



ANÁLISE NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LOCAL DE DUTOS SUJEITOS A CARREGAMENTOS COMBINADOS

Patricia Reis Vitoria

Departamento de Engenharia Civil*
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea
CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
e-mail: patricia_vitoria@hotmail.com

Deane Roehl*

e-mail: droehl@civ.puc-rio.br

Resumo. *Este trabalho apresenta um modelo numérico para a previsão do comportamento de dutos sujeitos a cargas combinadas, tendo em vista os carregamentos que podem ocorrer em campo. São contemplados nestes carregamentos efeitos térmicos, movimentos geotécnicos, pressão de operação. No caso de assentamento de solo, o duto pode estar submetido a efeitos de flexão que resultam em curvaturas excessivas. Como consequência ocorre a flambagem local do duto e desenvolvem-se rugas. Nestas condições podem surgir deformações acima dos valores limites estabelecidos em normas.*

Tendo em vista a natureza tri-dimensional do problema e a investigação do fenômeno de flambagem local, faz-se necessário o entendimento do comportamento tri-dimensional de cascas em condições de grandes deslocamentos e grandes deformações em regime elasto-plástico.

Neste artigo desenvolvem-se alguns modelos com base no método dos elementos finitos para a previsão do comportamento de dutos submetidos a cargas combinadas. Foram tomados como referência alguns resultados de ensaios disponíveis na literatura. Aspectos de modelagem de condições de contorno e carregamento são enfocados.

Palavras-chave: dutos, flambagem local, enrugamento, pós-flambagem

1. INTRODUÇÃO

Dutos são sistemas eficientes e seguros para o transporte de óleo e gás. O estudo da capacidade de carga de dutos em condições de serviço envolvendo o transporte de produtos agressivos e sujeitos a altas temperaturas e pressões ganha atualmente maior interesse dada a severidade das condições de operação e a crescente necessidade de manutenção e adaptação dos dutos existentes às condições atuais de serviço.

Observações em campo indicam que na presença de movimentos geotécnicos, frequentemente são impostos grandes deslocamentos em tubulações enterradas, resultando em grandes deformações localizadas na parede do tubo. Tais deslocamentos podem ser associados à travessia de rios, declives instáveis ou ainda a regiões onde ocorrem congelamento e descongelamento do solo. Com frequência a deformação do tubo resulta na flambagem local e, em regime pós-crítico, rugas se desenvolvem rapidamente apresentando por vezes magnitude significativa. Isto ocorre sob condições de carregamento diversas que englobam desde cargas de gravidade, pressão de operação, efeitos térmicos e movimentos de solos. A representação de estados de carregamento tão complexos

se dá tanto em simulações em laboratório quanto numéricas por combinações de cargas de pressão, axiais e flexão.

Este artigo apresenta uma modelagem numérica com base no método dos elementos finitos para a previsão realística do comportamento físico de tubulações enterradas quando sujeitas à variação de carregamentos combinados que possam surgir em situações de campo.

Em tubulações sob condições reais, o tubo que é uma estrutura de casca tridimensional, usualmente não apresenta deformações excessivas até que tenha desenvolvido uma resposta plástica significativa. Para prever a resposta complexa destas estruturas em regime pós-crítico, tal como a flambagem local ou o enrugamento pós-flambagem, é necessário entender o comportamento de estruturas de casca tridimensional e ser capaz de prever seu comportamento elasto-plástico na presença de grandes deslocamentos e grandes deformações.

Para as análises numéricas foram tomados como referência alguns resultados de testes de laboratório realizados pelo Grupo de Engenharia Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Alberta, Canadá. Para as análises foi utilizado o programa comercial de elementos finitos ABAQUS (Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc. 2000).

2. DESCRIÇÃO DO TESTE EXPERIMENTAL REALIZADO POR MOHAREB *et al.* (1993)

A montagem do ensaio e o carregamento aplicado na série de testes realizada por Mohareb *et al.* (1993) na Universidade de Alberta em 1992 é mostrada na Fig.(1). A técnica usada por Mohareb para o teste é similar à empregada em testes de colunas metálicas com excentricidade em pesquisas de engenharia estrutural. Esta técnica foi usada como alternativa ao teste de flexão em quatro pontos (“four point bend test”), que é o mais comum na indústria de tubulação. Esta inovação mostrou-se eficaz e apresenta economia em relação ao teste de flexão. (Souza, 1994)

Como se pode observar na Figura (1), os extremos do espécime do tubo são soldados em duas placas. As placas são aparafusadas em dois braços de carregamento. A carga axial P é aplicada pela máquina teste MTS. O momento é aplicado no espécime pelo macaco contra os braços de carregamento numa localização excêntrica ao eixo do tubo. Para que a ruga se forme no lado oposto da localização do macaco, as forças aplicadas nos braços de carregamento são compressivas.

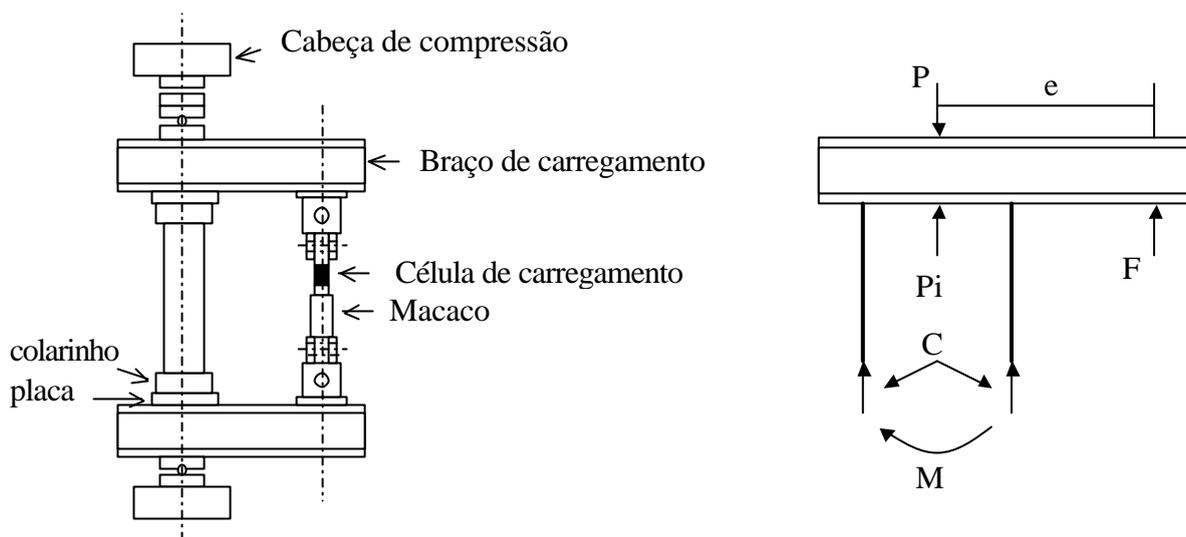


Figura 1. Montagem do ensaio e esquema das cargas atuando longitudinalmente no espécime

De modo a evitar que a plastificação e o enrugamento ocorram nos extremos do corpo de provas foram adicionados aos extremos do espécime, próximo às placas, dois colarinhos. Estes colarinhos, mostrados na Figura (1), são pequenos segmentos de tubo da mesma fonte do espécime. Eles são abertos e ajustados ao redor do espécime, e então soldados não havendo nenhum tipo de conexão

entre o colarinho e o tubo. Apesar do espécime estar submetido a momento uniforme, a deflexão do mesmo introduz uma excentricidade para a carga axial de modo que o maior momento é na verdade no meio do tubo. A combinação destas duas influências foi tal que a flambagem local ocorresse na parte central do espécime em vez de próxima aos extremos do mesmo.

O principal efeito ativo associado com cada teste é a imposição do aumento monotônico da curvatura do tubo. Com esta hipótese de carregamento pretende-se simular a flexão imposta devido ao movimento geotécnico. A medida que os deslocamentos impostos são aplicados, geralmente os demais carregamentos são mantidos constantes e iguais aos seus valores de projeto. A pressão interna é mantida constante por controle manual.

A carga axial é dependente de muitos fatores. Na ausência do movimento do solo na direção tangencial ao tubo, a carga axial é normalmente considerada como a combinação da restrição do efeito do coeficiente de Poisson e da restrição dos efeitos térmicos relativos à instalação da temperatura de operação.

3. SOLUÇÃO ANALÍTICA E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Comparação com os resultados experimentais de Mohareb et al. (1993)

Os resultados analíticos para cada um dos testes estudados são apresentados por meio de gráficos momento - curvatura média entre os extremos do tubo. Neste estudo a curvatura média adotada (k_{m}/L) é a rotação relativa entre dois extremos dos espécimes dividido pelo comprimento do tubo e o momento fletor considerado é a média dos momentos fletores nos dois extremos do segmento. Nesta curva o ponto chamado de ponto crítico é definido como o ponto onde o amolecimento inicia. Geralmente este ponto é indicativo da iniciação do enrugamento.

Adicionalmente a plotagem da configuração deformada do espécime permite a visualização da evolução da forma da estrutura em diversos estágios de carregamento.

3.1.1. Material

Os valores das tensões verdadeiras e deformações logarítmicas obtidos experimentalmente e adotados nos modelos são representados graficamente na Fig.(2). Para os parâmetros elásticos considerou-se o coeficiente de Poisson de 0,264 para os modelos com diâmetro de 324 mm e de 0,26 para os modelos com diâmetro de 508 mm. O módulo de elasticidade é de 203500 MPa para ambos.

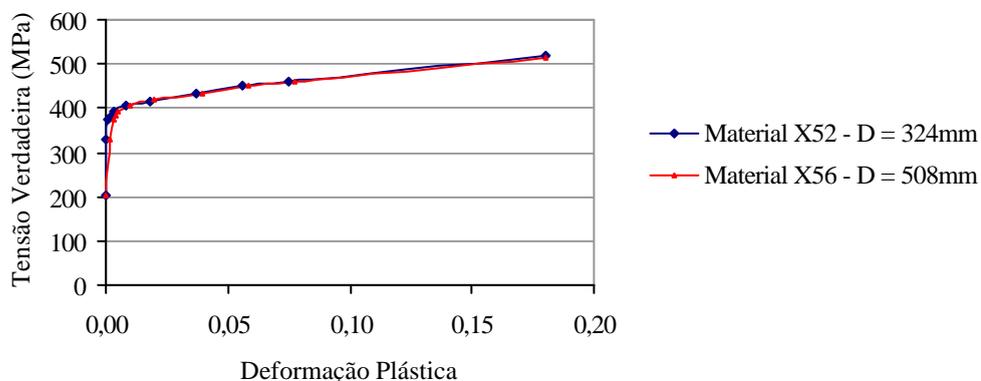


Figura 2. Curva Tensão Verdadeira – Deformação Plástica dos Materiais

3.1.2. Modelo de elementos finitos

De acordo com os testes realizados por Mohareb et al., as dimensões dos modelos estão mostradas na Tab.(1). Devido à simetria do tubo e do carregamento, somente a metade do tubo foi modelada. A geometria do tubo e as condições de contorno no plano de simetria são mostrados na Fig.(3). Nos ensaios foram considerados carregamento de flexão, compressão axial e pressão interna.

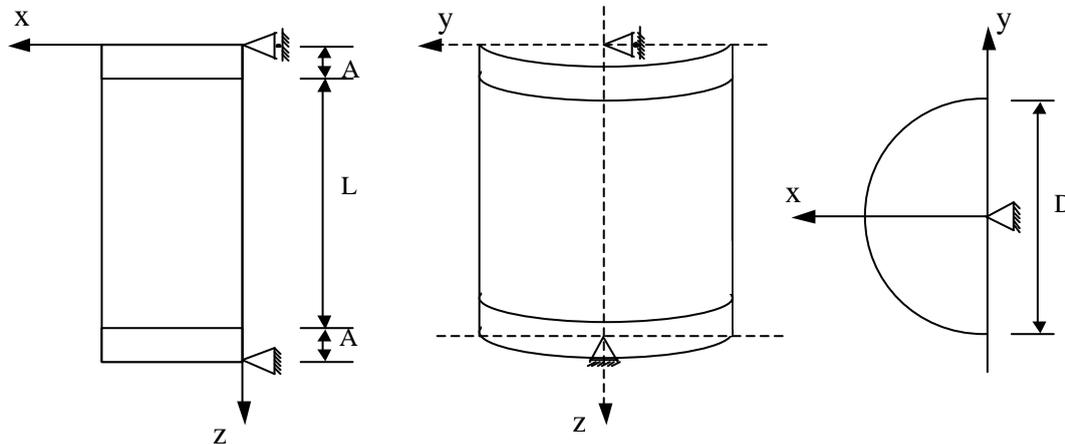


Figura 3. Geometria e condições de contorno do modelo

Tabela 1. Tabela com os dados geométricos referentes à Figura 3

TESTE	L (mm)	A (mm)	D (mm)
UGA508	1390	150	508
HGA324	1390	150	324

3.1.3. Condições de contorno e carregamento

No ensaio experimental, os extremos do tubo encontram-se soldados em duas placas. Para simular as condições de contorno do ensaio experimental, foi necessária a introdução de um nó em cada extremo do eixo do tubo, aos quais foram acoplados os nós dos elementos dos extremos do tubo. O nó inferior permite apenas a rotação em x, sendo que o superior além de permitir a rotação em x permite o deslocamento em z.

O acoplamento foi feito de duas formas. A primeira é restringindo os graus de liberdade especificados de um conjunto de nós a um movimento de corpo rígido de um nó de referência. A outra forma é usando restrições múltiplas (MPCs) que permitem restringir diferentes graus de liberdade do modelo. As MPCs usadas foram do tipo viga (BEAM) que introduzem uma viga rígida entre dois nós para restringir o deslocamento e rotação no primeiro nó ao deslocamento e rotação no segundo nó (Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc. 2000). Alternativamente, em um dos modelos com pressão interna (modelo HGA324_T) foi empregada uma tampa, no extremo do tubo, que simula o fechamento do tubo pela placa e onde a pressão interna é aplicada.

Experimentalmente foram adicionados aos extremos do espécime, próximo às placas, dois colarinhos do mesmo material do espécime, para evitar que a ruga se formasse nos extremos do tubo. No modelo analítico os aros são elásticos e possuem a mesma espessura do tubo.

A sequência de carregamento adotada em soluções analíticas coincide com a história de carregamento dos testes experimentais. As magnitudes das cargas axiais e pressão interna adotadas nas soluções analíticas são apresentadas na Tab.(2). No primeiro passo a carga axial de compressão

é aplicada em um dos nós extremos em apenas um incremento para todos os espécimes sob carregamento axial e flexão. Para tubos pressurizados, a pressão é aplicada na parede interna do tubo em um segundo passo. Para simular as forças associadas à pressão interna nos extremos do tubo, foram aplicadas forças de tração aos nós extremos.

Para o modelo com tampa (HGA324_T), no primeiro passo de carregamento, a pressão é aplicada na parede interna do tubo e na tampa de fechamento. Além da pressão, uma carga axial de compressão de 618 kN é aplicada ao nó extremo. Esta carga representa o somatório da carga P com a carga P_i , onde esta última contrabalança o valor da pressão aplicada na tampa.

Na solução analítica as rotações também foram impostas aos pontos nodais relativos aos extremos do tubo em um terceiro passo, depois que a carga axial e pressão interna foram aplicadas. Os momentos nos pontos nodais são reações dos suportes apresentados no modelo.

Tabela 2. Carregamentos adotados nos modelos

TESTE	Carregamento no Tubo			Carregamento nos Extremos	
	M variável	P constante MPa	C_A (kN)	P_i (kN)	$P = C+P_i+F$ (kN)
UGA508	e x F	-	647	-	647
HGA324	e x F	5,19	206	206	412

3.1.4. Seleção do Elemento

A partir dos elementos disponíveis na biblioteca do programa de elementos finitos ABAQUS, foi feita a escolha do elemento de casca tridimensional quadrilátero de quatro nós e com integração reduzida S4R para o segmento do tubo. O elemento S4R é adequado tanto para análises de cascas finas como para cascas espessas e incluem efeitos de deformação por cisalhamento e o modelo constitutivo associado contempla plasticidade com grandes deformações.

No modelo HGA324_T foram utilizados elementos de casca de três nós STRI3 para a tampa do tubo. Esta tampa simula o fechamento do tubo pela placa e onde também a pressão interna é aplicada. Um dos pontos nodais é comum a todos elementos da tampa e está localizado no eixo do tubo na seção transversal que coincide com o extremo do mesmo. Os pontos nodais restantes são comuns ao aro. O elemento STRI3 tem seis graus de liberdade por nó (três deslocamentos e três rotações), é usado em cascas finas e admite grandes rotações e pequenas deformações.

3.2. Soluções analíticas e comparação com os resultados experimentais

3.2.4. Teste UGA508

Os resultados da modelagem numérica do tubo de comprimento 1690 mm e diâmetro de 508 mm sujeito à flexão e compressão axial estão apresentados nesta seção.

A Figura (4) mostra a curva momento – curvatura com as soluções analíticas dos modelos, além do resultado experimental. Os momentos plotados são a média dos momentos das extremidades do tubo.

Os modelos UGA508_K1 e UGA508_K2 simulam as condições de contorno nos extremos do tubo com o acoplamento dos nós do aro ao nó auxiliar localizado no eixo do tubo. A única diferença entre os dois é que no modelo UGA508_K1 o acoplamento é imposto na direção radial e axial e no modelo UGA508_K2 o acoplamento é feito em todas as direções. Já no modelo UGA508_B elementos de restrição geométrica MPC usando elementos de viga (BEAM) foram empregados. Estes elementos são rígidos e todos são sujeitos à mesma rotação prescrita aos pontos nodais extremos.

A malha de elementos finitos do modelo UGA508_K1 possui 2100 elementos S4R, 2327 nós e 13590 graus de liberdade, enquanto a do modelo UGA508_K2 possui 2100 elementos S4R, 2265 nós e 13218 graus de liberdade.

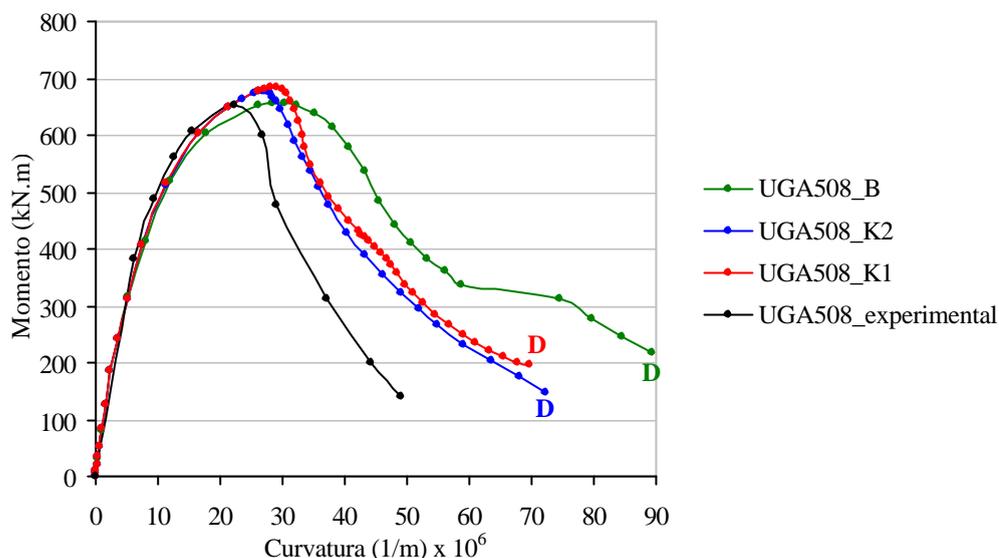


Figura 4. Curvas momento-curvatura do modelo UGA508

Os momentos críticos analíticos dos modelos UGA508_K1 e UGA508_K2 são de 683 kN e 678 kN respectivamente. Estes valores são 4,9% e 4,1% respectivamente maiores que o momento crítico experimental (651 kNm).

Para o modelo UGA508_B foi empregada uma malha menos refinada, constando de 576 elementos S4R, 667 nós e 3774 graus de liberdade. Neste modelo o momento crítico analítico é de 655 kN.m, que é 0,6% maior que o momento crítico experimental.

Observa-se na Figura (4) a boa concordância entre os modelos numéricos e o experimental na região de carregamento da estrutura. Os valores dos momentos críticos também são satisfatórios. Já no ramo de descarregamento, as respostas numéricas afastam-se dos resultados experimentais e diferem entre si, inclusive no modo de deformação conforme mostrado a seguir.

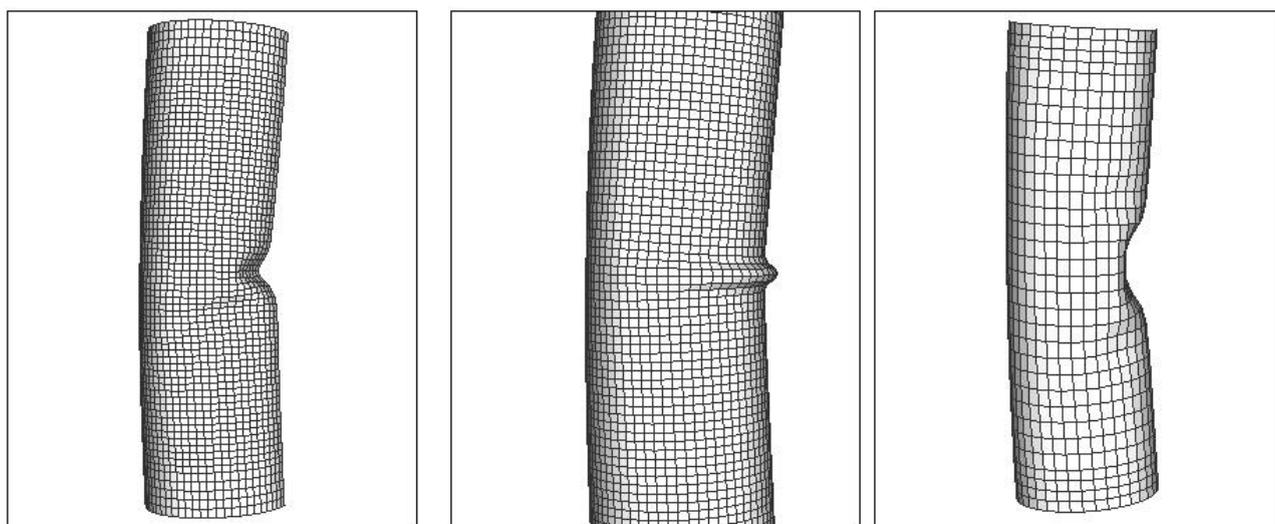


Figura 5. Configurações deformadas dos modelos UGA508_K1, UGA508_K2 e UGA508_B

Cabe ressaltar que estas estruturas são bastante sensíveis a imperfeições, principalmente em regime pós-crítico, de forma que a comparação com apenas um resultado experimental não é suficiente para a validação do modelo numérico. Os modelos também se mostraram bastante sensíveis à variação nas condições de contorno. Ainda que não tenham sido introduzidas imperfeições no modelo, podemos, a partir da Fig.(4) inferir sobre a sensibilidade da resposta numérica a estas imperfeições.

As configurações deformadas mostram como a estrutura se comporta ao longo da trajetória de amolecimento de cada curva momento-curvatura. As configurações deformadas sem magnificação dos deslocamentos, relacionadas aos pontos **D** da Fig.(4) são apresentadas na Fig.(5).

Pode-se observar das configurações deformadas da Fig.(5) que a mudança na modelagem das condições de contorno provocou diferentes configurações de flambagem local, alterando a formação da ruga. No modelo UGA508_B observa-se uma extensão maior da ruga, porém dada a diferença de malha, a mesma não pode ser atribuída exclusivamente à modelagem das condições de contorno.

3.2.2. Teste HGA324

Os resultados da modelagem numérica do tubo de comprimento 1690 mm e diâmetro de 324 mm sujeito à compressão axial, pressão interna e flexão estão apresentados nesta seção.

A Figura (6) mostra a curva momento – curvatura com as soluções analíticas dos modelos, além do resultado experimental.

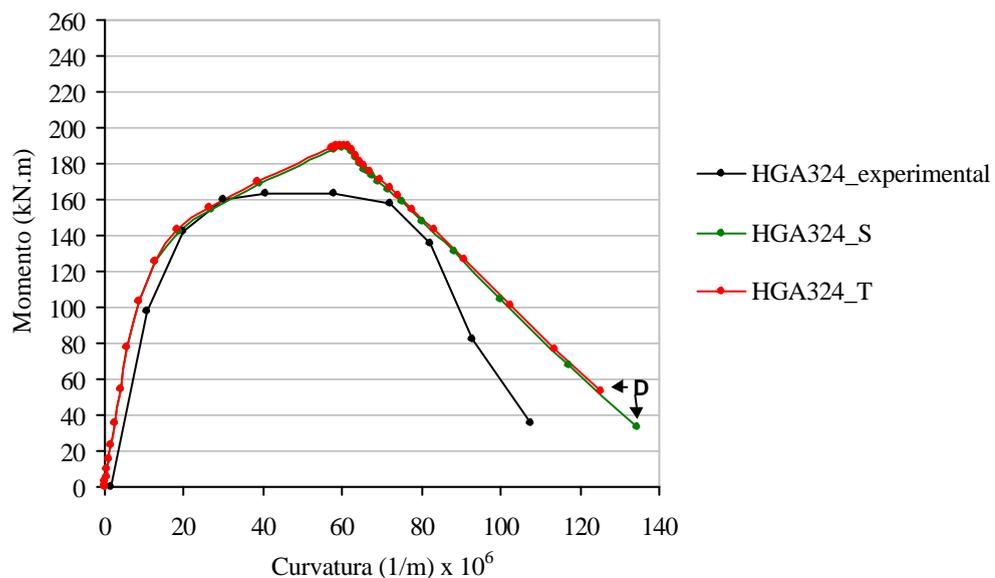


Figura 6. Curvas momento-curvatura do modelo HGA324

Os dois modelos analíticos HGA324 simulam as condições de contorno nos extremos do tubo com o acoplamento dos nós do aro aos nós extremos localizados no eixo do tubo na direção radial e axial. A diferença entre os modelos é que o modelo HGA324_T contém uma tampa de fechamento nos extremos do tubo onde é aplicada a pressão interna; já no modelo HGA324_S a força equivalente à pressão interna na tampa é aplicada no nó extremo que se encontra livre para se mover longitudinalmente.

O carregamento aplicado no modelo HGA324_S foi feito primeiramente com a aplicação de uma carga de 412 kN no nó extremo do eixo do tubo. Esta carga é equivalente a reação da máquina de carga à pressão interna e à carga devido à temperatura diferencial e ao efeito de Poisson. Em um segundo passo foi aplicada a pressão interna na parede interna do tubo. Por último foram aplicadas as rotações aos dois nós extremos localizados no eixo do tubo.

No modelo HGA324_T, a aplicação da pressão interna é feita na parede do tubo e na tampa que simula o fechamento do tubo pela placa (Fig. 7). Assim, a carga que é aplicada nos nós extremos é de 617 kN que é o somatório da carga $P = 412$ kN com a carga $P_i = 206$ kN que contrabalança o valor da pressão aplicada na tampa.

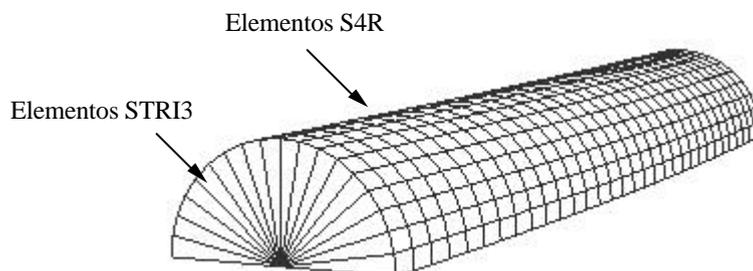


Figura 7. Malha de elementos finitos do modelo HGA324_T

No modelo HGA324_S, o momento crítico analítico correspondente à curva da Fig.(6) é de 189 kN.m que é 16% maior que o momento crítico experimental (163 kN.m). A sua malha de elementos finitos possui 576 elementos S4R, 705 nós e 4002 graus de liberdade.

No modelo HGA324_T, o momento crítico analítico correspondente à curva da Fig.(6) é de 190 kN.m que é 16,6% maior que o momento crítico experimental (163kN.m). A malha de elementos finitos possui 576 elementos S4R, 36 elementos STRI3, 705 nós e 4002 graus de liberdade.

Observa-se da Figura (6) que a região de carregamento da estrutura apresenta uma inclinação bem próxima à inclinação da curva experimental. A diferença entre as curvas dos modelos numéricos e a curva experimental é que a última inicia seu carregamento com uma curvatura de $1,67 (1/m) \times 10^6$.

Os pontos críticos numéricos se afastam do ponto crítico experimental, com um erro consideravelmente grande de aproximadamente 16%.

Os dois modelos resultaram em curvas praticamente coincidentes, assim como suas configurações deformadas, validando assim, a aplicação da carga referente à pressão interna na tampa, como carga concentrada aplicada ao nó extremo do eixo do tubo.

As configurações deformadas da Fig.(8) correspondem aos pontos **D** das curvas da Fig.(6) e mostram como a estrutura se comporta após o ponto crítico curva momento-curvatura.

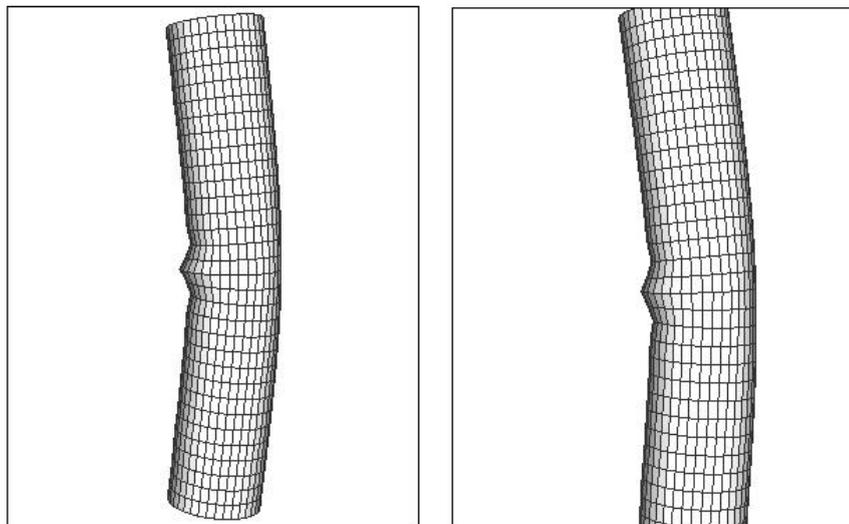


Figura 8. Configurações deformadas dos modelos HGA324_S e UGA324_T

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia de modelagem de dutos sujeitos a carregamentos combinados de pressão interna, força axial e momentos buscando reproduzir as condições de ensaio e obter assim um modelo de previsão numérica confiável. Uma vez validado o modelo o mesmo pode ser empregado para acompanhamento de programas de ensaio, além da realização de ensaios numéricos em substituição a ensaios de laboratório de difícil execução. Vantagem adicional deste tipo de enfoque é a possibilidade de uma avaliação completa de tensões e deformações em toda a estrutura, inclusive em regime pós-crítico. A identificação de diferentes modos de colapso para condições de carregamento diversas e a investigação da sensibilidade destes modos a imperfeições do duto são outras vantagens da metodologia apresentada aqui.

Com relação à modelagem investigada conclui-se que a representação do modo de falha do duto por flambagem é muito sensível à escolha dos parâmetros da análise, tais como malha de elementos finitos empregada, condições de contorno, modelo constitutivo, e modo de aplicação do carregamento, além de eventuais imperfeições, especialmente em regime pós-crítico. Já a carga crítica mostrou-se pouco sensível a estes parâmetros de análise.

5. REFERÊNCIAS

- Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2000, “ABAQUS Standard User’s Manual”, Versão 6.1.
- Mohareb, M.; Alexander, S.D.B.; Kulak, G.L. *et al.*, 1993, “Laboratory Testing of Line Pipe to Determine Deformation Behavior.” Proc. of the 12th Inter. Conf. on OMAE, Vol. V - Pipeline Technology, ASME, pp. 109-114.
- Souza, L.T.; Murray, D. W., 1994, “Prediction of Wrinkling Behavior of Girth-Welded Line Pipe.” Structural Engineering Report no. 197, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, T6G 2G7, 134 pp.
- Vitoria, P.R., 2001, “Flambagem local de dutos sujeitos a carregamentos combinados”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 134pp.

NUMERICAL ANALYSIS OF LOCAL BUCKLING OF PIPES UNDER COMBINED LOADING

Patricia Reis Vitoria

Departamento de Engenharia Civil*
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea
CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
e-mail: patricia_vitoria@hotmail.com

Deane Roehl*

e-mail: droehl@civ.puc-rio.br

Abstract: This paper presents a numerical model for the prediction of the behavior of pipelines subjected to combined load conditions and sequences up to collapse, reproducing the conditions which occur in field and in laboratory tests. These include thermal effects, operating pressure and ground movements. In the case of soil settlement the pipeline may be subject to bending effects which result in excessive curvatures. As a consequence local buckling occurs with the development of wrinkles. Under these conditions strains above those recommended in the codes can take place.

Due to the three dimensional nature of the problem, investigation of the local buckling phenomena, requires the understanding of the behavior of shells under large displacement and large strain conditions in elasto-plastic regime.

Some reference laboratory results available in the literature are presented. Aspects of the modeling such as boundary and loading conditions, material modeling and solution procedure are addressed. Validation of the numerical model presented here allows its application to the establishment and guidance of experimental programs.

Keywords: *pipeline, local buckling, wrinkling, postbuckling*