

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DUTOS COM DEFEITOS COMPLEXOS

Juliana von Schmalz Torres ⁽¹⁾

Silvana Maria Bastos Afonso da Silva ⁽²⁾

Flávio Aureliano da Costa ⁽³⁾

Paulo Roberto Maciel Lyra ⁽⁴⁾

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife-PE, CEP 50740-530.

Departamento de Engenharia Civil

(juliana@ufpe.br) ⁽¹⁾, (smb@ufpe.br) ⁽²⁾

Departamento de Engenharia Mecânica

(flavio@demec.ufpe.br) ⁽³⁾, (prmlyra@ufpe.br) ⁽⁴⁾

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação da carga de ruptura de dutos com defeitos causados por corrosão. São estudados defeitos internos e externos com forma geométrica complexa. O modelo é discretizado utilizando-se elementos sólidos na região do defeito e elementos de casca no restante do domínio. Assume-se o material com comportamento elasto-plástico e a não linearidade geométrica é considerada. Pressão interna e tensão axial são incluídas como condições de carregamento. Os programas ANSYS, PATRAN e MARC são utilizados para simulação e análise numérica. Uma rotina que automatiza a geração/discretização do modelo é criada em tais programas. Finalmente, a carga limite de alguns exemplos de dutos com defeitos é determinada e comparada com o procedimento analítico proposto pela norma britânica BS-7910 e pelo método Área Parabólica Retangular (RPA - Rectangular Parabolic Area), recentemente proposto na literatura.

Palavras-chave: Dutos, Defeitos, Integridade estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria de petróleo e gás natural, a avaliação da integridade estrutural de dutos é de extrema importância para manutenção da malha dutoviária, visto que paradas inesperadas de dutos em operação e vazamentos significam prejuízo para a empresa e para o meio ambiente. Desta forma, para que um duto opere com segurança é necessário o seu monitoramento, e caso ocorram defeitos, tal avaliação deve ser feita para se verificar o comportamento do duto com falhas. Para solução de tais problemas, a simulação numérica, em particular o uso do método dos elementos finitos, constitui uma boa alternativa capaz de fornecer respostas precisas em tempo hábil.

Uma metodologia para determinação da carga de ruptura de dutos com defeitos causados por corrosão é aqui apresentada. Os programas comerciais de elementos finitos ANSYS, PATRAN, e MARC são utilizados para simulação e análise numérica. Nestes programas, foram criadas rotinas que automatizam a geração do modelo.

São estudados defeitos internos e externos com forma geométrica complexa. O modelo é discretizado utilizando-se elementos sólidos tridimensionais na região do defeito e elementos de casca no restante do domínio. A transição entre os elementos sólidos e os de casca será feita de duas maneiras: (1) inserindo-se elementos de casca na região sólida e (2) usando-se equações de

restrições (ANSYS; PATRAN). Comparações serão feitas entre os resultados utilizando estas diferentes abordagens. O material empregado possui comportamento elasto-plástico e a não linearidade geométrica também é considerada. Pressão interna e tensão axial são os tipos de ações externas consideradas na análise.

Para ilustrar a metodologia aqui descrita, a carga limite (Chen et al., 1997; Chen et al., 1999) de alguns exemplos de dutos com defeitos será determinada e comparada com procedimentos analíticos propostos pela norma britânica BS-7910 (1999) e pelo método RPA (Benjamin & Andrade, 2003).

2. METODOLOGIA

2.1. Simulação numérica para análise de elementos finitos

A simulação numérica de dutos com defeitos é bastante complexa, tanto do ponto de vista da geração dos defeitos em si, quanto dos fenômenos que surgem devido as solicitações externas nos dutos corroídos. Desta forma, faz-se necessário uma abordagem integrada destes problemas para se obter resultados precisos e confiáveis.

Para conduzir a simulação e análise numérica de tais dutos, os códigos comerciais de elementos finitos utilizados foram o ANSYS, PATRAN e MARC. Nos dois primeiros, é criada uma rotina, utilizando a linguagem de programação específica de cada programa, que automatiza a geração do modelo. Para isto, alguns parâmetros do duto (diâmetro, espessura, comprimento, propriedades do material, carregamento aplicado), e do defeito (comprimento, largura, profundidade e posição), devem ser fornecidos. De posse desta interface automatizada, um engenheiro com pouca experiência numérica pode executar um grande número de análises em tempo hábil.

2.1.1. Modelo

Os defeitos podem assumir diversas formas, tamanhos e posições. Neste trabalho, os defeitos são simulados no formato apenas elíptico e no formato que combina elíptico e cilíndrico (Saldanha, S. & Bucherie, C., 2001). Por se tratar de uma modelagem aproximada, as três dimensões do defeito, comprimento, largura e profundidade, são representadas pelos três eixos utilizados para construção do elipsóide, sendo que em duas das dimensões (comprimento e profundidade do defeito) os valores desses parâmetros coincidem enquanto que na outra dimensão (largura do defeito) ocorre uma aproximação de tais valores devido à curvatura do duto. A Figura 1 mostra detalhes de um defeito de forma elíptica-cilíndrica, onde Lc é o comprimento da parte cilíndrica do defeito na direção axial, Le é o comprimento da parte elíptica do defeito na direção axial e Lw é largura do defeito (direção circumferencial). Quanto a localização de tais defeitos, os mesmos podem se posicionar na superfície interna e/ou externa do duto, conforme visualizado na Fig. 2.

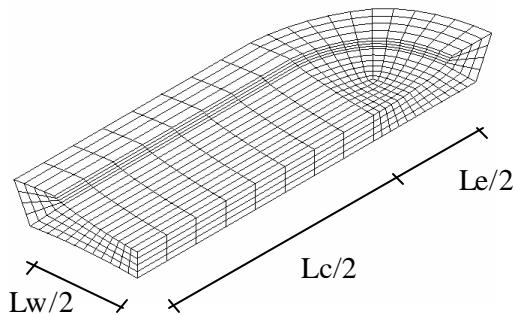


Figura 1. Detalhes da geometria e malha do defeito elíptico-cilíndrico nos dois planos de simetria.

Os carregamentos aplicados no duto foram pressão interna e tensão axial gerada pela pressão interna na extremidade do tubo onde não há defeito.

Devido à simetria do defeito, foi modelado apenas um quarto do duto, sendo assim, como condição de contorno considerou-se a simetria na seção longitudinal e extremidade do tubo onde há defeito além do deslocamento fixo em um ponto para evitar movimento de corpo rígido.

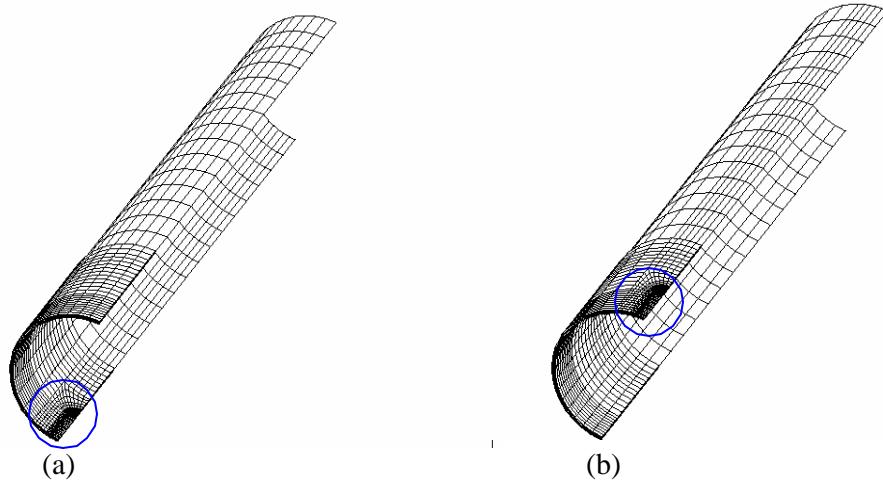


Figura 2. Malha de dutos com defeito elíptico-cilíndrico nas posições: a) interna e b) externa.

2.1.2. Discretização

O modelo foi discretizado utilizando-se elementos sólidos tridimensionais (Chen et al., 1998) na região do defeito, para uma melhor representação do comportamento das tensões e deformações ao longo da espessura, e elementos de casca no restante do domínio. Esta estratégia é considerada com o objetivo de reduzir o esforço computacional, além da estratégia de se optar pelo uso de elementos lineares. Com testes preliminares, foi verificada pouca diferença entre os resultados utilizando malhas com elementos lineares e quadráticos.

Como a região do defeito está sujeita a maiores gradientes de tensões, a densidade da malha foi gradualmente refinada nesta região. Nos exemplos a serem apresentados a seguir, foram utilizados quatro elementos ao longo da espessura em toda região sólida.

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes elementos sólidos contidos na biblioteca do ANSYS e do PATRAN respectivamente: SOLID45 e HEX8 (8 nós, com 3 graus de liberdade por nó), assim como os elementos de casca SHELL43 e QUAD4 (4 nós, com 6 graus de liberdade por nó).

A transição entre os elementos sólidos e os de casca, conforme pode ser visualizado no trecho L_o da Fig. 3, é feita de duas maneiras: inserindo-se elementos de casca na região sólida e usando-se equações de restrições. Os resultados aqui representados pelo ANSYS foram obtidos fazendo uso da primeira maneira, enquanto que a segunda maneira é aplicada nos exemplos modelados no PATRAN, conhecida no mesmo por *Multi-Point Constraints* (MPC's). Tal transição deve ser feita fora da região onde os gradientes de tensões são elevados. No presente estudo, também se verificou através de experimentos numéricos, a distância da casca a ser encaixada no sólido, e um valor de aproximadamente 15% do trecho sólido foi o adotado. Esta região de transição foi discretizada com dois elementos finitos.

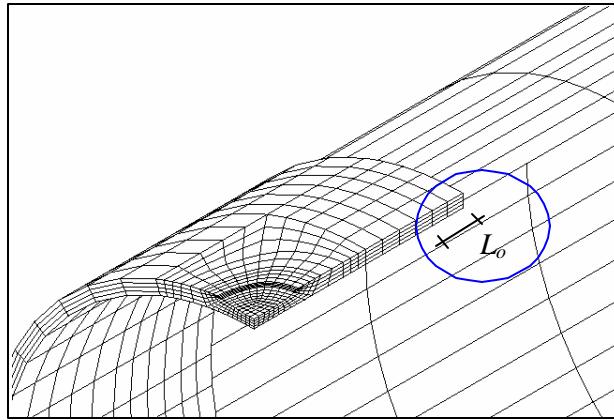


Figura 3. Malha de um defeito elíptico com transição sólido-casca.

2.1.3. Propriedades do material

O material empregado possui comportamento elasto-plástico com endurecimento isotrópico. Para construção da curva tensão *versus* deformação do material é necessário conhecer o módulo de elasticidade do material, tensão de escoramento, tensão e deformação última do material.

No ANSYS e no PATRAN, para grandes deformações, todos os valores de entrada e saída da tensão e deformação deverão ser em termos da tensão e deformação verdadeira. Desta forma, para a construção da curva do material é necessária a transformação dos valores de engenharia para valores verdadeiros. Segundo Souza (1982), a curva verdadeira na zona plástica do material pode ser representada pela equação:

$$\sigma_R = K e^n \quad (1)$$

onde K é o coeficiente de resistência e n é o coeficiente de encruamento. Para determinar os seus valores, o modo mais simples é transformar a expressão anterior na forma logarítmica, o que resulta num gráfico em linha reta. Onde o valor de n é dado pela inclinação desta reta e K é obtido pela resolução da equação acima em um dos pontos onde são conhecidos os valores do par tensão-deformação, ou seja, em nosso caso foram o ponto de escoamento e o ponto limite do material. É ainda indicado que seja feita a subtração da deformação elástica da deformação total, para que os valores das tensões e deformações verdadeiras determinem uma linha, a mais reta possível. A seguir, é mostrado na Fig. 4 a curva de um material API 5L-X60, que neste caso foi simplificada numericamente por 16 pontos correspondentes aos pares de tensão verdadeira versus deformação verdadeira calculados.

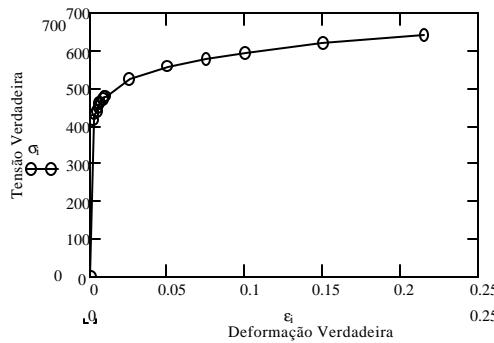


Figura 4. Curva tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira do material API 5L-X60.

2.1.4. Análise de elementos finitos

De posse de tais dados, finalmente a análise de elementos finitos é conduzida considerando o comportamento elasto-plástico do material e a não linearidade geométrica. Em seguida, a carga limite é obtida considerando como critério de ruptura, o momento em que o primeiro elemento atingir a tensão de ruptura do material.

2.2. Métodos analíticos

Objetivando validar os resultados numéricos, procedimentos analíticos existentes na literatura foram investigados. No presente trabalho, brevemente apresentamos os procedimentos propostos pela norma britânica BS 7910 e o método RPA recentemente proposto por Benjamin & Andrade (2003).

2.2.1. Norma britânica BS-7910

De acordo com esta norma, a pressão de falha de um duto corroído com apenas um defeito é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$P_f = P_o \times R_s \quad (2)$$

onde P_o é a pressão de um duto sem defeito e R_s o fator de reserva da resistência, e são dados por:

$$P_o = \frac{2B_o s_u}{D - B_o} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{\left(1 - \frac{d_c}{B_o}\right)}{\left(1 - \frac{d_c}{B_o} \frac{1}{Q_c}\right)} \quad (4)$$

Sabendo-se que s_u é a tensão última de projeto, B_o é a espessura do duto, D é o diâmetro do duto, d_c é a profundidade do defeito e Q_c é o fator de correção do comprimento e é obtido por:

$$Q_c = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{l_c}{\sqrt{DB_o}} \right)^2} \quad (5)$$

Da equação anterior, l_c é o comprimento do defeito.

2.2.2. Método RPA

Este procedimento de cálculo (Benjamin & Andrade, 2003) foi proposto com o objetivo de suprir os problemas apresentados pela metodologia RSTRENG (1989), quando aplicada na estimativa da carga limite de dutos com defeitos longos.

De acordo com o método RPA, defeitos curtos são aqueles que $L \leq \sqrt{20D_e t}$, enquanto que os defeitos longos ocorrem quando $L > \sqrt{20D_e t}$. Sendo: L comprimento do defeito, D_e diâmetro externo do duto, t espessura do duto. A presente metodologia especifica portanto expressões

analíticas para cálculo da pressão de falha de dutos corroídos, de acordo com a classificação dos defeitos anteriormente expostos.

Desta forma, a pressão de falha de um defeito curto é calculada pela seguinte equação:

$$p_f = (s_y + 69 \text{ MPa}) \frac{2t}{D_e} \left[\frac{1 - 0,85(d/t)}{1 - 0,85(d/t)M^{-1}} \right] \quad (6)$$

onde d é a profundidade do defeito, s_y é a tensão de escoamento do material e o fator de Folias é dado por:

$$M = \left[1 + 0,6275 \frac{L^2}{D_e t} - 0,003375 \left(\frac{L^2}{D_e t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Para o caso de defeitos longos, a pressão de falha é calculada pela seguinte equação:

$$p_f = (s_y + 69 \text{ MPa}) \frac{2t}{D_e} \left[\frac{1 - a(d/t)}{1 - a(d/t)M^{-1}} \right] \quad (8)$$

$$\text{sendo: } a = 1 - 0,15 \frac{(64 \cdot 10^6)}{\left(\frac{L^2}{D_e t} \right)^6} \quad \text{e} \quad M = 2,1 + 0,07 \left(\frac{L^2}{D_e t} \right) \quad (9)$$

3. EXEMPLOS

Inicialmente são apresentados exemplos (modelos 1, 2 e 3) com objetivo de se obter e verificar, de acordo com a norma BS 7910 e o método RPA, a carga limite de dutos com defeitos externos e internos. Em seguida outros exemplos (modelos 4, 5 e 6) são ilustrados a fim de se comparar resultados utilizando as diferentes maneiras de transição sólido-casca.

As principais características geométricas dos defeitos aqui analisados estão apresentadas na Tabela 1. Nesta tabela, além das dimensões e formas do defeito também está presente a classificação do tipo defeito segundo o método RPA.

Tabela 1. Características dos defeitos.

Dimensões (mm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
<i>Comp. Total</i>	60	40	320	40	200	200
Comp. Elíptico	60	14	80	40	40	40
Comp. Cilíndrico	0	26	240	0	160	160
<i>Largura</i>	60	34	60	50	50	50
<i>Profundidade</i>	3	4	3,5	5	5	7,5
Forma do defeito	Elíptica	Elíptica-cilíndrica	Elíptica-cilíndrica	Elíptica	Elíptica-cilíndrica	Elíptica-cilíndrica
Tipo do defeito (definição RPA)	Curto	Curto	Longo	Curto	Curto	Curto

As propriedades do material para o aço API 5L X56 utilizado nas análises dos modelos 1, 2 e 3 são: módulo de elasticidade $E=2,061 \times 10^5$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu=0,3$, tensão de escoamento $\sigma_y=386$ MPa, tensão última $\sigma_u=489$ MPa e deformação última $\varepsilon_u=25,5\%$. Para os modelos 4, 5 e 6, o aço utilizado é o API 5L X60 ($\sigma_y=413$ MPa, $\sigma_u=517$ MPa e $\varepsilon_u=24\%$).

Para os três primeiros modelos, os parâmetros constantes do duto são o diâmetro externo $d=355,6$ mm, a espessura da parede do duto $t=8,7$ mm e o comprimento axial $L=1778$ mm. Para os demais modelos, o duto tem as seguintes dimensões: $d=355,6$ mm, $t=10,3$ mm e $L=1066,8$ mm.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da pressão de falha calculados utilizando o método RPA e a norma BS 7910 bem como os analisados no ANSYS. Percebe-se nestes modelos estudados que os métodos analíticos são mais conservadores, isto ocorre devido às simplificações em suas formulações. Sendo ainda o método RPA mais a favor da segurança do que a norma britânica. Nesta tabela também se observa, quanto aos resultados numéricos, que a pressão de falha dos dutos com defeitos externos e internos, de mesmas dimensões, praticamente coincidem quando se trata dos modelos 1 e 2 (defeitos curtos). Uma pequena diferença entre os resultados fica nítida para o modelo 3 (defeito longo), podendo ainda observar que este modelo com o defeito posicionado na superfície interna do duto apresenta uma capacidade de carga maior do que o posicionado externamente. Para os modelos 1 e 2 com defeitos internos, a pressão limite foi atingida antes mesmo de ter sido alcançada a tensão última do material.

Tabela 2. Pressões de falha determinadas analiticamente e numericamente.

Pressões	P_f (MPa) - RPA	P_f (MPa) - BS 7910	P_f (MPa) - Numérico (Def. Externo)	P_f (MPa) - Numérico (Def. Interno)
Modelo 1	20,26	22,81	26,75	26,79
Modelo 2	20,54	23,12	25,91	25,96
Modelo 3	14,70	16,66	19,91	21,28

Os resultados da pressão de falha dos dutos corroídos utilizando as diferentes formas de transição entre elementos sólidos e de casca podem ser visualizados na Tab. 3. Para os modelos 4 e 6, observa-se que a maneira de transição que encaixa os elementos de casca na região sólida é mais conservativa do que a que faz uso das equações de restrições (MPC's). Nesta tabela, a percentagem negativa corresponde à diminuição da pressão em relação à técnica MPC.

Tabela 3. Comparações entre os valores da pressão de falha utilizando as diferentes maneiras de transição sólido-casca.

Pressões	P_f (MPa) - MPC	P_f (MPa) - Encaixe	%
Modelo 4	34,9	33,2	- 4,87
Modelo 5	24,3	24,52	0,91
Modelo 6	15,8	15,35	- 2,85

4. CONCLUSÕES

Uma metodologia prática para avaliar até que ponto a capacidade do duto é afetada por defeitos causados por corrosão foi apresentada. Comparações foram feitas entre os resultados da pressão de falha obtidos analiticamente e numericamente. O comportamento da pressão de falha, em função da posição do defeito em relação à superfície do duto bem como em função das diferentes maneiras de considerar a transição entre elementos finitos sólidos e de casca também foi investigado.

De acordo com os resultados obtidos na pressão de falha, percebe-se que os métodos analíticos são mais conservadores que os procedimentos numéricos, isto ocorre devido às

simplificações em suas formulações. Sendo ainda o método RPA mais a favor da segurança do que a norma britânica.

Para os defeitos curtos do modelo 1 e 2 notou-se que a posição dos defeitos, interna ou externa à superfície do duto, é irrelevante no resultado da pressão limite. O que se conclui também para o caso de utilizar diferentes formas de transição sólido-casca no modelo 5 onde as pressões foram bem próximas. Quanto aos resultados dos modelos 4 e 6, observou-se que a transição que utiliza a técnica de encaixe foi mais conservadora do que a que faz uso das equações de restrições.

Estudos considerando outras dimensões e formas de defeitos, tipo de carregamentos bem como a iteração entre defeitos estão em andamento, a fim de melhor verificar o comportamento dos dutos corroídos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto CTPETRO-FINEP-ANP “Análise de Integridade e Projeto Econômico de Dutos e Travessias” (contrato nº 65.00.0406.00).

6. REFERÊNCIAS

ANSYS, Help system: Commands reference, elements reference, design optimization and others.

Benjamin,A.C. & Andrade,E.Q., 2003, Modified method for the assessment of the remaining strength of corroded pipelines, IBP413-03, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio Pipeline Conference & Exposition 2003.

BS 7910, 1999, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures Annex G: The assessment of corrosion in pipes, pipelines and pressure vessels.

Chen, H. F., Cen, Z. Z., Xu & B. Y. and Zhan, S. G., 1997, A numerical method for reference stress in the evaluation of integrity, International Journal of Pressure Vessel and Piping, vol.71, pp. 47-53.

Chen, H. F., Liu, Y. H., Cen, Z. Z. & Xu, B. Y, 1998, Numerical analysis of limit load and reference stress of defective pipelines under multi-loading systems, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 75, pp 105-114.

Chen, H. F., Liu, Y. H., Cen, Z. Z. & Xu, B. Y, 1999, On the solution of limit load and reference stress of 3-D structures under multi-loading systems, Engineering structures, vol. 21, pp. 530-537.

PATRAN, 2003. Help system: User's Guide, PCL Manual, Reference Manual and others.

RSTRENG, 1989, Kiefner J.F. & Vieth, P.H., Final Report on Project PR 3-805 – A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe.

Saldanha, S. & Bucherie, C., 2001, Integrity of non crack corroder pipelines submitted to internal pressure. A methodology by Bureau Veritas, based upon Elastic-Plastic 3D Finite Element Analysis, IBP09001, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás.

Souza, S. A., 1982, Ensaios mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos, Editora Edgard Blucher Ltda, 5a edição, pp. 51-58.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF DUCTS WITH COMPLEX DEFECTS

Juliana von Schmalz Torres ⁽¹⁾
Silvana Maria Bastos Afonso da Silva ⁽²⁾
Flávio Aureliano da Costa ⁽³⁾
Paulo Roberto Maciel Lyra ⁽⁴⁾

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife-PE, CEP 50740-530.
Departamento de Engenharia Civil
(juliana@ufpe.br)⁽¹⁾, (smb@ufpe.br)⁽²⁾
Departamento de Engenharia Mecânica
(flavio@demec.ufpe.br)⁽³⁾, (prmlyra@ufpe.br)⁽⁴⁾

Abstract. This work presents a methodology for determination of the load of rupture of ducts with defects caused for corrosion. Internal and external defects with complex geometric form are studied. The model is discretized using solid elements in the region of the defect and elements of shell in the remain of the domain. The behavior of material is assumed elasto-plastic and the non geometric linearity is considered. Internal pressure and axial tension are considered as loading conditions. The commercials codes ANSYS, PATRAN and MARC are used for simulation and numerical analysis. A routine that automatizes the generation/discretization of the model is created for such codes. Finally, the limit load of some examples of ducts with defects is determined and compared with the analytical procedure considered by British norm BS-7910 and by the Rectangular Parabolic Area (RPA) method, recently proposed in literature.

Keywords. Ducts, Defects, Structural integrity.