

2

Revisão bibliográfica das metodologias semi-empíricas para avaliação de dutos com defeitos de corrosão

O desenvolvimento de métodos para avaliação da integridade de dutos rígidos com defeitos de corrosão foi iniciado pioneiramente pelo *Battelle Memorial Institute*, em conjunto com a AGA (*American Gas Assotiation*). O objetivo desses estudos era avaliar a relação entre o tamanho de defeitos de corrosão com a pressão de falha. Foram realizados diversos testes de ruptura em dutos de aço carbono, com defeitos reais e fabricados. A partir desses testes, modelos embasados na mecânica da fratura foram modificados, dando origem a equações matemáticas semi-empíricas. A principal equação gerada neste estudo ficou conhecida como NG-18 *Surface Flaw Equation* [15], conforme descrita na Equação 2.1.

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0} M^{-1}} \right] \quad (2.1)$$

Onde,

σ_{rup} → Tensão circunferencial da parede do duto no instante da ruptura, numa região fora do defeito;

σ_{flow} → Tensão de escoamento média do material;

A → Área longitudinal de material perdida na região do defeito;

A_0 → Área longitudinal original da região corroída;

M → Fator de Folias, ou fator de dilatação do defeito;

O Fator de Folias [16] leva em consideração a influência da deformação ocorrida na região do defeito sobre a tensão circunferencial. O Fator de Folias pode ser expresso pela Equação 2.2.

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \left(\frac{L^2}{Dt} \right) - 0,003375 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^2} \quad (2.2)$$

Onde,

$L \rightarrow$ Comprimento longitudinal do defeito;

$D \rightarrow$ Diâmetro externo do duto;

$t \rightarrow$ Espessura de parede do duto;

A tensão circunferencial numa região fora do defeito pode ser calculada conforme a Equação 2.3.

$$\sigma_{circ} = P \left(\frac{D}{2t} \right) \quad (2.3)$$

Onde,

$\sigma_{circ} \rightarrow$ Tensão circunferencial (“hoop stress”);

$P \rightarrow$ Pressão interna atuante no duto;

No momento da ruptura, a tensão circunferencial numa região fora do defeito é igual à tensão de ruptura definida na Equação 2.1. Substituindo a Equação 2.3 na Equação 2.1, tem-se a pressão de ruptura de um duto com defeito de corrosão sendo expressa pela Equação 2.4.

$$P_{rup} = \sigma_{flow} \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0} M^{-1}} \right] \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 é a base de diversos métodos semi-empíricos como ASME B31G, DNV-RP-F101, RStreng .85 dL e Método RPA. Esses métodos serão descritos em detalhes a seguir.

2.1. ASME B31G

O documento ASME B31G [6] é um manual para determinação da resistência remanescente de dutos corroídos. Essa metodologia se apresentou como uma excelente ferramenta para determinar se um duto existente poderia continuar operando com defeitos de corrosão ou deveria ser reparado. Esta metodologia está limitada a avaliar dutos dentro das seguintes condições:

- 1) Dutos construídos conforme as normas ASME B31.4 [17], ASME B31.8 [18] e ASME B31.11 [19];
- 2) Dutos de aço carbono ou aços de alta resistência e baixa liga, conforme norma ASTM graus A53, A106 e A381 [20] e norma API 5L [21];
- 3) Defeitos no corpo do duto com contornos suaves, que não promovam concentração de tensões;
- 4) Dutos submetidos apenas a carregamento de pressão interna;
- 5) Não deve ser utilizado para avaliar: defeitos de corrosão nas soldas circunferenciais e longitudinais, também como suas zonas termicamente afetadas; defeitos causados por dano mecânico, como “*gouges*” e “*grooves*”; e defeitos introduzidos nas fases de fabricação dos tubos e/ou chapas;

O procedimento descrito pela ASME B31G está baseado em uma extensa série de testes em escala real, que foram realizados para levar dutos contendo defeitos de corrosão até a falha. Na execução dos testes, utilizou-se tubos removidos de serviço com defeitos reais de corrosão e tubos com defeitos fabricados. Foram realizados centenas de testes em vários tipos de defeitos para estabelecer um comportamento geral para os defeitos de corrosão. Expressões matemáticas para calcular a resistência de tubos corroídos foram desenvolvidas tomando como base esses testes. Estas expressões matemáticas, apesar de semi-empíricas, estavam baseadas em princípios bem estabelecidos da mecânica da fratura. O princípio básico da mecânica da fratura está fundamentado no fato de que a resistência do material à fratura instável, na presença de um defeito, está relacionada com o tamanho do defeito e com a tenacidade do material. Quanto mais tenaz é um material, maior é o tamanho do defeito antes que uma falha catastrófica ocorra. Além disso, quanto maior é o tamanho do defeito, menor é a pressão na qual o duto venha a vazar ou se romper. Estas

duas características podem parecer óbvias, mas formam as bases do mecanismo de ruptura em termos da determinação da real resistência de um duto contendo defeitos.

As expressões matemáticas desenvolvidas a partir dos experimentos iniciais foram modificadas baseadas em resultados dos testes subsequentes e atualmente provém uma confiável estimativa para a falha de defeitos de corrosão sob o efeito da pressão interna, na faixa de materiais cobertos pela metodologia abordada na ASME B31G. Os experimentos subsequentes em tubos corroídos indicaram que dutos de aço carbono apresentam tenacidade adequada e que a tenacidade não é um fator significativo. De forma geral, foi observado que o fenômeno de falha de dutos corroídos, sob o efeito da pressão interna, é controlado pela dimensão do defeito de corrosão e pela tensão de escoamento do material. A Figura 2.1 apresenta a sequência adotada pela ASME B31G para avaliação de dutos com defeito de corrosão.

Primeiramente, se faz uma avaliação da profundidade máxima encontrada nos defeitos de corrosão. Essa avaliação é relativa à espessura de parede nominal do duto, e indica que dutos com defeitos de corrosão com profundidade relativa abaixo de 10% da espessura de parede podem continuar operando. Por outro lado, dutos com defeitos cujas profundidades são superiores a 80% da espessura de parede nominal devem ser necessariamente reparados. Em seguida, os defeitos com profundidades entre 10% e 80% da espessura de parede nominal são submetidos a uma avaliação segundo os comprimentos dos defeitos. Os comprimentos dos defeitos com profundidades entre 10% e 80% são comparados com um comprimento de referência calculado conforme a Equação 2.5.

$$L = 1.12B\sqrt{Dt} \quad (2.5)$$

Sendo,

$$B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1.1d/t - 0.15}\right)^2 - 1} \quad \text{para } d/t > 17,5\% \quad (2.6)$$

$$B = 4.0 \quad \text{para } d/t \leq 17,5\%$$

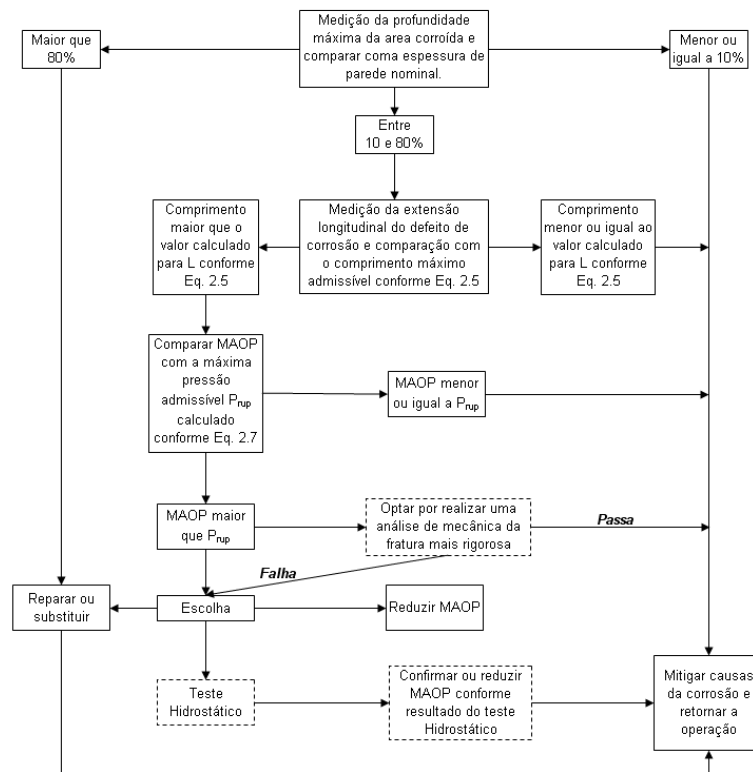


Figura 2.1 - Procedimento para análise da resistência de um duto corroído conforme ASME B31.G [6]

Para os defeitos cujas profundidades estão entre 10% e 80% da espessura nominal, e os valores medidos de seus comprimentos são superiores aos valores de referência calculados conforme Equação 2.5, deve ser realizada uma avaliação em terceiro nível de forma a calcular o máximo valor de pressão interna a qual esse duto pode operar. Esse valor é calculado segundo a Equação 2.7.

$$P_{rup} = 1.1P \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t \sqrt{\lambda^2 + 1}} \right)} \right] \quad \text{para } \lambda \leq 4.0 \quad (2.7)$$

$$P_{rup} = 1.1P \left[1 - \frac{d}{t} \right] \quad \text{para } \lambda > 4.0$$

Onde,

$$\lambda = 0.893 \left(\frac{L_m}{\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.8)$$

$$P = \text{maior} \left[MAOP; \frac{2 \cdot SMYS \cdot t \cdot F \cdot T}{D} \right] \quad (2.9)$$

Sendo,

$L_m \rightarrow$ Comprimento medido da extensão longitudinal do defeito, em polegadas;

$D \rightarrow$ Diâmetro nominal externo do duto, em polegadas;

$t \rightarrow$ Espessura de parede nominal do duto, em polegadas;

$F \rightarrow$ Fator de projeto conforme ASME B31.4, ASME B31.8 ou ASME B31.11;

$T \rightarrow$ Fator de temperatura de projeto conforme ASME B31.4, ASME B31.8 ou ASME B31.11;

$MAOP \rightarrow$ Pressão máxima de operação admissível.

Os defeitos que não passarem na avaliação final devem ser reparados, ou alternativamente a MAOP do duto reduzida. Ainda existe a opção de se realizar um teste hidrostático para avaliar a integridade global do duto, de forma a validar a MAOP como sendo segura ou confirmar a necessidade de reparar os defeitos.

Em uma correlação com a Equação NG-18 (*Surface Flaw Equation*), pode se considerar área corroída na região do defeito conforme a Equação 2.10.

$$A = \alpha L_m d \quad (2.10)$$

Dessa forma, substituindo a Equação 2.10 na Equação NG-18, temos o seguinte resultado, conforme apresentado na Equação 2.11:

$$P_{rup} = \sigma_{flow} \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t} M^{-1}} \right] \quad (2.11)$$

Na metodologia da ASME B31G, a área de material perdido é representada de duas formas: a) forma de parábola para defeitos curtos ($\alpha = 2/3$) ou b) forma retangular para defeitos longos ($\alpha = 1$), conforme ilustrado na Figura 2.2.

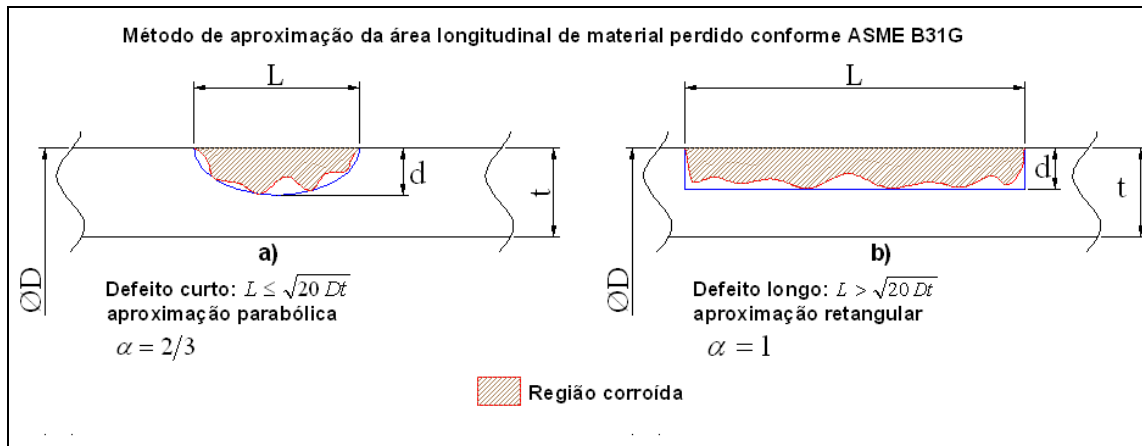


Figura 2.2 - Representação da área longitudinal de material perdido: a) forma parabólica e b) forma retangular

Quanto à tensão observada numa região fora do defeito no momento da ruptura, a ASME B31G considera $\sigma_{flow} = 1.1\sigma_{esc}$. Dessa forma, a Equação NG-18 com as considerações da ASME B31G se apresenta da seguinte forma:

a) Para defeitos longos, quando $L_m > \sqrt{20Dt}$:

$$P_{rup} = 1.1\sigma_{esc} \left(\frac{2t}{D} \right) \left[1 - \frac{d}{t} \right] \quad (2.12)$$

Sendo,

$$M \rightarrow \infty \quad (2.13)$$

b) Para defeitos curtos, quando $L_m \leq \sqrt{20Dt}$:

$$P_{rup} = 1.1\sigma_{esc} \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - \frac{2d}{3t}}{1 - \frac{2d}{3t} \frac{1}{\sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)}}} \right] \quad (2.14)$$

Sendo,

$$M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)} \quad (2.15)$$

2.2. Método RStreng 0,85dL

Esta metodologia foi elaborada tomando-se como base os desenvolvimentos da ASME B31G, com algumas modificações propostas por Vieth & Kiefner [8] em 1989, no sentido de tornar o método menos conservativo. Tais modificações tiveram como base os resultados do Projeto PR 3-805 do *Pipeline Research Committee* da AGA com o Instituto Battelle. As principais diferenças entre os métodos ASME B31G e RStreng 0,85dL podem ser observados na Tabela 2.1.

	ASME B31G	RSTRENG .85 dL
Defeitos aplicáveis	$0,1 \leq d/t < 0,8$	$0,2 \leq d/t < 0,8$
σ_{flow}	$\sigma_{flow} = 1,1\sigma_{esc}$	$\sigma_{flow} = \sigma_{esc} + 69\text{Mpa}$
	Defeitos Curtos	
L	$L_m \leq \sqrt{20Dt}$	$L_m \leq \sqrt{50Dt}$
α	$\alpha = 2/3$	$\alpha = 0,85$
M	$M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)}$	$M = \sqrt{1 + 0,6275 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right) - 0,003375 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)^2}$
	Defeitos Longos	
L	$L_m > \sqrt{20Dt}$	$L_m > \sqrt{50Dt}$
α	$\alpha = 1$	$\alpha = 0,85$
M	$M \rightarrow \infty$	$M = 3,3 + 0,032 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)$

Tabela 2.1 - Diferenças entre os métodos ASME B31G e RStreng .85 dL

Dessa forma, a pressão de ruptura de um duto com defeito de corrosão submetido à pressão interna, de acordo com o método RStreng 0,85 dL, pode ser calculada da seguinte forma:

a) Para defeitos longos, quando $L_m > \sqrt{50Dt}$:

$$P_{rup} = (\sigma_{esc} + 69MPa) \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - 0,85 \frac{d}{t}}{1 - 0,85 \frac{d}{t \left(3,3 + 0,032 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right) \right)}} \right] \quad (2.16)$$

b) Para defeitos curtos, quando $L_m \leq \sqrt{50Dt}$:

$$P_{rup} = (\sigma_{esc} + 69MPa) \left(\frac{2t}{D} \right) \left[\frac{1 - 0,85 \frac{d}{t}}{1 - 0,85 \frac{d}{t \sqrt{1 + 0,6275 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right) - 0,003375 \left(\frac{L_m^2}{Dt} \right)^2}}} \right] \quad (2.17)$$

2.3. Método RPA

Estudos experimentais realizados por Benjamin & Andrade [9] mostraram que o método RStreng 0,85dL fornece resultados não-conservadores para defeitos longos de profundidade uniforme. A partir desses estudos, foi proposto uma versão modificada para o método RStreng 0,85dL, que fornece resultados adequadamente conservadores para o caso de defeitos longos. Este novo método, denominado Método RPA (“*Rectangular Parabolic Area*”) ou Método 0,85dL Modificado, usa duas diferentes equações para estimar a pressão de falha de dutos com defeito de corrosão. A primeira, utilizada para defeitos curtos (defeitos nos quais $L_m \leq \sqrt{20Dt}$), é a mesma adotada pelo Método RStreng 0,85dL. Por outro lado, a equação utilizada para defeitos longos (defeitos nos quais $L_m > \sqrt{20Dt}$), é uma versão modificada da primeira equação e considera a área longitudinal de material perdido como sendo uma composição das formas retangular e parabólica.

A Figura 2.3 ilustra o processo de avaliação adotada pela norma PETROBRAS N-2786 [22], que considera o Método RPA para a avaliação de defeitos de corrosão em dutos.

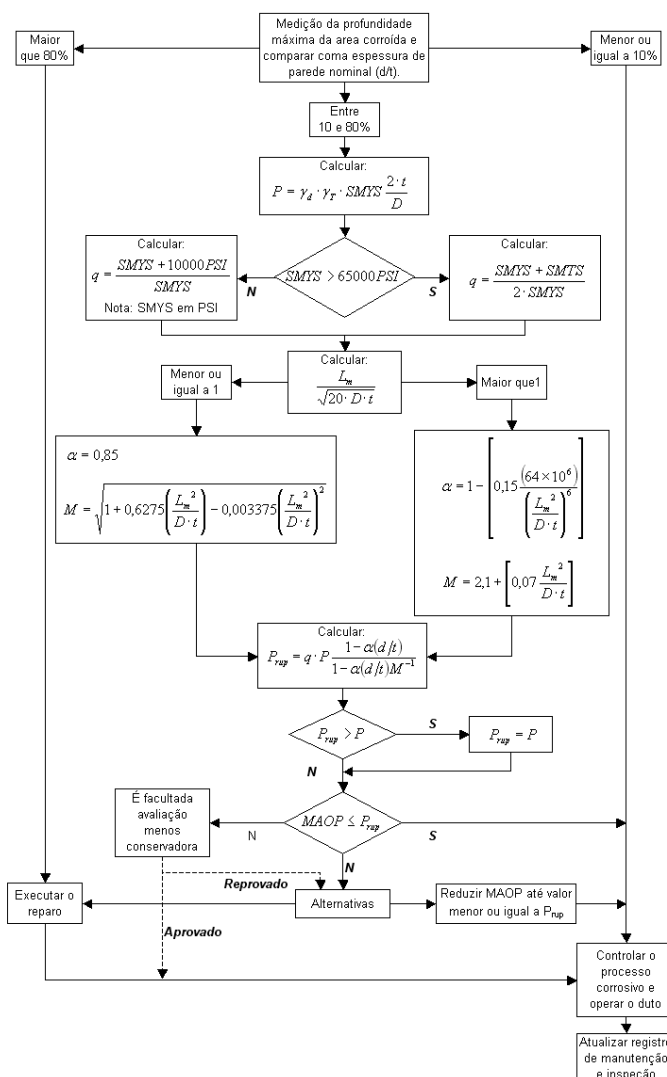


Figura 2.3 - Sistemática de avaliação de defeitos de corrosão em dutos rígidos considerada na norma PETROBRAS N-2786 [22]

2.4. Formulação de Kastner

O processo de soldagem de uma forma geral vem se apresentando até hoje como o meio mais eficaz e econômico na fabricação de dutos de aço. No entanto, esse processo requer cuidados especiais para garantir uma união metalúrgica homogênea, e principalmente, isenta de defeitos de fabricação. As especificações de procedimentos de soldagem, utilizadas na fabricação de dutos de aço, de uma forma geral, impõem que o metal adicionado apresente propriedades mecânicas superiores às do metal de base, o que

muitas vezes implica em perda de tenacidade desse metal adicionado. Por outro lado, o aquecimento inerente aos processos de soldagem promove transformações metalúrgicas na região adjacente ao cordão de solda, o que implica em mudança nas propriedades mecânicas dessa região, como perda de tenacidade, por exemplo. Essa região é conhecida como zona termicamente afetada, ou ZTA. Pelas questões apresentadas, defeitos localizados nas soldas circunferenciais e na ZTA demandam atenção especial na avaliação da integridade de dutos.

A formulação apresentada por Kastner [10] estabeleceu um método de avaliação de dutos de aço com defeitos circunferenciais submetidos à tensão longitudinal. Pela sua aplicação, essa metodologia vem sendo utilizada para avaliação de dutos com defeitos de corrosão, situados nas soldas circunferências e ZTA dessas soldas. A Formulação de Kastner está fundamentada na teoria de que um defeito circunferencial ocasiona um aumento da tensão longitudinal na região do defeito, promovido pela redução de área de material resistente e pelo aparecimento de um momento que é criado na região do defeito devido a uma excentricidade do centro de gravidade. A Equação 2.18 apresenta o valor da tensão longitudinal admissível em um duto com defeito circunferencial, segundo a Formulação de Kastner.

$$\sigma_{adm} = \sigma_{flow} \left[\frac{\left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(\pi - \beta \frac{d}{t}\right)}{\pi \left(1 - \frac{d}{t}\right) + 2 \frac{d}{t} \sin \beta} \right] \quad (2.18)$$

Onde,

$$\beta = \left(\frac{c/2}{r_m} \right) \quad (2.19)$$

$$r_m = \left(\frac{D-t}{2} \right) \quad (2.20)$$

Sendo,

$c \rightarrow$ Largura do defeito, na direção circunferencial;

A Equação de Kastner é utilizada pela norma PETROBRAS N-2786, para avaliação de defeitos de corrosão em soldas circunferenciais, sendo que a tensão de escoamento média do material é calculada conforme a Equação 2.21.

$$\sigma_{flow} = \gamma_d \cdot \gamma_c \cdot \gamma_T \cdot SMYS \quad (2.21)$$

Onde,

$\gamma_d \rightarrow$ Fator de segurança de projeto;

$\gamma_c \rightarrow$ Fator de segurança para avaliação de corrosão em soldas circunferenciais;

$\gamma_T \rightarrow$ Fator de redução devido à temperatura;

Dessa forma, para a avaliação de defeitos de corrosão circunferenciais segundo a formulação de Kastner, deve-se calcular a tensão longitudinal atuante no duto e comparar com o valor da tensão longitudinal admissível conforme a Equação 2.18. O duto poderá continuar operando se o valor da tensão longitudinal aplicada for menor que o valor da tensão longitudinal admissível calculada.

2.5. DNV-RP-F101

A Prática Recomendada DNV-RP-F101 [7], publicado em 1999, consolida os resultados obtidos a partir de um JIP (*Joint Industry Project*), desenvolvido pela DNV (*Det Norske Veritas*) em cooperação com a *British Gas Technology*, e com o patrocínio de mais onze empresas, entre elas a PETROBRAS. Os métodos apresentados nesta prática recomendada são aplicáveis a defeitos de corrosão em dutos de aço carbono, projetados pelos principais códigos de projeto como: DNV-OS-F101 [23], ASME B31.4, ASME B31.8, BS8010 [24], IGE/TD/1 [25], ISO13623 [26], CSA Z662-94 [27], desde que a filosofia de segurança inerente ao código não seja violada.

Quanto ao tipo de defeito, este método pode ser aplicado em dutos com corrosão interna e externa no material base, em soldas circunferenciais ou longitudinais, e em perda de metal em regiões reparadas por esmerilhamento, com perfil suave e sem presença de trincas.

Pressão interna e carregamentos de tração e dobramento podem influenciar na falha de um duto corroído. A Tabela 2.2 apresenta as combinações de carregamentos e defeitos de corrosão cobertos por essa prática recomendada.

Carregamento	Tipos de defeito
Pressão interna	Defeito isolado
	Interação de defeito
	Defeitos com forma complexa
Pressão interna combinada com tensão longitudinal de compressão	Defeito isolado

Tabela 2.2 - Combinações de carregamentos e defeitos de corrosão cobertos pela DNV-RP-F101

A tensão longitudinal de compressão apresentada na Tabela 2.2 pode ser oriunda de carregamentos axiais, carregamentos de dobramento, carregamentos térmicos, etc. A prática recomendada apresentada na DNV-RP-F101 é restrita para o uso em situações com carregamento de pressão interna e compressão longitudinal. O comportamento de defeitos de corrosão sob a combinação de pressão interna e dobramento, e/ou carregamentos de tensão longitudinal trativa não são considerados nessa prática recomendada.

As seguintes situações não são cobertas pela DNV-RP-F101:

- 1) Dutos que não sejam de aço carbono;
- 2) Aços com grau superior ao X80;
- 3) Carregamentos cíclicos;
- 4) Defeitos não suaves como trincas;
- 5) Corrosão combinada com trinca;
- 6) Corrosão combinada com dano mecânico, como moessa;
- 7) Defeitos de perda de metal provocado por dano mecânico (“gouges”);
- 8) Defeitos de fabricação na solda;
- 9) Defeitos com profundidade maior que 85% da espessura de parede original;

O procedimento de avaliação é aplicável somente a dutos cujo aço seja esperado falhar por colapso plástico. O procedimento não é recomendado para aplicações onde fratura frágil é esperada ocorrer. Isto inclui as seguintes situações:

- 10) Em aços cuja temperatura de transição dúctil/frágil seja superior à temperatura de operação;

- 11) Materiais com espessura superior a 12,7mm (1/2”), a menos que a temperatura de transição dúctil/frágil seja inferior à temperatura de operação;
- 12) Aços semi-acalmados.

Os métodos apresentados nesta prática recomendada para avaliação de corrosão, considerando apenas carregamento de pressão interna, foram validados em testes de 138 amostras em tamanho real, incluindo defeitos de corrosão fabricados e reais. As faixas de variação dos parâmetros dos testes estão apresentadas na Tabela 2.3.

Duto	
Diâmetro (mm)	219,1(8”) a 914,4 (26”)
Espessura (mm)	3,40 a 25,4
D/t	8,6 a 149,4
Grau (API/5L)	X42 a X65
Defeitos	
d/t	0 a 0,97
$L/(Dt)^{0,5}$	0,44 a 35
c/t (circunferencial)	0,01 a 22

Tabela 2.3 - Variação dos parâmetros avaliados nos testes de pressão interna – DNV-RP-F101

A sistemática de avaliação de defeitos de corrosão pela DNV-RP-F101 pode ser observada na Figura 2.4.

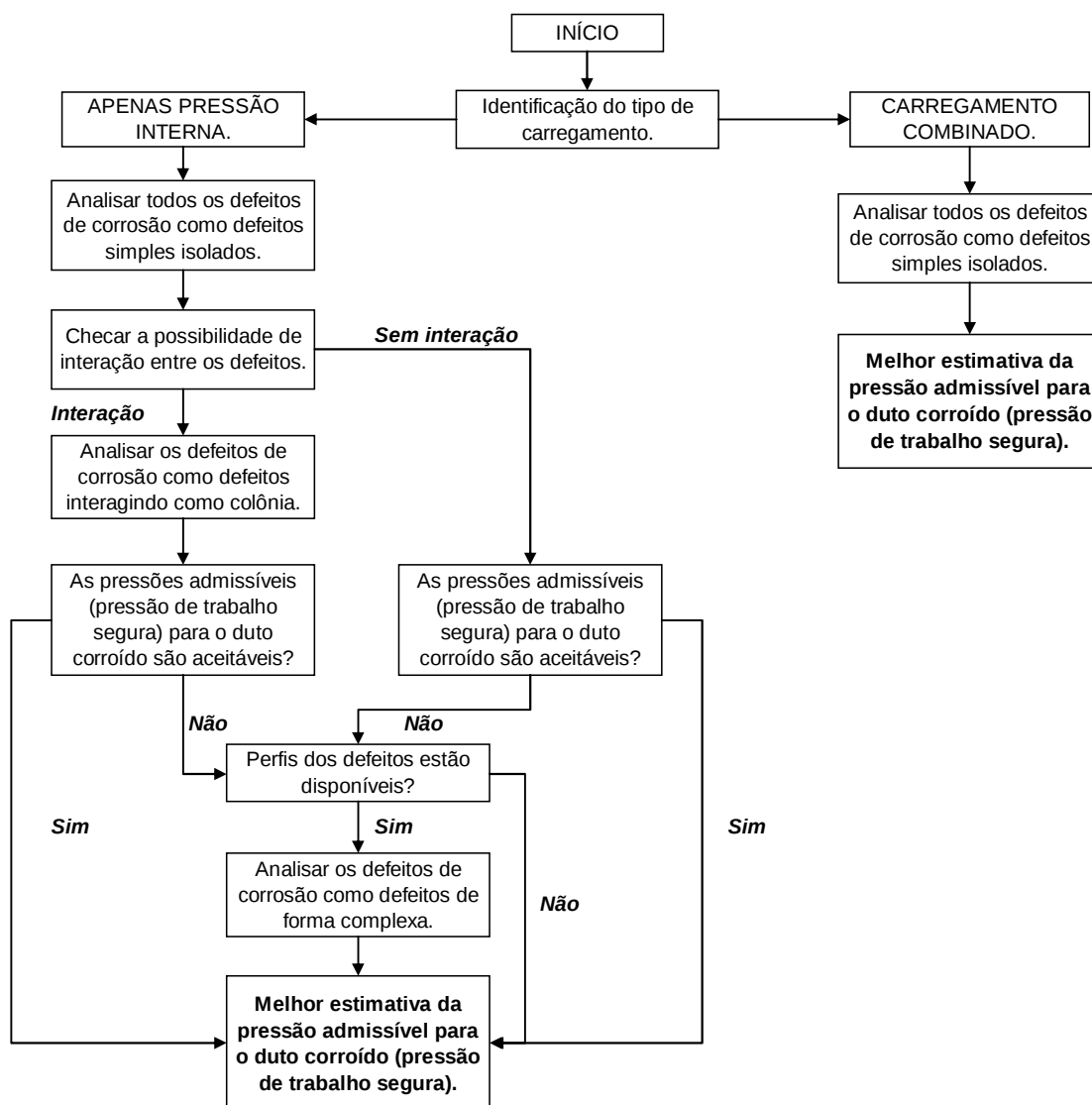


Figura 2.4 - Adaptação do fluxograma da DNV-RP-F101 para avaliação de defeitos de corrosão em dutos

Esta prática recomendada descreve duas metodologias para avaliação de dutos rígidos com defeitos de corrosão, apresentadas em **Parte A** e **Parte B**. A metodologia descrita na **Parte A** está de acordo com a filosofia de segurança adotada pela Norma DNV-OS-F101. Esta seção da DNV-RP-F101 é um suplemento da norma DNV-OS-F101, onde incertezas associadas com o tamanho da profundidade do defeito e propriedades do material são especificamente consideradas. Equações calibradas de forma probabilística, com fatores

parciais de segurança, são apresentadas para a determinação da pressão de operação admissível para um duto corroído.

A metodologia apresentada na **Parte B** está baseada no ASD (*Allowable Stress Design*), onde a sistemática consiste no cálculo da pressão de falha de um defeito de corrosão, com a subsequente multiplicação desta pressão por um fator único, baseado no fator original de projeto. Considerações das incertezas associadas ao tamanho dos defeitos de corrosão e às propriedades do material são deixadas a cargo do responsável pela análise.

Tendo em vista que o objetivo deste capítulo é apresentar uma visão geral de vários métodos semi-empíricos para avaliação de dutos corroídos, somente a avaliação de defeito isolado com carregamento de pressão interna, segundo a **Parte B** da DNV-RP-F101, será apresentada. A descrição completa de todos os métodos de avaliação da **Parte B** se encontra no Apêndice A. Somente a **Parte B** foi explorada nesse trabalho, pois essa sistemática é mais genérica, não sendo sua utilização restrita a dutos projetados pela DNV-OS-F101.

2.5.1.

Avaliação de defeito isolado com carregamento de pressão interna somente

Defeitos adjacentes podem interagir com o defeito avaliado produzindo uma pressão de falha inferior à pressão de falha calculada na condição de defeito isolado. Para um defeito de corrosão ser avaliado como um defeito isolado, o mesmo deve manter espaçamentos mínimos com relação aos defeitos adjacentes, nas direções longitudinais e circunferenciais, conforme apresentado nas Equações 2.22 e 2.23. Para os casos em que a interação é observada, a formulação para avaliação de defeito isolado não é mais válida, sendo necessário avaliar o(s) defeito(s) pelo critério da interação de defeitos (Apêndice A).

$$f > 360\sqrt{\frac{t}{D}} \quad (2.22)$$

$$s > 2.0\sqrt{Dt} \quad (2.23)$$

Sendo,

$f \rightarrow$ Espaçamento circunferencial angular entre defeitos adjacentes, em graus;

$s \rightarrow$ Espaçamento longitudinal entre defeitos adjacentes;

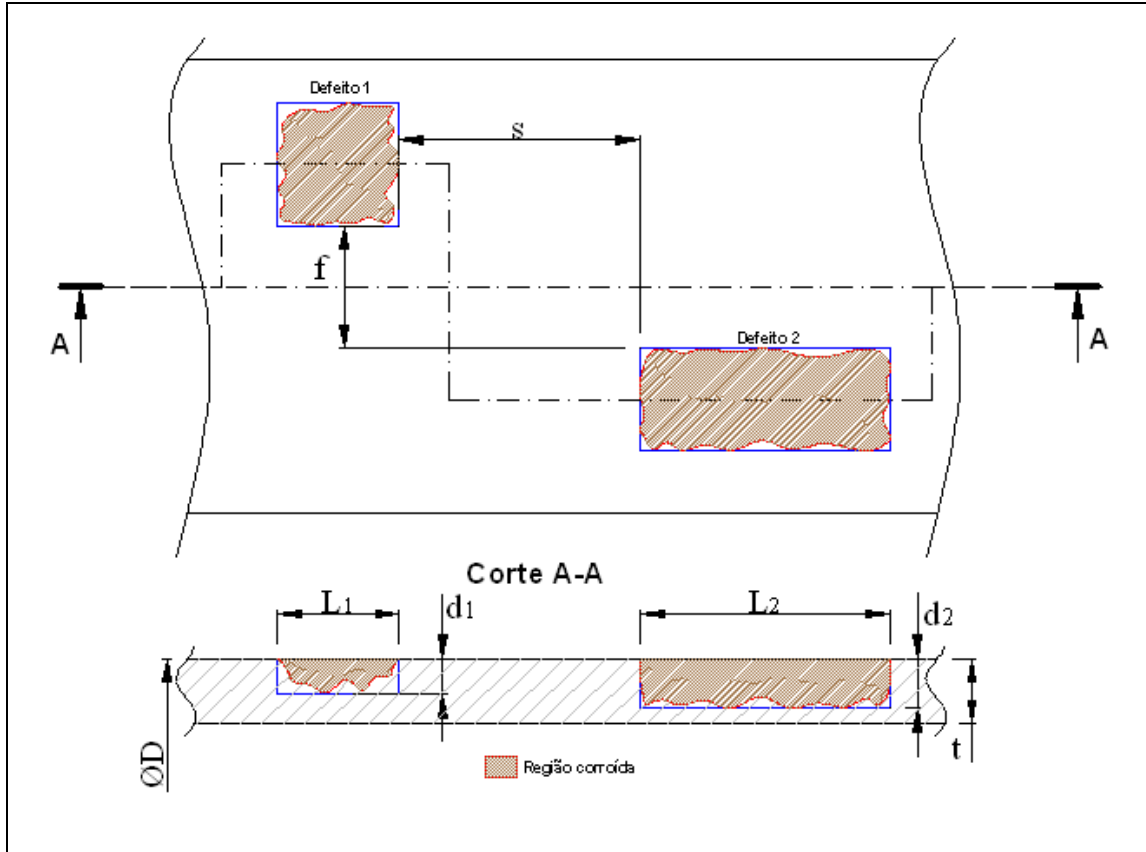


Figura 2.5 - Dimensões utilizadas na caracterização de um defeito isolado, adaptada de [7]

Uma vez realizada a caracterização do defeito como isolado, o cálculo da pressão de falha, para carregamento de pressão interna somente, pode ser observado na Equação 2.24.

$$P_{rup} = \frac{2 \cdot t \cdot UTS}{(D-t)} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t \cdot M}} \right] \quad (2.24)$$

Onde,

$$M = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{L_m}{\sqrt{Dt}} \right)^2} \quad (2.25)$$

Sendo,

$UTS \rightarrow$ Resistência à tração do material;

Para se definir a pressão de operação segura (P_{sw}), deve-se multiplicar a pressão de ruptura (P_{rup}) pelo fator F , onde $F = F_1 \cdot F_2$.

Sendo,

$F \rightarrow$ “*Total Usage Factor*”

$F_1 \rightarrow$ 0,9 (“*Modelling Factor*”)

$F_2 \rightarrow$ Fator de projeto