

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

ALCIANE VARGAS BASSO

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DNV-RP-F101 PARA DUTOS CORROÍDOS
SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA

CURITIBA

2014

ALCIANE VARGAS BASSO

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DNV-RP-F101 PARA DUTOS CORROÍDOS
SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. João Elias Abdalla Filho, Ph.D.

CURITIBA

2014

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À suprema divindade, Deus, pelo dom da vida. Obrigada por ser a minha luz e meu guia!

À mãezinha do céu, Boa Mãe, Maria, pelo conforto. Obrigada por ser bendita!

À minha mãe, Maria Salete, pelo incentivo e total segurança. Obrigada por acreditar em mim! Obrigada por suas orações! Obrigada por ser minha mãe!

Ao meu pai, Alceu Luiz, pelo exemplo de determinação. Obrigada pela sua conduta! Obrigada por ser meu pai!

À minha irmã, Mariane, pela alegria de você existir. Obrigada pela sua companhia! Obrigada por ser minha irmã!

Ao prof. João Elias, pela sua paciência, dedicação e nobreza de caráter. Obrigada pela confiança! Obrigada por estar sempre à disposição! Obrigada por sua eficiência e competência exemplar! Obrigada por ser meu orientador!

À Jane, por sua atenção e carinho. Obrigada por sua amizade! Obrigada por ser maravilhosa!

Ao prof. Shang, pela sua ajuda. Obrigada por ser atencioso!

Ao prof. Russo, pelo seu incentivo. Obrigada por sua torcida!

Ao amigo, Pe. Roberto, por seu suporte. Obrigada por suas orações!

Aos meus amigos da pastoral, em especial minha madrinha Mayara, obrigada pela acolhida!

Aos meus colegas Paula, Viviane e Sauro, pela ótima convivência. Obrigada pelo apoio, amizade e companhia!

À minha amiga Paula Fernanda, obrigada por ser exemplo de bondade e generosidade! Obrigada por seu carinho!

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná, que financiou esta conquista. Em especial, seu fundador, São Marcelino Champagnat. Obrigada!

Por vocês existirem na minha vida... Muito obrigada!

*“A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em
levantarmo-nos sempre depois de cada queda.”*

Confúcio

RESUMO

Dutos são uma forma eficiente de transporte de petróleo, gás natural, álcool etílico e seus derivados. Os dutos percorrem os mais variados terrenos desde os locais de produção para abastecer as regiões consumidoras. Por estarem em contato direto com o terreno faz com que os dutos sejam susceptíveis a defeitos de corrosão. A corrosão é uma das formas mais comuns de danos em dutos. Os defeitos de corrosão podem ser difíceis de detectar, além de apresentarem riscos que afetam a integridade dos materiais e estruturas na engenharia. Constatada a corrosão, deve-se avaliar qual a pressão máxima permitida para aquela situação. O estudo tem por objetivo avaliar os resultados fornecidos pelo método DNV-RP-F101 para dutos corroídos quando submetidos a carregamento de pressão interna para diferentes dimensões de defeitos de corrosão. A metodologia adotada primeiramente estima as pressões internas permitidas para dutos comprometidos com a perda de espessura causada por corrosão aplicando o método analítico DNV-RP-F101. Em seguida, compara esses resultados com soluções numérico-computacionais obtidas via o método dos elementos finitos. Neste caso, para validar o modelo no programa ANSYS, utiliza-se por referência Choi *et al.* (2003), onde tubos de alta resistência em aço X65 com sete diferentes geometrias de defeitos foram submetidos a testes experimentais. O que difere um defeito do outro é a dimensão, que pode variar no comprimento, profundidade ou largura, tendo-se optado pela geometria retangular por ser mais conservadora. Para avaliar a força restante nos dutos corroídos, dentre as diferentes metodologias existentes, optou-se para comparação o método B31G também conhecido como critério ASME, juntamente ao MEF, ambos comparados ao método DNV. Nos estudos realizados, ficou comprovado o reconhecido conservadorismo do método B31G na avaliação de defeitos longos. No geral, sem distinção de critério curto e longo, conforme ASME, o método DNV apresentou melhores resultados. Porém, o aprofundamento do estudo não garante afirmar que o método DNV é o mais recomendável para a estimativa da pressão de falha para dutos com defeitos de corrosão sob pressão interna.

Palavras-chave: *Dutos, defeitos de corrosão, método DNV-RP-F101, análise por elementos finitos.*

ABSTRACT

Pipelines are an efficient means to transport oil, natural gas, ethanol and derivatives. For being in direct contact with the soil, buried pipelines may be subjected to corrosion defects. Corrosion is the most common cause of pipeline damage. Once the defect has been detected, the associated failure pressure must be evaluated. To evaluate the applicability of the method DNV-RP-F101 for corroded pipes when subjected to combined loads of internal pressure. Estimate allowable internal pressure for pipes containing corrosion wall-reduction defects using the DNV-RP-F101 analytical method. Compare such results with numerical results provided by finite element analyses. In order to validate the numerical model using ANSYS program, experimental results provided by Choi *et al.* (2003) will be used. Seven API-X65 pipes containing wall reduction defects with varying length, width and depth have been bursted by internal pressure. After validating the numerical model, the stress states of the pipes will be obtained numerically. To evaluate the remaining strength in corroded pipelines, among the different methodologies, it was decided to compare the B31G method also known as ASME criterion along the MEF, both compared to the DNV method. In studies, it was proved the recognized conservatism B31G method to evaluate long defects. Overall, no criterion for distinguishing short and long, ASME, DNV method yielded better results. However, the deepening of the study can not guarantee stating that the DNV method is most recommended for estimating the failure pressure for pipelines with corrosion defects under internal pressure. Therefore, failure pressures provided by DNV-RP-F101 method will be compared to those provided by finite element analyses. Results will contribute to assess the accuracy of the DNV-RP-F101 method in evaluating corroded pipes subjected to internal pressure. Further, it is expected to assess the degree of conservativeness of the method to be used safely in practice.

Keywords: *Pipelines, corrosion defects, DNV-RP-F101 method, finite element analysis.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3 DNV-RP-F101	22
4 CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO	30
4.1 Elemento Finito	31
4.2 Propriedades do Material	32
4.3 Geometria do Duto com Defeito de Corrosão	33
4.4 Procedimento de Cálculo	35
5 ANÁLISES E RESULTADOS	39
5.1 Configurações da malha de elementos finitos.....	39
5.2 Diferentes geometrias de defeitos.....	47
5.3 Diferentes geometrias de duto	55
6 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e derivados.</i>	12
<i>Figura 2: Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural.</i>	12
<i>Figura 3: Fluxograma do processo de avaliação.</i>	23
<i>Figura 4: Representação das dimensões para defeito único.</i>	26
<i>Figura 5: Representação das dimensões para defeitos interagindo.</i>	26
<i>Figura 6: Representação do elemento "SOLID 186".</i>	31
<i>Figura 7: Duto com defeito de corrosão de geometria retangular.</i>	33
<i>Figura 8: Curva tensão-deformação do aço API X65.</i>	37
<i>Figura 9: Estudo de configuração da malha de elementos finitos, malha estruturada para defeito DA.</i>	40
<i>Figura 10: Estudo de configuração da malha de elementos finitos, malha automática para defeito DA.</i>	40
<i>Figura 11: Distribuição de tensões na região do defeito DA, malha estruturada.</i>	41
<i>Figura 12: Distribuição de tensões na região do defeito DA, malha automática.</i>	42
<i>Figura 13: Validação do modelo em malha automática, ref. Choi et al. (2003)Fonte: Software ANSYS (2010).</i>	43
<i>Figura 14: Validação do modelo em malha estruturada, ref. Choi et al. (2003).</i>	44

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Característica do estudo, método DNV.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2: Restrição de Resistência à Tração para PSL 1.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3: Geometria dos defeitos analisados com pressão de falha obtida por ensaio experimental</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4: Especificações de tubulações.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 5: Valores de deformação e tensão para o aço API X65</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 6: Comparativo de valores de pressão de falha obtidos pelos diferentes métodos em análise.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 7: Análise paramétrica para o duto em estudo, 100 defeitos diferentes.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 8: Análise de Convergência para Defeito Curto (Critério ASME).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 9: Análise de Convergência para Defeito Longo (Critério ASME).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 10: Comparativo entre amostragens</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 11: Análise paramétrica para diferentes geometrias de dutos</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 12: Análise de convergência para diferentes geometrias de dutos</i>	<i>56</i>

1 INTRODUÇÃO

Dutos são utilizados para o transporte de petróleo e derivados. De maneira eficiente, os dutos percorrem os mais variados terrenos desde os locais de produção para abastecer as regiões consumidoras. Portanto, com o aumento da demanda de energia é inevitável o crescimento da malha dutoviária.

Especialistas afirmam que os dutos têm potencial para aumentar participação na matriz de transportes do país. Questionada pela reportagem da Agência CNT de Notícias, a Transpetro garantiu que “a Petrobras estuda modelos de negócios que fomentem o crescimento da expansão dutoviária, com projetos de aumento da capacidade de bombeamento dos dutos que se encontram no limite da capacidade operacional”. Ainda de acordo com companhia, “o modal dutoviário tem potencial para crescer na interiorização de derivados a partir do litoral para regiões de grande concentração de demanda”. (ANP, 2013)

Assim como as hidrovias e ferrovias, o sistema de dutos exige altos investimentos para ser construído, o chamado custo fixo – grandes áreas precisam ser desapropriadas para dar espaço às instalações, por exemplo. O Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Industrial da Universidade de São Paulo (USP) estima que a construção de um quilômetro de dutos é oito vezes mais cara que a mesma distância em rodovias. No entanto, analistas garantem que o modal ainda é o mais apropriado a longas distâncias, uma vez que os gastos se diluem à medida que aumenta o percurso.

A Confederação Nacional dos Transportes (CNT) cita um exemplo de vantagem quando se usa o transporte dutoviário: a vazão média de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) em um bombeio recebido nos dutos da Liquigás – companhia de distribuição presente em 23 estados e que abastece 35 milhões de consumidores residenciais – é de 150 toneladas por hora ou 3.600 toneladas por dia. Para transportar a mesma quantidade pelas rodovias, a empresa estima que aproximadamente 144 caminhões a mais estariam em circulação. Como resultado teríamos mais chances de congestionamentos e

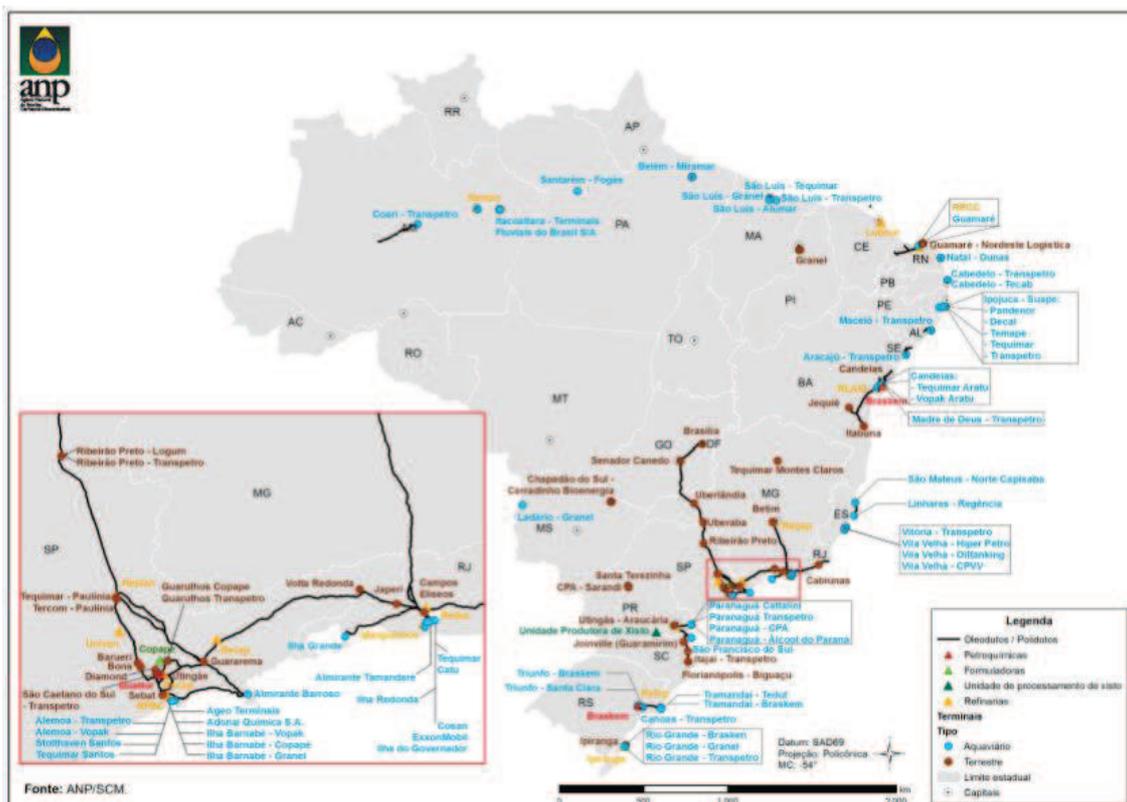
maior risco de acidentes. Dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) apontam que ele representa apenas 4% da matriz de transportes de cargas no Brasil, à frente apenas do segmento aeroviário. Na ponta, os líderes são o rodoviário (61,1%), ferroviário (20,7%) e aquaviário (13,6%). Esses números são resultado de um problema cultural no Brasil quando, na década de 50, o progresso era sinônimo de construir estradas. Por isso, temos uma extensão mínima de dutos em comparação a outros países.

Segundo dados da ANP (2013), no Brasil o número fica em torno de 22 mil km de dutovias em operação. Fica atrás da União Européia (800 mil) e de outros países com menor extensão territorial como México (40 mil), Argentina (38 mil) e Austrália (32 mil). A maioria dos mais de 400 dutos existentes no Brasil são utilizados para transporte de petróleo e derivados. O primeiro sistema foi instalado na Bahia, no início da década de 40, e ligava a Refinaria Experimental de Aratu até o Porto de Santa Luzia. A Petrobras detém a maior parcela do mercado de exploração, pesquisa e prospecção de petróleo em águas e solo brasileiros. Em 1997, outras empresas passaram a participar, pois até então a Petrobras detinha o monopólio para a prospecção, pesquisa e extração do petróleo no Brasil.

Dois sistemas de dutos são os mais conhecidos no Brasil. Primeiro, o controlado pela Transpetro, subsidiária da Petrobras que opera mais de 14 mil km de oleodutos e gasodutos no país. A companhia transporta gás, petróleo e derivados por todo o Brasil, principalmente às regiões Sudeste, Nordeste e Sul. Além da Petrobras, sua principal cliente, a Transpetro presta serviço a diversas distribuidoras e à indústria petroquímica. Iniciado em 1996, o Gasoduto Bolívia-Brasil saiu do papel a partir da iniciativa do governo brasileiro em oferecer uma nova opção de matriz energética – atualmente, transporta metade do gás natural consumido no país. (ANP, 2013)

Operado pela Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG), o sistema tem uma extensão total de 3.150 km – quase 2.600 estão em território nacional e atravessam os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

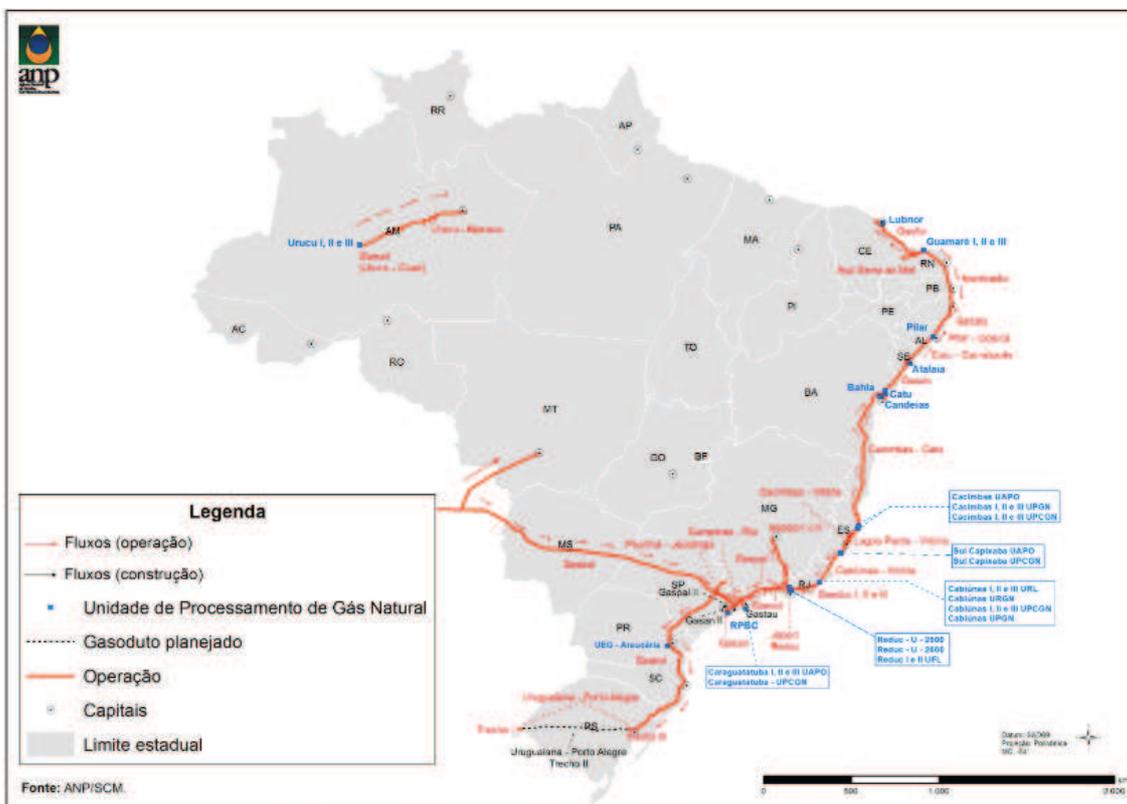
Apresentam-se a seguir, nos cartogramas fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo, figuras 1 e 2, os traçados dos dutos no Brasil.



Fonte: ANP/SCM.

Figura 1: Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e derivados.

Fonte: ANP/SCM (2013)



Fonte: ANP/SCM.

Figura 2: Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural.

Fonte: ANP/SCM (2013)

As vantagens para reverter esse quadro, dizem especialistas, não faltam. Segundo o gerente geral de logística e suprimentos da Liquigás, há grandes benefícios na utilização dos dutos: custos de manutenção mais baixos que os de outros modais, maior nível de segurança e confiabilidade. Eles permitem o transporte de grandes quantidades de um produto em pouco tempo. Entregam o material com pontualidade e uma assertividade muito grande. São altamente eficazes, é a melhor relação custo-benefício.

Outros pontos positivos são a dispensa de armazenamento, baixo consumo de energia, operações de carga e descarga simplificadas, menor suscetibilidade a perdas e roubos e possibilidade de operar ininterruptamente, 24 horas por dia, sete dias por semana. Na outra ponta, podemos citar como desvantagens a capacidade limitada de transporte (apenas gases, líquidos ou misturas semifluidas), resistência à entrada de novos agentes no mercado e riscos de acidentes ambientais se as tubulações se romperem. Portanto, os cuidados com o projeto e manutenção de dutos devem ser permanentes para evitar o colapso dos mesmos e minimizar riscos de desastres ambientais e prejuízos financeiros.

Com o tempo os dutos se tornam susceptíveis a sofrer danos. São várias as causas de defeitos em dutos. Elas podem ocorrer no ato da construção da dutovia ou ao longo de sua operação. Dentre os diferentes problemas que podem ocorrer nas tubulações, a forma mais comum é a corrosão.

A corrosão é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição. Pode ocorrer sobre as superfícies internas e externas do tubo, no material de base, na costura da solda, na solda circunferencial e/ou na zona associada afetada pelo calor. O duto, como outras estruturas metálicas, deterioram-se com o tempo, neste caso, a perda de metal na seção transversal, resultará em uma redução da capacidade de operação e segurança do duto. (COSHAM *et al.*, 2007)

Os defeitos de corrosão são responsáveis por afetar a vida útil de um duto, provocando desde pequenos vazamentos de difícil detecção pela pequena quantidade de óleo perdida, até o rompimento total.

Ao avaliar a corrosão, o efeito do crescimento contínuo da corrosão deve ser considerado. Se uma região corroída deve ser deixada no serviço, então as medidas devem ser tomadas para prender ainda mais o crescimento da corrosão, ou um programa de inspeção adequado deve ser adotado. Após a inspeção, determina-se a necessidade de intervenção a fim de efetuar reparos para garantir a continuidade da utilização do sistema. (DNV-RP-F101, 2004)

Assim, constatada a corrosão deve-se avaliar qual a pressão máxima permitida para aquela situação portanto métodos de avaliação são necessários para determinar a gravidade desses defeitos após serem detectados.

Para avaliar a força restante nos dutos corroídos, dentre as diferentes metodologias encontradas na literatura podemos citar o critério ASME ou método B31G, o método $0.85dL$ ou B31G modificado, o método RPA (*Rectangular Parabolic Area*) ou $0.85dL$ modificado, o método DNV (*Det Norske Veritas*) ou DNV-RP-F101 (*Recommend Practice F101 Corroded Pipelines*) e, por fim, o método PCORRC.

Como objetivo de abordagem neste estudo, através da análise paramétrica, objetiva-se avaliar os resultados fornecidos pelo método DNV-RP-F101 para dutos corroídos quando submetido a carregamento de pressão interna para diferentes dimensões de defeitos de corrosão. Para avaliar a força restante nos dutos corroídos, soluções obtidas através do método DNV, dentre as diferentes metodologias existentes, o critério ASME, também conhecido como método B31G foi escolhido por ser o método pioneiro e por isso mais conservador.

Assim, após estimar e avaliar as pressões internas permitidas para dutos comprometidos com a perda de espessura causada por corrosão aplicando o método analítico DNV-RP-F101, será possível comparar esses resultados com soluções numérico-computacionais obtidas via o método dos elementos finitos.

Conforme mencionado anteriormente, várias pesquisas, tendo dutos como foco principal, têm sido realizadas. Por isso, após este capítulo introdutório, uma breve revisão da literatura é apresentada no capítulo 2 com o intuito de levantar os assuntos mais relevantes em pesquisa. Na sequência, apresentam-se no capítulo 3, aspectos quanto à abordagem do método DNV-RP-F101, foco principal da pesquisa. As características do duto em estudo são especificadas no capítulo 4. A formulação do elemento finito, juntamente às

especificações quanto ao procedimento de cálculo para os métodos utilizados são incluídas de maneira explicativa neste capítulo. O capítulo 5 traz as análises e resultados obtidos. Por fim, no capítulo 6 discutem-se esses resultados como conclusão do estudo. Neste último capítulo ainda é proposto assuntos pertinentes à pesquisa para continuidade em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na engenharia dutoviária é imprescindível o estudo da corrosão na estrutura de dutos metálicos visto que estes defeitos podem levar a ruptura do duto, causando diversos problemas no meio em que estiver inserido. Na literatura, encontram-se vários estudos de análise da corrosão baseados na perda de espessura da parede do duto para determinar qual a pressão máxima permitida para aquela situação e avaliar a gravidade desses defeitos após serem detectados. Neste contexto, algumas das pesquisas realizadas que abordam estudos relacionados à corrosão serão apresentadas a seguir.

Park *et al.* (1996) avaliaram a redução da pressão de colapso de dutos longos que apresentam defeitos de corrosão do tipo mossas “circunferencial” com diferentes profundidades através de uma combinação de experiência e análise. Este estudo aborda o problema de avaliação da capacidade de colapso do duto danificado. Num total de 37 experimentos realizados, os resultados apresentaram uma correlação da seção transversal do defeito e a pressão de colapso bastante significativa do ponto de vista do seu efeito sobre o desempenho de um colapso do duto. Concluíram que o defeito tipo mossas reduz a resistência ao colapso local do cilindro. Por ser relativamente insensível à geometria detalhada de um dente, mas ser criticamente dependente do ovalização máxima de sua seção transversal mais deformado. Neste caso, só quando esta correlação for menor que 0,5% é que podem ser negligenciadas.

Choi *et al.* (2003) propuseram uma solução analítica para dutos com materiais de alta resistência contendo defeitos de corrosão. Os dutos em aço X65 com sete diferentes geometrias de defeitos foram submetidos a testes experimentais em escala real, cuja corrosão foi simulada por desgaste mecânico e com formato retangular. Simularam através de elementos finitos análises plásticas tridimensionais. O programa utilizado foi o ABAQUS, fazendo uso do elemento 3D isoparamétrico de 20 nós. Eles observaram que os resultados de estimativa de pressão de falha obtidos pelas simulações computacionais de elementos finitos estavam em conformidade com os dados

experimentais. Estes mesmos resultados quando comparados ao método B31G, comprovou-se o conservadorismo do método para defeitos curtos.

Valentini (2006) desenvolveu pesquisa para avaliar os métodos analíticos semi-empíricos de análise de dutos corroídos. Neste estudo, os métodos semi-empíricos que foram considerados são B31G (ASME), $0.85dL$ (B31G modificado), RPA ($0.85dL$ modificado) e o DNV (DNV-RP-F101). O método dos elementos finitos é utilizado para validar os resultados obtidos por tais métodos. Para análise utilizou-se dutos de materiais X65, X70 e X80 com defeitos isolados de corrosão sob carregamentos de pressão interna combinados a cargas axiais de compressão ou tração. No estudo, ficou comprovado o reconhecido conservadorismo do método B31G na avaliação de defeitos longos e a falta de conservadorismo do método $0.85dL$ na avaliação de defeitos de corrosão longos e profundos. O método RPA ainda poderia ser melhorado, com uma pequena modificação na sua formulação de defeitos longos, mais precisamente nos defeitos longos próximos da transição curto-longo, com a inserção de uma pequena queda dos valores de pressão. Por fim, o método DNV muitas vezes apresentou melhores resultados sem a aplicação do fator de modelagem.

Cosham *et al.* (2007) em pesquisa sobre a avaliação da corrosão em dutos, apresentam testes de pequena dimensão e de grande escala, análises teóricas e descrevem métodos de avaliação. O estudo baseia-se nos resultados de um projeto conjunto da indústria, o qual documenta as melhores técnicas atualmente disponíveis para a avaliação de defeitos em dutos (como a corrosão, moissas, goivas, defeitos de solda, etc.) em um manual de orientações sobre seu uso. Inicialmente, a investigação concentrou-se no comportamento de defeitos do tipo entalhes em forma de V e fendas, mas posteriormente, o estudo foi estendido a considerar defeitos artificiais e reais de corrosão. O foco principal da investigação sobre o significado de defeitos de corrosão tem sido no sentido de defeitos orientados longitudinalmente sujeitos a carga de pressão interna. O estudo avalia um único defeito, defeitos interagindo e considera métodos de avaliação mais precisos (menos conservadores) com regras de interação para estimar a resistência estática de dutos contendo defeitos de corrosão.

Silva *et al.* (2007) apresentaram uma aplicação da tecnologia de redes neurais para a avaliação de dutos com defeitos que interagem. Simulações de elementos finitos foram realizadas em um duto contendo dois defeitos em forma igualmente e alinhados, longitudinal ou de modo circunferencial. Com variações nos espaçamentos do defeito, formou-se uma base de dados que contém a relação entre as pressões de falha dos dutos com defeitos múltiplos e únicos. Portanto, o método dos elementos finitos é utilizado para produzir um banco de dados, que indica, para cada configuração de defeito múltipla, a perda de capacidade de carga do tubo, quando comparada com a capacidade de carga do tubo contendo um único defeito. As redes neurais foram concebidas usando esse banco de dados, que estabelece regras de interação e uma avaliação da interação desses defeitos nas direções longitudinais e circunferenciais. Os resultados das redes neurais são comparados com aqueles derivados a partir do código DNV-RP-F101. Observaram que os resultados obtidos não apresentam qualquer discrepância maior quando comparado com os resultados apresentados na literatura. Por fim, a baixa complexidade da aplicação apresentada neste estudo não permite a generalização das regras propostas, mas mostra a grande possibilidade de utilização de rede neural como uma ferramenta eficiente para avaliar a integridade estrutural de dutos corroídos.

Abdalla *et al.* (2010) desenvolveram uma pesquisa com abordagem na questão da avaliação da força residual de dutos corroídos para dois diferentes defeitos de corrosão. Defeitos oriundos da redução da espessura da parede e pit de corrosão. As análises numéricas são usados como uma tentativa de avaliar a pressão de falha de dutos submetidos ao primeiro tipo de defeito. Modelagem de elementos finitos com o elemento *SHELL* são utilizados e os resultados numéricos são comparados com os resultados fornecidos por métodos semi-empíricos. Observa-se que o método ASME B31G é conservador pois invariavelmente proporciona valores de pressão de falha menores que os valores de análise de elemento finito. Os outros dois métodos, *RSTRENG0.85dL* e DNV-RP-F101, também são em geral conservadores, embora em alguns casos, têm proporcionado resultados ligeiramente acima dos resultados de análise de elementos finitos. Assim, conclui-se que os métodos semi-empíricos são confiáveis para fins práticos. No caso de defeito

tipo pit de corrosão, alvo da pesquisa, analisando a distribuição de tensões em um segmento de duto submetido à deformação plástica, a relação de distribuição das tensões com a variação do diâmetro do duto é estabelecido. Verificou-se que a pressão aumenta com o aumento do diâmetro do duto. Assim, conclui-se com base nos resultados sobre defeitos do tipo pit de corrosão, que a formação da fenda deve iniciar no fundo do defeito.

Ma *et al.* (2011) analisaram o critério de avaliação ASME B31G – 2009, para a força restante em dutos corroídos. Esta terceira edição B31G, é a revisão mais recente emitido pelo ANSI (*American National Standards Institute*). Este estudo discute o processo de desenvolvimento de ASME B31G, e apresenta a análise comparativa da ASME B31G, *RSTRENG* e DNV-RP-F101 com base no cálculo de pressões de falha previstas para os 35 grupos de dados de ensaios de dutos. Discutem-se os desvios entre os valores previstos e os resultados experimentais reais utilizados. Finalmente, as aplicações práticas são comparadas entre os métodos de avaliação. O estudo revelou que as previsões baseadas em ASME B31G-2009 são muito mais precisas do que as previsões baseadas nas edições anteriores do B31G. Em comparação com as duas versões anteriores, a última edição ASME B31G-2009 mostrou muita precisão melhorada. As análises demonstram que nas aplicações do ASME B31G-2009 e *RSTRENG 0.85dL* melhora a eficiência do transporte de dutos e otimiza o custo de gerenciamento do sistema de tubulações. O conservadorismo do ASME B31G-2009 é quase o mesmo com *RSTRENG 0.85dL*. No entanto, ambos são aplicáveis apenas para avaliar dutos em aço de média e baixa resistência (abaixo de X65) e não é conservador para os aços de alta resistência. Em contraponto, o DNV-RP-F101 é adequado para os aços de alta resistência, mas os seus resultados muitas vezes não são seguros para aplicação a dutos de aços de baixa e média resistência. Por fim, o método ASME B31G-2009 deverá alargar o âmbito de aplicação na avaliação da qualidade de aços de alta resistência e de grande diâmetro.

Meliani *et al.* (2011) estudou a integridade estrutural dos dutos corroídos submetidos a pressão interna. Os defeitos semi-esféricos, semi-elípticos e defeitos de entalhe são examinados sob esta carga e os fatores de segurança são validados por meio do procedimento SINTAP (*Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry*) o qual é modificado usando um

diagrama de avaliação de falha baseado em entalhe, NFAD (*Notch-based Failure Assessment Diagram*). Dois métodos de avaliação de defeitos de corrosão em tubos são utilizados: análise limite (LA) e diagrama de avaliação de falha de entalhe modificado (NMFAD). Para análises de pressão limite o método ASME B31G, modificado ASME B31G, DNV-RP F-101 e o método de Choi foram utilizados. A avaliação do defeito é feita por comparação do fator de segurança para um valor prescrito (abordagem determinística) ou probabilidade de falha para um nível convencional. Os valores do fator de segurança são adaptados ao fator de segurança parcial de acordo com o grau de incertezas das propriedades do material, a fim de evitar o excesso de prudência. Além disso, o fator de segurança é de natureza probabilística associado a uma probabilidade de falha. Por fim, os resultados indicaram que o intervalo de confiança do fator de segurança tem um valor satisfatório.

Mutas *et al.* (2012) em pesquisa discutiram abordagens para a estimativa da resistência de estruturas cilíndricas sujeitos a pressões internas. Concluiu-se que a presença de certos defeitos de formas e tamanhos nas paredes de estruturas cilíndricas, sujeitos a pressões internas leva a uma diminuição da sua resistência estática. Ainda, pode-se perceber no estudo que o comprimento de um defeito ao longo do eixo, a profundidade na parede e a plasticidade do material são parâmetros básicos que influenciam a resistência estrutural.

Zhang *et al.* (2012) realizaram pesquisa sobre método probabilístico de avaliação com base nos critérios de avaliação de dutos corroídos. Um método de avaliação probabilística é fornecido para o duto com defeitos de corrosão com base nos critérios de avaliação de tubos corroídos atuais, e a probabilidade de falha de dutos corroídos devido às incertezas de cargas, bens materiais e precisão de medição são estimados utilizando o método Monte-Carlo. Além disso, a abordagem de análise de sensibilidade é introduzida a avaliar a influência de diversas variáveis aleatórias para a segurança do duto. É proposto método para determinar o tamanho crítico do defeito baseado em probabilidade de falha aceitável. As avaliações da integridade de dutos são realizadas utilizando abordagens deterministas convencionais, apesar de existirem muitas incertezas sobre os parâmetros na avaliação da integridade de dutos. A comparação dos resultados do cálculo de probabilidade de falha

indicou que a margem de segurança aplicada nos três critérios de avaliação utilizados é diferente. E os resultados da análise de sensibilidade mostraram que a pressão de operação e a profundidade do defeito são o fator dominante para a confiabilidade. Conseqüentemente, o intervalo de flutuação da pressão de funcionamento deve ser estritamente controlado para melhora nos resultados. A fim de aumentar a confiança, uma apresentação estatística mais refinada das variáveis aleatórias no modelo analítico certamente será necessária. Conclui-se ainda que, outros modos de falha devem ser investigados em estudos separados e informações adicionais sobre condições de duto devem ser incorporadas na análise para produzir uma prática mais segura e resultados econômicos.

3 DNV-RP-F101

DET NORSKE VERITAS (DNV) é uma fundação autônoma e independente com objetivos de salvaguarda da vida, a propriedade e o meio ambiente, no mar e em terra. DNV compromete classificação, certificação, verificação e outros serviços de consultoria relacionados com a qualidade das embarcações, instalações em terra e as indústrias em todo o mundo, e realiza pesquisas em relação a estas funções. (DNV-RP-F101, 2004)

A partir de uma diretriz de projeto desenvolvido em cooperação entre BG *Technology* e DNV (*Det Norske Veritas*), juntamente à organizações e empresas patrocinadoras, dentre elas, a PETROBRAS, formou-se a base técnica para a formulação deste método de avaliação de defeitos em dutos corroídos.

O projeto de tecnologia BG gerou um banco de dados de mais de 70 testes de ruptura em dutos usinados contendo defeitos de corrosão, incluindo defeitos individuais, defeitos interagindo e defeitos de forma complexos. Além disso, foi produzida uma base de dados completa de análises 3D não-linear de elementos finitos de dutos contendo defeitos. Foram desenvolvidos critérios para a previsão da força restante de dutos com defeito de corrosão.

Para carregamento combinado, o projeto gerou um banco de dados de 12 testes de ruptura em dutos contendo defeitos de corrosão, incluindo a influência das cargas axiais sobrepostos e flexão sobre a pressão de falha. Métodos probabilísticos foram utilizados para a calibração de código e a determinação de coeficientes parciais de segurança.

Os resultados dos seus respectivos projetos industriais conjuntos foram fundidos e formaram a base técnica para a prática recomendada. A intenção desta prática recomendada é fornecer procedimentos diferenciados para a avaliação da tubulação corroída. (DNV-RP-F101, 2004)

Um fluxograma descrevendo o processo de avaliação é mostrado na figura a seguir.

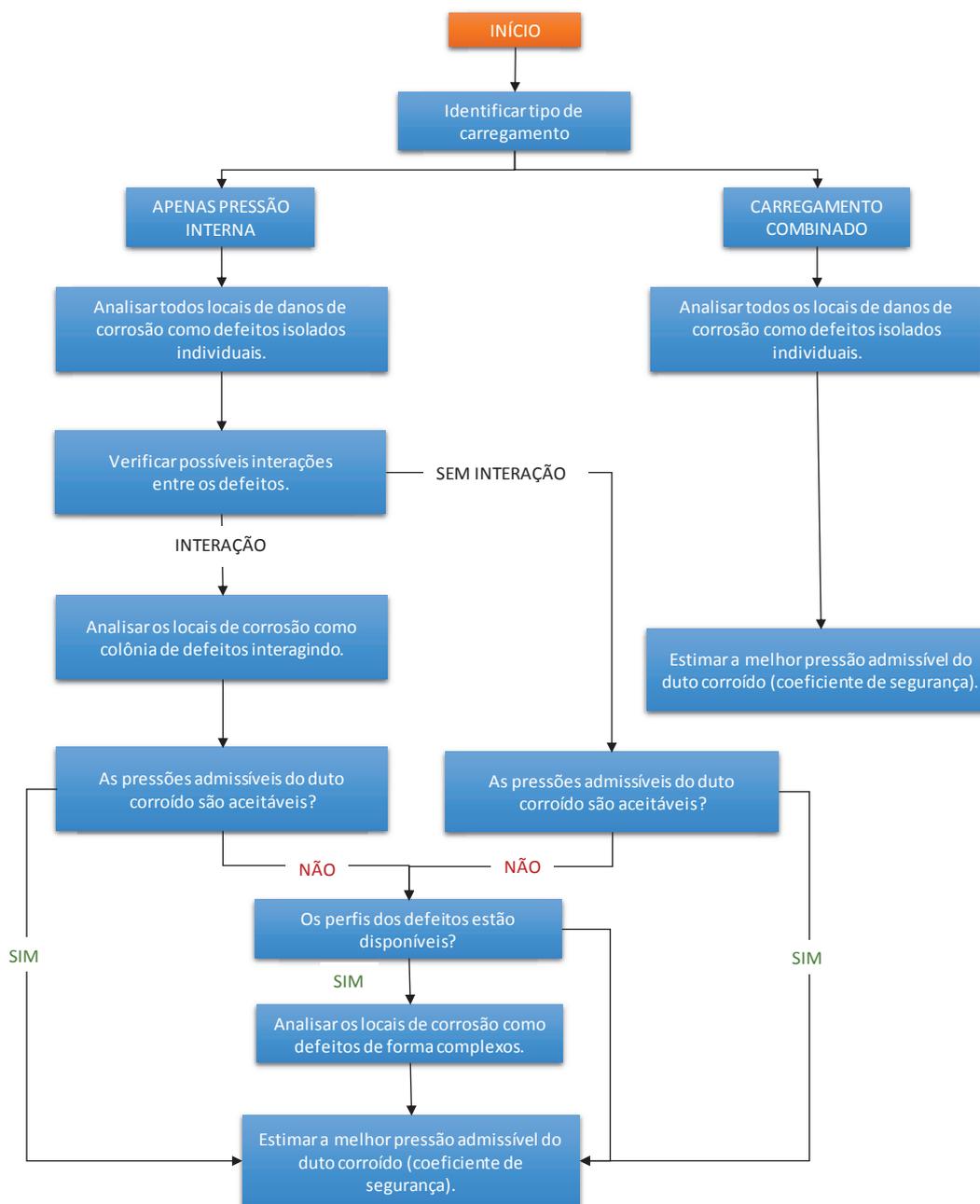


Figura 3: Fluxograma do processo de avaliação.

Fonte: Adaptado de *Recommended Practice DNV-RP-F101, October 2004*.

A metodologia empregada serve para avaliar dutos contendo corrosão. Os métodos fornecidos no documento da DNV-RP-F101 destinam-se a ser usado em caso de defeitos de corrosão em tubulações de aço carbono (não aplicável para outros componentes). Assim, destaca-se a seguir aspectos que estão fora do âmbito da DNV-RP-F101:

- 1) Materiais que não o duto de aço carbono.
- 2) Dutos de graus superiores de X80.
- 3) Carregamento cíclico.
- 4) Defeitos tipo rachaduras.
- 5) Combinado corrosão e rachaduras.
- 6) Combinado corrosão e danos mecânicos.
- 7) Defeitos atribuível aos danos mecânicos, por exemplo, goivas.
- 8) Defeitos de fabricação em soldas.
- 9) Defeitos de profundidades superiores a 85% da espessura da parede original.
- 10) Qualquer material que tem sido demonstrado que possuem uma temperatura de transição acima da temperatura de funcionamento.
- 11) Material de espessura superior a 12,7 mm (1/2 "), a menos que a temperatura de transição seja inferior à temperatura de funcionamento.

O documento DNV-RP-F101 fornece recomendações para avaliar dutos contendo defeitos de corrosão quando estão sujeitos ao carregamento da pressão interna apenas, e à carga de pressão interna combinada com tensões de compressão longitudinal nas seguintes combinações de carga/tensões e defeitos. Carga de pressão interna para defeito único, defeitos interagindo e defeitos de forma complexos. Diferentemente da abordagem de carregamento de pressão interna combinado com tensão de compressão longitudinal somente para defeitos individuais.

A tensão de compressão longitudinal pode ser devido a cargas axiais, cargas de flexão, cargas de temperatura, etc. Métodos para avaliar o comportamento dos defeitos de corrosão sob combinado de pressão interna e cargas de flexão e/ou cargas de tração longitudinais, não fazem parte da abordagem desta norma. O processo de avaliação só é aplicável aos dutos de aços que se espera virem a falhar por colapso plástico. Outros modos de falha como a flambagem, fissuras e fratura, podem ter de ser considerados ao avaliar a corrosão. Neste caso, outros métodos podem ser aplicáveis.

Quanto aos tipos de defeitos, utilizando a DNV-RP-F101, é possível avaliar a corrosão do tipo interna e externa no material base, na linha de junção e contorno das soldas, colônias de interação dos defeitos de corrosão e quando a perda de metal ocorre devido a reparos.

Quanto a avaliação do defeito, defeitos de perda de metal isolados deverão ser avaliados individualmente como defeitos individuais. Defeitos adjacentes podem interagir para produzir uma pressão de falha que é mais baixa do que as pressões de falhas individuais dos defeitos isolados tratados como um defeito único. Para o caso onde ocorre a interação, a equação de defeito único já não é válida e o processo deve ser estudado para a interação do defeito.

Um defeito pode ser tratado como um defeito isolado, e a interação com outros defeitos não precisam ser considerada, se qualquer uma das seguintes condições:

- 1) O espaçamento angular circunferencial entre defeitos adjacentes, φ :

$$\varphi > 360 \sqrt{\frac{t}{D}} \quad (1)$$

- 2) O espaçamento axial entre defeitos adjacentes, s :

$$s > 2.0 \sqrt{Dt} \quad (2)$$

Apresenta-se a seguir, nas figuras 4 e 5, a representação da geometria dos defeitos quando considerados individuais e quando ocorre a interação dos defeitos pela abordagem DNV-RP-F101.

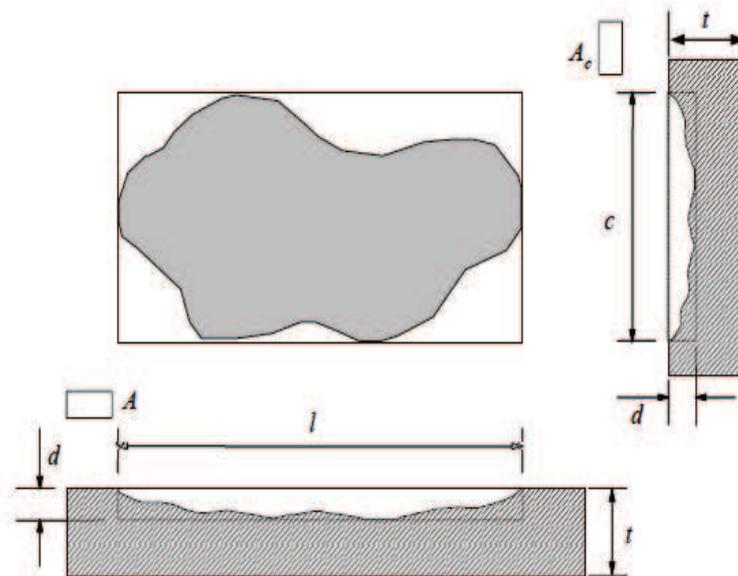


Figura 4: Representação das dimensões para defeito único.

Fonte: DNV-RP-F101, 2004.

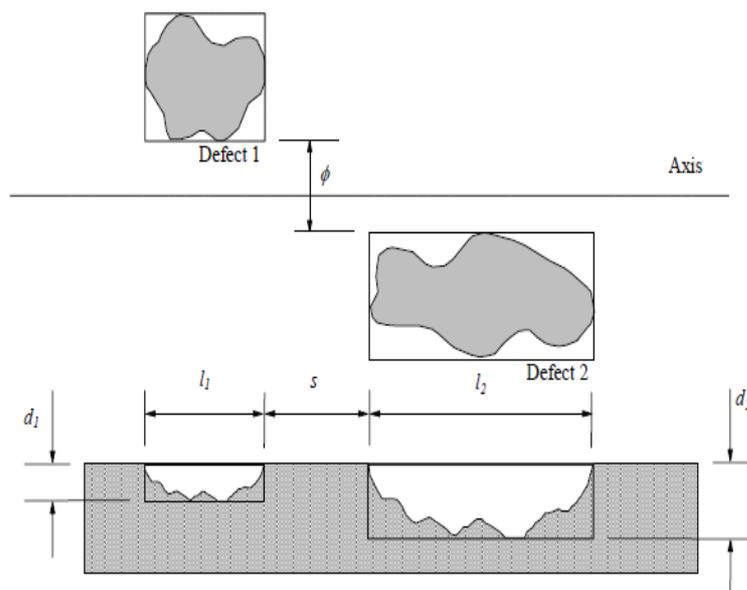


Figura 5: Representação das dimensões para defeitos interagindo.

Fonte: DNV-RP-F101, 2004.

Este documento DNV-RP-F101 descreve duas abordagens alternativas para a avaliação da corrosão. Apesar deste assunto não pertencer à abordagem desta pesquisa, a saber, a principal diferença entre as duas abordagens está na sua filosofia de segurança. Basicamente o primeiro método está baseado no fator de segurança parcial e o segundo é classificado como tensão admissível.

A primeira abordagem inclui fatores de segurança calibrados tendo em conta a propagação natural em propriedades do material, a espessura da parede e as variações de pressão interna. Incertezas associadas com o dimensionamento do defeito e da especificação das propriedades do material são consideradas na determinação da pressão de funcionamento permitida. Equações probabilísticas calibradas (com fatores de segurança parciais) para a determinação da pressão de funcionamento admissível de um duto corroído são dadas.

A segunda abordagem está baseada na tensão admissível. A pressão de ruptura do defeito corrosão é calculada, e esta pressão de falha é multiplicada por um fator de utilização com base no fator original de projeto. Aqui as considerações das incertezas associadas com o dimensionamento do defeito de corrosão são deixadas ao critério do utilizador.

Apresenta-se a seguir o procedimento de cálculo para defeitos únicos conforme formulações do método DNV-RP-F101. Para defeitos de corrosão isolado com quaisquer dimensões, sob carregamento de pressão interna, a norma recomenda:

$$P_{sw} = F \cdot P_f \quad (3)$$

$$F = F1 \cdot F2 \quad (4)$$

$$P_f = \tau_u \cdot \frac{2 \cdot t}{(D - t)} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) \cdot Q^{-1}} \right] \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \cdot \frac{l^2}{D \cdot t}} \quad (6)$$

Nas equações, sabe-se que:

P_{sw}	Pressão operacional, [N/mm ²];
P_f	Pressão de falha do duto corroído, [N/mm ²];
τ_u	Tensão última do material, [MPa];
D	Diâmetro externo do duto corroído, [mm];
t	Espessura da parede do duto corroído, [mm];
l	Comprimento do defeito de corrosão, [mm];
d	Profundidade do defeito de corrosão, [mm];
Q	Fator de correção do comprimento;
F	Fator de segurança;
$F1$	Fator de modelagem;
$F2$	Fator operacional;

Para defeitos de corrosão isolado com quaisquer dimensões, sob carga de pressão interna combinada a compressão longitudinal, a norma recomenda o procedimento de cálculo que apresenta-se a seguir.

$$P_{sw} = F \cdot P_f \quad (7)$$

$$F = F1 \cdot F2 \quad (8)$$

$$P_f = \min(P_{press}, P_{comp}) \quad (9)$$

$$P_{press} = \tau_u \cdot \frac{2 \cdot t}{(D - t)} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) \cdot Q^{-1}} \right] \quad (10)$$

$$P_{comp} = \tau_u \cdot \frac{2 \cdot t}{(D - t)} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) \cdot Q^{-1}} \right] \cdot H_1 \quad (11)$$

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \cdot \frac{l^2}{D \cdot t}} \quad (12)$$

$$H_1 = \frac{1 + \frac{\tau_L}{\tau_u \cdot A_r}}{1 - \frac{\left(1 - \frac{d}{t}\right)}{2 \cdot A_r \cdot \left(1 - \frac{d}{t}\right)}} \quad (13)$$

$$A_r = \left(1 - \frac{d}{t} \cdot \theta\right) \quad (14)$$

$$\theta = \frac{c}{\pi \cdot D} \quad (15)$$

Nas equações, sabe-se que:

P_{sw} Pressão operacional, [N/mm²];

P_f Pressão de falha do duto corroído, [N/mm²];

P_{press} Pressão de falha do duto corroído por defeito único sob carga de pressão interna, [N/mm²];

P_{comp} Pressão de falha do duto com defeito de corrosão isolado sob carga de pressão interna combinada a compressão longitudinal, [N/mm²];

τ_u Tensão última do material, [MPa];

τ_L Tensão de compressão longitudinal, [MPa];

D Diâmetro externo do duto corroído, [mm];

t Espessura da parede do duto corroído, [mm];

l Comprimento do defeito de corrosão, [mm];

c Largura do defeito de corrosão, [mm];

d Profundidade do defeito de corrosão, [mm];

Q Fator de correção do comprimento;

H_1 Fator de acréscimo da tensão de compressão longitudinal;

A_r Área circunferencial com fator de redução;

θ Razão entre o tamanho circunferencial na região da corrosão e a diâmetro externo do duto.

F Fator de segurança;

$F1$ Fator de modelagem;

$F2$ Fator operacional;

4 CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO

Verifica-se que o método DNV apresenta como diferencial a tensão última ao invés da tensão de escoamento como controlador do mecanismo de falha. Além de que admite interação entre defeitos, para carregamentos de pressão interna apenas. O método DNV ainda permite avaliar além da pressão interna, os defeitos de corrosão sob a influência de carregamentos combinados de pressão interna e tensões de compressão longitudinal. Porém, vale ressaltar que a abordagem deste estudo limita-se a análise do método DNV na estimativa da pressão de falha em duto corroído quando apresenta um único defeito de corrosão e sob a influência apenas da pressão interna.

Inicialmente será analisada uma série de 100 diferentes defeitos com variações nas suas dimensões de comprimento e espessura para uma mesma geometria de duto. Posteriormente, as análises se estenderão a defeitos em três diferentes dutos. Os resultados do método DNV serão comparados com base nos resultados obtidos pelo método B31G. Opta-se por este método também conhecido como critério ASME por ser o método pioneiro e por isso mais conservador.

Os resultados de ambos os métodos analíticos serão comparados com soluções numérico-computacionais obtidas via o Método dos Elementos Finitos. Considera-se as seguintes características atribuídas ao estudo, abordadas pelo método DNV, de maneira explicativa na tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Característica do estudo, método DNV

Característica do duto	Defeito de corrosão
Material do duto	Aço X65
Tipo de carregamento	Pressão interna
Tipo de análise	Estimativa da pressão de falha
Tipo do defeito	Defeito único
Formato do defeito	Retangular
Profundidades do defeito	20%, 40%, 60% e 80% da espessura da espessura da parede original do duto.

Fonte: A autora (2014)

4.1 Elemento Finito

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica para obtenção de soluções aproximadas em problemas de valor de contorno, sendo aplicado a uma grande variedade de problemas da engenharia. Em particular, tanto quanto um critério de falha apropriado tenha sido estabelecido, muitos estudos têm demonstrado a capacidade do MEF avaliar corretamente a pressão falha de dutos corroídos (SILVA *et al.*, 2007)

O MEF consiste em discretizar o domínio da solução em uma quantidade finita de subdomínios simples, denominados elementos finitos. Estes elementos são representados matematicamente quase sempre por expansões polinomiais, denominadas funções de forma do elemento. O conjunto de elementos, que podem assumir as mais variadas formas, é denominado malha. A solução global é obtida pelo somatório das soluções locais de cada elemento. (HUEBNER, 1995)

O elemento finito utilizado na simulação dos dutos com defeitos de corrosão foi o elemento tridimensional isoparamétrico de 20 nós *SOLID186* (ANSYS, 2010). A figura 6 mostra a geometria do elemento com geometria sólida, estrutural e homogênea, bem como a localização dos nós e o sistema de coordenadas locais e globais.

Para o elemento tridimensional, as análises realizadas são não-lineares, resolvidas a partir de incrementos de carga, em que considera-se a ocorrência de falha quando a tensão atingir o valor da tensão última do material em qualquer ponto.

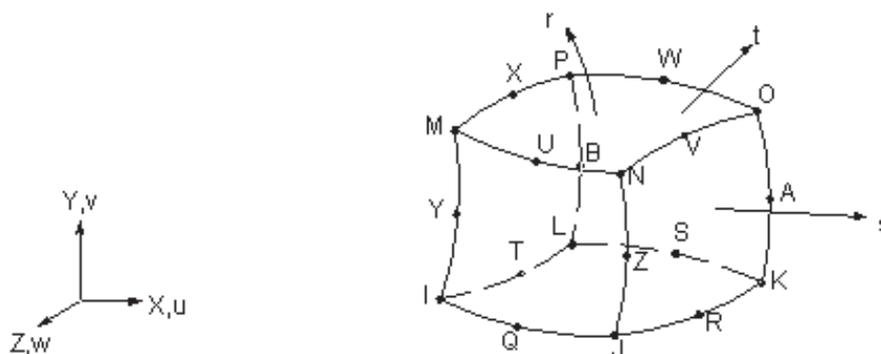


Figura 6: Representação do elemento “*SOLID 186*”.

Fonte: ANSYS (2010).

4.2 Propriedades do Material

Para a fabricação de dutos são utilizados aços de média a alta resistência com limite de escoamento e resistência à tração, conforme tabela 2 a seguir. As especificações são regidas pela norma API – *American Petroleum Institute*. As características deste grupo de aço são boa conformabilidade, tenacidade e soldabilidade. Os dutos em aço de alta resistência são indicados para aplicações em oleodutos, gasodutos, minerodutos, entre outras aplicações industriais, transportando petróleo, gás natural, álcool etílico e seus derivados.

Tabela 2: Restrição de Resistência à Tração para PSL 1

(1)	(2)		(3)	
	Limite de Escoamento Mínimo		Resistência à Tração Mínimo	
Grau	<i>psi</i>	<i>MPa</i>	<i>psi</i>	<i>MPa</i>
A25	25.000	172	45.000	310
A	30.000	207	48.000	331
B	35.000	241	60.000	414
X42	42.000	290	60.000	414
X46	46.000	317	63.000	434
X52	52.000	359	66.000	455
X56	56.000	386	71.000	490
X60	60.000	414	75.000	517
X65	65.000	448	77.000	531
X70	70.000	483	82.000	565

Fonte: Adaptado, *API Specification 5L for LinePipe (2000)*.

4.3 Geometria do Duto com Defeito de Corrosão

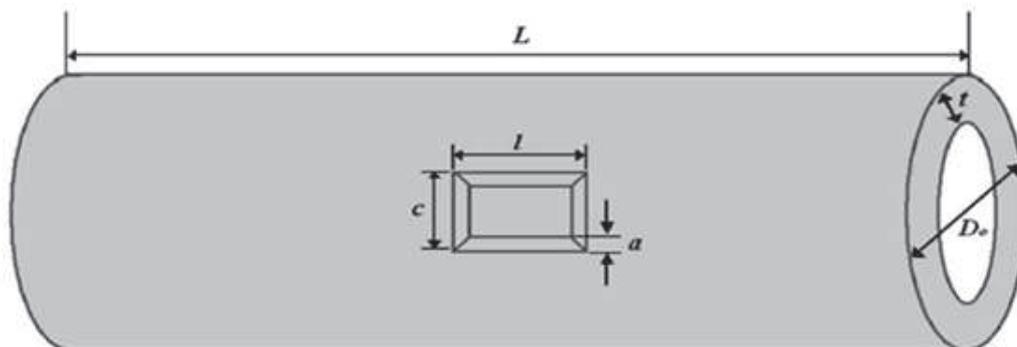


Figura 7: Duto com defeito de corrosão de geometria retangular

Fonte: Choi *et al.* (2003)

Inicialmente, por referência ao estudo experimental de Choi *et al.* (2003), o duto utilizado para o estudo de configuração da malha de elementos finitos nas simulações computacionais possui 2,3 metros de comprimento (L) e 762 mm de diâmetro externo (D) com 17,5 mm de espessura de parede (t). Os diferentes defeitos de corrosão em forma retangular apresenta as variáveis de comprimento (l), largura (c) e profundidade (a), esquematizado na figura 7, encontra-se detalhado na tabela 3 abaixo, com os respectivos valores de pressão de falha obtidos pelo ensaio experimental.

Tabela 3: Geometria dos defeitos analisados com pressão de falha obtida por ensaio experimental

Espécime	l (mm)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)	P (MPa)
DA	200	50	4,4	25	24,11
DB	200	50	8,8	50	21,76
DC	200	50	13,1	75	17,15
LA	100	50	8,8	50	24,30
LC	300	50	8,8	50	19,80
CB	200	100	8,8	50	23,42
CC	200	200	8,8	50	22,64

Fonte: Choi *et al.* (2003).

A modelagem consiste em examinar as pressões do duto com defeito de corrosão. Considerando a simetria do duto e um defeito centralizado,

consequentemente a análise computacional via elementos finitos ocorrerá em um quarto da estrutura danificada.

Após a configuração adequada da malha, o estudo se divide em análise para o duto de geometria 2,0 metros de comprimento e 508 mm de diâmetro externo com 12,7 mm de espessura de parede, para os diferentes tipos de defeitos. E na sequência, o aprofundamento do estudo ocorre para diferentes geometrias de duto e um mesmo critério de defeito. Os dutos possuem geometrias diferentes, conforme tabela 4, especificações retiradas da norma API (2000). Inicialmente, optou-se pelo duto com 2,0 metros de comprimento e 1930,4 mm de diâmetro externo e com os mesmos 12,7 mm de espessura de parede. E na segunda análise para diferentes geometrias, mantém-se o diâmetro externo de 508 mm e diminui para 9,525 mm a espessura de parede do duto. Nesta etapa de análises, apresentadas no próximo capítulo, os diferentes defeitos encontram-se relacionados na tabela 7, assim como os diferentes dutos analisados encontram-se na tabela 10.

Tabela 4: Especificações de tubulações

Tam.	Diâmetro Externo	Espessura da Parede	Peso por unidade de comp.	Diâmetro Interno	Teste Mínimo de Pressão (psi)										
	<i>D</i> (in)	<i>t</i> (in)	<i>Wpe</i> (lb/ft)	<i>d</i> (in)	Grau A	Grau B	Grau X42	Grau X46	Grau X52	Grau X56	Grau X60	Grau X65	Grau X70	Grau X80	
20	20.000	0.500	104.23	19.000	Std.	900	1500	1890	2070	2340	2520	2700	2930	3000	3000
					Alt.	1130	1310	1890	2070	2340	2520	2700	2930	3150	3600
20	20.000	0.375	78.67	19.250	Std.	680	790	1420	1550	1760	1890	2030	2190	2360	2700
					Alt.	840	980	1420	1550	1760	1890	2030	2190	2360	2700
30	30.000	0.688	215.58	28.624	Std.	830	960	1730	1900	2150	2310	2480	2680	2890	3000
					Alt.	1030	1200	1890	1900	2150	2310	2310	2480	2890	3300
76	76.000	0.500	403.55	75.000	Std.	240	280	500	540	620	660	710	770	830	950
					Alt.	300	350	500	540	620	660	710	770	830	950

Fonte: Adaptado, *API Specification 5L for LinePipe (2000)*.

4.4 Procedimento de Cálculo

4.4.1 Método B31G

Para defeitos curtos, onde $l \leq \sqrt{20.D.t}$, temos:

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \left(\frac{2.t}{D}\right) \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{a}{t}\right)}{1 - \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{a}{t} \cdot \left(\sqrt{1 + 0,8 \cdot \left(\frac{l^2}{D.t}\right)}\right)\right)} \right] \quad (16)$$

Para defeitos longos, onde $l > \sqrt{20.D.t}$, temos:

$$P_f = 1,1 \cdot \sigma_{esc} \cdot \left(\frac{2.t}{D}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{t}\right) \quad (17)$$

Analisando o método B31G, também conhecido como critério ASME, pode-se observar que para defeitos considerados curtos, além do coeficiente de escoamento (τ_{esc}) apresenta-se como variáveis na estimativa de pressão de falha as dimensões de comprimento (l) e profundidade do defeito (a). Assim como, as dimensões de diâmetro externo (D) e espessura da parede do duto (t). No segundo caso, em exceção à variável correspondente ao comprimento do defeito (l) que é desprezada, as demais variáveis mantêm-se como influência na previsão da pressão de falha para dutos contendo defeitos de corrosão considerados longos pelo critério ASME.

4.4.2 Método DNV-RP-F101

Como foco do estudo, para defeitos de corrosão isolado com quaisquer dimensões, sob carregamento de pressão interna, a norma recomenda:

$$P_f = \tau_u \cdot \frac{2 \cdot t}{(D - t)} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{a}{t}\right)}{1 - \left(\frac{a}{t}\right) \cdot Q^{-1}} \right] \quad (18)$$

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \cdot \frac{l^2}{D \cdot t}} \quad (19)$$

Aqui, pode-se observar como particularidade do método o coeficiente de resistência à tração (τ_u), como critério controlador da falha. Para aplicabilidade do método, como estimativa da pressão de falha no duto corroído, o método ainda exige que se conheça as dimensões de diâmetro externo (D) e espessura da parede (t) do duto, extensão longitudinal da corrosão, ou seja o comprimento (l) e a profundidade do defeito (a).

4.4.3 Simulações Numéricas

Neste estudo, inicialmente, foram feitas simulações dos dutos ensaiados por Choi *et al.* (2003), utilizando o método dos elementos finitos com elementos tridimensionais, a fim de validar a malha de elementos finitos por comparação dos resultados assim obtidos com os resultados correspondentes do experimento. Devido a simetria, foi considerado um quarto do duto na análise. Os dados geométricos considerados na simulação dos dutos representados na figura 7 são os seguintes:

- Comprimento do duto: $L = 2,3 \text{ mm}$
- Diâmetro externo do duto: 762 mm
- Espessura do duto: $t = 17,5 \text{ mm}$

A curva tensão-deformação para o material do duto utilizado neste estudo, aço API X65, foi obtida por Choi *et al.* (2003) e está representada na figura 8. Utilizando o critério de von Mises, assume-se que o escoamento ocorre quando a tensão cisalhante efetiva atinge o valor da tensão de escoamento. Assim sendo, os valores do módulo de elasticidade, da tensão de escoamento e da tensão última são obtidos a partir do gráfico.

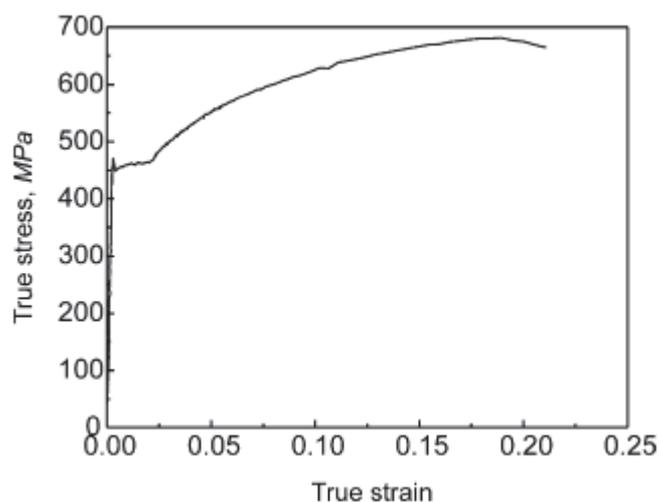


Figura 8: Curva tensão-deformação do aço API X65

Fonte: Choi *et al.* (2003)

Esta curva permite a obtenção de dados do material, como módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão última. Pois o processo de avaliação só é aplicável aos aços que se espera virem a falhar por colapso plástico.

Além disso, a partir de pontos desta curva, tabela 5, foram obtidos valores de deformações e de tensões correspondentes, considerados como dados de entrada desta curva no programa ANSYS para as análises realizadas.

Tabela 5: Valores de deformação e tensão para o aço API X65

Deformação	Tensão
0,0023	468
0,024	476
0,042	530
0,066	579
0,101	621
0,112	631
0,163	667
0,187	673

Fonte: Adaptado, Shang (2009)

O dados do material considerado, aço API X65, são apresentados a seguir, sendo os valores do módulo de elasticidade, da tensão de escoamento e da tensão última obtidos a partir do gráfico da figura 8.

- Coeficiente de Poisson : $\nu = 0,3$
- Módulo de elasticidade: $E = 203 \text{ GPa}$
- Tensão de escoamento: 468 MPa
- Tensão última: 673 MPa

Como descrito no item anterior, o elemento finito utilizado na simulação dos dutos com defeitos de corrosão foi o elemento tridimensional isoparamétrico de 20 nós *SOLID186* (ANSYS, 2010). A figura 6 mostra a geometria do elemento com geometria sólida, estrutural e homogênea, bem como a localização dos nós e o sistema de coordenadas locais e globais.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 Configurações da malha de elementos finitos

Neste caso, para validar o modelo no programa *ANSYS*, utiliza-se por referência Choi *et al.* (2003), onde tubos de alta resistência em aço X65 com sete diferentes geometrias de defeitos foram submetidos a testes experimentais. O que difere um defeito do outro é a dimensão, que pode variar no comprimento, largura ou profundidade, como pode-se observar na figura 7, tendo-se optado pela geometria retangular por ser mais conservadora.

Após a validação do modelo computacional será possível analisar o estado de tensões no duto para o caso em estudo. Portanto, neste caso, a pressão de falha estimada pelo método DNV-RP-F101 será comparada com o resultado obtido pelo programa *ANSYS*.

Para aplicabilidade do método DNV, nesta série de defeitos do estudo de Choi *et al.* (2003), considera-se que a temperatura de transição seja inferior à temperatura de funcionamento. Pois está fora da abordagem da DNV quando o material de espessura superior a 12,7 mm (1/2") tiver temperatura de transição superior à temperatura de funcionamento.

A modelagem consiste em examinar as pressões do duto com defeito de corrosão. Considerando a simetria do duto e um defeito centralizado, conseqüentemente a análise ocorrerá em um quarto da estrutura danificada.

Para realização adequada das análises, primeiramente foram realizados estudos adicionais para estabelecer uma configuração adequada de malha. Portanto, foram construídos dois modelos diferenciados de malhas para cada espécime em questão. Para ambos os casos, adotou-se uma malha constituída por elementos de 20 nós, *SOLID186* do programa *ANSYS*, com geometria sólida, estrutural e homogênea. Nas figuras 9 e 10, observa-se os dois modelos de malhas construídos para o primeiro caso de defeito.

O duto em análise possui 2,3 metros de comprimento e 762 mm de diâmetro externo com 17,5 mm de espessura de parede. No primeiro caso, o defeito apresenta as seguintes dimensões 200, 50 e 4,4 mm de comprimento, largura e profundidade, respectivamente. As dimensões de cada espécime encontram-se registradas na tabela 3.

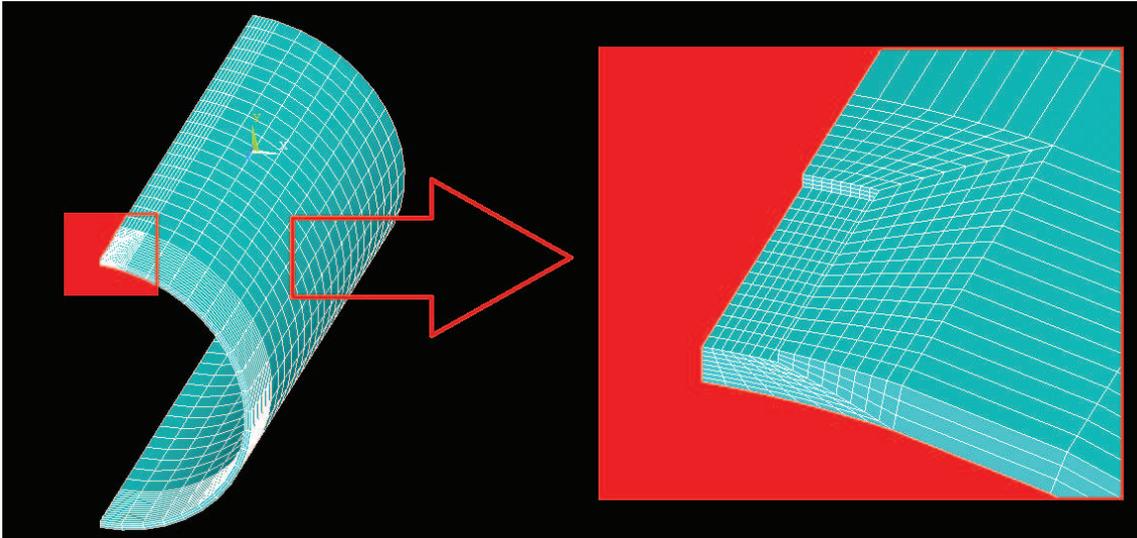


Figura 9: Estudo de configuração da malha de elementos finitos, malha estruturada para defeito DA

Fonte: Software ANSYS (2010)

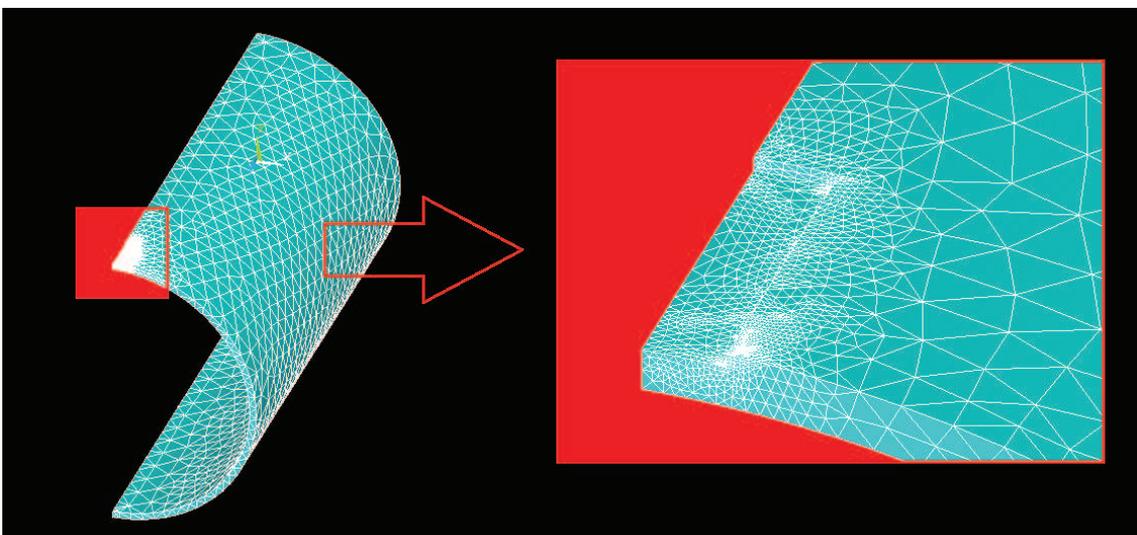


Figura 10: Estudo de configuração da malha de elementos finitos, malha automática para defeito DA.

Fonte: Software ANSYS (2010)

Para o elemento tridimensional, as análises realizadas são não-lineares, resolvidas a partir de incrementos de carga, em que considera-se a ocorrência de falha quando a tensão atingir o valor da tensão última do material em qualquer ponto. As figuras 11 e 12 correspondem a distribuição de tensões na região do defeito DA como comparativo para os dois tipos de malhas, malha estruturada e malha automática, respectivamente, do primeiro espécime analisado.

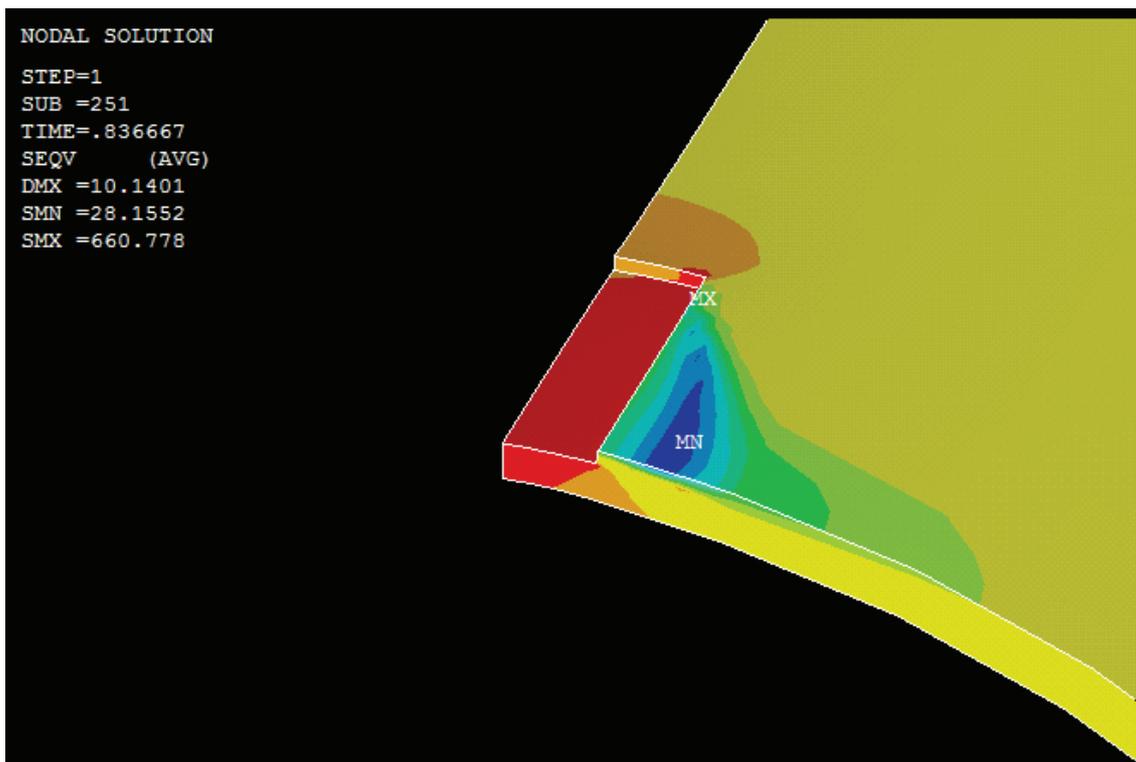


Figura 11: Distribuição de tensões na região do defeito DA, malha estruturada.

Fonte: Software ANSYS (2010)

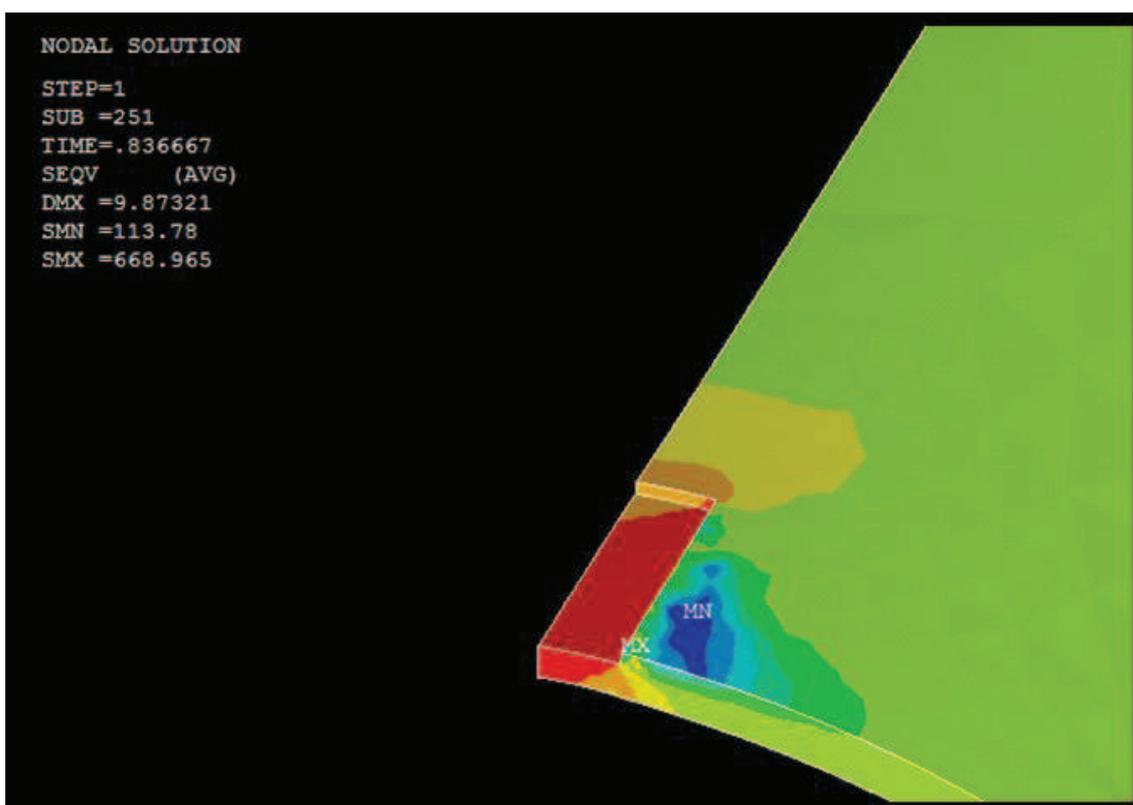


Figura 12: Distribuição de tensões na região do defeito DA, malha automática.

Fonte: Software ANSYS (2010)

A seguir, apresenta-se nas figuras 13 e 14, a sequência de distribuição de tensões na região do defeito analisada para as sete diferentes geometrias referente aos experimentos de Choi *et al.* (2003). Da mesma forma, compara-se a modelagem de elementos finitos para os dois tipos de malhas, malha estruturada e malha automática, respectivamente.

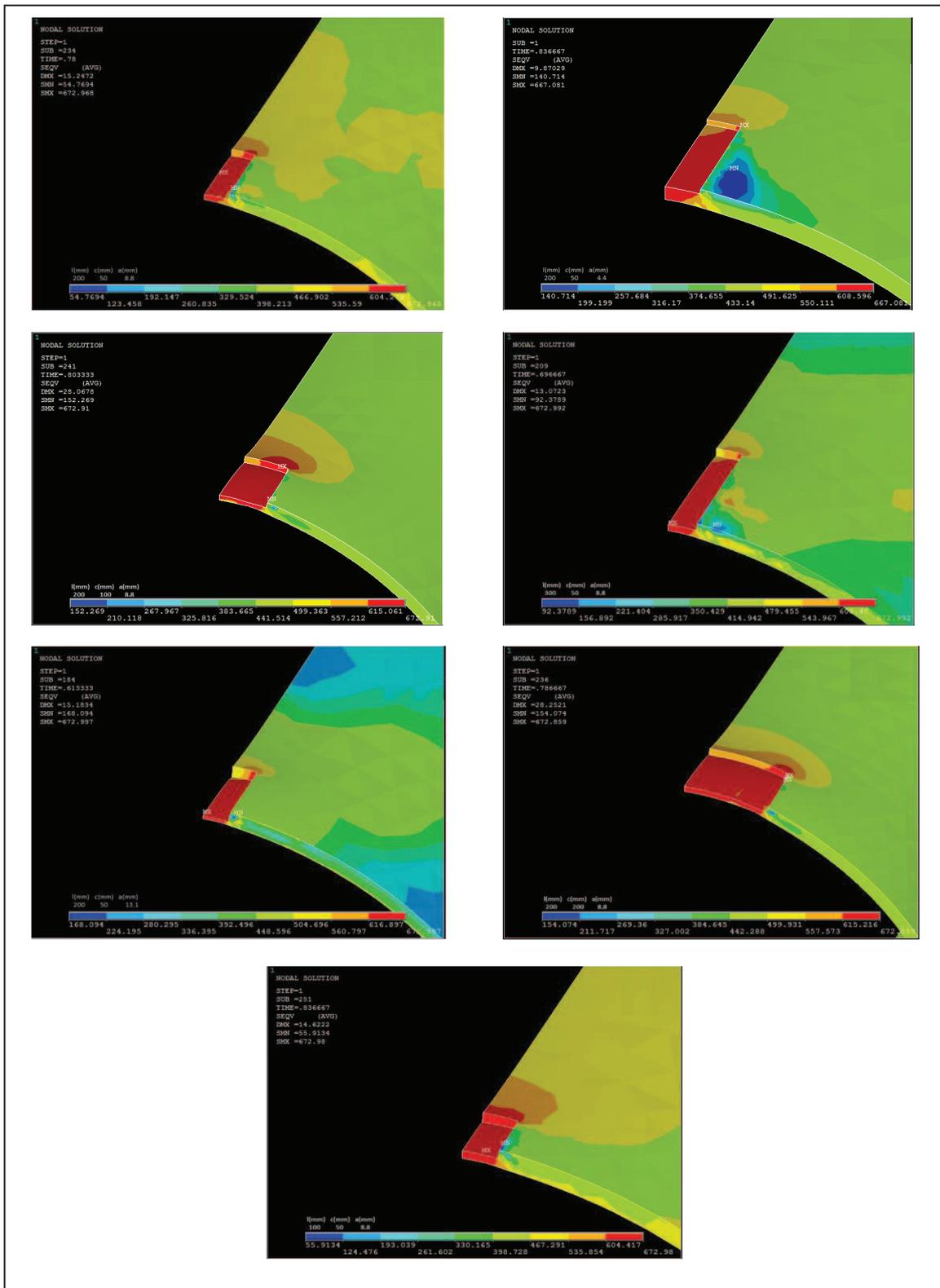


Figura 13: Validação do modelo em malha automática, ref. Choi *et al.*

(2003)Fonte: Software ANSYS (2010)

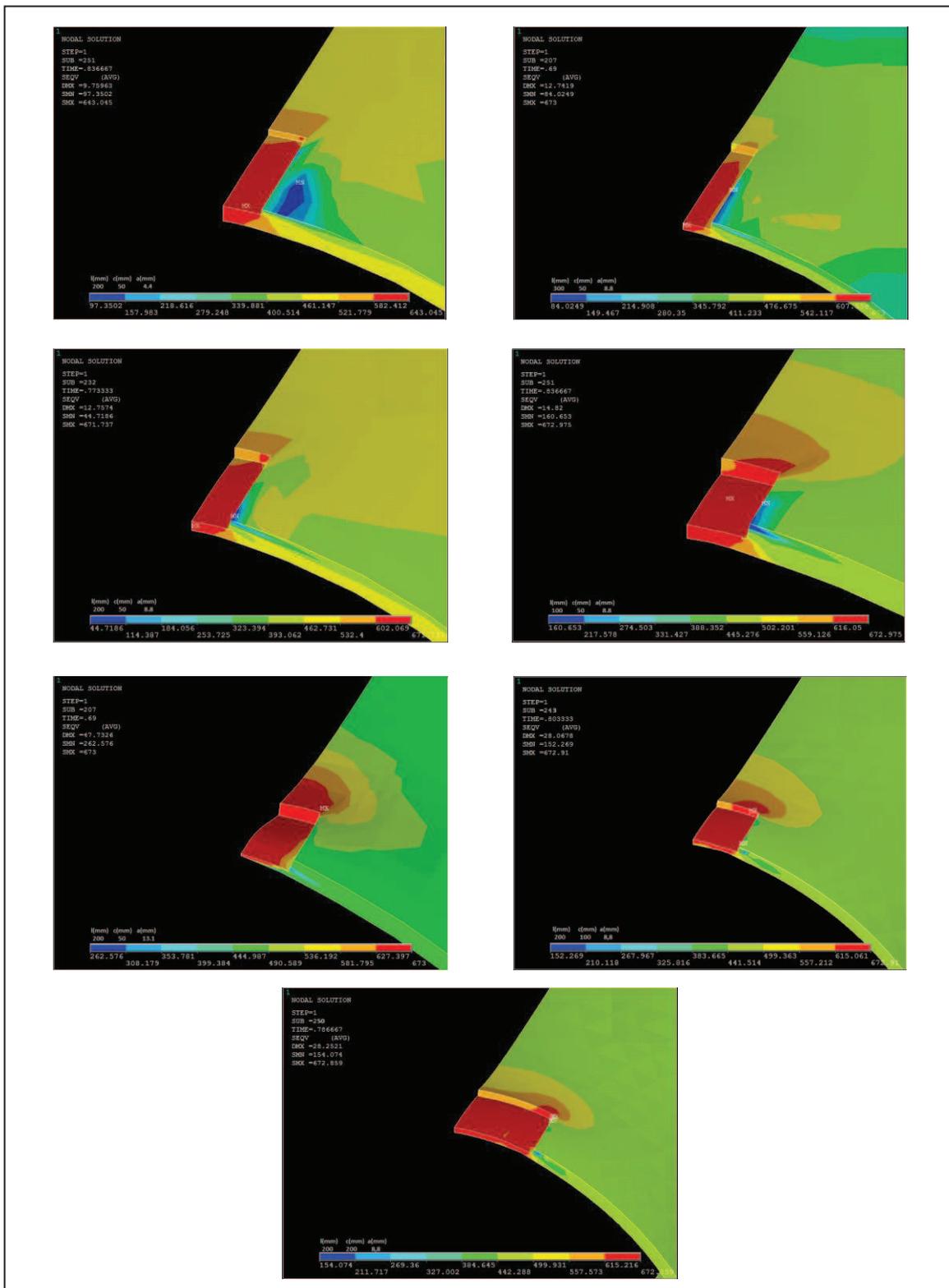


Figura 14: Validação do modelo em malha estruturada, ref. Choi *et al.* (2003)

Fonte: Software ANSYS (2010)

De acordo com Choi *et al.* (2003), a pressão registrada no ensaio experimental foi de 24,11 MPa, muito próximo àquela obtida através do programa ANSYS, no valor de 25,10 MPa. Para este caso de defeito, obteve-se através do método DNV-RP-F101 uma pressão de falha de intensidade 28,92 MPa, correspondente aos esforços de pressão interna no duto. Na sequência, foram analisados outros seis casos com diferentes variações de defeitos. As análises encontram-se registradas na tabela 6, a seguir.

Tabela 6: Comparativo de valores de pressão de falha obtidos pelos diferentes métodos em análise.

Espécime	P (MPa)					ERRO			
	Ensaio Experimental	B31G (ASME)	DNV	MEF		B31G (ASME)	DNV	MEF	
				Malha Automática	Malha Estruturada			Malha Automática	Malha Estruturada
DA	24,11	21,62	28,87	25,10	25,10	0,90	1,20	1,04	1,04
DB	21,76	19,17	24,60	23,40	23,20	0,88	1,13	1,08	1,07
DC	17,15	16,20	17,17	18,40	20,70	0,94	1,00	1,07	1,21
LA	24,30	21,35	28,70	25,10	25,10	0,88	1,18	1,03	1,03
LC	19,80	18,08	21,97	20,90	20,70	0,91	1,11	1,06	1,05
CB	23,42	19,17	24,60	24,10	24,30	0,82	1,05	1,03	1,04
CC	22,64	19,17	24,60	23,60	25,00	0,85	1,09	1,04	1,10

Fonte: A autora (2014)

Com base nos registros da tabela 6, pode-se verificar que o valor de pressão de falha possui a mesma intensidade para os espécimes DA e LA, através da solução numérico-computacional obtida via o método dos elementos finitos. Neste caso, comparativamente enquanto reduz-se à metade o comprimento do defeito, dobra-se o valor da profundidade do defeito, por isso na sequência será feito um estudo paramétrico mais detalhado para levantar conclusões mais acertivas do assunto.

Pode-se ainda verificar que para os espécimes DB, CB e CC, os valores calculados pelo método analítico DNV-RP-F101 são exatamente iguais. Isto justifica-se pois para análise de pressão interna, o método desconsidera a largura do defeito.

O estudo será aprofundado com análises para dutos corroídos com diferentes dimensões de defeitos. Neste caso, os resultados deverão contribuir

para determinar a acurácia do método DNV-RP-F101 para dutos corroídos quando esses dutos estão submetidos simultaneamente à ação de pressão interna e cargas de compressão. Espera-se também determinar se o método é suficientemente conservador para que possa ser utilizado na prática com segurança.

5.2 Diferentes geometrias de defeitos

No estudo de análise paramétrica de dutos contendo diferentes defeitos de corrosão, partimos do seguinte critério defeitos curtos e defeitos longos segundo o critério ASME. Por escolha, distancia-se em torno de 5% do limite. Assim sendo, a partir de pequenas variações definiu-se os diferentes defeitos conforme tabela 7.

Neste caso, quanto às dimensões do defeito, optou-se por variar o comprimento do defeito ao mesmo tempo que manteve-se a sua largura, para quatro diferentes profundidades no duto em estudo.

Os valores de pressão de falha estimados pelos métodos analíticos B31G e DNV são comparados ao método dos elementos finitos, listados na tabela 7. Os registros são comparados separadamente nas tabelas 8 e 9, para defeitos curtos e longos, respectivamente.

Ainda apresenta-se nos gráficos 1 e 2 os resultados obtidos no estudo e referenciados na tabela 7, para os métodos B31G e DNV respectivamente. Um comparativo entre esses métodos, é apresentado no gráfico 3.

Tabela 7: Análise paramétrica para o duto em estudo, 100 defeitos diferentes.

Análises	Dimensões do defeito				Tipo de defeito (critério ASME)	P _f (MPa)		
	l (mm)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)		B31G (ASME)	DNV-RP- F101	MEF
1	20	10	2,54	20	CURTO	24,55	27,17	27,4
2	20	10	5,08	40	CURTO	24,43	27,06	27,4
3	20	10	7,62	60	CURTO	24,25	26,85	27,4
4	20	10	10,16	80	CURTO	23,98	26,24	27,4
5	40	20	2,54	20	CURTO	24,32	26,99	27,3
6	40	20	5,08	40	CURTO	23,89	26,59	27,4
7	40	20	7,62	60	CURTO	23,30	25,82	27,4
8	40	20	10,16	80	CURTO	22,42	23,77	27,3
9	60	30	2,54	20	CURTO	24,02	26,72	27,4
10	60	30	5,08	40	CURTO	23,22	25,91	27,4
11	60	30	7,62	60	CURTO	22,15	24,42	27,3
12	60	30	10,16	80	CURTO	20,66	20,84	27,3
13	80	40	2,54	20	CURTO	23,72	26,40	27,4
14	80	40	5,08	40	CURTO	22,56	25,13	27,3
15	80	40	7,62	60	CURTO	21,08	22,92	27,3
16	80	40	10,16	80	CURTO	19,11	18,13	26,0
17	100	50	2,54	20	CURTO	23,44	26,07	27,4
18	100	50	5,08	40	CURTO	21,99	24,34	27,3
19	100	50	7,62	60	CURTO	20,18	21,49	26,6
20	100	50	10,16	80	CURTO	17,86	15,90	23,6
21	120	60	2,54	20	CURTO	23,21	25,74	27,4

22	120	60	5,08	40	CURTO	21,51	23,59	27,3
23	120	60	7,62	60	CURTO	19,44	20,22	25,3
24	120	60	10,16	80	CURTO	16,90	14,15	21,5
25	140	70	2,54	20	CURTO	23,01	25,44	27,3
26	140	70	5,08	40	CURTO	21,11	22,92	27,0
27	140	70	7,62	60	CURTO	18,86	19,13	24,2
28	140	70	10,16	80	CURTO	16,15	12,79	19,4
29	160	80	2,54	20	CURTO	22,85	25,15	27,3
30	160	80	5,08	40	CURTO	20,78	22,32	26,6
31	160	80	7,62	60	CURTO	18,38	18,21	23,1
32	160	80	10,16	80	CURTO	15,56	11,73	17,3
33	180	90	2,54	20	CURTO	22,71	24,90	27,3
34	180	90	5,08	40	CURTO	20,51	21,79	26,1
35	180	90	7,62	60	CURTO	18,00	17,43	21,7
36	180	90	10,16	80	CURTO	15,09	10,90	16,1
37	200	100	2,54	20	CURTO	22,59	24,67	27,3
38	200	100	5,08	40	CURTO	20,29	21,33	25,7
39	200	100	7,62	60	CURTO	17,68	16,78	20,6
40	200	100	10,16	80	CURTO	14,71	10,24	14,0
41	220	110	2,54	20	CURTO	22,49	24,47	27,3
42	220	110	5,08	40	CURTO	20,09	20,93	25,2
43	220	110	7,62	60	CURTO	17,42	16,23	19,9
44	220	110	10,16	80	CURTO	14,40	9,70	13,2
45	240	120	2,54	20	CURTO	22,40	24,29	27,3
46	240	120	5,08	40	CURTO	19,93	20,58	25,0
47	240	120	7,62	60	CURTO	17,19	15,77	19,5
48	240	120	10,16	80	CURTO	14,14	9,26	13,1
49	260	130	2,54	20	CURTO	22,33	24,13	27,3
50	260	130	5,08	40	CURTO	19,79	20,27	24,6
51	260	130	7,62	60	CURTO	17,00	15,37	18,9
52	260	130	10,16	80	CURTO	13,92	8,90	12,2
53	280	140	2,54	20	CURTO	22,26	23,98	27,4
54	280	140	5,08	40	CURTO	19,67	20,00	24,4
55	280	140	7,62	60	CURTO	16,84	15,02	18,4
56	280	140	10,16	80	CURTO	13,74	8,60	11,2
57	300	150	2,54	20	CURTO	22,20	23,85	27,3
58	300	150	5,08	40	CURTO	19,57	19,76	24,0
59	300	150	7,62	60	CURTO	16,70	14,72	17,8
60	300	150	10,16	80	CURTO	13,57	8,34	10,6
61	320	160	2,54	20	CURTO	22,15	23,74	27,3
62	320	160	5,08	40	CURTO	19,47	19,55	23,6
63	320	160	7,62	60	CURTO	16,58	14,46	17,3
64	320	160	10,16	80	CURTO	13,43	8,11	10,2
65	340	170	2,54	20	CURTO	22,11	23,63	27,3
66	340	170	5,08	40	CURTO	19,39	19,36	23,5
67	340	170	7,62	60	CURTO	16,47	14,23	16,9
68	340	170	10,16	80	CURTO	13,31	7,92	9,8
69	360	180	2,54	20	LONGO	19,71	23,54	27,4
70	360	180	5,08	40	LONGO	14,78	19,19	23,2
71	360	180	7,62	60	LONGO	9,86	14,02	16,6
72	360	180	10,16	80	LONGO	4,93	7,75	5,9
73	380	190	2,54	20	LONGO	19,71	23,45	27,2
74	380	190	5,08	40	LONGO	14,78	19,04	22,9
75	380	190	7,62	60	LONGO	9,86	13,84	16,3
76	380	190	10,16	80	LONGO	4,93	7,61	9,2
77	400	200	2,54	20	LONGO	19,71	23,37	27,2
78	400	200	5,08	40	LONGO	14,78	18,90	22,7

79	400	200	7,62	60	LONGO	9,86	13,68	16,0
80	400	200	10,16	80	LONGO	4,93	7,47	5,9
81	420	210	2,54	20	LONGO	19,71	23,30	27,2
82	420	210	5,08	40	LONGO	14,78	18,78	22,5
83	420	210	7,62	60	LONGO	9,86	13,53	15,8
84	420	210	10,16	80	LONGO	4,93	7,36	5,8
85	440	220	2,54	20	LONGO	19,71	23,23	27,2
86	440	220	5,08	40	LONGO	14,78	18,66	22,3
87	440	220	7,62	60	LONGO	9,86	13,40	15,6
88	440	220	10,16	80	LONGO	4,93	7,25	5,7
89	460	230	2,54	20	LONGO	19,71	23,17	27,2
90	460	230	5,08	40	LONGO	14,78	18,56	22,2
91	460	230	7,62	60	LONGO	9,86	13,28	15,5
92	460	230	10,16	80	LONGO	4,93	7,16	5,7
93	480	240	2,54	20	LONGO	19,71	23,12	27,2
94	480	240	5,08	40	LONGO	14,78	18,46	22,0
95	480	240	7,62	60	LONGO	9,86	13,17	15,3
96	480	240	10,16	80	LONGO	4,93	7,08	5,7
97	500	250	2,54	20	LONGO	19,71	23,06	27,2
98	500	250	5,08	40	LONGO	14,78	18,38	22,0
99	500	250	7,62	60	LONGO	9,86	13,07	15,4
100	500	250	10,16	80	LONGO	4,93	7,00	5,7

Fonte: A autora (2014)

Tabela 8: Análise de Convergência para Defeito Curto (Critério ASME)

Análises	Dimensões do defeito				Tipo de defeito (critério ASME)	ERRO		ERRO MÉDIO (DEFEITO)	
	l (mm)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)		B31G/MEF	DNV/MEF	B31G/MEF	DNV/MEF
1	20	10	2,54	20	CURTO	0,896	0,991		
2	20	10	5,08	40	CURTO	0,892	0,988		
3	20	10	7,62	60	CURTO	0,885	0,980	0,887	0,979
4	20	10	10,16	80	CURTO	0,875	0,958		
5	40	20	2,54	20	CURTO	0,891	0,988		
6	40	20	5,08	40	CURTO	0,872	0,970		
7	40	20	7,62	60	CURTO	0,850	0,942	0,859	0,943
8	40	20	10,16	80	CURTO	0,821	0,871		
9	60	30	2,54	20	CURTO	0,877	0,975		
10	60	30	5,08	40	CURTO	0,847	0,945		
11	60	30	7,62	60	CURTO	0,811	0,895	0,823	0,895
12	60	30	10,16	80	CURTO	0,757	0,763		
13	80	40	2,54	20	CURTO	0,866	0,964		
14	80	40	5,08	40	CURTO	0,826	0,920		
15	80	40	7,62	60	CURTO	0,772	0,839	0,800	0,855
16	80	40	10,16	80	CURTO	0,735	0,697		
17	100	50	2,54	20	CURTO	0,856	0,951		
18	100	50	5,08	40	CURTO	0,805	0,892		
19	100	50	7,62	60	CURTO	0,759	0,808	0,794	0,831
20	100	50	10,16	80	CURTO	0,757	0,674		
21	120	60	2,54	20	CURTO	0,847	0,940		
22	120	60	5,08	40	CURTO	0,788	0,864		
23	120	60	7,62	60	CURTO	0,769	0,799	0,797	0,815
24	120	60	10,16	80	CURTO	0,786	0,658		

25	140	70	2,54	20	CURTO	0,843	0,932		
26	140	70	5,08	40	CURTO	0,782	0,849	0,809	0,808
27	140	70	7,62	60	CURTO	0,779	0,790		
28	140	70	10,16	80	CURTO	0,832	0,659		
29	160	80	2,54	20	CURTO	0,837	0,921		
30	160	80	5,08	40	CURTO	0,781	0,839	0,828	0,807
31	160	80	7,62	60	CURTO	0,796	0,788		
32	160	80	10,16	80	CURTO	0,899	0,678		
33	180	90	2,54	20	CURTO	0,832	0,912		
34	180	90	5,08	40	CURTO	0,786	0,835	0,846	0,807
35	180	90	7,62	60	CURTO	0,829	0,803		
36	180	90	10,16	80	CURTO	0,937	0,677		
37	200	100	2,54	20	CURTO	0,827	0,904		
38	200	100	5,08	40	CURTO	0,789	0,830	0,881	0,820
39	200	100	7,62	60	CURTO	0,858	0,815		
40	200	100	10,16	80	CURTO	1,051	0,731		
41	220	110	2,54	20	CURTO	0,824	0,896		
42	220	110	5,08	40	CURTO	0,797	0,831	0,897	0,819
43	220	110	7,62	60	CURTO	0,875	0,816		
44	220	110	10,16	80	CURTO	1,091	0,735		
45	240	120	2,54	20	CURTO	0,821	0,890		
46	240	120	5,08	40	CURTO	0,797	0,823	0,895	0,807
47	240	120	7,62	60	CURTO	0,882	0,808		
48	240	120	10,16	80	CURTO	1,080	0,707		
49	260	130	2,54	20	CURTO	0,818	0,884		
50	260	130	5,08	40	CURTO	0,805	0,824	0,916	0,813
51	260	130	7,62	60	CURTO	0,900	0,813		
52	260	130	10,16	80	CURTO	1,141	0,730		
53	280	140	2,54	20	CURTO	0,812	0,875		
54	280	140	5,08	40	CURTO	0,806	0,820	0,940	0,820
55	280	140	7,62	60	CURTO	0,915	0,816		
56	280	140	10,16	80	CURTO	1,226	0,767		
57	300	150	2,54	20	CURTO	0,813	0,874		
58	300	150	5,08	40	CURTO	0,815	0,824	0,962	0,828
59	300	150	7,62	60	CURTO	0,938	0,827		
60	300	150	10,16	80	CURTO	1,281	0,786		
61	320	160	2,54	20	CURTO	0,811	0,869		
62	320	160	5,08	40	CURTO	0,825	0,829	0,978	0,832
63	320	160	7,62	60	CURTO	0,958	0,836		
64	320	160	10,16	80	CURTO	1,317	0,795		
65	340	170	2,54	20	CURTO	0,810	0,866		
66	340	170	5,08	40	CURTO	0,825	0,824	0,992	0,835
67	340	170	7,62	60	CURTO	0,974	0,842		
68	340	170	10,16	80	CURTO	1,358	0,808		

Fonte: A autora (2014)

Tabela 9: Análise de Convergência para Defeito Longo (Critério ASME)

Análises	Dimensões do defeito				Tipo de defeito (critério ASME)	ERRO		ERRO MÉDIO (DEFEITO)	
	l (mm)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)		B31G/MEF	DNV/MEF	B31G/MEF	DNV/MEF
69	360	180	2,54	20	LONGO	0,719	0,859		
70	360	180	5,08	40	LONGO	0,637	0,827	0,696	0,961
71	360	180	7,62	60	LONGO	0,594	0,845		

72	360	180	10,16	80	LONGO	0,835	1,314		
73	380	190	2,54	20	LONGO	0,725	0,862		
74	380	190	5,08	40	LONGO	0,646	0,832	0,628	0,842
75	380	190	7,62	60	LONGO	0,605	0,849		
76	380	190	10,16	80	LONGO	0,536	0,827		
77	400	200	2,54	20	LONGO	0,725	0,859		
78	400	200	5,08	40	LONGO	0,651	0,833	0,707	0,953
79	400	200	7,62	60	LONGO	0,616	0,855		
80	400	200	10,16	80	LONGO	0,835	1,267		
81	420	210	2,54	20	LONGO	0,725	0,857		
82	420	210	5,08	40	LONGO	0,657	0,835	0,714	0,954
83	420	210	7,62	60	LONGO	0,624	0,856		
84	420	210	10,16	80	LONGO	0,850	1,269		
85	440	220	2,54	20	LONGO	0,725	0,854		
86	440	220	5,08	40	LONGO	0,663	0,837	0,721	0,956
87	440	220	7,62	60	LONGO	0,632	0,859		
88	440	220	10,16	80	LONGO	0,865	1,273		
89	460	230	2,54	20	LONGO	0,725	0,852		
90	460	230	5,08	40	LONGO	0,666	0,836	0,723	0,950
91	460	230	7,62	60	LONGO	0,636	0,857		
92	460	230	10,16	80	LONGO	0,865	1,256		
93	480	240	2,54	20	LONGO	0,725	0,850		
94	480	240	5,08	40	LONGO	0,672	0,839	0,726	0,948
95	480	240	7,62	60	LONGO	0,644	0,861		
96	480	240	10,16	80	LONGO	0,865	1,241		
97	500	250	2,54	20	LONGO	0,725	0,848		
98	500	250	5,08	40	LONGO	0,672	0,835	0,725	0,940
99	500	250	7,62	60	LONGO	0,640	0,848		
100	500	250	10,16	80	LONGO	0,865	1,228		

Fonte: A autora (2014)

Com base na tabela 7, pode-se perceber para a amostragem de 100 defeitos que o método analítico B31G apresenta uma discrepância de 12% para defeitos curtos e 29% para defeitos longos, já o método DNV apresenta para os respectivos critérios 16% e 6%. Assim comprova-se o conservadorismo do método B31G (ASME) para defeitos longos, como pode-se comprovar no gráfico 1.

Observa-se que o método ASME B31G é conservador também pois invariavelmente proporciona valores de pressão de falha menores que os valores de análise de elemento finito. O método DNV-RP-F101, também é em geral conservador, embora em alguns casos, têm proporcionado resultados ligeiramente acima dos resultados de análise de elementos finitos.

Na sequência, pode-se perceber para a amostragem de 64 defeitos que o método analítico B31G e DNV, respectivamente, apresentam um erro

percentual de 18% e 12%. Muito próximo à amostragem total de 100 defeitos com 18% e 13%, respectivamente.

Portanto, ao analisar a amostra para o mesmo número de defeitos curtos e longos, reduzindo-a à 64 defeitos, nota-se que em geral a diferença do erro percentual entre os métodos analíticos é quase irrelevante conforme tabela 10. Isto justifica uma amostragem consideravelmente significativa para o estudo.

Neste caso, observa-se uma melhor aplicabilidade do método DNV para defeitos longos. Analogamente, pode-se dizer que o método B31G se comporta melhor para dutos corroídos com defeitos curtos. Pode-se observar ainda, na tabela 7 que as pressões de falha obtida pelo método B31G são conservadoras quando comparado com o Método DNV.

Tabela 10: Comparativo entre amostragens

DEFEITO		B31G/MEF	DNV/MEF
TOTAL (100)	Erro Médio	0,822	0,873
	Erro Percentual	18%	13%
	Desvio Padrão	0,145	0,129
CURTO (68)	Erro Médio	0,877	0,842
	Erro Percentual	12%	16%
	Desvio Padrão	0,705	0,938
LONGO (32)	Erro Médio	0,705	0,938
	Erro Percentual	29%	6%
	Desvio Padrão	0,092	0,176
TOTAL (100)	Erro Médio	0,819	0,88
	Erro Percentual	18%	12%
	Desvio Padrão	0,145	0,129
CURTO (32)	Erro Médio	0,933	0,822
	Erro Percentual	7%	18%
	Desvio Padrão	0,132	0,086
LONGO (32)	Erro Médio	0,705	0,938
	Erro Percentual	29%	6%
	Desvio Padrão	0,092	0,176

Fonte: A autora (2014)

O gráfico 1 sugere um valor constante de pressão de falha após um certo tipo de defeito. Isto se justifica pela equação do método para defeitos longos com $l > \sqrt{20.D.t}$, equação 17, ao observarmos a equação o método desconsidera o comprimento do defeito como varável dependente na estimativa de pressão de falha para dutos corroídos. Observa-se no

comportamento da função que para um aumento progressivo de defeito, os resultados demonstram valores decrescentes de pressão de falha plotados na curva do gráfico 1.

Da mesma forma, isto ocorre na curva do gráfico 2 que apresenta plotado os valores de pressão de falha estimados pelo método analítico DNV-RP-F101 para dutos corroídos com defeitos que vão aumentando progressivamente nesta análise. Portanto, igualmente, no comportamento da função os resultados demonstram valores decrescentes de pressão de falha plotados na curva do gráfico. No entanto, pode-se observar que a curva está uniformemente distribuída, ou seja, não se verifica um salto no limiar da separação entre defeito curto e defeito longo, conforme critério ASME.

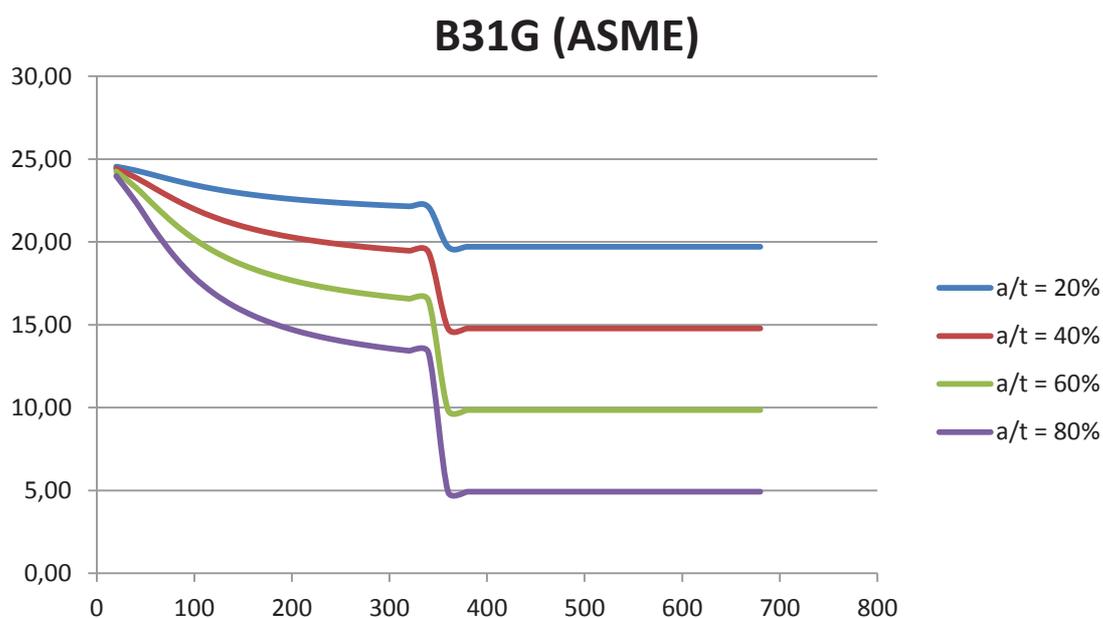


Gráfico 1: B31G (ASME)

Fonte: A autora (2014)

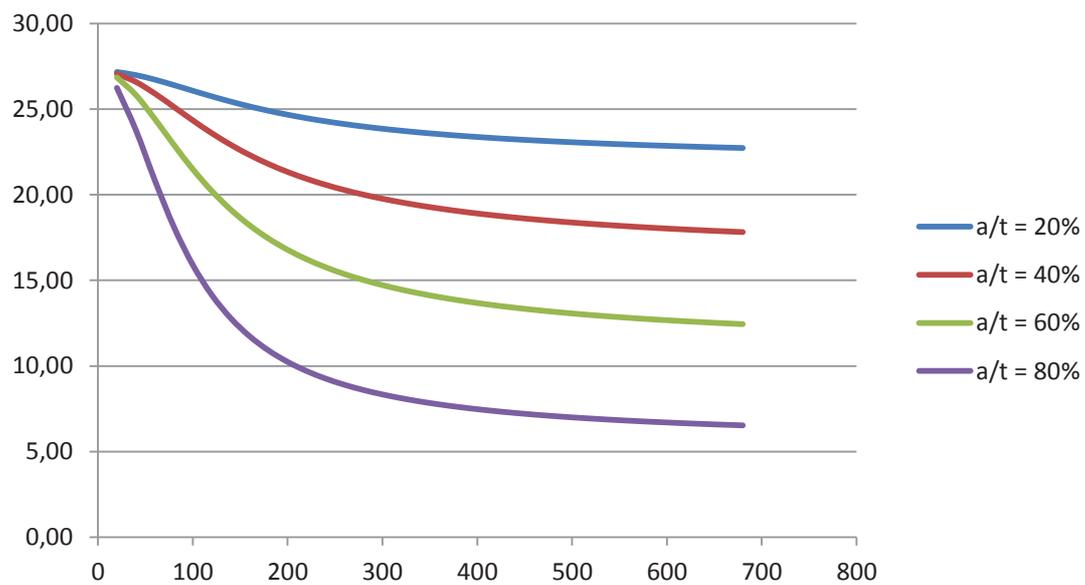
DNV-RP-F101

Gráfico 2: DNV-RP-F101

Fonte: A autora (2014)

5.3 Diferentes geometrias de duto

Na análise paramétrica do defeito, pode-se verificar que as dimensões do duto interferem consideravelmente no estudo. Por isso, apresenta-se a seguir uma sequência de resultados que abordam esta questão.

Neste caso, para aprofundar a análise, quanto às dimensões do duto, optou-se por manter o comprimento e variar, separadamente, o valor do diâmetro externo e a espessura de parede do duto em estudo.

Primeiramente, como critério, adota-se defeitos limiares à caracterização de defeito curto e defeito longo quanto ao critério ASME. Por escolha, distancia-se em torno de 5% do limite.

Os valores de pressão de falha estimados pelos métodos analíticos B31G e DNV são comparados ao método dos elementos finitos, para dutos com defeitos de corrosão e encontram-se listados na tabela 11.

Tabela 11: Análise paramétrica para diferentes geometrias de dutos

Dimensões do duto	Dimensões do defeito				Tipo de defeito (critério ASME)	P _f (MPa)		
	l (mm)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)		B31G (ASME)	DNV	MEF
DUTO 1 L = 2 m D = 508 mm t = 12,7 mm	340	170	2,54	20	CURTO	22,107	23,631	27,3
	340	170	5,08	40		19,390	19,364	23,5
	340	170	7,62	60		16,466	14,226	16,9
	340	170	10,16	80		13,312	7,921	9,8
DUTO 2 L = 2 m D = 1930,4 mm t = 12,7 mm	380	190	2,54	20	LONGO	19,712	23,449	27,2
	380	190	5,08	40		14,784	19,042	22,9
	380	190	7,62	60		9,856	13,839	16,3
	380	190	10,16	80		4,928	7,606	9,2
DUTO 3 L = 2 m D = 508 mm	665	332,5	2,54	20	CURTO	5,817	6,102	6,8
	665	332,5	5,08	40		5,101	4,999	6,6
	665	332,5	7,62	60		4,332	3,671	5,2
	665	332,5	10,16	80		3,501	2,043	3,5
DUTO 3 L = 2 m D = 508 mm	735	367,5	2,54	20	LONGO	5,187	6,06	6,9
	735	367,5	5,08	40		3,891	4,924	6,4
	735	367,5	7,62	60		2,594	3,581	5,0
	735	367,5	10,16	80		1,297	1,97	1,6
DUTO 3 L = 2 m D = 508 mm	295	147,5	1,905	20	CURTO	16,580	17,608	20,3
	295	147,5	3,81	40		14,540	14,426	18,1
	295	147,5	5,715	60		12,347	10,597	13,1
	295	147,5	7,62	80		9,981	5,899	7,8

t = 9,525 mm	325	162,5	1,905	20		14,784	17,489	20,3
	325	162,5	3,81	40	LONGO	11,088	14,216	17,8
	325	162,5	5,715	60		7,392	10,344	13,0
	325	162,5	7,62	80		3,696	5,693	4,4

Fonte: A Autora (2014)

Comparando os resultados obtidos através dos métodos numéricos, B31G e DNV, com soluções numérico-computacionais obtidas via o método dos elementos finitos, programa ANSYS, tem-se o valor do erro de cálculo listados na tabela 12, a seguir.

Tabela 12: Análise de convergência para diferentes geometrias de dutos

Dimensões do duto	Dimensões do defeito				Tipo de defeito (critério ASME)	ERRO DE CÁLCULO		ERRO MÉDIO (DEFEITO)		ERRO MÉDIO (GERAL)	
	l(m m)	c (mm)	a (mm)	a/t (%)		B31G/MEF	DNV/MEF	B31G/MEF	DNV/MEF	B31G/MEF	DNV/MEF
DUTO 1 L = 2 m D = 508 mm t = 12,7 mm	340	170	2,54	20	CURTO	0,810	0,866	0,992	0,835		
	340	170	5,08	40		0,825	0,824	1%	17%		
	340	170	7,62	60		0,974	0,842	Desvio Padrão			
	340	170	10,16	80		1,358	0,808	0,26	0,02	0,81	0,839
	380	190	2,54	20	LONGO	0,725	0,862	0,628	0,842	19%	16%
	380	190	5,08	40		0,646	0,832	37%	16%	Desvio Padrão	
	380	190	7,62	60		0,605	0,849	Desvio Padrão		0,26	0,37
	380	190	10,16	80		0,536	0,827	0,08	0,02		
DUTO 2 L = 2 m D=1930,4mm t = 12,7 mm	665	332,5	2,54	20	CURTO	0,855	0,897	0,865	0,736		
	665	332,5	5,08	40		0,773	0,757	13%	26%		
	665	332,5	7,62	60		0,833	0,706	Desvio Padrão			
	665	332,5	10,16	80		1,000	0,584	0,10	0,13	0,769	0,817
	735	367,5	2,54	20	LONGO	0,752	0,878	0,672	0,899	23%	18%
	735	367,5	5,08	40		0,608	0,769	33%	10%	Desvio Padrão	
	735	367,5	7,62	60		0,519	0,716	Desvio Padrão		0,15	0,32
	735	367,5	10,16	80		0,811	1,231	0,13	0,23		
DUTO 3 L = 2 m D = 508 mm t = 9,525 mm	295	147,5	1,905	20	CURTO	0,817	0,867	1,213	0,958		
	295	147,5	3,81	40		0,803	0,797	4%	19%		
	295	147,5	5,715	60		0,943	0,809	Desvio Padrão			
	295	147,5	7,62	80		1,280	0,756	0,22	0,05	0,951	0,948
	325	162,5	1,905	20	LONGO	0,728	0,862	0,69	0,937	5%	5%
	325	162,5	3,81	40		0,623	0,799	31%	6%	Desvio Padrão	
	325	162,5	5,715	60		0,569	0,796	Desvio Padrão		0,22	0,42
	325	162,5	7,62	80		0,840	1,294	0,12	0,24		

Fonte: A autora (2014)

Com base na tabela 12, quando analisamos o defeito curto separadamente para cada duto, é possível perceber:

- No caso do duto 1, um erro médio percentual muito pequeno, 1% para o método B31G em relação ao MEF. Nesta amostra de defeitos, o método DNV apresentou um valor percentual de 17% de erro médio em relação ao MEF.
- No duto 2, o erro médio foi de 13% e 26%, ou seja o método DNV apresentou o dobro do erro médio calculado do que o método B31G, ambos em relação ao MEF.
- No terceiro duto em análise, duto 3, verifica-se 4% e 19% para os métodos analíticos, B31G e DNV, respectivamente, em relação ao método dos elementos finitos via solução numérico-computacional.

Igualmente comprova-se nos resultados registrados na tabela 12, para defeitos longos, nos dutos 1, 2 e 3, respectivamente, 37% e 16%, 33% e 10%, 31% e 6%, o percentual de erro médio para os métodos analíticos, B31G e DNV, em relação ao MEF.

Portanto, os resultados demonstram que nos três casos de dutos em estudo, segundo o critério ASME, para defeitos caracterizados curtos, o método B31G apresenta um menor erro de cálculo em relação ao método DNV. Em contraponto, o método analítico DNV-RP-F101 apresenta um menor valor de erro médio em relação ao método analítico B31G, no cálculo de pressão de falha para dutos com defeitos de corrosão caracterizados longo, segundo este mesmo critério.

Analisando cada método analítico separadamente, segundo o critério ASME de defeito curto e longo, na tabela 12, também é possível verificar um extremo de valores percentuais para o método B31G. Para as três diferentes geometrias de duto, temos respectivamente, para defeito curto e longo: 1% e 37%, 13% e 33%, 4% e 31% no valor de erro médio calculado em relação à pressão de falha obtida por modelagem computacional.

Diversamente, o método DNV apresenta 17% e 16%, 26% e 10%, 19% e 6%, ou seja porcentagens de valores mais próximos. Por fim, nesta análise específica ao método analítico para defeitos curto e longo, pode-se dizer que o método DNV apresentou uma menor variação de erro em relação ao método B31G.

6 CONCLUSÃO

Dutos são uma forma eficiente de transporte de petróleo, gás natural, álcool etílico e seus derivados. Por estarem em contato direto com o terreno faz com que os dutos sejam susceptíveis a defeitos de corrosão. Constatada a corrosão, deve-se avaliar qual a pressão máxima permitida para aquela situação.

Defeitos de corrosão que ocorrem em tubulações de petróleo e gás podem crescer a um grau que pode ser suficiente para comprometer a segurança da estrutura.

Assim, os cuidados com o projeto e manutenção de dutos devem ser permanentes para evitar o colapso dos mesmos e minimizar riscos de desastres ambientais e prejuízos financeiros.

Como objetivo de pesquisa deste estudo temos o método DNV-RP-F101 (*Recommend Practice F101 Corroded Pipelines*) que surgiu em 1999 da cooperação entre BG Technology e Det Norske Veritas, em parceria com diversas empresas, entre elas a Petrobras. Como particularidade, o método apresenta uma abordagem diferenciada, por utilizar a resistência à tração ao invés do limite de escoamento, como critério controlador da falha.

Para avaliar a força restante nos dutos corroídos, dentre as diferentes metodologias existentes, optou-se para comparação o método B31G também conhecido como critério ASME. Este foi escolhido por ser o método pioneiro e por isso mais conservador.

Para o duto em estudo, os métodos analíticos foram comparados às soluções numérico-computacionais obtidas pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa ANSYS, na estimativa e comportamento da pressão de falha no estudo paramétrico.

O método dos elementos finitos é empregado como referencial de comparação pois, além de ser preciso, permite a avaliação dos métodos analíticos utilizados. Neste sentido, contribui-se no intuito de melhoramento com o acréscimo de suas considerações quanto à aplicabilidade do método em análise.

Concluiu-se que a variação da espessura, a , e do comprimento l , do defeito influenciam consideravelmente na pressão de ruptura. A largura do defeito, c , no entanto, causa um efeito insignificante na pressão de ruptura.

Pode-se observar que as estimativas de pressão de falha obtidas pelos métodos analíticos são conservadoras quando comparadas com as simulações numérico-computacionais via MEF.

Nos estudos realizados, ficou comprovado o reconhecido conservadorismo do método B31G na avaliação de defeitos longos. No geral, sem distinção de critério curto e longo, conforme ASME, o método DNV apresentou melhores resultados. Porém, o aprofundamento do estudo não garante afirmar que o método DNV é o mais recomendável para a estimativa da pressão de falha para dutos com defeitos de corrosão sob pressão interna.

Este estudo quanto à aplicabilidade do método DNV no cálculo de pressão de falha de dutos contendo defeitos de corrosão, não aborda defeitos interagindo para análise da pressão interna. O carregamento combinado de pressão interna e compressão longitudinal para defeito único é outro tópico abordado na DNV e não contemplado neste estudo. Por isso sugere-se, ambos os estudos, como proposta de pesquisa para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HUEBNER, K. H.; DEWHIST, L. D.; SMITH, E.D; BYROM, G.T.. **The Finite Element Method for Engineers**. Wiley-Interscience; 4 edition, September 7, 2001, 744p.

CHOI, J.B.; GOO, B.K.; KIM, J.C.. Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v.80, p.121-128, fev. 2003.

COSHAM, A.; HOPKINS, P.; MACDONALD, K.A., Best Practice for the Assessment of Defect in Pipelines – Corrosion. **Engineering Failure Analysis**, v.14, p.1245-1265, 2007.

PARK, T. D.; KYRIAKIDES, S., On the Collapse of Dented Cylinders under External Pressure. **International Journal of Mechanical Sciences**, v.38, n.5, p.557-578, 1996.

SILVA, R.C.C.; GUERREIRO, J.N.C.; LOULA, A.F.D.. A Study of Pipe Interacting Corrosion Defects using the FEM and Neural Networks. **Advances in Engineering Software**, v.38, p.868-875, 2007.

MA, B.; SHUAI, J.; WANG, J.; HAN, K.. Analysis on the Latest Assessment Criteria of ASME B31G-2009 for the Remaining Strength of Corroded Pipelines. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v.11, p.666-671, 2011.

MELIANI, M.H.; MATVIENKO, Y.G.; PLUVINAGE, G.. Corrosion Defect Assessment on Pipes using Limit Analysis and Notch Fracture Mechanics. **Engineering Failure Analysis**, v.18, p.271-283, 2011.

MUTAS, V.V.; TREBSKII, M.A.; RABKINA, M.D. Analysis of Strength Estimation Procedures for Cylindrical Structures with Local Surface Defects Subject to Internal Pressures. **Strength of Materials**, v.44, n.5, p.574-578, 2012.

ZHANG, G.; Luo, J.; ZHAO, X.; ZHANG, H.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.. Research on Probabilistic Assessment Method based on the Corroded Pipeline Assessment Criteria. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v.95, p.1-6, 2012.

COSHAM A. and HOPKINS P..The assessment of corrosion in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual (PDAM), **Pipeline Pigging and Integrity Management Conference**. Amsterdam (2004), p. 1–3, Mai.2004.

ABDALLA E. F; MACHADO R.D; BERTIN R.J;VALENTINI M.D.. Evaluation of Residual Strength of Pipelines Containing Corrosion Defects. **Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba PR, Brazil Civil-Comp Press, 2010.

ANP - Agência Nacional de Petróleo , Gas Natural e Biocombustíveis -**Modal Dutoviário Carece de Investimentos Para se Tornar mais Utilizado no País**. Disponível em: www.anp.gov.br . Acesso em: 19 Set. 2013.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Modal dutoviário carece de investimentos para se tornar mais utilizado no país**. Disponível em: www.cnt.org.br. Acesso em 26 mar. 2013.

Ambiente Brasil. **Resíduos e Meio Ambiente**. Disponível em: http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/petroleo/residuos_e_meio_ambiente.html. Acesso em 19 set. 2013.

DNV GL Group. Disponível em: <http://www.dnvba.com/br/Pages/default.aspx>. Acesso em 26 mar. 2013

Petrobras. Disponível em: www.petrobras.com.br/pt/. Acesso em 19 set. 2013.

Transpetro. Disponível em: www.transpetro.com.br. Acesso em 19 set. 2013.

DNV-RP-F101, **Recommended Practice for Corroded Pipelines**, Det Norske Veritas, Norway, Hovik, out. 2004.

American Petroleum Institute, **API Specification for Line Pipe - Specification 5L**, 42th edition, 168 p., dez. 2000.

VALENTINI, M.D. **Avaliação dos métodos semi-empíricos para análise de dutos corroídos subsidiado pelo método dos elementos finitos**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, 2006.

SHANG, H.Y. **Introdução de Fatores de concentração de tensões na análise não linear via MEF de sistemas de dutos corroídos**. 2009. 156f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, 2009.