

## 5

### **Avaliação de um defeito isolado em condições hipotéticas**

No Capítulo 2 foram apresentadas diferentes metodologias semi-empíricas utilizadas na indústria para cálculo da pressão de falha em dutos com defeitos de corrosão. Um breve histórico do desenvolvimento de cada metodologia foi apresentado destacando-se as principais características e diferenças de cada modelo.

No Capítulo 3 foi apresentado o desenvolvimento de uma metodologia analítica para o cálculo das probabilidades de vazamento, de ruptura e de falha em dutos com defeitos de corrosão, submetidos à pressão interna. Foi dado ênfase aos aspectos estocásticos associados aos dados de inspeção por PIG instrumentado e aos referentes às taxas de crescimento dos defeitos.

Neste Capítulo será apresentada uma avaliação de um defeito hipotético isolado com a aplicação detalhada dos modelos semi-empíricos para cálculo da pressão de falha apresentados no Capítulo 2 e do modelo analítico para cálculo da probabilidade de falha apresentado no Capítulo 3. Será apresentada também uma comparação dos valores de pressão e probabilidade de falha, calculados analiticamente, com os fornecidos pelos programas PLANPIG, CONFIABILIDADE e OPIS.

A partir da comparação entre os resultados analíticos e os apresentados pelos programas, será possível observar a influência das premissas de crescimento do defeito nos cálculos da pressão e probabilidade de falha futura, também como a influência da probabilidade de vazamento e de ruptura no cálculo da probabilidade de falha.

A situação hipotética de um defeito isolado, apresentada neste Capítulo, foi propositalmente definida de forma a permitir a observação da influência dos modos de falha por ruptura e por vazamento no cálculo da probabilidade de falha. Além disso, a taxa de corrosão considerada foi definida hipoteticamente objetivando permitir uma variação sensível dos valores de pressão de falha e probabilidade de falha em 10 anos. A Tabela 5.1 sumariza os dados que compõem a situação hipotética de um defeito isolado, objeto das avaliações apresentadas neste Capítulo.

<b>Dados hipotéticos para avaliação de um defeito isolado</b>	
<b>Dados do duto</b>	
Cenário	Oleoduto de exportação de uma plataforma <i>offshore</i>
Tempo em operação	25 anos
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>
Material do tubo	API 5L X60 (SMYS= 60ksi ; SMTS=75ksi)
Diâmetro externo do duto	22" (558,8mm)
Espessura de parede	0,625" (15,875mm)
Comprimento do duto	10 km
Fator de Projeto	0,72
<b>Dados da inspeção</b>	
Tipo de PIG	MFL
Acurácia do PIG na medição da profundidade do defeito	+/- 10% t
Confiança do PIG na medição da profundidade	80%
Acurácia do PIG na medição do comprimento do defeito	+/- 15mm
Confiança do PIG na medição do comprimento	80%
Acurácia do PIG na medição da largura do defeito	+/- 15mm
Confiança do PIG na medição da largura	80%
<b>Dados do defeito</b>	
<b>Profundidade (d/t)</b>	<b>0,55</b>
<b>Comprimento (L)</b>	<b>200 mm</b>
<b>Largura (C)</b>	<b>20 mm</b>
<b>Corrosividade</b>	
Taxa de corrosão média na profundidade do defeito	0,35mm/ano
Desvio padrão da taxa de corrosão	0,050 mm/ano
Coefficiente de variação da taxa de corrosão	0,143
Erro na taxa de corrosão (3,5 x Desvio Padrão)	0,175 mm/ano

Tabela 5.1 – Dados hipotéticos de um defeito isolado em um duto submetido à pressão interna

## 5.1. Premissa de crescimento do defeito

Os defeitos de corrosão medidos por PIG instrumentado são anomalias promovidas por um processo contínuo que pode ser caracterizado em função de diversos fatores como as características do fluido transportado e do solo, eficiência da proteção catódica, características do material do duto e outros. É fato que o processo de corrosão é um mecanismo de falha que atua sobre as três dimensões de um defeito, ou seja, na profundidade, comprimento e largura. Por outro lado, as ferramentas largamente utilizadas para a medição da corrosividade, como sondas e cupons de corrosão, permitem medir a taxa média de crescimento do defeito na dimensão profundidade. Outro método muito utilizado é a determinação da taxa de corrosão na profundidade em função de um tratamento estatístico dos dados fornecidos pelas inspeções por PIG Instrumentado.

A determinação do modelo para crescimento do defeito fica a cargo do responsável pela avaliação da integridade do duto. Existem diversos métodos utilizados para a determinação do crescimento do defeito, variando-se desde a adoção de uma taxa constante

apenas na dimensão profundidade até a determinação de perfis de corrosividade ao longo do duto definidos de forma independente para as três dimensões do defeito.

Segundo o critério adotado pelo aplicativo PLANPIG, conforme definido em [30], as taxas de corrosão, nas dimensões comprimento e largura de um defeito, são determinadas em função da classificação geométrica do defeito conforme apresentado na Tabela 4.2. Dessa forma, as taxas definidas para cada dimensão tendem a manter uma proporcionalidade com a forma do defeito.

Por outro lado, a premissa de crescimento adotada pelo aplicativo CONFIABILIDADE, considera o crescimento do defeito apenas na dimensão profundidade, conforme apresentado em [32]. O programa permite a avaliação do duto em diferentes segmentos, adotando-se uma taxa de corrosão constante para cada segmento considerado.

Por sua vez, o aplicativo OPIS permite que as taxas de corrosão nas três dimensões de um defeito sejam definidas independentemente a critério do usuário, ou calculadas conforme o modelo definido em [35]. É possível também definir um perfil de corrosividade ao longo do duto associado às condições ambientais locais, tais como potencial elétrico duto-solo ou outros fatores ambientais promotores da corrosão. Nas simulações do aplicativo OPIS apresentadas neste Capítulo, optou-se por considerar o crescimento do defeito conforme a Tabela 4.2.

Face às diferentes filosofias de crescimento de defeito, adotadas pelos programas PLANPIG, CONFIABILIDADE e OPIS, torna-se necessária a definição de um critério para crescimento do defeito a ser utilizado nos cálculos analíticos de forma a tornar a comparação dos resultados de pressão de falha e probabilidade de falha em um momento futuro o mais representativa possível. Dessa forma, optou-se por realizar os cálculos analíticos de duas maneiras diferentes no que se refere à premissa de crescimento do defeito: a) crescimento do defeito apenas na dimensão profundidade, e b) crescimento do defeito nas dimensões profundidade e comprimento conforme a Tabela 4.2. Além de tornar mais representativo o resultado das comparações entre os valores analíticos e os fornecidos pelos programas, essa abordagem possibilita uma visão adicional a respeito da influência do modelo de crescimento do defeito na determinação da pressão de falha e probabilidade de falha em um momento futuro.

Considerando que os modelos avaliados no cálculo da pressão de falha estão definidos em função apenas da profundidade e do comprimento do defeito, a dimensão largura será considerada como constante.

Conforme apresentado no Capítulo 3, as dimensões de um defeito podem ser observadas como variáveis aleatórias, regidas por uma função de distribuição de probabilidade Normal, cujas expressões para o cálculo da expectância e da variância estão apresentadas nas Equações 5.1 e 5.2.

$$d = N(\mu_d, \sigma_d^2) \quad (5.1)$$

$$L = N(\mu_L, \sigma_L^2) \quad (5.2)$$

Onde,

$$\mu_d = \mu_{d0} + y\mu_{cd} \quad (5.3)$$

$$\sigma_d^2 = \sigma_{d0}^2 + y^2\sigma_{cd}^2 \quad (5.4)$$

$$\mu_L = \mu_{L0} + y\mu_{cL} \quad (5.5)$$

$$\sigma_L^2 = \sigma_{L0}^2 + y^2\sigma_{cL}^2 \quad (5.6)$$

Sendo,

$d \rightarrow$  Variável aleatória correspondente à profundidade do defeito de corrosão;

$L \rightarrow$  Variável aleatória correspondente ao comprimento do defeito de corrosão;

$\mu_d \rightarrow$  Valor esperado da profundidade do defeito de corrosão em um instante  $y$  qualquer;

$\sigma_d \rightarrow$  Desvio padrão do valor da profundidade do defeito de corrosão em um instante  $y$  qualquer;

$\mu_L \rightarrow$  Valor esperado do comprimento do defeito de corrosão em um instante  $y$  qualquer;

$\sigma_L \rightarrow$  Desvio padrão do valor do comprimento do defeito de corrosão em um instante  $y$  qualquer;

$y$  → Tempo em anos a partir da data da inspeção;

$\mu_{d0}$  → Valor da profundidade do defeito de corrosão medido na inspeção por PIG;

$\sigma_{d0}$  → Desvio padrão da medição da profundidade do defeito;

$\mu_{cd}$  → Valor médio da taxa de corrosão na profundidade do defeito;

$\sigma_{cd}$  → Desvio padrão da taxa de corrosão na profundidade do defeito.

$\mu_{L0}$  → Valor medido na inspeção por PIG para o comprimento do defeito;

$\sigma_{L0}$  → Desvio padrão da medição do PIG para o comprimento do defeito;

$\mu_{cL}$  → Valor médio da taxa de corrosão no comprimento do defeito;

$\sigma_{cL}$  → Desvio padrão da taxa de corrosão no comprimento do defeito.

A confiabilidade inerente às ferramentas de inspeção é normalmente especificada em função da incerteza e do intervalo de confiança, sendo o desvio padrão calculado por  $\sigma = (\delta\sqrt{n})/[\Phi^{-1}(I.C.+1)/2]$ , no caso de incertezas absolutas, ou  $\sigma = (\varepsilon \times t\sqrt{n})/[\Phi^{-1}(I.C.+1)/2]$ , para incertezas relativas, sendo:

$I.C.$  → Intervalo de confiança;

$\delta$  → Incerteza absoluta associada a uma medição;

$\varepsilon$  → Incerteza relativa associada a uma medição;

$t$  → Espessura de parede nominal do duto;

$\Phi^{-1}$  → Inverso da função de distribuição acumulada da normal reduzida;

$n$  → Número de medições;

As Tabelas 5.2 e 5.3 resumizam os valores da expectância e do desvio padrão, para as dimensões do defeito considerado na Tabela 5.1, calculados para o instante imediato e em 10 anos após a inspeção, conforme as Equações 5.1 e 5.2.

<b>Crescimento do defeito apenas na profundidade</b>					
Previsão		0 anos		10 anos	
Defeito		E[d] - $\mu$	$\sigma$	E[d] - $\mu$	$\sigma$
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>		<b>0,55</b>	<b>0,0780</b>	<b>0,77</b>	<b>0,0841</b>
<b>Comprimento do defeito (L)</b>		<b>200,00</b>	<b>11,7046</b>	<b>200,00</b>	<b>11,7046</b>

Tabela 5.2 - Expectância e desvio padrão das dimensões do defeito isolado para a condição de crescimento apenas na profundidade

<b>Crescimento do defeito na profundidade e no comprimento conforme Tab 4.2</b>					
Previsão		0 anos		10 anos	
Defeito		E[d] - $\mu$	$\sigma$	E[d] - $\mu$	$\sigma$
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>		<b>0,55</b>	<b>0,0780</b>	<b>0,77</b>	<b>0,0841</b>
<b>Comprimento do defeito (L)</b>		<b>200,00</b>	<b>11,7046</b>	<b>217,50</b>	<b>11,7046</b>

Tabela 5.3 - Expectância e desvio padrão das dimensões do defeito isolado para a condição de crescimento na profundidade e comprimento conforme a Tabela 4.2

## 5.2.

### Pressão de falha imediata e futura

A pressão de falha imediata pode ser obtida analiticamente a partir da aplicação das metodologias semi-empíricas apresentadas no Capítulo 2, considerando-se as dimensões do defeito fornecidas pela inspeção por PIG Instrumentado. Por outro lado, os métodos semi-empíricos não consideram o crescimento do defeito, ficando a critério do responsável a análise e a determinação das dimensões do defeito para momento futuro desejado.

Uma vez que as dimensões do defeito podem ser determinadas probabilisticamente a partir da aplicação dos conceitos de variáveis aleatórias, é possível calcular a pressão de falha prevista para um instante futuro da mesma forma como realizado para o instante imediato, ou seja, pela aplicação analítica das expressões semi-empíricas apresentadas no Capítulo 2 sobre a expectância das dimensões do defeito para o momento futuro de interesse. Dessa forma, as Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os valores de pressão de falha e de ERF para o instante imediato e em 10 anos após a inspeção, nas diferentes condições de crescimento do defeito isolado conforme apresentado nas Tabelas 5.2 e 5.3.

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação imediata</b>					
Diâmetro Externo	558,8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15,875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0,72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0,55</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>200,00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>M</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
ASME B31G	263,66	2,146	0,667	201,39	1,034
RStreng 0.85dL	279,67	1,939	0,850	196,23	1,062
Método RPA	279,64	1,939	0,850	196,21	1,062
DNV RP F101	308,38	1,548	1,000	215,21	1,076

Tabela 5.4 - Pressão de falha e ERF calculados analiticamente para o defeito isolado na condição imediata

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos</b>					
<b>Taxa de corrosão somente na profundidade</b>					
Diâmetro Externo	558,8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15,875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0,72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0,77</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>200,00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>M</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
ASME B31G	263,66	2,146	0,667	168,57	1,236
RStreng 0.85dL	279,67	1,939	0,850	145,73	1,430
Método RPA	279,64	1,939	0,850	145,71	1,430
DNV RP F101	308,38	1,548	1,000	140,88	1,643

Tabela 5.5 - Pressão de falha e ERF calculados analiticamente para o defeito isolado na condição futura, considerando o crescimento do defeito apenas na profundidade

Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos Taxa de corrosão na profundidade e no comprimento conf. Tab. 4.2					
Diâmetro Externo	558,8 mm		$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$		
Espessura de parede	15,875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0,72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0,77</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>217,50 mm</b>				
Metodologias	$P_{flow}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$M$	$\alpha$	$P_{rup}$	ERF
ASME B31G	263,66	2,295	0,667	165,21	1,261
RStreng 0.85dL	279,67	2,062	0,850	141,45	1,473
Método RPA	279,64	2,062	0,850	141,43	1,473
DNV RP F101	308,38	1,629	1,000	134,31	1,723

Tabela 5.6 - Pressão de falha e ERF calculados analiticamente para o defeito isolado na condição futura, considerando o crescimento do defeito na profundidade e no comprimento

A partir das Tabelas 5.5 e 5.6, é possível verificar a influência do modelo de crescimento do defeito sobre a pressão de falha futura. Na opção DNV RP F101 do modelo analítico, verifica-se uma diferença de aproximadamente 5% entre as pressões de falha apresentadas analiticamente para as duas condições de crescimento de defeito. Essa análise indica a necessidade de adoção de modelos tridimensionais de crescimento de defeito, de forma a obter previsões mais realistas a respeito da pressão de falha futura. Uma vez que a consideração de crescimento do defeito apenas na profundidade fornece resultados de pressão de falha até 5% superiores, a conclusão da análise pode levar a resultados não conservativos, comprometendo as decisões que venham a ser tomadas em função dessa abordagem.

Na utilização dos aplicativos PLANPIG, CONFIABILIDADE e OPIS, as pressões de falha imediata e futura são fornecidas diretamente a partir dos dados da inspeção e da taxa de corrosão informada, guardando-se as premissas inerentes a cada programa quanto ao crescimento do defeito. Dessa forma, a Tabela 5.7 apresenta os resultados de pressão de falha e ERF para o defeito apresentado na Tabela 5.1, na condição imediata e em 10 anos após a inspeção.

<b>Simulação com os programas avaliados</b>				
Diâmetro Externo	558.8 mm	<b>Avaliação imediata</b>		
Espessura de parede	15.875 mm	PLANPIG	$P_{rup}$	ERF
SMYS	60 ksi	B31G	184.64	1.128
SMTS	75 ksi	RPA	171.49	1.215
Fator de Projeto (F)	0.72	CONFIABILIDADE	$P_{rup}$	ERF
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>	B31G	203.252	1.025
Profundidade do defeito (d/t)	0.55	DNV	215.220	0.968
Comprimento do defeito (L)	200 mm	Arco&Kiefner	196.171	1.062
		OPIS	$P_{rup}$	ERF
Acurácia do PIG na profundidade	0.10 t	RStreng 0.85dL	196.130	1.062
Confiança na profundidade	80%	<b>Avaliação em 10 anos</b>		
Acurácia do PIG no comprimento	15 mm	PLANPIG	$P_{rup}$	ERF
Confiança no comprimento	80%	B31G	148.64	1.402
Acurácia do PIG na largura	15 mm	RPA	113.99	1.828
Confiança na largura	80%	CONFIABILIDADE	$P_{rup}$	ERF
		B31G	170.207	1.224
Taxa de corrosão média na profundidade	0.350 mm/ano	DNV	140.861	1.479
Desvio padrão da taxa de corrosão	0.050 mm/ano	Arco&Kiefner	145.688	1.430
Coefficiente de variação da taxa de corrosão	0.143	OPIS	$P_{rup}$	ERF
Erro na taxa de corrosão (3,5 X Desv. Padrão)	1.175 mm/ano	RStreng 0.85dL	141.380	1.474

Tabela 5.7 - Valores de pressão de falha e ERF obtidos pela aplicação dos programas avaliados em um defeito isolado, para o instante imediato e em 10 anos após a inspeção

Faz-se necessário neste ponto do trabalho apresentar alguns conceitos a respeito da precisão dos resultados numéricos fornecidos por programas de computador. Em função de diversos fatores como mudanças de unidades, arredondamentos, operações com variáveis numéricas de diferentes precisões e propagação de erros, é provável que os resultados calculados pelos diferentes métodos se apresentem com algum erro sistêmico associado quando comparados entre si. O erro sistêmico não invalida os resultados calculados, no entanto, implica na necessidade de se estabelecer critérios para o uso dos valores obtidos.

No estudo proposto neste Capítulo, resultados apresentados por programas de computador são comparados com valores obtidos pela aplicação de modelos analíticos. A aderência entre os métodos comparados pode ser definida pela manutenção de um erro tolerável na comparação de um grande número de defeitos, dentro de condições operacionais variadas. Uma vez que neste ponto do trabalho apenas um único defeito está sendo avaliado, será possível apenas verificar se o erro verificado se apresenta dentro de limites toleráveis. A aderência entre os métodos será confirmada no Capítulo seguinte, onde um estudo semelhante será realizado para três diferentes dutos, em condições operacionais diversas.

De forma a estabelecer um critério quanto à aderência entre os métodos avaliados, torna-se necessário definir um erro tolerável a ser obtido entre os resultados analíticos e os

fornecidos pelos programas. Uma vez que este trabalho não contempla a investigação dos códigos de programação de cada aplicativo, definir o erro sistêmico apresentado por cada programa é uma tarefa de difícil realização. Por outro lado, é possível definir uma tolerância máxima admissível em função do efeito que um determinado erro pode promover sobre a avaliação da integridade do duto.

A pressão de falha calculada pelos aplicativos fornece subsídios para a verificação da integridade de um duto sob a ótica de falha por ruptura. Deterministicamente, o duto se apresenta em uma condição segura quando o valor da pressão de falha calculada é superior à MAOP. A utilização de fatores de projeto é normalmente indicada, de forma a absorver as incertezas inerentes aos dados de geometria do duto, de material e de inspeção. Considerando a ordem de grandeza dos fatores de projeto tipicamente adotados, é admissível definir como tolerância um erro relativo entre os métodos comparados de 2% nos valores de pressão de falha. Logo, é possível definir que os métodos avaliados serão considerados como aderentes no cálculo da pressão de falha uma vez que não sejam observados erros relativos maiores que 2%, considerando-se uma avaliação dentro de um grande número de defeitos, em condições operacionais variadas.

A seguir serão apresentados os comentários sobre a comparação dos dados de pressão de falha imediata e em um momento futuro, para os valores fornecidos pelos aplicativos avaliados e os obtidos analiticamente. Objetivando sistematizar o estudo, os comentários e observações serão apresentados para cada programa individualmente, conforme as seções seguintes.

### **5.2.1. Aplicativo PLANPIG**

Pela observação da Tabela 5.7, é possível verificar que os resultados obtidos pelo aplicativo PLANPIG no cálculo das pressões de falha imediata e futura se apresentam inferiores aos calculados analiticamente. Em uma investigação a respeito da variação apresentada pelo PLANPIG, identificou-se que o aplicativo considera no cálculo da pressão de falha os valores de profundidade e comprimento dos defeitos equivalentes às dimensões medidas na inspeção, somadas aos valores da incerteza característica do PIG, conforme recomendado em [22]. Ou seja, o método adota uma abordagem extremista no cálculo da

pressão de falha, pois considera os valores máximos possíveis para a profundidade e comprimento dos defeitos.

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os valores de pressão de falha e ERF calculados analiticamente, considerando os valores de profundidade e comprimento do defeito somados às incertezas do PIG Instrumentado. Adotou-se para o cálculo na condição futura o modelo de crescimento de defeito da Tabela 4.2, conforme definido em [30].

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação imediata</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.65</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>215.00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>M</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
ASME B31G	263.66	2.273	0.667	184.59	1.129
Método RPA	279.64	2.044	0.850	171.49	1.215

Tabela 5.8 - Valores de pressão de falha e ERF imediatos, calculados analiticamente para as metodologias B31G e RPA com a majoração das dimensões do defeito isolado pelas incertezas do PIG

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos</b>					
<b>Taxa de corrosão na profundidade e no comprimento conf. Tab. 4.2</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.87</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>232.50 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>M</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
ASME B31G	263.66	2.424	0.667	145.49	1.432
Método RPA	279.64	2.168	0.850	110.43	1.887

Tabela 5.9 - Valores de pressão de falha e ERF em 10 anos, calculados analiticamente para as metodologias B31G e RPA com a majoração das dimensões do defeito pelas incertezas do PIG e modelo de crescimento do defeito na profundidade e comprimento conforme a Tabela 4.2

A partir da avaliação da Tabela 5.9, verifica-se que a premissa de crescimento do defeito na dimensão comprimento, conforme apresentado em [30], não é observada nas

opções *Integridade Imediata* e *Integridade Futura* do PLANPIG. Calculando-se a pressão de falha na condição futura, considerando o modelo de crescimento do defeito apenas na profundidade, associado à premissa de majoração das dimensões do defeito pelas incertezas da ferramenta de medição, é possível verificar valores congruentes entre os resultados analíticos e os fornecidos pelo PLANPIG, conforme observado na Tabela 5.10.

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos</b>					
<b>Taxa de corrosão somente na profundidade</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.87</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>215.00 mm</b>				
Metodologias	$P_{flow}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	M	$\alpha$	$P_{rup}$	ERF
ASME B31G	263.66	2.273	0.667	148.58	1.402
Método RPA	279.64	2.044	0.850	114.00	1.827

Tabela 5.10 - Valores de pressão de falha e ERF em 10 anos, calculados analiticamente para as metodologias B31G e RPA com a majoração das dimensões do defeito pelas incertezas do PIG e modelo de crescimento do defeito apenas na profundidade

Pode-se confirmar pela observação das Tabelas 5.8 e 5.10 que o aplicativo PLANPIG, nas opções *Integridade Imediata e Futura*, considera a soma das incertezas características do PIG instrumentado nas dimensões dos defeitos, associado ao modelo de crescimento do defeito apenas na profundidade. A Tabela 5.11 permite observar as diferenças relativas entre os valores analíticos e os apresentados pelo aplicativo PLANPIG. Verifica-se que o programa apresenta resultados aderentes ao modelo analítico, considerando as observações aqui apresentadas.

<b>PROGRAMA</b>			<b>MODELO ANALÍTICO</b>		
<i>Avaliação imediata</i>					
PLANPIG	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
B31G	184.64	1.128	184.59	1.129	0.03%
RPA	171.49	1.215	171.49	1.215	0.00%
<i>Avaliação em 10 anos - Crescimento do defeito somente na profundidade</i>					
PLANPIG	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
B31G	148.64	1.402	148.58	1.402	0.04%
RPA	113.99	1.828	114.00	1.827	0.00%

Tabela 5.11 – Avaliação do erro relativo apresentado entre o aplicativo PLANPIG e o modelo analítico no cálculo da pressão de falha considerando as dimensões do defeito majoradas

## 5.2.2. Aplicativo CONFIABILIDADE

Comparando-se os resultados de pressão de falha fornecidos pelo programa CONFIABILIDADE, conforme a Tabela 5.7, observa-se que o aplicativo apresentou resultados aderentes ao modelo analítico nas opções B31G, Arco&Kiefner e DNV RP F101. Na opção DNV RP F101, verifica-se que o fator de 0,9 correspondente ao “*modelling factor*”, conforme definido na DNV RP F101, deve ser utilizado na determinação do fator de segurança total.

As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam os valores de pressão de falha e ERF calculados analiticamente pela aplicação da metodologia DNV RP F101, sem a utilização do fator de 0,9 correspondente ao “*modelling factor*” definido em [7].

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação imediata</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.55</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>200.00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>M</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
DNV RP F101	308.38	1.548	1.000	215.21	0.968

Tabela 5.12 - Valores de pressão de falha e ERF calculados analiticamente para a metodologia DNV RP F101 sem a utilização do fator de 0,9 correspondente ao “*modelling factor*” – condição imediata

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos</b>					
<b>Taxa de corrosão somente na profundidade</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.77</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>200.00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	<b><math>P_{flow}</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>M</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>P_{rup}</math></b>	<b>ERF</b>
DNV RP F101	308.38	1.548	1.000	140.88	1.479

Tabela 5.13 – Valores de pressão de falha e ERF calculados analiticamente para a metodologia DNV RP F101 sem a utilização do fator de 0,9 correspondente ao “*modelling factor*” – condição futura com crescimento do defeito somente na profundidade

É possível confirmar que o aplicativo CONFIABILIDADE calcula a pressão de falha real e não considera em seu algoritmo o fator “*modelling factor*” na opção DNV. Dessa forma, se faz necessário considerar esse fator na entrada de dados do programa, multiplicando o fator de projeto pretendido por 0,9.

A Tabela 5.14 sumariza as diferenças relativas entre os valores analíticos e os apresentados pelo aplicativo CONFIABILIDADE. Verifica-se que o programa apresenta resultados aderentes ao modelo analítico, sendo a opção B31G a que apresenta o maior erro sistêmico, de aproximadamente 1%.

PROGRAMA			MODELO ANALÍTICO		
<i>Avaliação imediata</i>					
CONFIABILIDADE	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
B31G	203.25	1.025	201.39	1.034	-0.93%
DNV	215.22	0.968	215.21	0.968	-0.01%
Arco&Kiefner	196.17	1.062	196.23	1.062	0.03%
<i>Avaliação em 10 anos - Crescimento do defeito somente na profundidade</i>					
CONFIABILIDADE	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
B31G	170.21	1.224	168.57	1.236	-0.97%
DNV	140.86	1.479	140.88	1.479	0.01%
Arco&Kiefner	145.69	1.43	145.73	1.430	0.03%

Tabela 5.14 - Avaliação do erro relativo apresentado entre o aplicativo CONFIABILIDADE e o modelo analítico no cálculo da pressão de falha

### 5.2.3. Aplicativo OPIS

Na comparação dos resultados de pressão de falha fornecidos pelo aplicativo OPIS com os obtidos analiticamente pela aplicação do Método RStreng 0,85dL, é possível observar que o programa calcula a pressão de falha real e não utiliza o fator de projeto no cálculo da pressão de falha, apesar do fator de projeto pretendido ser inserido no campo apropriado. As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam os resultados de pressão de falha calculados analiticamente, sendo o fator de projeto considerado igual a 1,0.

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação imediata</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.55</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>200.00 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	$P_{flow}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$M$	$\alpha$	$P_{rup}$	ERF
RStreng 0.85dL	279.67	1.939	0.850	196.23	1.062

Tabela 5.15 - Valores de pressão de falha e ERF imediato calculados analiticamente para a metodologia RStreng 0,85dL com a utilização de fator de projeto equivalente a 1,0

<b>Aplicação analítica dos métodos semi-empíricos - Avaliação em 10 anos</b>					
<b>Taxa de corrosão na profundidade e no comprimento conf. Tab. 4.2</b>					
Diâmetro Externo	558.8 mm	$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right]$ $ERF = \frac{MAOP}{F \cdot P_{rup}}$			
Espessura de parede	15.875 mm				
SMYS	60 ksi				
SMTS	75 ksi				
Fator de Projeto (F)	0.72				
MAOP	150 kgf/cm <sup>2</sup>				
<b>Profundidade do defeito (d/t)</b>	<b>0.77</b>				
<b>Comprimento do defeito (L)</b>	<b>217.50 mm</b>				
<b>Metodologias</b>	$P_{flow}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$M$	$\alpha$	$P_{rup}$	ERF
RStreng 0.85dL	279.67	2.062	0.850	141.45	1.473

Tabela 5.16 - Valores de pressão de falha e ERF em 10 anos calculados analiticamente para a metodologia RStreng 0,85dL com a utilização de fator de projeto equivalente a 1,0 – crescimento do defeito conforme a Tabela 4.2

Pela observação das Tabelas 5.15 e 5.16 é possível confirmar que a pressão de falha calculada pelo aplicativo OPIS é a pressão de falha real, ou seja, mesmo utilizando-se o fator de projeto na entrada de dados, os resultados de pressão de falha fornecidos não consideram o uso do fator de projeto.

A Tabela 5.17 permite observar as diferenças relativas entre os valores analíticos e os apresentados pelo aplicativo OPIS, considerando a premissa de cálculo da pressão de falha real adotada pelo programa. É possível verificar também que o aplicativo respondeu positivamente ao uso do critério de crescimento do defeito na dimensão do comprimento, apresentando resultados congruentes aos obtidos analiticamente.

PROGRAMA			MODELO ANALÍTICO		
<i>Avaliação imediata</i>					
OPIS	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
RStreng 0.85dL	196.13	1.062	196.23	1.062	0.05%
<i>Avaliação em 10 anos - Crescimento do defeito conf. Tab. 4.2</i>					
OPIS	$P_{rup}$	ERF	$P_{rup}$	ERF	Erro (%)
RStreng 0.85dL	141.38	1.474	141.45	1.473	0.05%

Tabela 5.17 - Avaliação do erro relativo apresentado entre o aplicativo OPIS e o modelo analítico no cálculo da pressão de falha

### 5.3. Probabilidade de falha imediata e futura

O método analítico desenvolvido no Capítulo 3 para cálculo da probabilidade de falha de um duto contendo defeitos de corrosão consiste na avaliação segundo uma abordagem onde os modos de falha por vazamento e por ruptura são avaliados como fenômenos independentes. Dessa forma, a probabilidade de falha de um defeito pode ser obtida a partir da Equação 5.7.

$$POF = 1 - [(1 - POL) \times (1 - POR)] \quad (5.7)$$

Onde,

$$POL = 1 - \Phi\left(\frac{d_{ref} - \mu_d}{\sigma_d}\right) \quad (5.8)$$

$$POR = \Phi\left(\frac{MAOP - \mu_{rup}}{\sigma_{rup}}\right) \quad (5.9)$$

$$\mu_{rup} = P_{rup}(\mu_d, \mu_L) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 P_{rup}}{\partial d^2} \sigma_d^2 + \frac{\partial^2 P_{rup}}{\partial L^2} \sigma_L^2 \right] \quad (5.10)$$

$$\sigma_{rup}^2 = \left[ \frac{\partial P_{rup}}{\partial d} \right]^2 \sigma_d^2 + \left[ \frac{\partial P_{rup}}{\partial L} \right]^2 \sigma_L^2 \quad (5.11)$$

$$P_{rup} = P_{flow} \left[ \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \frac{d}{t.M}} \right] \quad (5.12)$$

Sendo,

$d_{ref}$  → Valor limite da profundidade do defeito quanto a vazamento;

$\mu_{rup}$  → Média da distribuição de probabilidade da pressão de falha calculada;

$\sigma_{rup}$  → Desvio padrão da distribuição de probabilidade da pressão de falha calculada;

$MAOP$  → Pressão máxima de operação admissível;

$P_{flow}$  → Pressão que levaria um duto novo a atingir tensões equivalentes a uma tensão crítica;

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

$\alpha$  → Fator de ajuste da área transversal do defeito;

$P_{rup}$  → Função semi-empírica para cálculo da pressão de falha, definida em função dos parâmetros  $M$ ,  $\alpha$  e  $P_{flow}$  característicos de cada metodologia particular.

A partir da observação da Equação 5.8, é possível verificar que a probabilidade de vazamento em um instante qualquer pode ser calculada analiticamente como uma função da profundidade limite quanto ao vazamento e da profundidade do defeito, sendo esta última definida estocasticamente conforme as Equações 5.3 e 5.4. Em teoria, o vazamento ocorre quando o defeito atinge uma profundidade equivalente a 100% da espessura de parede nominal do duto. No entanto, esse valor é adequadamente definido em função de normas, práticas recomendadas e manuais corporativos utilizados por grandes empresas do setor. No presente estudo, será utilizada a Norma ASME B31G como referência, onde se define que qualquer defeito com profundidade superior a 80% da espessura nominal do duto ( $d_{ref}$ ) deve ser reparado obrigatoriamente.

Conforme a Equação 5.9, a probabilidade de ruptura para um instante qualquer pode ser calculada analiticamente em função da MAOP e da pressão de falha, onde a expectativa e a variância da pressão de falha pode ser obtida pelas Equações 5.10 e 5.11. Dessa forma, desenvolvendo-se os cálculos para o defeito isolado dado, adotando-se as funções  $P_{rup}$

adequadas para cada metodologia semi-empírica avaliada, é possível obter analiticamente os valores de probabilidade de ruptura. A Tabela 5.18 sumariza os valores de probabilidade de falha (POF), de vazamento (POL) e de ruptura (POR), obtidos analiticamente.

Cálculo analítico da probabilidade de falha				
Previsão	Metodologia	POL	POR	POF (Combinada)
<b>Condição imediata</b>				
0 anos	ASME B31G	6.779E-04	1.136E-06	6.791E-04
	RStreng 0.85dL	6.779E-04	1.942E-03	2.619E-03
	Método RPA	6.779E-04	1.948E-03	2.625E-03
	DNV RP F101	6.779E-04	1.136E-03	1.813E-03
<b>Crescimento do defeito apenas na profundidade</b>				
10 anos	ASME B31G	3.634E-01	9.454E-02	4.236E-01
	RStreng 0.85dL	3.634E-01	5.949E-01	7.421E-01
	Método RPA	3.634E-01	5.952E-01	7.423E-01
	DNV RP F101	3.634E-01	6.368E-01	7.688E-01
<b>Crescimento do defeito na profundidade e no comprimento conforme Tab. 4.2</b>				
10 anos	ASME B31G	3.634E-01	1.444E-01	4.553E-01
	RStreng 0.85dL	3.634E-01	6.662E-01	7.875E-01
	Método RPA	3.634E-01	6.665E-01	7.877E-01
	DNV RP F101	3.634E-01	7.002E-01	8.091E-01

Tabela 5.18 – Resultados analíticos de probabilidade de falha para o defeito isolado

A partir da Tabela 5.18 é possível verificar para a condição futura a influência do modelo de crescimento do defeito sobre a probabilidade de ruptura, e conseqüentemente da probabilidade de falha. Observa-se na opção B31G uma diferença absoluta de  $4.98 \times 10^{-2}$  entre os resultados de probabilidade de ruptura obtidos para os diferentes modelos de crescimento de defeito. Essa diferença na probabilidade de ruptura corresponde a uma diferença na probabilidade de falha de  $3.17 \times 10^{-2}$ . Essa observação ratifica a necessidade de adoção de modelos tridimensionais de crescimento de defeito, de forma a obter previsões representativas da probabilidade de ruptura futura.

Conforme apresentado no Capítulo 4, os aplicativos CONFIABILIDADE e OPIS fornecem as probabilidades de vazamento, de ruptura e de falha combinada, na condição imediata e futura, permitindo dessa forma a comparação integral entre esses programas e o modelo analítico. Por outro lado, o aplicativo PLANPIG calcula as probabilidades de segurança (PS) e de vazamento (PV) como subprodutos do cálculo do tempo de re-inspeção. Considerando que o cálculo da probabilidade de falha, representado nos

parâmetros PS e PV, não é uma funcionalidade disponível pelo PLANPIG, optou-se por não considerar essas variáveis na comparação dos resultados de probabilidade de falha fornecidos pelos outros métodos. Os resultados de probabilidade de falha fornecidos pelos aplicativos CONFIABILIDADE e OPIS podem ser observados na Tabela 5.19.

Simulação com os programas avaliados no cálculo da probabilidade de falha					
Previsão	Aplicativo	Opção	POL	POR	POF (Combinada)
0 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	6.780E-04	4.634E-06	6.827E-04
		Arco&Kiefner	6.780E-04	3.567E-03	4.242E-03
		DNV RP F101	6.780E-04	2.165E-03	2.842E-03
	OPIS	RStreng 0.85dL	6.800E-04	1.376E-02	1.376E-02
10 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	3.526E-01	8.212E-02	4.057E-01
		Arco&Kiefner	3.526E-01	5.765E-01	7.258E-01
		DNV RP F101	3.526E-01	6.006E-01	7.414E-01
	OPIS	RStreng 0.85dL	3.628E-01	6.308E-01	6.308E-01

Tabela 5.19 - Resultados de probabilidade de falha calculados pela aplicação dos programas para o defeito isolado

Conforme discutido anteriormente, os resultados apresentados por programas de computador estão sujeitos a erros sistêmicos provenientes das mudanças de unidades, arredondamentos de valores, associação de variáveis de diferentes tipos, propagação de erros, e outros. Observou-se no estudo comparativo dos resultados de pressão de falha a necessidade de se estabelecer critérios para identificação da aderência entre as diferentes metodologias avaliadas, onde se definiu que erros relativos menores que 2% seriam aceitáveis. Essa abordagem se apresenta bastante razoável na comparação de grandezas físicas como pressão. No entanto, a determinação de critérios de comparação de grandezas adimensionais como probabilidade se mostra bastante complexa devido à grande sensibilidade apresentada pelas funções de distribuição de probabilidade características, em função de pequenas variações nos argumentos.

Dessa forma, o presente estudo se limita a apresentar apenas a comparação entre os resultados de probabilidade de falha obtidos analiticamente e os fornecidos pelos programas avaliados, a partir das diferenças absolutas entre os valores. Apenas como referência, serão destacados os resultados cuja diferença absoluta entre os valores comparados for inferior a  $1,0 \times 10^{-2}$ , evidenciando dessa forma a aderência entre os métodos comparados, uma vez que esse erro equivale à taxa de falha anual, recomendada por [23],

para um duto com classe de segurança baixa, avaliado segundo o estado limite de operacionalidade (*serviceability limit state*).

Os valores de POL, POR e POF obtidos analiticamente e pela aplicação dos programas foram calculados com a utilização de um fator de projeto de 1,0, representando o cálculo da probabilidade de falha real.

De forma a sistematizar a comparação dos resultados de probabilidade de falha fornecidos pelos programas e os calculados analiticamente, optou-se por organizar o estudo em função das probabilidades de vazamento, de ruptura e de falha, conforme apresentado nas seções seguintes.

### 5.3.1. Avaliação da probabilidade de vazamento

COMPARAÇÃO ANALÍTICO X PROGRAMAS - Probabilidade de Vazamento					
Previsão	Aplicativo	Opção	POL Programa	POL Analítico	Diferença (Anal - Prog)
0 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	6,780E-04	6,779E-04	-5,256E-08
		Arco&Kiefner	6,780E-04	6,779E-04	-5,256E-08
		DNV RP F101	6,780E-04	6,779E-04	-5,256E-08
	OPIS	RStreng 0.85dL	6,750E-04	6,779E-04	2,947E-06
10 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	3,526E-01	3,634E-01	1,078E-02
		Arco&Kiefner	3,526E-01	3,634E-01	1,078E-02
		DNV RP F101	3,526E-01	3,634E-01	1,078E-02
	OPIS	RStreng 0.85dL	3,628E-01	3,634E-01	5,890E-04

Tabela 5.20 – Avaliação comparativa dos resultados de POL apresentados pelos programas

É possível observar que os aplicativos CONFIABILIDADE e OPIS se apresentam alinhados com modelo analítico no cálculo da probabilidade de vazamento para o instante imediato. A diferença entre os valores de POL fornecidos pelos programas e os obtidos analiticamente apresentaram valores inferiores a  $1,0 \times 10^{-2}$ , o que evidência a aderência entre os métodos.

Por outro lado, na condição futura é possível observar um aumento da diferença entre os valores apresentados pelos programas e os obtidos analiticamente. Uma vez que o cálculo da probabilidade de vazamento é uma função do valor da profundidade do defeito para um instante qualquer e da profundidade limite admissível para o defeito quanto ao vazamento, a qual foi considerada igual a 80% da espessura de parede nominal do duto para todos os métodos, é possível indagar que a origem da dispersão reside no valor da

profundidade do defeito calculado para o instante futuro. Por sua vez, o cálculo da profundidade do defeito para um instante qualquer é uma função da medição feita pelo PIG com as incertezas associadas e da taxa de corrosão na profundidade e sua respectiva variância. Na avaliação da probabilidade de vazamento no instante imediato é possível constatar que a comparação dos resultados para os programas OPIS e CONFIABILIDADE apresentam diferenças desprezáveis, eliminando a possibilidade da dispersão observada na avaliação futura residir no tratamento dos dados provenientes da inspeção, uma vez que na condição imediata a parcela inerente ao crescimento do defeito é nula. Dessa forma, é possível concluir que a causa das dispersões observadas na comparação das probabilidades de vazamento na condição futura reside em algum ponto situado nos modelos empregados pelos diferentes métodos para crescimento do defeito. As observações feitas neste ponto não permitem especificar exatamente qual a causa da dispersão, tarefa essa que demandaria uma investigação detalhada dos algoritmos adotados por cada programa.

### 5.3.2. Avaliação da probabilidade de ruptura

A partir da observação da Planilha 5.21, é possível verificar que o aplicativo CONFIABILIDADE se mostrou alinhado ao modelo analítico no cálculo da probabilidade de ruptura imediata, apresentando erros inferiores a  $1,0 \times 10^{-2}$ .

COMPARAÇÃO ANALÍTICO X PROGRAMAS - Probabilidade de Ruptura					
Previsão	Aplicativo	Opção	POR Programa	POR Analítico	Diferença (Anal - Prog)
0 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	4,634E-06	1,136E-06	-3,498E-06
		Arco&Kiefner	3,567E-03	1,942E-03	-1,625E-03
		DNV RP F101	2,165E-03	1,136E-03	-1,029E-03
	OPIS	RStreng 0.85dL	1,376E-02	1,942E-03	-1,182E-02
10 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	8,212E-02	9,454E-02	1,242E-02
		Arco&Kiefner	5,765E-01	5,949E-01	1,842E-02
		DNV RP F101	6,006E-01	6,368E-01	3,618E-02
	OPIS	RStreng 0.85dL	6,308E-01	6,662E-01	3,541E-02

Tabela 5.21 – Avaliação comparativa dos resultados de POR apresentados pelos programas

Na comparação dos resultados de probabilidade de ruptura em um instante futuro, é possível verificar um aumento na diferença entre os resultados apresentados pelos programas e os calculados analiticamente. Diferentemente da probabilidade de vazamento, a probabilidade de ruptura é uma função da pressão de falha e da pressão máxima de

operação admissível, considerada igual para todos os métodos avaliados. Logo, a causa da divergência nos resultados pode ser atribuída ao valor da expectativa da pressão de falha calculada ou à sua respectiva variância. Considerando que os estudos comparativos da pressão de falha na condição futura apresentaram erros desprezáveis, entende-se que a provável causa da dispersão avaliada na comparação da probabilidade de ruptura em um momento futuro reside em alguma abordagem adotada pelos programas, diferente da apresentada para o cálculo analítico, na determinação da variância da pressão de ruptura.

Associando-se as observações feitas na comparação da probabilidade de vazamento na condição futura com as verificações feitas nesta seção, é possível estabelecer a teoria de que a causa das divergências observadas na condição futura está associada às premissas adotadas pelos aplicativos na determinação da variância das dimensões do defeito em um instante futuro. No entanto, como já mencionado anteriormente, a determinação exata da causa das divergências observadas demandaria uma investigação dos algoritmos implementados nos aplicativos CONFIABILIDADE e OPIS, tarefa essa não coberta por este trabalho.

### 5.3.3. Avaliação da probabilidade de falha combinada

A Tabela 5.22 apresenta o resultado da comparação dos valores de probabilidade de falha fornecidos pelos programas avaliados com os valores obtidos analiticamente.

COMPARAÇÃO ANALÍTICO X PROGRAMAS - Probabilidade de Falha					
Previsão	Aplicativo	Opção	POF Programa	POF Analítico	Diferença (Anal - Prog)
0 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	6,827E-04	6,791E-04	-3,618E-06
		Arco&Kiefner	4,242E-03	2,619E-03	-1,623E-03
		DNV RP F101	2,842E-03	1,813E-03	-1,029E-03
	OPIS	RStreng 0.85dL	1,376E-02	2,619E-03	-1,114E-02
10 anos	CONFIABILIDADE	ASME B31G	4,057E-01	4,236E-01	1,787E-02
		Arco&Kiefner	7,258E-01	7,421E-01	1,632E-02
		DNV RP F101	7,414E-01	7,688E-01	2,737E-02
	OPIS	RStreng 0.85dL	6,308E-01	7,875E-01	1,567E-01

Tabela 5.22 – Avaliação comparativa dos resultados de POF apresentados pelos programas

O aplicativo CONFIABILIDADE se mostrou alinhado com o modelo analítico no cálculo da probabilidade de falha imediata, com diferenças absolutas inferiores a  $1,0 \times 10^{-2}$ . Essa observação era esperada uma vez que a probabilidade de falha é uma função das

probabilidades de vazamento e ruptura, situações onde a aderência ao modelo analítico foi observada.

A partir das avaliações das Tabelas 5.20, 5.21 e 5.22 é possível observar que os resultados de probabilidade imediata são sensíveis às diferentes premissas de cálculo da POF, ou seja, se o modelo considera os modos de falha por ruptura e por vazamento como fenômenos independentes. Por outro lado, as causas de divergência nos valores de probabilidade de falha futura podem ser atribuídas aos diferentes modelos de crescimento do defeito, e às diferentes premissas de cálculo das variâncias das dimensões dos defeitos na condição futura.