



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS  
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING  
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO RAIO DE ADOÇAMENTO NA OBTENÇÃO DA PRESSÃO DE FALHA VIA MEF PARA DUTOS COM DEFEITOS DE CORROSÃO.**

**Adriano Dayvson Marques Ferreira**

**Júlio Tenório Pimentel**

**Silvana Maria Bastos Afonso**

**Ramiro Brito Willmersdorf**

**Lucas Marques Teles da Silva**

adriano.dayvson@gmail.com

julio.pimentel@gmail.com

smb@ufpe.br

ramiro@willmersdorf.net

lucasmарques\_17@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, CEP: 50740-530, Recife, Brasil

**Edmundo Q. de Andrade**

edmundoq@petrobras.com.br

CENPES/PETROBRÁS

Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil

**Abstract.** Neste trabalho é apresentado um estudo da influência do raio de adoçamento, mantendo-se fixo o raio de concordância, em modelos idealizados de defeitos de corrosão em dutos que são usados para o cálculo da pressão de falha com análises via o método dos elementos finitos. Para avaliar a influência deste parâmetro, um conjunto de realizações de perfis complexos de corrosão é gerado. Para cada realização são gerados vários modelos paramétricos de corrosão de geometria idealizada alterando entre eles o parâmetro raio de adoçamento, mantendo-se os parâmetros profundidade, largura, raio de concordância e comprimento do defeito constantes. Após essas idealizações, modelos de elementos finitos são gerados e uma análise estrutural não linear é conduzida em cada um deles. Um modelo de elementos finitos com o perfil de corrosão complexo também é gerado para cada caso e sua análise é realizada obtendo-se assim a pressão de falha de todos os casos. Todos os modelos de elementos finitos empregados nas análises são gerados utilizando o sistema PIPEFLAW, um sistema de modelagem escrito com a linguagem PCL (PATRAN command language). O sistema PIPEFLAW gera um modelo completo para a análise não linear via MEF de um duto com um defeito para cada perfil. A análise é realizada pelo ANSYS, sendo as análises não lineares gerenciadas por um módulo específico do sistema PIPEFLAW. O módulo de gerenciamento de análises não lineares foi escrito em Python e utiliza critérios de incremento de carga e de convergência definidos pelo CENPES/PETROBRAS. O resultado da pressão de falha para cada realização de geometria complexa é comparado com os resultados das pressões de falha dos perfis idealizados gerados a partir daquela realização. Assim podemos avaliar como o parâmetro raio de adoçamento influencia nos resultados da pressão de falha em comparação ao modelo complexo. Com esta investigação experimental exaustiva buscou-se determinar faixas de variação para o parâmetro de interesse que garanta que a geometria dos modelos idealizados não resultem em resultados enviesados.

**Keywords:** Dutos, Corrosão, Raio de Adoçamento,...

## 1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural de dutos corroídos, submetidos a pressão interna, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), tem tido grande protagonismo nos últimos anos tanto na indústria quanto na academia e mais ainda quando se observa a importância desse método para a indústria de petróleo e gás. A modelagem por Elementos Finitos (EF) de defeitos de corrosão em dutos se dá a partir de dados extraídos em campo a partir do uso de ferramentas de inspeção que verificam a perda de material na parede da tubulação. Essas ferramentas, conhecidas como pigs inteligentes (*smart pig - pipeline inspection gauges*), podem ser de três tipos principais: fuga de fluxo magnético, ultrassom e contato mecânico. O mais comumente utilizado é o do pig ultrassônico e é sobre ele que o artigo estará se referindo sempre que se falar de dados de inspeção. Os dados obtidos a partir de uma inspeção por pig inteligente vêm na forma de uma matriz que identifica a posição do ponto de medição e a espessura remanescente da parede do duto, além de identificar se o defeito é interno ou externo. A partir desses dados as empresas de inspeção trabalham com programas que automaticamente idealizam a geometria do(s) defeito(s) utilizando algum método escolhido pelo fabricante ou pelo cliente, como por exemplo ASME B31.G, RSTRENG, DNV RP-F101. Essa idealização geométrica leva em conta que defeitos interagentes entre si são apenas um defeito com a profundidade do ponto mais crítico, considerando assim uma perda generalizada de massa naquela região. Quando se idealiza matematicamente não há necessidade de prever concentração de tensão em cantos mas, no caso de uma idealização geométrica que será construída em um modelador de EF, os cantos tem que

ser levados em consideração, assim raios de adoçamento e concordância são utilizados nessa modelagem. Aqui foi realizado um estudo paramétrico da influência do raio de adoçamento no resultado da análise de EF.

## 2 METODOLOGIA

Para realizar o estudo paramétrico foi utilizado um mapeamento de inspeção de um defeito de corrosão real e a partir desse mapeamento foi utilizada uma ferramenta desenvolvida por Ferreira (2011), para gerar dez realizações que levaram em conta os parâmetros estatísticos da corrosão. Essa ferramenta gera perfis de corrosão a partir de um mapeamento base, esses novos mapeamentos tem as mesmas características estatísticas do modelo base. A partir desses dez novos mapeamentos foram gerados modelos de elementos finitos utilizando o módulo do MSC.PATRAN (2012), o PIPEFLAW\_M (CABRAL, 2007), desenvolvido pelo PADMEC, que automatiza a geração de defeitos reais e idealizados (CABRAL et al., 2007b, 2007a; MOTTA et al., 2009, 2010; FERREIRA, 2011) usando como parâmetros de entrada os dados do duto e defeito. Os modelos reais gerados foram depois analisados usando a ferramenta de gerenciamento automático de análise, também desenvolvida pelo PADMEC, chamada PIPEFLAW\_A (CABRAL et al., 2013), desenvolvida em Python (PYTHON, 2011), que utiliza o ANSYS (2012) com solver e que tem critério de incremento de carga e convergência definidos pelo CENPES/PETROBRAS.

A configuração de malha utilizada na geração automática dos modelos segue um rigoroso procedimento, que mantém a malha refinada na região do defeito e depois, usando critérios desenvolvidos pelo CENPES/PETROBRAS, garante transições suaves até distâncias adequadas da zona de influência do defeito. Os modelos idealizados utilizados nas análises de elementos finitos deste trabalho tem dupla simetria, de forma a economizar tempo computacional, já que os modelos idealizados com apenas um defeito são simétricos.

As análises começam com uma estimativa da pressão de escoamento, que vai sendo sistematicamente incrementada com passos de carga que seriam inicialmente de 1/4 da pressão de escoamento do material. O sistema usa técnica de *save/restart* para garantir a continuidade da análise. Dois critérios de parada são usados, o de menor incremento de carga e o critério de ruptura do material, que é determinado quando a tensão máxima de von Mises atinge ou ultrapassa a tensão máxima de ruptura do material.

Todos os modelos, sejam reais ou idealizados tem as seguintes características:

- Comprimento do duto ( $L_d$ ) - 1500 mm
- Diâmetro do duto ( $D$ ) - 508 mm
- Espessura nominal do duto ( $t$ ) - 8.2 mm
- Comprimento do defeito ( $L$ ) - 184 mm
- Largura do defeito ( $w$ ) - 115 mm

As profundidades máximas ( $h$ ) dos dez defeitos reais base, que são as mesmas profundidades dos defeitos idealizado, são mostrados na Tabela 1. Para executar as análises foi usado a curva de material mostrada na Tabela 2.

As características físicas do material de referência utilizados nas análises dos modelos de elementos finitos são mostradas a seguir:

**Tabela 1: Profundidade máxima de cada defeito real base.**

| Caso   | 0    | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|--------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| h (mm) | 5.31 | 5.54 | 4.5 | 5.71 | 4.93 | 5.04 | 4.59 | 3.58 | 5.91 | 5.05 |

**Tabela 2: Dados da tensão x deformação do material utilizado.**

| Deformação   | Tensão (MPa)   |
|--------------|----------------|
| 0.0017427184 | 359            |
| 0.0054139056 | 376            |
| 0.0090850928 | 390            |
| 0.0194322819 | 425            |
| 0.0241614925 | 435            |
| 0.045965611  | 465            |
| 0.0771786733 | 490            |
| 0.0996711554 | 502.6874346083 |
| 0.1868389109 | 535            |

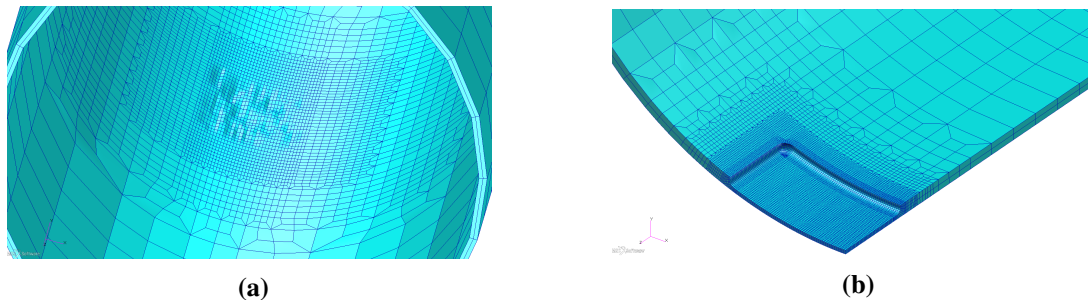
- $E = 206000$  MPa
- $\nu = 0.3$
- $\sigma_{esc} = 359$  MPa
- $\sigma_{rup} = 535$  MPa

Após obter os resultados das análises dos dez modelos reais, eles foram tomados como base para a idealização. Para cada modelo real foram gerados nove modelos idealizados mantendo-se fixos  $Ld$ ,  $D$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $w$ ,  $L$  e raio de concordância ( $rc$ ). A única variável do problema foi o raio de adoçamento ( $ra$ ), que foi variado conforme a Tabela 3, isso para cada modelo real de referência.

A Figura 1 ilustra a configuração da malha e do defeito de um modelo real utilizado como base (a) e um modelo idealizado gerado a partir de algum modelo base real (b).

**Tabela 3: Variação paramétrica do raio de adoçamento pela profundidade do defeito.**

| Caso | ra/h         |
|------|--------------|
| 0    | 0.01         |
| 1    | 0.0762071563 |
| 2    | 0.2086252354 |
| 3    | 0.3410357815 |
| 4    | 0.4734463277 |
| 5    | 0.6058568738 |
| 6    | 0.73826742   |
| 7    | 0.8706967985 |
| 8    | 0.97         |

**Figura 1: Imagens da discretização utilizadas em (a) defeitos reais e (b) defeitos idealizados.**

### 3 RESULTADOS

Após a realização das cem análises dos modelos de elementos finitos criados (dez modelos reais mais noventa modelos idealizados), todos os grupos bases mostram clara convergência dos seus resultados a partir de  $ra/h = 0.5$ . A Tabela 4 mostra um resumo dos resultados das pressões de falha dos casos analisados. Na Figura 2 podemos ver o passo de carga em que a tensão máxima é atingida para um dos modelos reais base.

Tabela 4: Pressão de falha (MPa) de cada análise realizada.

|       | res-real | res0  | res1  | res2  | res3  | res4  | res5  | res6  | res7  | res8  |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| real0 | 13.38    | 9.89  | 10.64 | 11.11 | 11.44 | 11.45 | 11.45 | 11.45 | 11.47 | 11.5  |
| real1 | 13.57    | 8.76  | 9.92  | 10.52 | 10.84 | 11.04 | 11.07 | 11.08 | 11.08 | 11.12 |
| real2 | 13.54    | 11.73 | 12.27 | 12.74 | 12.74 | 12.73 | 12.73 | 12.73 | 12.75 | 12.77 |
| real3 | 13.59    | 8.18  | 9.64  | 10.11 | 10.36 | 10.78 | 10.77 | 10.77 | 10.77 | 10.8  |
| real4 | 13.43    | 10.87 | 11.42 | 12.09 | 12.1  | 12.09 | 12.09 | 12.1  | 12.12 | 12.14 |
| real5 | 13.58    | 10.49 | 11.2  | 11.81 | 11.91 | 11.91 | 11.92 | 11.91 | 11.94 | 11.96 |
| real6 | 13.36    | 11.54 | 12.12 | 12.6  | 12.61 | 12.61 | 12.61 | 12.61 | 12.63 | 12.64 |
| real7 | 13.58    | 13.37 | 13.56 | 13.55 | 13.55 | 13.56 | 13.56 | 13.57 | 13.58 | 13.56 |
| real8 | 13.21    | 7.34  | 8.62  | 9.52  | 9.79  | 10.09 | 10.35 | 10.36 | 10.39 | 10.41 |
| real9 | 13.58    | 10.48 | 11.2  | 11.78 | 11.9  | 11.9  | 11.91 | 11.89 | 11.91 | 11.94 |

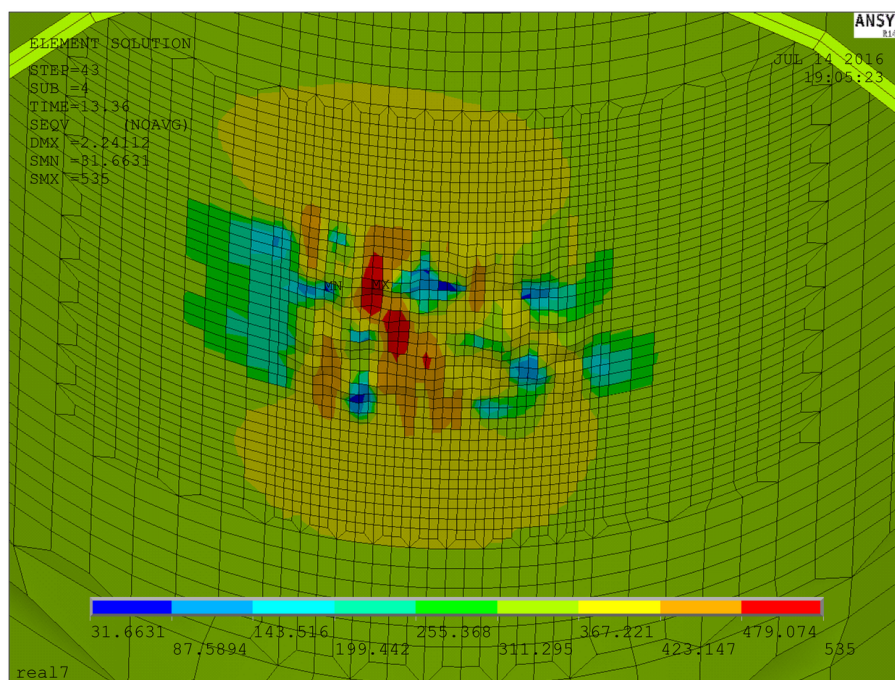
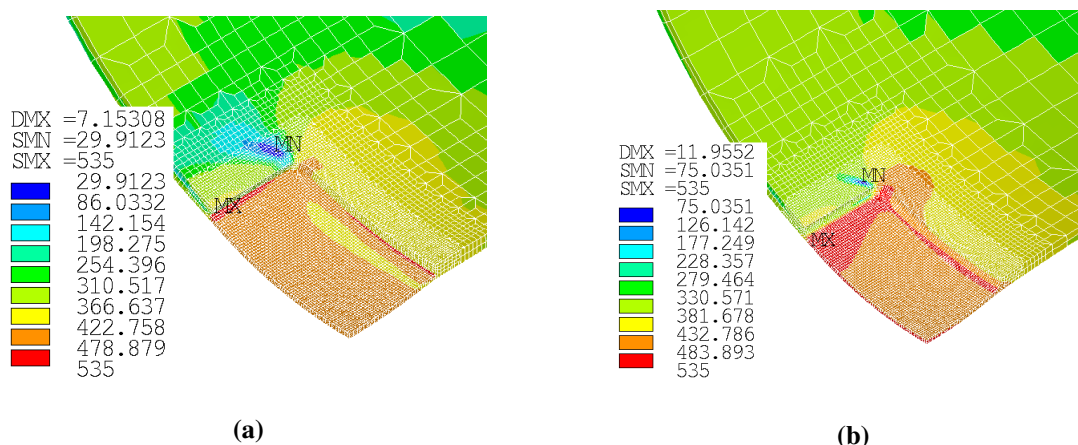


Figura 2: Figura que ilustra uma das análises de um dos modelos reais base utilizados.

Pela Figura 3 podemos ver que quando o modelo tem uma relação  $ra/h$  muito pequena a falha se dá exatamente na região do  $ra$  (a), claramente mostrando que valores baixos dessa relação podem provocar concentração de tensões artificiais, enviesando o resultado. Já em (b) podemos ver que a falha passa a ocorrer na região do defeito.



**Figura 3: Modelos idealizados onde (a) o raio de adoçamento é pequeno em relação a  $h$  e (b) a relação do raio de adoçamento e profundidade do defeito é maior que 0.5.**

Os gráficos da Figura 4 apresentam a convergência das análises para cada caso. As linhas e pontos em vermelho mostram os resultados da pressão de falha dos modelos reais e as linhas e pontos azuis mostram os resultados dos modelos idealizados com parametrização do  $ra$ .

## 4 CONCLUSÃO

Utilizando os dois módulos da ferramenta PIPEFLAW, o módulo de modelagem e o módulo de análise, pode-se obter resultados que podem se tornar referência em relação a geometria idealizada de modelos de elementos finitos de dutos corroídos. A ferramenta foi utilizada na tentativa de determinar um padrão razoável e seguro do raio de adoçamento utilizado na geração de modelos idealizados.

A partir da realização de análise paramétrica e dos resultados encontrados, pode-se concluir com segurança que os raios de adoçamento utilizados na idealização de modelos de dutos corroídos devem ser acima de  $ra/h = 0.5$  para garantir que a análise não seja enviesada por uma concentração de tensões nos cantos do defeito.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à PETROBRAS por permitir que esse trabalho fosse publicado, pelo fornecimento dos artigos contendo e dos dados numéricos utilizados e pelo apoio nas pesquisas junto ao grupo PADMEC. Os autores gostariam também de agradecer à FINEP/CT-PETRO, através da rede RPCMOD, CAPES, CNPq e a FACEPE pelo apoio financeiro que possibilitou a execução deste trabalho e de vários outros que vêm sendo desenvolvidos nesta área pelo grupo de pesquisa PADMEC.

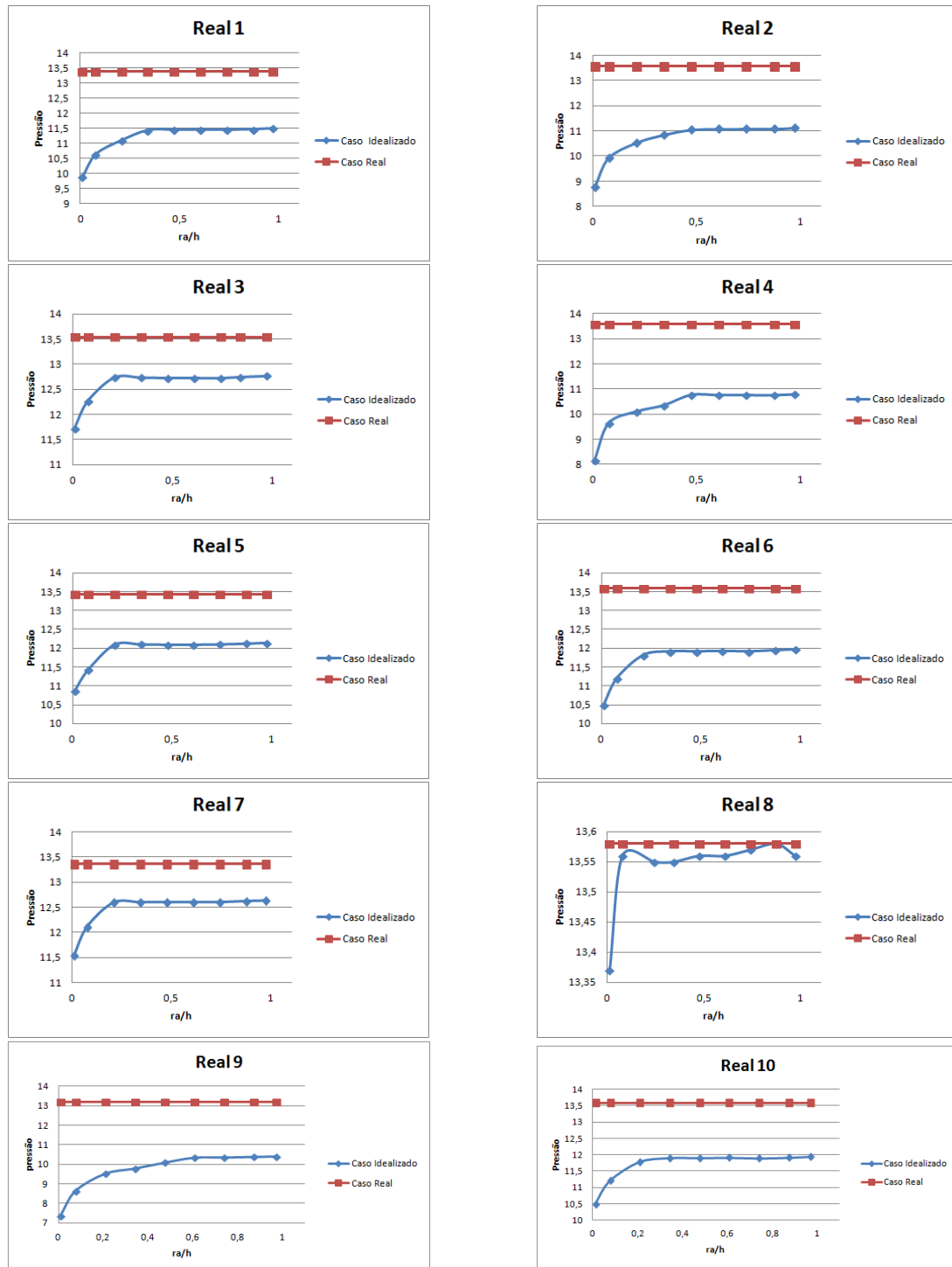


Figura 4: Gráficos de convergência da pressão da falha com a variação da relação  $ra/h$  para cada modelo real base.



## BIBLIOGRAFIA

ANSYS. *Release 14.5 Documentation*. Canonsburg, Pennsylvania, U.S.A., 2012.

CABRAL, H. L. D. *Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais para Modelagem e Análise Automática de Defeitos de Corrosão em Dutos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

CABRAL, H. L. D.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; AFONSO, S. M. B.; MOTTA, J. V. S. Finite element analyses of the behaviour of pipelines with multiple longitudinally aligned corrosion defects. In: *19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007*. [S.l.: s.n.], 2007.

CABRAL, H. L. D.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; AFONSO, S. M. B.; MOTTA, J. V. S.; ANDRADE, E. Q. Modelagem e análise automática de dutos com múltiplos defeitos de corrosão alinhados circunferencialmente. In: *Iberian LatinAmerican Congress on Computational Methods in Engineering, Buenos Aires, Argentina, Novembro, 2007*. [S.l.: s.n.], 2007.

CABRAL, M. A. F. S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; BOUCHONNEAU, N. S.; ANDRADE, E. Q. A new tool for automatic nonlinear fe analysis of pipelines with corrosion defects. In: *Rio Pipeline Conference and Exposition, 2013*. [S.l.: s.n.], 2013.

FERREIRA, A. D. M. *Ferramentas Computacionais para Análise Estrutural de Dutos com Defeitos Reais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; ANDRADE, E. Q. A. . Automatic geometric modeling, mesh generation and fe analysis for pipelines with idealized defects and arbitrary location. In: *Rio Pipeline Conference and Exposition, 2009*. [S.l.: s.n.], 2009.

MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; ANDRADE, E. Q. Automatic modeling and analysis of pipelines with colonies of corrosion defects. In: *Iberian LatinAmerican Congress on Computational Methods in Engineering, Buenos Aires, Argentina, Novembro, 2010*. [S.l.: s.n.], 2010.

MSC.PATRAN. *User's Guide Reference Manual*. <http://www.mscsoftware.com>, 2012.

PYTHON. *Tutorial and Library Reference Manual*. <http://www.python.org/doc/>, 2011.