/INEGI)  
MÁRIO SANTOS (INETI)

**COMISSÃO CIENTÍFICA**

A. CARDON (BÉLGICA)  
A. CORREIA DA CRUZ (ISQ)  
A. S. MIRANDA (UM)  
A. T. MARQUES (FEUP)  
A. DE FREITAS MENESES (U AÇORES)  
A. BARROS (UM)  
C. NAVARRO (ESPAÑA)  
EMA COELHO (LNEC)  
L. SIMAS DINIS (FEUP)  
F. Q. MELO (U AVEIRO)  
J. F. SILVA GOMES (FEUP)  
J. F. DIAS RODRIGUES (FEUP)  
J. H. SEABRA (FEUP)  
J. J. L. MORAIS (UTAD)  
J. M. CATARINO (LNEC)  
J. M. CIRNE (FCTUC)  
J. M. SILVA (IST)  
M. C. CRUZ AZEVEDO  
M. JOÃO BARROS (U AÇORES)  
MÁRIO SANTOS (INETI)  
N. F. RILO (FCTUC)  
PAULO A. G. PILOTO (IPB)  
S. A. MEGUID (CANADÁ)

**PATROCÍNIOS**

CÂMARA MUNICIPAL DE PONTA DELGADA  
CASA DOS AÇORES DO NORTE  
COMISSÃO DE TURISMO DA REGIÃO DOS AÇORES  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES  
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL  
FUNDAÇÃO PARA A CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL  
SPECTRIS PORTUGAL  
MRA

## *Prefácio*

*A Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), cumprindo os seus objectivos de divulgação e promoção das técnicas de Mecânica Experimental, organiza mais um dos seus encontros Nacionais. Este fórum é o primeiro a merecer a designação de Congresso e a ter todos os trabalhos submetidos sujeitos a revisão.*

*Mantendo a intenção de descentralizar estes encontros, onde normalmente participam os mais reputados investigadores nacionais com interesses neta área, a Direcção da APAET decidiu que o 6.º Congresso seria realizado nos Açores. Desta forma a reunião decorre numa das partes mais agradáveis do território nacional e junto da comunidade académica que integra a Universidade dos Açores. Esta Universidade, que cedo aceitou ser anfitriã do 6.º Congresso, fundada há cerca de três décadas, é hoje reconhecidamente um dos principais pólos de desenvolvimento do arquipélago dos Açores.*

*Este Congresso reúne 78 contribuições das várias áreas do conhecimento que recorrem às técnicas da Mecânica Experimental nas suas actividades de investigação. Pela qualidade e número dos trabalhos recebidos este encontro é já uma agradável surpresa.*

*Finalmente envio os meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para que este congresso fosse possível: a Direcção da APAET, as Comissões Organizadora e Científica, os patrocinadores, a Universidade dos Açores e todos os participantes pela qualidade das suas contribuições.*

*Resta agora esperar que aquilo que já é uma grata surpresa se transforme num agradável 6.º Congresso de Mecânica Experimental.*

*Mário A. P. Vaz  
Presidente da Comissão Organizadora*

## DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MODELOS PARA A ANÁLISE DE TENSÕES E DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS TUBULARES

Elza M. M. Fonseca<sup>1</sup>; Francisco Q. Melo<sup>2</sup>; Carlos A. M. Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>2</sup> Secção Autónoma de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

<sup>3</sup> Depto. de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### RESUMO

As estruturas tubulares têm elevada importância tecnológica em aplicações abrangendo variados campos, como é o caso do transporte de fluidos para assegurar conforto nas comunidades (água e aquecimento), produção de energia e processos químicos. As aplicações avançadas como a produção de energia nuclear, a indústria aeronáutica e aeroespacial, estão sujeitas a elevados padrões de segurança impostos tanto na fase do projecto, como na das inspecções a efectuar a este tipo de estruturas. Não só a melhoria no desenho e as soluções construtivas para os componentes de estruturas de tubagens têm contribuído para os progressos verificados no projecto; com efeito, o desenvolvimento de materiais capazes de suportar as mais severas condições de serviço tem importante implicação não só na a redução do custo total do projecto (por economia de

peso global, uma vez que a rigidez estrutural seja melhorada) mas também no aumento da segurança e fiabilidade.

A ligação entre os vários componentes de uma tubagem (elementos rectos, curvos, flanges, reservatórios), as adversidades a que estão sujeitos, as altas temperaturas, os carregamentos diversos, o ambiente de exposição, o próprio transporte e a instalação de tubagens, traduz-se numa complexidade para o cálculo de tensões e deformações podendo originar os mais variados problemas. Áreas distintas de actuação como a mecânica dos materiais, a mecânica da fractura, análise de vibrações, entre outras, poderão de alguma forma contribuir para a minimização atempada de algumas ocorrências. A figura 1 representa algumas destas aplicações industriais, de estruturas deste tipo.

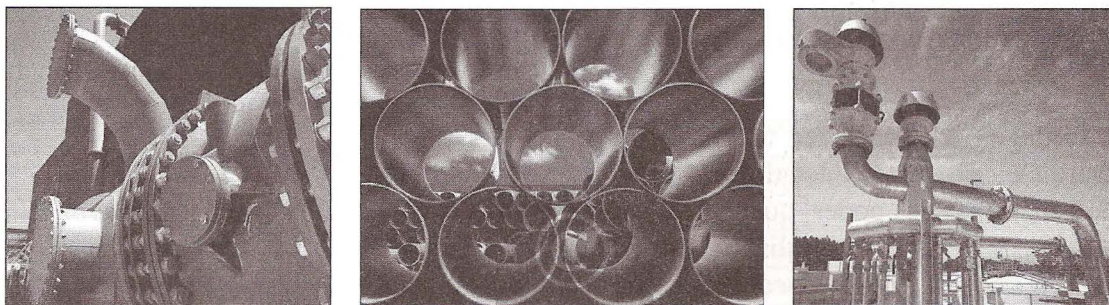


Fig. 1 - Aplicações industriais de sistemas tubulares.

Muitos são os autores com relevantes contribuições que se destacam no estudo de acessórios curvos utilizando técnicas analíticas e experimentais, entre outros, [Theodore von Kármán (1911)],

[Vigness (1943)], [Cheng e Thailer (1970)] e mais tarde [Thomson (1980)]. Recentemente, novas contribuições utilizando técnicas numéricas, tornaram possíveis estudos mais complexos neste tipo de geometrias, consideradas como elementos

de casca fina e com os problemas decorrentes da ovalização e empenamento quando as estruturas são solicitadas. Salienta-se [Bathe e Almeida (1982)], [Wilczek (1984)], [Melo (1992-1997)] e mais recentemente [Fonseca (2002-2005)].

Este trabalho representa um conjunto de formulações alternativas na análise e na obtenção de campos de tensão e de deformação em estruturas tubulares consideradas de espessura fina.

Desenvolveram-se elementos finitos baseados na modelação unidimensional de sistemas tubulares, utilizando um campo de deslocamentos resultado da combinação de graus de liberdade para um elemento de viga indeformável e graus de liberdade na capacidade de distorção da secção tubular. Os elementos considerados apresentam duas secções nodais.

São apresentados vários modelos alternativos, com base em diferentes campos de deslocamentos. Utilizam-se polinómios de ordem diferente ou funções trigonométricas, para a modelação dos deslocamentos nos termos de viga indeformável. Estes deslocamentos são combinados com uma solução de termos da série de Fourier, permitindo assim o cálculo de tensões ou deslocamentos na superfície média da casca do elemento tubular.

Os modelos apresentados são denominados da seguinte forma: modelo 5P (utiliza um polinómio de 5ª ordem e desenvolvimento da série de Fourier), modelo 3P (com um polinómio de 3ª ordem e série de Fourier), modelo 1P (polinómio de 1ª ordem e série de Fourier) e um dos mais recentes modelos TF (utiliza funções trigonométricas e desenvolvimento em série de Fourier) e o outro recente elemento *Ring* (utiliza só funções trigonométricas).

A integração da matriz rigidez é efectuada numericamente na direcção longitudinal do elemento, obedecendo a uma integração exacta na direcção meridional. No uso da integração numérica optou-se em alguns casos pela integração selectiva dos termos da matriz rigidez, sub integrando apenas as parcelas relativas ao corte, evitando assim a sensibilidade ao fenómeno de *locking* quando a integração é completa.

Apresentam-se vários exemplos com a utilização de cada um destes modelos. Nas figuras seguintes representam-se o estado de tensão normal e de corte, obtido para uma secção de um acessório curvo quando solicitado por um conjunto de forças concentradas diametralmente, utilizando os vários modelos referidos.

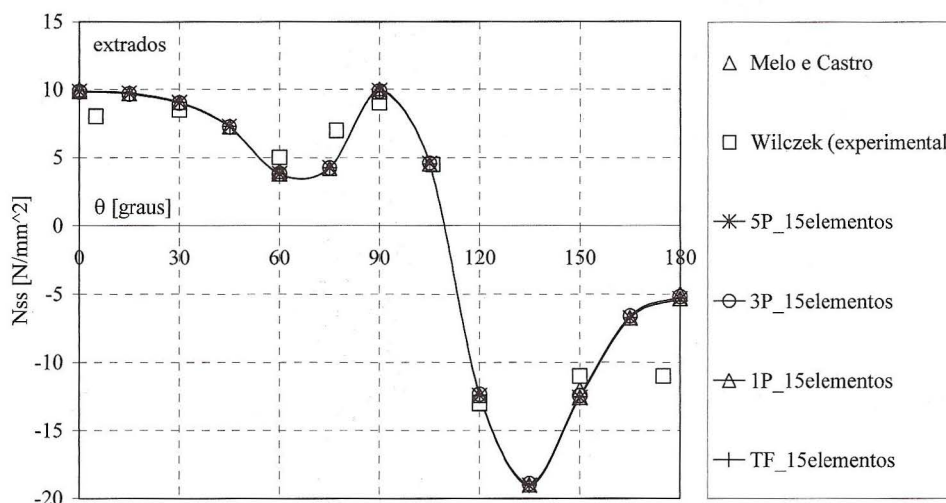


Fig. 2 – Estado de tensão normal numa secção de um acessório curvo.

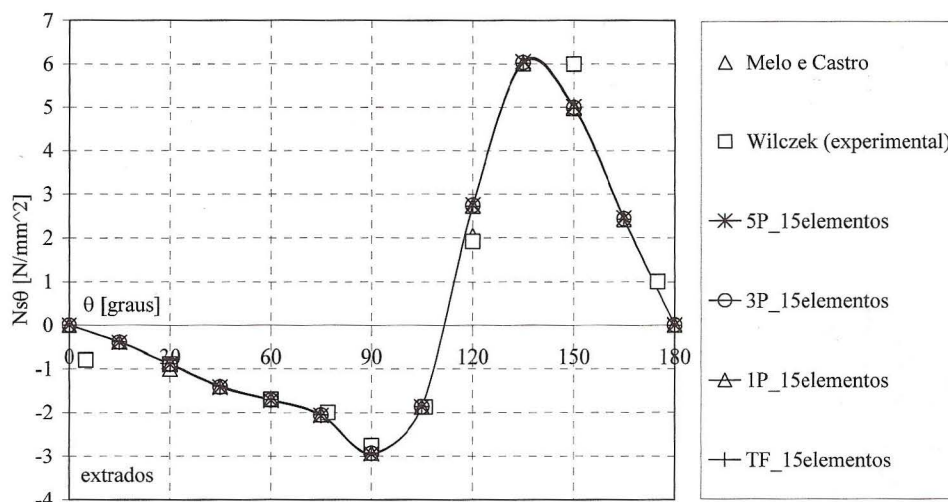


Fig. 3 – Estado de tensão de corte numa secção de um acessório curvo.

A motivação associada à utilização destes novos elementos traduz-se num elevado desempenho computacional no que respeita à facilidade da geração de malhas por serem unidimensionais, na simulação das condições de fronteira aplicáveis e na necessidade de malhas pouco refinadas. Tornam possível a determinação de campos de deslocamentos ao longo de uma linha média do elemento e sobre a superfície de uma casca desses elementos. Possibilitam o cálculo de tensões de membrana em qualquer secção recta da estrutura, permitindo ainda verificar os fenómenos de ovalização e empenamento decorrentes em estruturas desta natureza. Estes elementos permitem de uma forma fácil obter resultados comparáveis com outros elementos finitos mais dispendiosos, como é exemplo, os elementos de casca.

A complexidade, na análise, de estruturas do tipo mencionado, exige o recurso a métodos numéricos de elevado desempenho, pelo que se recorreu à utilização do método dos elementos finitos, desenvolvendo elementos com estas características.

## REFERÊNCIAS

Von Kármán Th., “Über die Formänderung dünnwandiger Rohre insbesondere Federnder Ausgleichrohre“, Zeits V.D.I., Band 55, ss. 1889-1895, 1911.

Vigness L., “Elastic Properties of Curved Tubes“, Trans A.S.M.E., Vol. 65, pp.105-120, 1943.

Cheng D.H. and Thailer M.J., “On the Bending of Curved Circular Tubes“, A.S.M.E., Journ. Eng. Indust., Vol. 92, ser. B, nº1, pp. 62-66, 1970.

Thomson G., “The Influence of End Constraints on Pipe Bends“, PhD Thesis, University of Strathclyde, Scotland, UK, 1980.

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.

Wilczek E., “Statische Berechnung eines Rohrkrümmers mit Realen Randbedingungen“, Ph.D. thesis, Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1984.

Melo F.J.M.Q. and 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 Nº 4, pp.787-794, 1992.

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.

Fonseca E.M.M., Melo F.J.M.Q. and 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.

Fonseca E.M.M., Melo F.J.M.Q. and Oliveira C.A.M., “The Thermal and Mechanical Behaviour of Structural Steel Piping Systems“, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.82/2, pp.145-153, 2005.