

## 6

# Comparação de aplicativos em dutos com defeitos reais de corrosão

No Capítulo 4, foi possível conhecer três diferentes programas para o gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão. Observou-se que cada aplicativo apresentado encerra um conjunto de funcionalidades que visam auxiliar o responsável pela avaliação e gestão da integridade de dutos de aço, fornecendo informações relevantes na determinação dos defeitos a serem reparados, na determinação do intervalo ótimo para re-inspeção e auxiliando na elaboração de um plano de inspeção baseada no risco. Tendo-se em vista as diferenças e particularidades de cada programa, é importante que o responsável pela gestão da integridade conheça as principais funcionalidades de cada um antes de selecionar o aplicativo mais adequado às suas necessidades. Esse capítulo se propõe a apresentar um estudo comparativo entre os aplicativos PLANPIG, CONFIABILIDADE e OPIS, avaliando a performance e identificando as particularidades inerentes a cada programa na avaliação da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão.

### 6.1. Metodologia de comparação dos aplicativos

A comparação de aplicativos para gerenciamento da integridade deve seguir critérios bem definidos no sentido de conferir credibilidade aos resultados obtidos. Uma vez que cada programa encerra um conjunto de funcionalidades, é preciso conhecer as características em comum, e que conseqüentemente podem ser comparadas. O Capítulo 4 apresentou todas as funcionalidades disponíveis para cada aplicativo, e descreveu também as teorias e premissas contidas em seus algoritmos, segundo a literatura. No entanto, este capítulo apresenta o resultado de uma avaliação aprofundada dos resultados fornecidos por cada programa na avaliação da integridade de dutos de aço com defeitos reais de corrosão.

Após diversas simulações com os diferentes aplicativos, identificou-se que o cálculo da pressão de falha imediata, e a previsão da pressão de falha para momentos futuros, são

características que se mostraram presentes em todos os programas avaliados. Por outro lado, o cálculo da probabilidade de falha se apresentou de diferentes modos para cada aplicativo.

Os aplicativos OPIS e CONFIABILIDADE permitem calcular, para cada defeito isolado, a probabilidade de vazamento (POL), a probabilidade de ruptura (POR) e a probabilidade de falha (POF), esta última sendo obtida em função das probabilidades de ruptura e vazamento. O aplicativo CONFIABILIDADE ainda permite obter o cálculo das probabilidades de vazamento, de ruptura e de falha, para o duto como um todo, combinando as probabilidades de todos os defeitos assumindo uma abordagem de circuito em série, onde a falha em qualquer um dos defeitos promove a falha do duto.

Por sua vez, o PLANPIG calcula as probabilidades de segurança (PS) e de vazamento (PV), para cada defeito, como subprodutos da função *Cálculo do Tempo de Re-inspeção*. Segundo [30], o parâmetro PS é a probabilidade do defeito de corrosão atingir a profundidade de segurança DS, onde DS é o menor valor entre a profundidade do defeito correspondente a um ERF igual a 1,0 (usando o fator de projeto pretendido) e 80% da espessura nominal do duto. Analogamente, o parâmetro PV é a probabilidade do defeito de corrosão atingir a profundidade de ruptura DR, onde DR é o menor valor entre a profundidade do defeito correspondente a um ERF igual a 1,0 (usando um fator de projeto de 1,0) e 85% da espessura nominal do duto. Para cada defeito, o tempo de re-inspeção é obtido pela iteração da variável tempo no algoritmo de cálculo da profundidade do defeito, até que a probabilidade PS calculada seja igual a um valor de probabilidade admissível, que é definido em função do parâmetro CI/CV e da severidade do defeito, conforme apresentado em [30]. O tempo de re-inspeção determinado para cada defeito assume o menor valor entre o tempo de re-inspeção calculado e a vida útil do duto, que é um dado de entrada.

É reconhecido que o cálculo da probabilidade de falha não pode ser considerado como uma função primária do PLANPIG, uma vez que esse dado é apenas um subproduto da função a qual o programa se propõe a realizar, que é o *Calculo do Tempo de Re-Inspeção*. Dessa forma, optou-se por não considerar essas variáveis na comparação dos resultados de probabilidade de falha fornecidos pelos outros métodos.

Em função das características apresentadas por cada aplicativo, verifica-se que é possível comparar os programas estudados conforme a Tabela 6.1.

Análise Aplicativo	Avaliação no momento da inspeção		Avaliação em um momento futuro	
	Pressão de falha	Probabilidade de falha	Pressão de falha	Probabilidade de falha
CONFIABILIDADE	ERF	POF	ERF	POF
OPIS	ERF	POF	ERF	POF
PLANPIG	ERF	---	ERF	---

Tabela 6.1 - Resumo das variáveis comparáveis pelos programas estudados

De forma a estabelecer valores de referência para as avaliações das pressões de falha, imediata e futura, fornecidas pelos aplicativos estudados, foram desenvolvidos cálculos analíticos das pressões de falha, através das metodologias semi-empíricas descritas no Capítulo 2. A pressão de falha imediata foi calculada analiticamente considerando as dimensões dos defeitos fornecidas pela inspeção por PIG instrumentado. Por outro lado, no cálculo analítico da pressão de falha em um momento futuro, foram consideradas as dimensões dos defeitos fornecidas pela inspeção, somadas ao produto da taxa de corrosão pelo período avaliado.

Os valores de probabilidade de falha imediata e futura podem ser obtidos analiticamente pela aplicação da metodologia desenvolvida no Capítulo 3, que considera a influência das incertezas da medição do PIG Instrumentado e da taxa de corrosão. Esse método foi utilizado na obtenção de valores de referência para a avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata e futura fornecidos pelos programas.

## 6.2. Descrição dos dutos avaliados

Outro fator importante na comparação de aplicativos para gerenciamento da integridade é a diversidade dos casos estudados. De forma a conferir representatividade ao estudo, foram selecionados três dutos, em condições distintas no que tange a tempo em operação, dados operacionais, diâmetros, espessuras de parede e cenários de aplicação. A Tabela 6.2 apresenta as características dos dutos avaliados no que se refere aos dados de projeto, condições operacionais, e características do PIG utilizado na inspeção.

Descrição dos dutos avaliados no estudo comparativo entre ferramentas computacionais para avaliação da integridade			
	Duto 1	Duto 2	Duto 3
<b>DADOS OPERACIONAIS</b>			
Duto	Duto 1	Duto 2	Duto 3
Cenário	Duto que interliga duas plataformas	Duto terrestre	Duto que interliga duas plataformas
Tipo de duto	Transferência	Transporte	Transferência
Fluido transportado	Gás	Óleo	Óleo
Data da instalação	8/1/1994	1976	1/1/1987
Tempo em operação	14 anos	32 anos	22 anos
MAOP	120 kgf/cm <sup>2</sup> (1706.8 psi) (11762.2 kPa)	52 kgf/cm <sup>2</sup> (739.6 psi) (5099.1 kPa)	60 kgf/cm <sup>2</sup> (853.4 psi) (5883.6 kPa)
Vazão média de operação	125000 m <sup>3</sup> /h	1279 m <sup>3</sup> /h	300 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de origem	11°C	N.D.	70 °C
Temperatura de destino	N.D.	N.D.	N.D.
<b>DADOS DE PROJETO</b>			
Material grade	API 5L X65	API 5L X52	API 5L X60
SMYS	65 ksi (448 MPa) ( 4.570 kgf/cm <sup>2</sup> )	52 ksi (358 MPa) (3.656 kgf/cm <sup>2</sup> )	59.880 ksi (412.86 MPa) (4210.16 kgf/cm <sup>2</sup> )
SUTS	77 ksi (530 MPa) ( 5.413 kgf/cm <sup>2</sup> )	66 ksi (455 MPa) (4.640 kgf/cm <sup>2</sup> )	74.967 ksi (516.88 MPa) (5270.93 kgf/cm <sup>2</sup> )
Diâmetro externo (API5L=> +/- 0.75%)	16" (406.4mm)	22" (558,8mm)	22" (558,8mm)
Diâmetro interno	15,108" - 15,172"	21,50"	20,75"
Espessura de parede (API5L=> +/- 12.5%)	0,406" - 0,438"	0,25"	0,625" (15,875mm)
Extensão total	47 km	98 km	17,50 km
Fator de projeto	0,72	0,72	0,72
<b>DADOS DA INSPEÇÃO</b>			
Empresa de inspeção	-	-	-
Ano da inspeção	2006	2005	2003
Tipo do PIG	MFL	MFL	MFL
Profundidade com probabilidade de detecção	5% t	10% t	10% t
Probabilidade de detecção	90%	80%	80%
Acurácia do PIG na profundidade	+/- 17%	+/- 10%	+/- 10%
Confiança na leitura da profundidade	80%	80%	80%
Acurácia do PIG no comprimento	+/- 30mm	+/- 15mm	+/- 15mm
Confiança na leitura do comprimento	80%	80%	80%
Acurácia do PIG na largura	+/- 30mm	+/- 15mm	+/- 15mm
Confiança na leitura da largura	80%	80%	80%
<b>CONSIDERAÇÕES</b>			
Taxa de corrosão média na profundidade dos defeitos considerada nas análises	0.033 mm/ano	0.063 mm/ano	0.487 mm/ano
Desvio Padrão da taxa de corrosão	0.028 mm/ano	0.016 mm/ano	0.050 mm/ano
Coefficiente de variação da taxa de corrosão	0.855	0.263	0.102
Erro da taxa de corrosão	0.100 mm/ano	0.058 mm/ano	0.174 mm/ano
Coefficiente de variação no diâmetro externo	0.0001	0.0001	0.0001
Coefficiente de variação na espessura	0.0001	0.0001	0.0001
Outros coeficientes de variação	0.0001	0.0001	0.0001

Tabela 6.2 - Descrição dos dutos avaliados pelas ferramentas computacionais para determinação da integridade

A diversidade na severidade dos defeitos de corrosão de cada duto possibilitou que os aplicativos fossem avaliados sobre inúmeras combinações de profundidades e comprimentos de defeitos, associadas a diferentes características operacionais e de projeto. Os dutos avaliados foram enumerados seguindo o estado de corrosão apresentado, sendo o Duto 3 o que apresenta o estado mais severo de corrosão. Os valores de profundidade e comprimento dos defeitos ao longo da posição nos três dutos podem ser observados nas Figuras de 6.1 a 6.6.

Além das diferentes condições de severidade avaliadas pelos três dutos, observa-se que na avaliação particular do estado de corrosão de cada duto é possível identificar a existência de uma acentuada dispersão a respeito da severidade dos defeitos, indicando a existência de diferentes taxas de corrosão em função de segmentos específicos. Face às diferentes metodologias de determinação da taxa de corrosão adotadas por cada aplicativo, definiu-se como critério de normalização a utilização de uma taxa de corrosão única para

cada duto, sendo as respectivas médias e variâncias calculadas estatisticamente a partir dos dados de inspeção e do tempo em operação de cada duto.

No Capítulo anterior, foi possível observar a influência do modelo de crescimento do defeito na determinação da pressão de falha e da probabilidade de falha futura. Considerando que a maior parte dos defeitos avaliados nos três dutos está classificada como *pite*, julgou-se adequado utilizar nos cálculos analíticos o critério definido na Tabela 4.2, onde o defeito cresce nas dimensões profundidade e comprimento com a mesma taxa de corrosão. Essa abordagem possibilita avaliar em um caso real as premissas adotadas por cada aplicativo quanto ao crescimento do defeito.

### 6.2.1. Duto 1

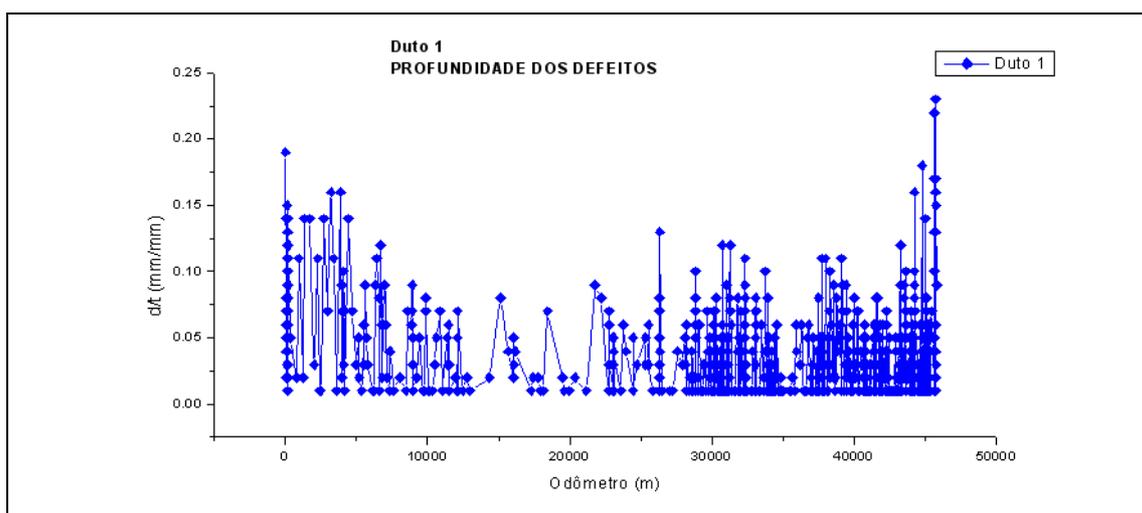


Figura 6.1 - Distribuição da profundidade dos defeitos ao longo da posição para o Duto 1

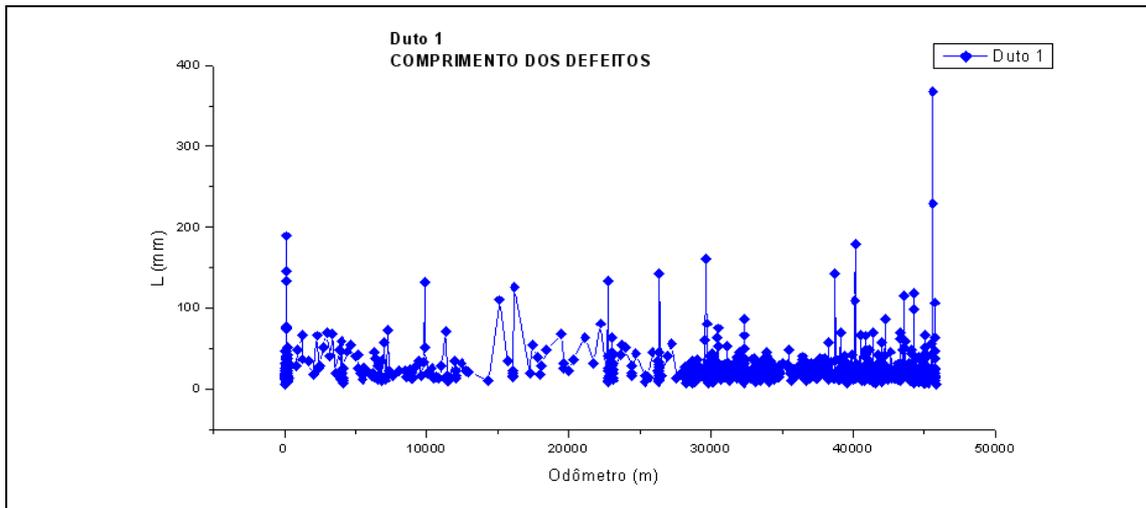


Figura 6.2 - Distribuição do comprimento dos defeitos ao longo da posição para o Duto 1

### 6.2.2. Duto 2

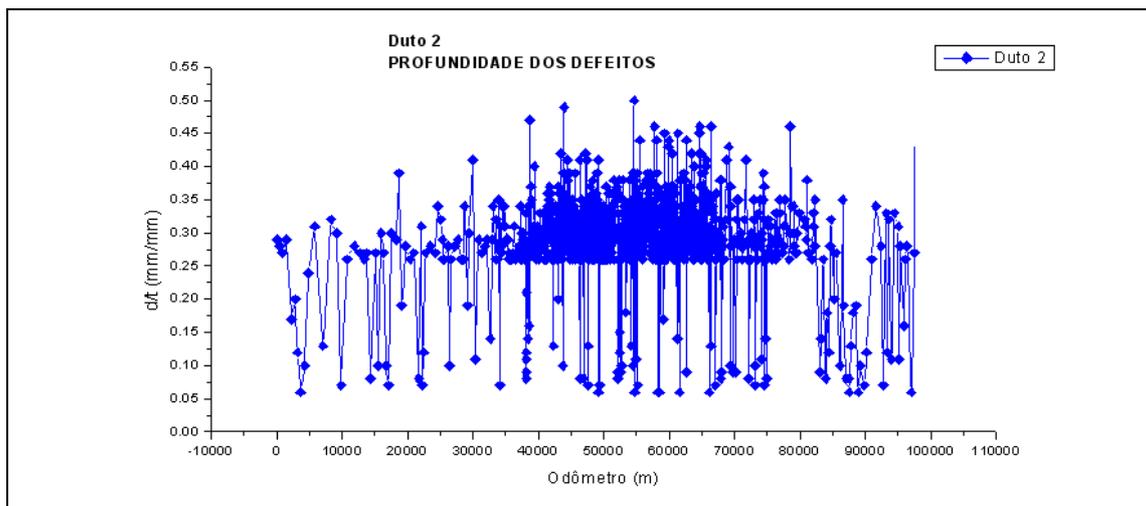


Figura 6.3 - Distribuição da profundidade dos defeitos ao longo da posição para o Duto 2

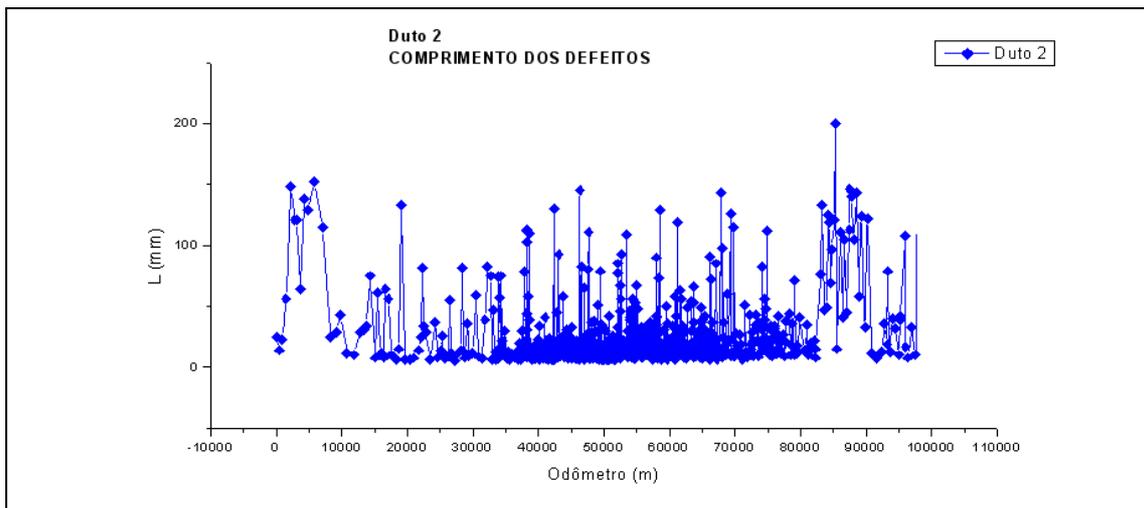


Figura 6.4 - Distribuição do comprimento dos defeitos ao longo da posição para o Duto 2

**6.2.3.  
Duto 3**

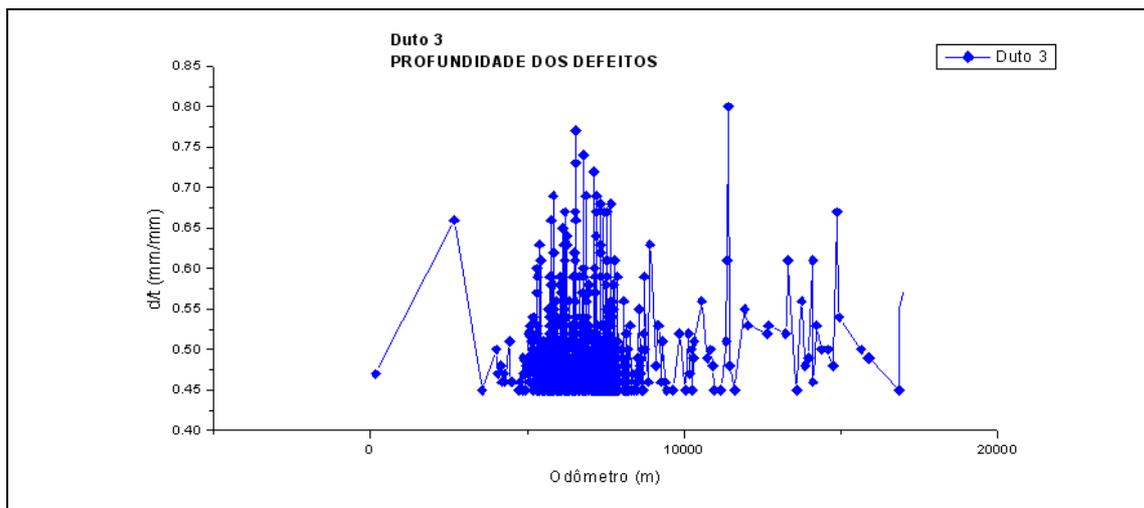


Figura 6.5 - Distribuição da profundidade dos defeitos ao longo da posição para o Duto 3

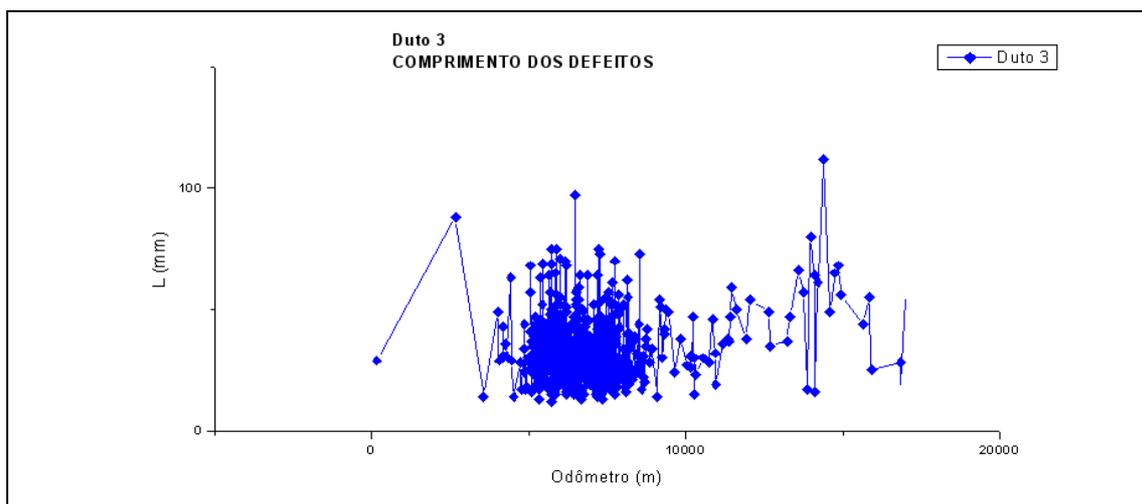


Figura 6.6 - Distribuição do comprimento dos defeitos ao longo da posição para o Duto 3

### 6.3. Considerações estocásticas do estudo

No capítulo 3 foram apresentados aspectos da confiabilidade aplicada ao gerenciamento da integridade de dutos de aço, onde foi possível conhecer a importância dos dados de inspeção, geométricos e de materiais. No que tange à avaliação estocástica dos parâmetros de projeto, das condições operacionais e da inspeção por PIG instrumentado, cada aplicativo utiliza uma determinada filosofia na aquisição e tratamento desses dados. De forma a balizar o estudo comparativo dentro das mesmas condições, referente à avaliação estocástica dos dados, torna-se necessária a adoção de alguns critérios. A Tabela 6.3 apresenta as considerações estatísticas adotadas por cada aplicativo na avaliação dos dados de projeto, parâmetros operacionais e dados da inspeção por PIG Instrumentado.

Referente aos dados da geometria do duto, das propriedades do material e da pressão de trabalho, apenas o aplicativo CONFIABILIDADE adota uma abordagem estocástica na aquisição dos dados. Isso implica na necessidade de se inserir esses dados de forma que eles assumam um comportamento determinístico, não comprometendo assim a comparação dos resultados de probabilidade de falha fornecidos pelos programas. A seleção de uma distribuição normal com coeficiente de variação de 0,0001 faz com que o dado, que em princípio seria avaliado de uma forma estocástica, se apresente com características quase determinísticas. Isso se deve ao fato de que com a utilização de um coeficiente de variação muito baixo, a variância tende a zero, o que inibe o aspecto probabilístico do dado em

questão. Esse artifício se mostrou satisfatório como critério de normalização do estudo no que se refere aos dados geométricos, de materiais e operacionais. Por outro lado, os dados de taxa de corrosão e de inspeção por PIG recebem um tratamento estocástico por todos os aplicativos, sendo necessário apenas adequar os dados às diferentes formas de aquisição inerente a cada programa.

CONSIDERAÇÕES ESTOCÁSTICAS ADOTADA POR CADA APLICATIVO				
Aplicativos		PLANPIG 3.0	OPIS	CONFIABILIDADE
GEOMETRIA	Diâmetro externo	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	Espessura de parede	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	Extensão total do duto	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO
MATERIAL	SMYS	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	SMTS	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
DADOS OPERACIONAIS	PRESSÃO DE TRABALHO	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	MAOP	DETERMINÍSTICO	DETERMINÍSTICO	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	TAXA DE CORROSÃO NA PROFUNDIDADE	- Média - Erro da taxa de corrosão	- Média - Desvio padrão	- Média; - Função de distribuição; - Coeficiente de variação.
	TAXA DE CORROSÃO NO COMPRIMENTO	Calculado internamente	- Média - Desvio padrão	Não Solicitado
	TAXA DE CORROSÃO NA LARGURA	Calculado internamente	- Média - Desvio padrão	Não Solicitado
CARACTERÍSTICA DO PIG	Probabilidade de detecção da profundidade	Solicitado	Não solicitado	Não solicitado
	Incerteza do PIG na medição da profundidade do defeito	Solicitado	Solicitado	Solicitado
	Intervalo de Confiança na leitura da profundidade do defeito	Solicitado	Solicitado	Solicitado
	Incerteza do PIG na medição do comprimento do defeito	Solicitado	Solicitado	Solicitado
	Intervalo de Confiança na leitura do comprimento do defeito	Solicitado	Solicitado	Não solicitado
	Incerteza do PIG na medição da largura do defeito	Solicitado	Solicitado	Não solicitado
	Intervalo de Confiança na leitura da largura do defeito	Solicitado	Solicitado	Não solicitado

Tabela 6.3 - Considerações estatísticas adotadas pelos diferentes aplicativos avaliados

#### 6.4. Avaliação da pressão de falha imediata

Uma das principais características de um aplicativo para avaliação da integridade de um duto de aço com defeitos de corrosão é o cálculo da pressão de falha em função dos defeitos medidos por algum método de inspeção. A partir do conhecimento da pressão de falha, é possível determinar o fator de reparo estimado (ERF – *Estimated Repair Factor*), que é a razão entre a pressão máxima de operação admissível (MAOP – *maximum allowed operation pressure*) e o valor da pressão de falha ajustada por fatores de projeto. Considerando uma abordagem determinística, assume-se que a operação de um duto é

segura quando os valores de ERF calculados para cada defeito são menores que 1,0. Esse método para determinação da integridade de dutos de aço é largamente utilizado por profissionais da área de integridade.

Nesta seção serão apresentados os resultados da comparação dos valores da pressão de falha imediata, fornecidos por cada aplicativo para os três dutos reais, com os valores obtidos analiticamente pela aplicação dos métodos semi-empíricos pertinentes. De forma a normalizar o estudo, a comparação será feita em função do valor de ERF para cada defeito, o que elimina os inconvenientes de mudanças de unidades, permite uma avaliação direta quanto ao estado de integridade do duto e avalia o tratamento dado pelos programas ao fator de projeto adotado. O critério de aderência definido no Capítulo anterior foi adotado, onde erros relativos inferiores a 2% configuram a aderência entre duas metodologias comparadas. Os resultados da comparação podem ser verificados nos gráficos a seguir, e estão organizados em função dos métodos semi-empíricos nos quais os aplicativos estão baseados.

#### 6.4.1. Avaliação dos aplicativos quanto a ASME B31G

As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 apresentam a comparação dos valores de ERF obtidos pela aplicação dos programas PLANPIG e CONFIABILIDADE com os resultados analíticos obtidos pela aplicação direta da Norma ASME B31G.

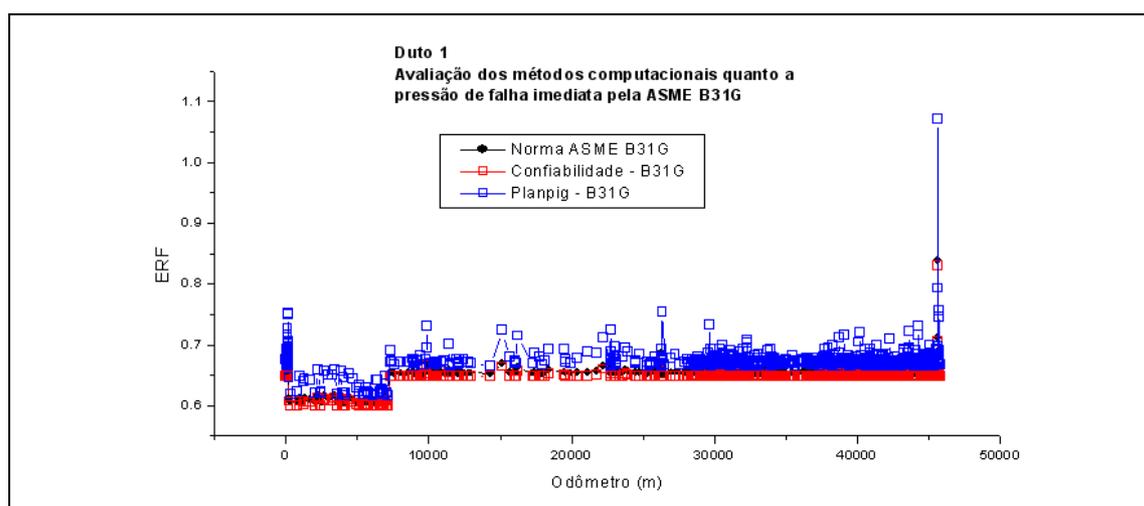


Figura 6.7 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF imediato para o Duto 1

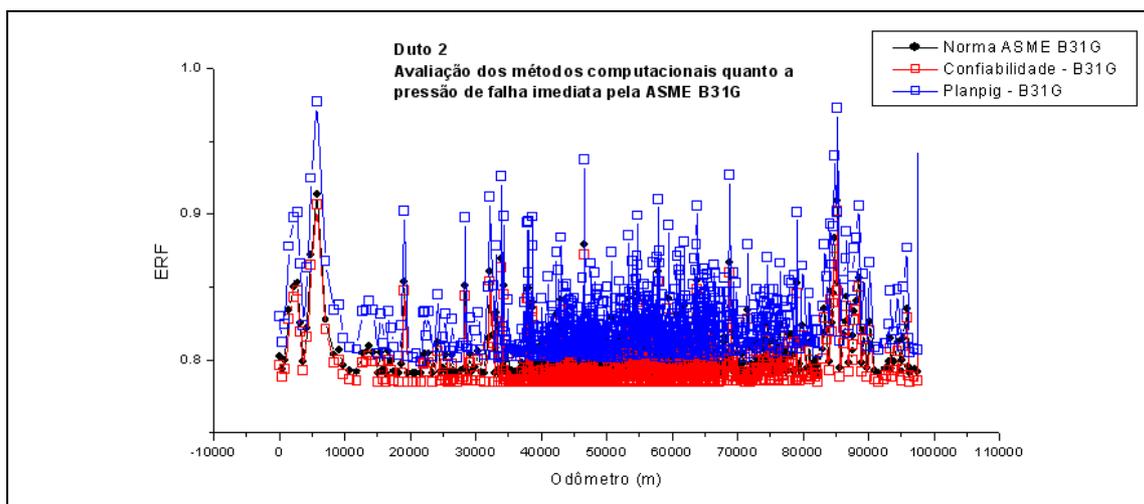


Figura 6.8 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF imediato para o Duto 2

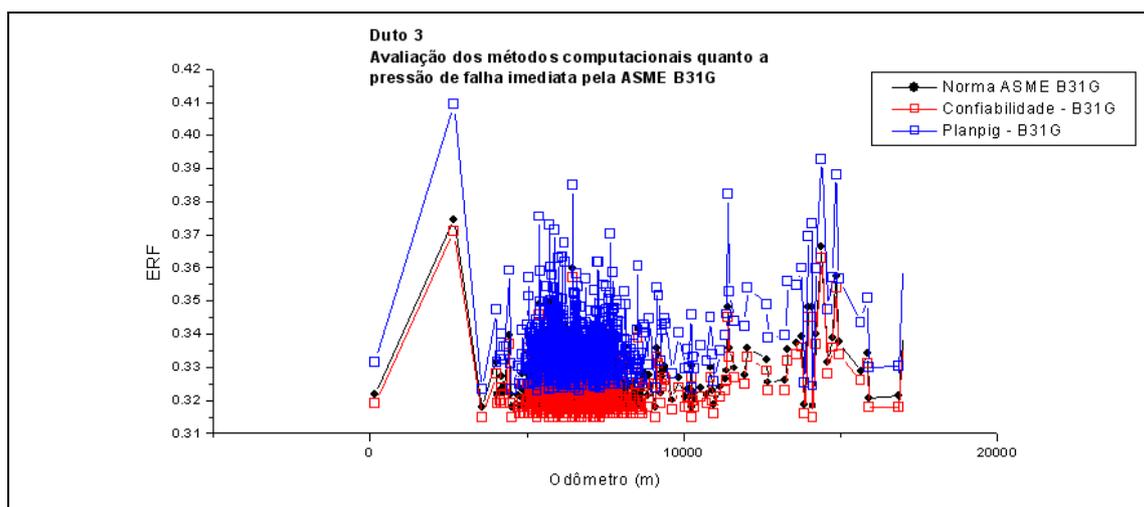


Figura 6.9 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF imediato para o Duto 3

É possível observar que o aplicativo CONFIABILIDADE apresentou valores de ERF com uma variação de aproximadamente 1% sobre os valores de ERF calculados analiticamente. Após diversas simulações com aplicativo CONFIABILIDADE, não foi possível identificar a origem do desvio. No entanto, essa divergência não compromete a aderência do programa ao modelo analítico, e pode ser atribuída a erros sistêmicos inerentes ao programa na opção B31G.

O aplicativo PLANPIG apresentou resultados de ERF superiores aos calculados analiticamente. Conforme já detectado no capítulo anterior, o programa considera no cálculo da pressão de falha imediata 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 extrema considerando os valores máximos possíveis para a profundidade e comprimento dos defeitos. A Figura 6.10 apresenta a comparação dos valores de ERF calculados pelo aplicativo PLANPIG com os valores de ERF calculados analiticamente, considerando no cálculo analítico os valores limites de profundidade e comprimento dos defeitos para o Duto 3.

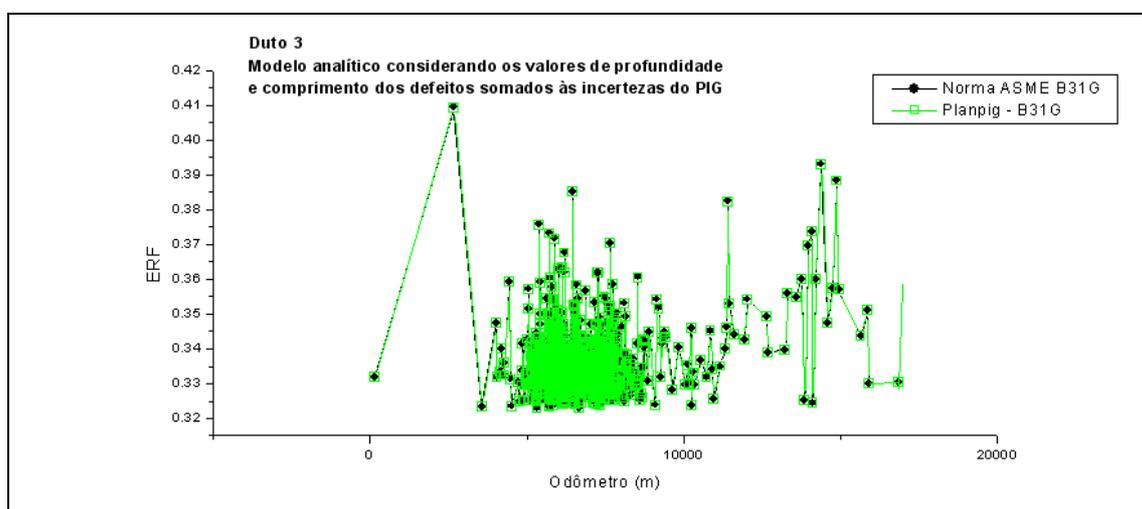


Figura 6.10 - Comparação dos valores de ERF imediato calculados pelo PLANPIG na opção ASME B31G com os valores de ERF calculados analiticamente considerando a soma das incertezas do PIG nas dimensões do defeito

Pode-se confirmar pela observação da Figura 6.10 que o aplicativo PLANPIG considera a soma das incertezas características do PIG instrumentado nas dimensões dos defeitos, conforme recomendado na norma PETROBRAS N-2786 [22].

### 6.4.2. Avaliação dos aplicativos quanto a DNV RP F101

As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 apresentam a comparação dos valores de ERF obtidos analiticamente pela aplicação da prática recomendada DNV RP F101 com os valores calculados pelo aplicativo CONFIABILIDADE, que é o único programa dentre os avaliados que utiliza o algoritmo da DNV RP F101.

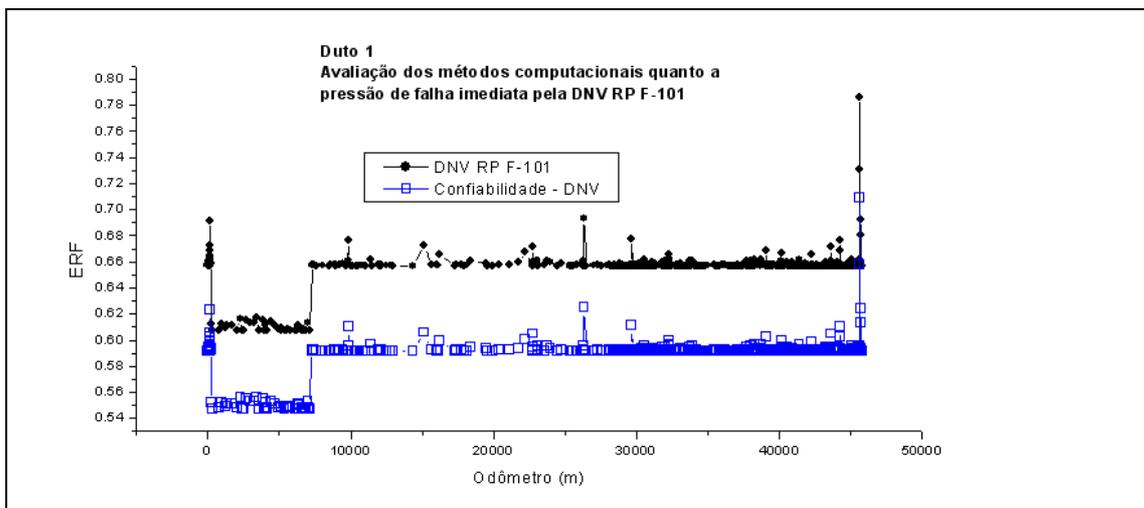


Figura 6.11 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF imediato para o Duto 1

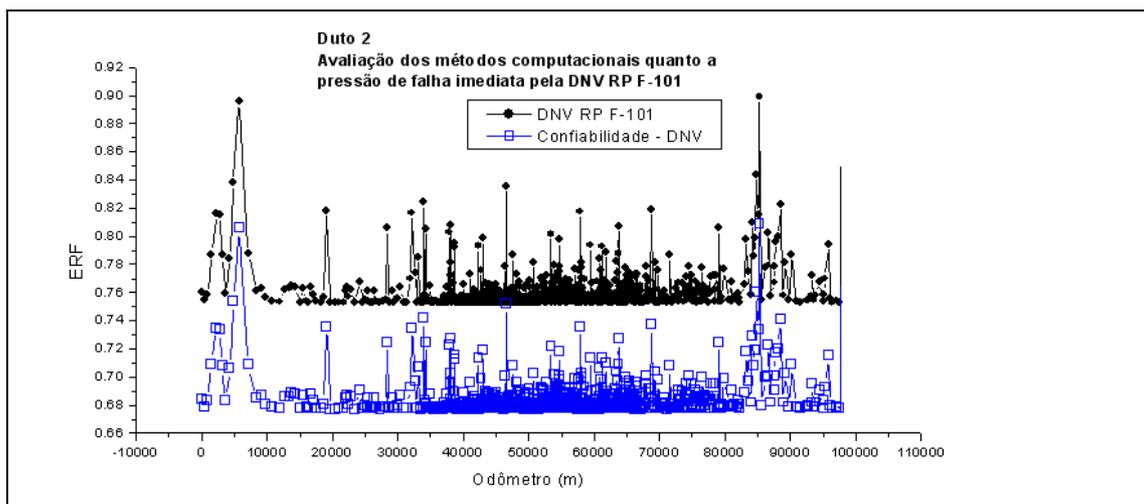


Figura 6.12 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF imediato para o Duto 2

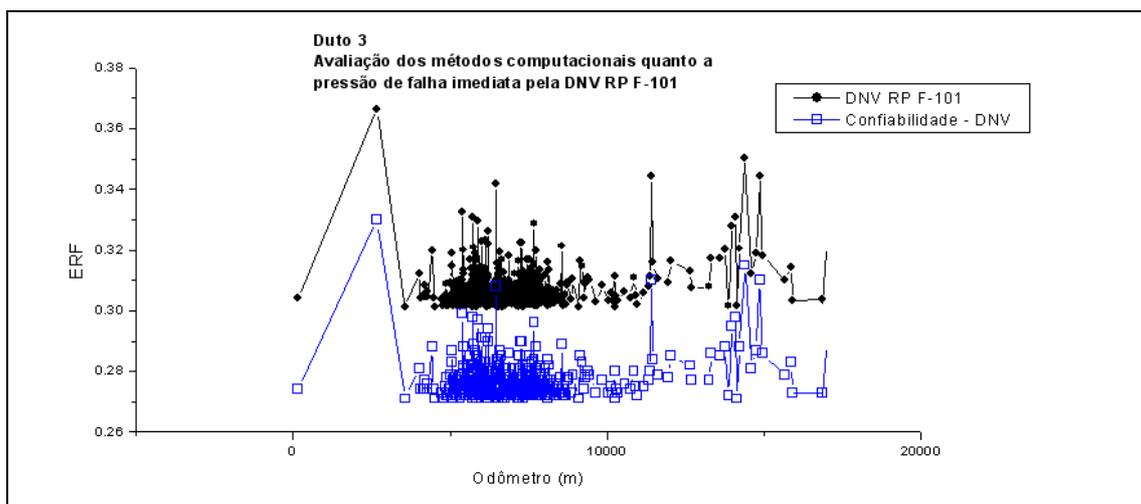


Figura 6.13 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF imediato para o Duto 3

É possível verificar que o aplicativo CONFIABILIDADE apresentou valores de ERF inferiores aos calculados analiticamente pela aplicação da DNV RP F101. Conforme verificado no Capítulo 5, observa-se que a variação é proporcional, e após algumas simulações, confirmou-se que o desvio representa um fator de 0,90 sobre o fator de projeto admitido na entrada de dados do aplicativo CONFIABILIDADE. Esse fator é definido na DNV RP F101 como “*modelling factor*”, que é utilizado para calcular o fator de segurança total. A Figura 6.14 apresenta a comparação dos valores de ERF imediato calculados no programa CONFIABILIDADE, sendo o fator de segurança admitido no aplicativo equivalente ao produto do fator de projeto pelo fator 0,9.

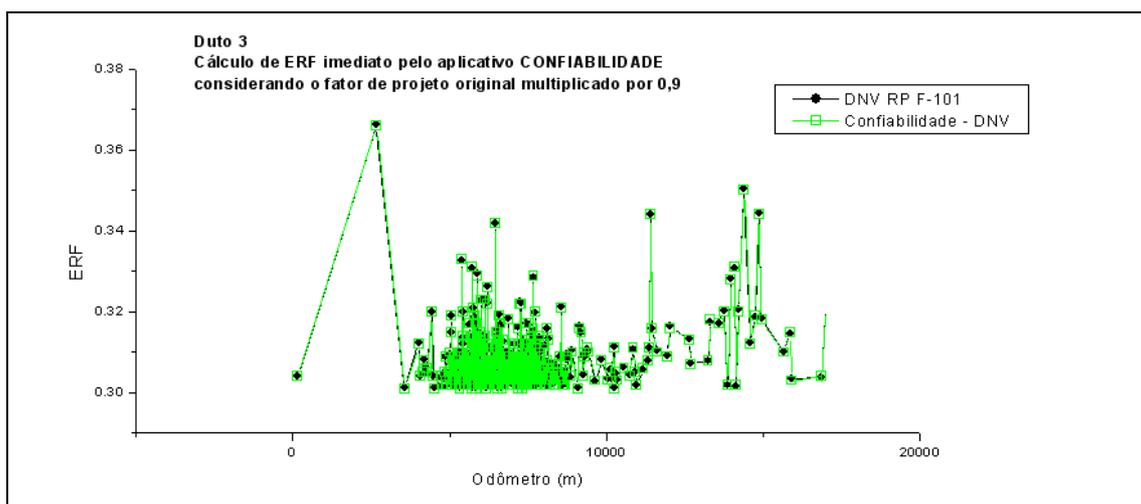


Figura 6.14 – Valores de ERF imediato calculados pelo aplicativo CONFIABILIDADE com a multiplicação do fator de projeto original por 0,9

Conforme apresentado, observa-se que o aplicativo CONFIABILIDADE não considera em seu algoritmo o fator “*modelling factor*”, e dessa forma, se faz necessário considerar esse fator na entrada de dados do programa, multiplicando o fator de projeto pretendido por 0,9.

### 6.4.3. Avaliação dos aplicativos quanto ao Método RPA

As Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam a comparação dos valores de ERF imediato obtidos analiticamente pela aplicação do Método RPA com os valores calculados pelo PLANPIG, que é o único aplicativo dentre os avaliados que utiliza o algoritmo do Método RPA.

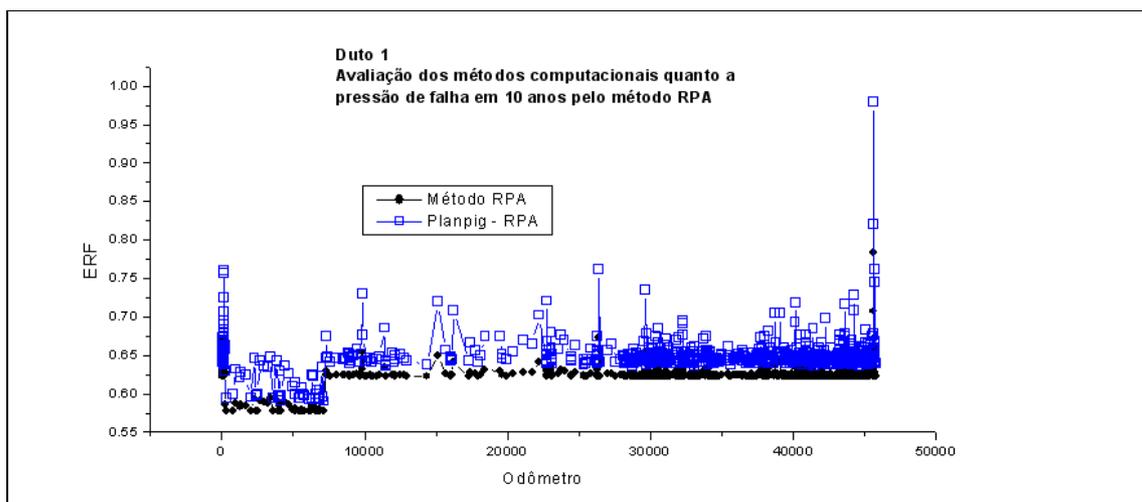


Figura 6.15 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF imediato para o Duto 1

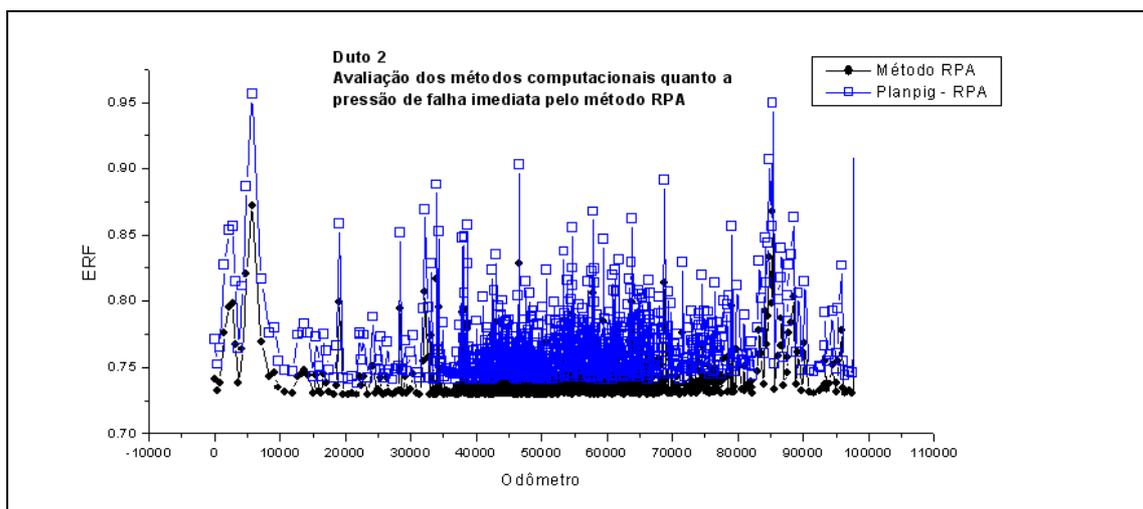


Figura 6.16 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF imediato para o Duto 2

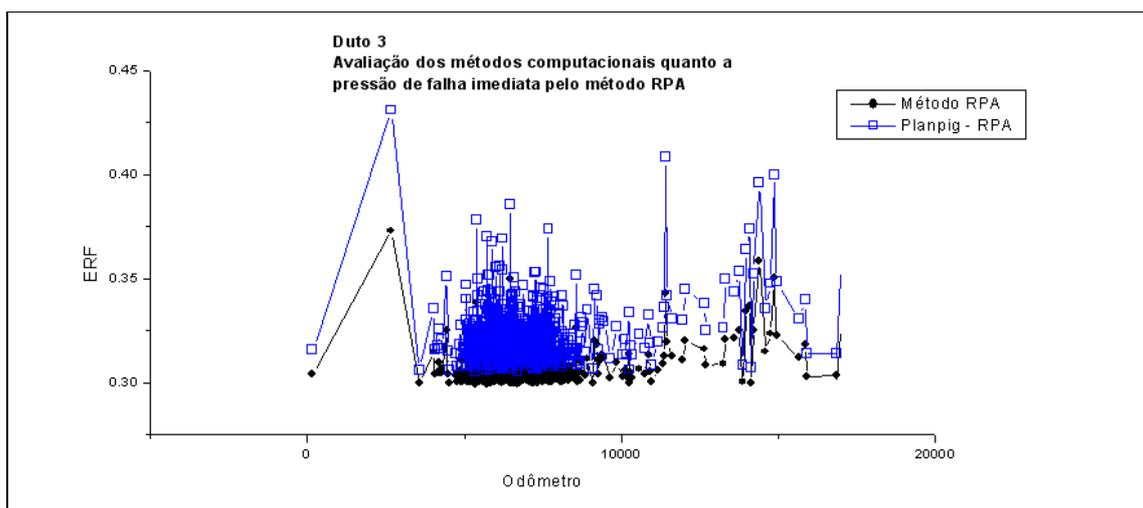


Figura 6.17 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF imediato para o Duto 3

Verifica-se que o cálculo de ERF pelo aplicativo PLANPIG na opção RPA também considera a soma das incertezas características do PIG nas dimensões dos defeitos, conforme recomendado em [22]. A Figura 6.18 apresenta a comparação dos valores de ERF calculados pelo aplicativo PLANPIG na opção RPA com os valores de ERF calculados analiticamente, considerando no cálculo analítico a soma das incertezas do PIG às dimensões dos defeitos.

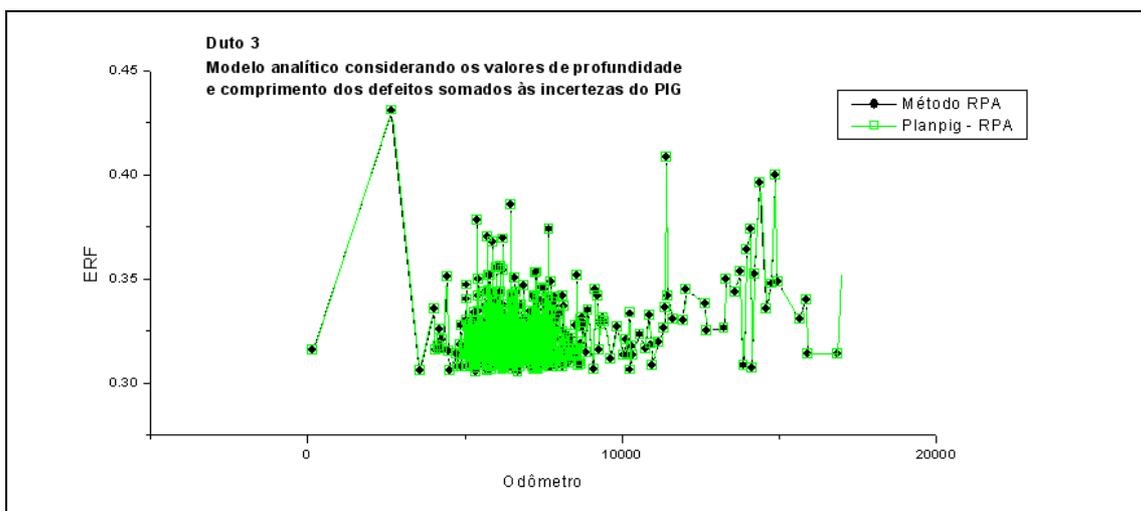


Figura 6.18 - Comparação dos valores de ERF imediato calculados pelo PLANPIG na opção RPA com os valores de ERF calculados analiticamente considerando a soma das incertezas do PIG nas dimensões do defeito para o Duto 3

#### 6.4.4. Avaliação dos aplicativos quanto ao Método RStreng 0,85dL

As Figuras 6.19, 6.20 e 6.21 apresentam a comparação dos valores de ERF obtidos analiticamente pela aplicação do Método RStreng 0,85dL com os valores fornecidos pelos aplicativos CONFIABILIDADE e OPIS.

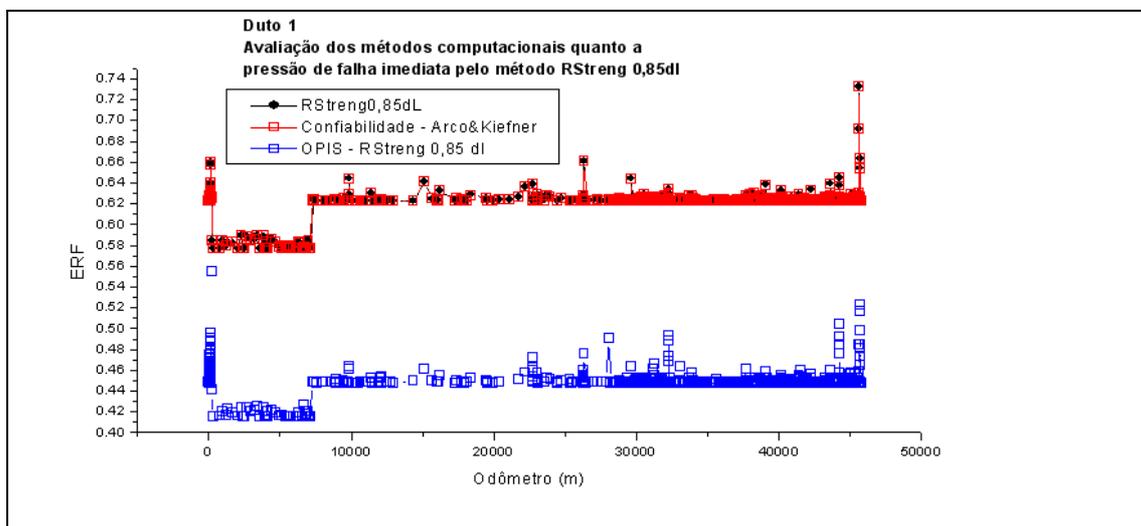


Figura 6.19 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF imediato para o Duto 1

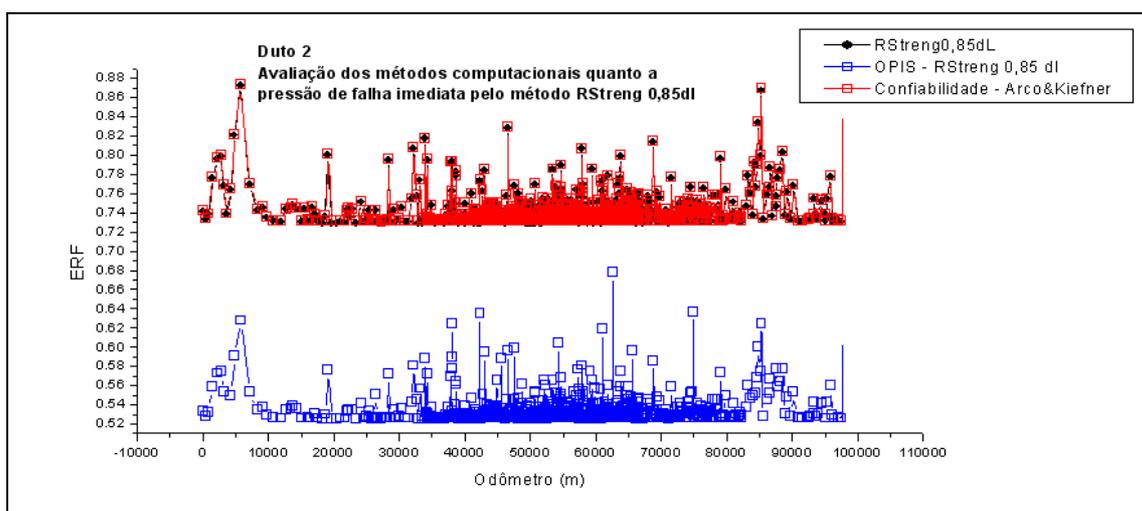


Figura 6.20 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF imediato para o Duto 2

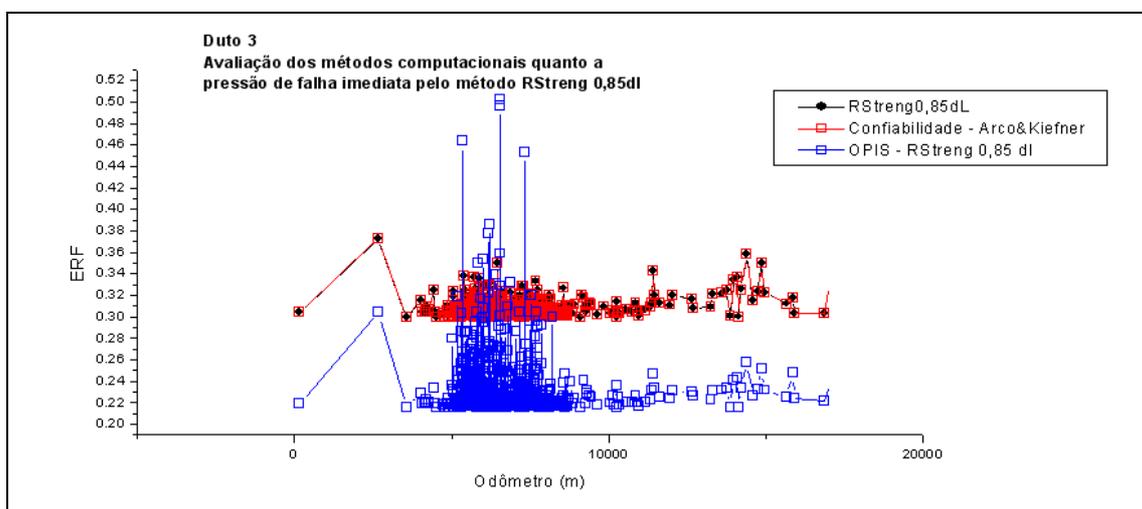


Figura 6.21 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF imediato para o Duto 3

É possível observar que o aplicativo CONFIABILIDADE apresentou resultados satisfatórios no que se refere à pressão de falha imediata na opção Arco&Kiefner (RStreng 0,85dL), se mostrando totalmente aderente ao modelo analítico. Por outro lado, o aplicativo OPIS apresentou resultados de ERF inferiores aos calculados pela aplicação do Método RStreng 0,85dL, da mesma forma como já detectado no Capítulo 5. A partir da avaliação da diferença entre os valores apresentados nas curvas, verificou-se que a diferença observada nos resultados fornecidos pelo programa OPIS é promovida em parte pela não utilização do fator de projeto no cálculo da pressão de falha, apesar do fator de projeto pretendido ser

inserido no campo apropriado para aquisição dos dados. É possível comprovar essa abordagem pela observação das Figuras 6.22 e 6.23, onde os valores de ERF obtidos analiticamente são comparados com os valores de ERF fornecidos pelo aplicativo OPIS corrigidos pelo fator de projeto.

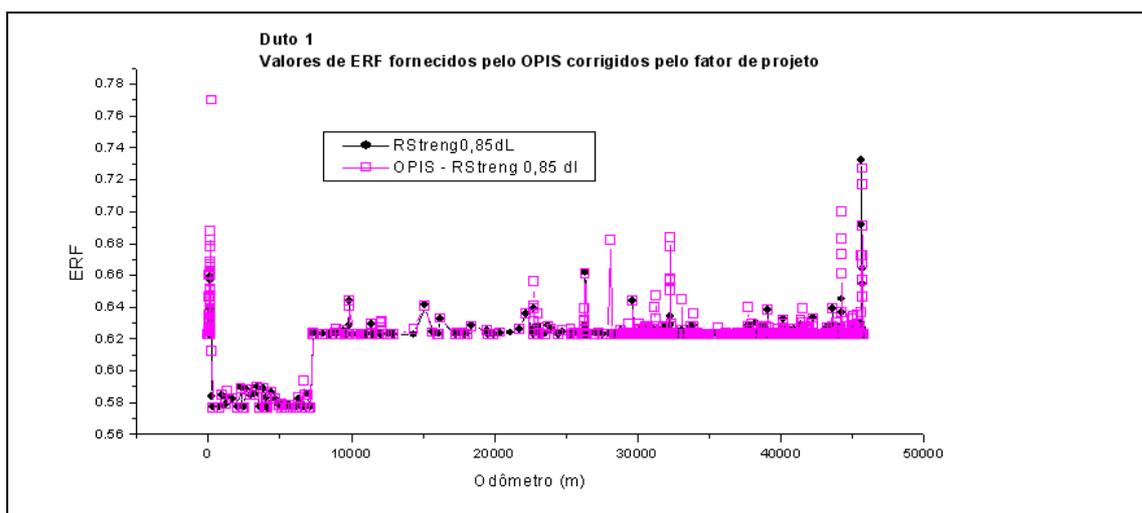


Figura 6.22 - Comparação dos valores de ERF imediato calculados analiticamente pelo Método RStreng 0,85dL com os apresentados pelo OPIS corrigidos pelo fator de projeto para o Duto 1

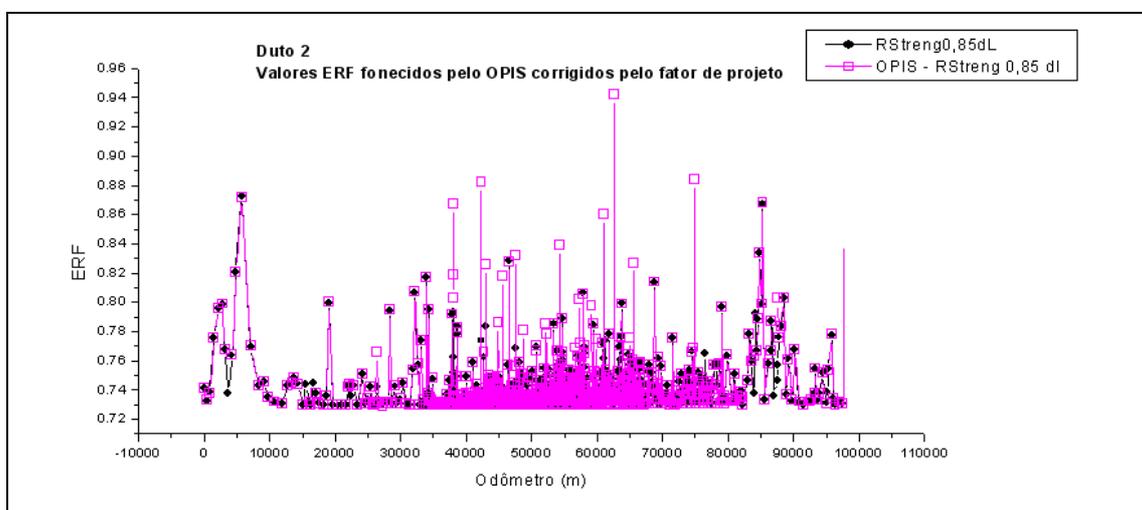


Figura 6.23 - Comparação dos valores de ERF imediato calculados analiticamente pelo Método RStreng 0,85dL com os apresentados pelo OPIS corrigidos pelo fator de projeto para o Duto 2

Verifica-se que mesmo com a correção dos valores de ERF fornecidos pelo OPIS ainda existem regiões e pontos divergentes, entre a curva analítica e a do programa. Esse

comportamento pode ser atribuído ao fato de que o aplicativo OPIS considera em seu algoritmo a interação dos defeitos de forma incondicional, não permitindo a opção de avaliação isolada, diferentemente da abordagem que está sendo conduzida neste trabalho. Essa avaliação é suportada pela observação da Figura 6.24, onde é possível verificar a amplificação dos valores de ERF fornecidos pelo OPIS na região central do Duto 3, onde se nota a existência de diversos defeitos agrupados.

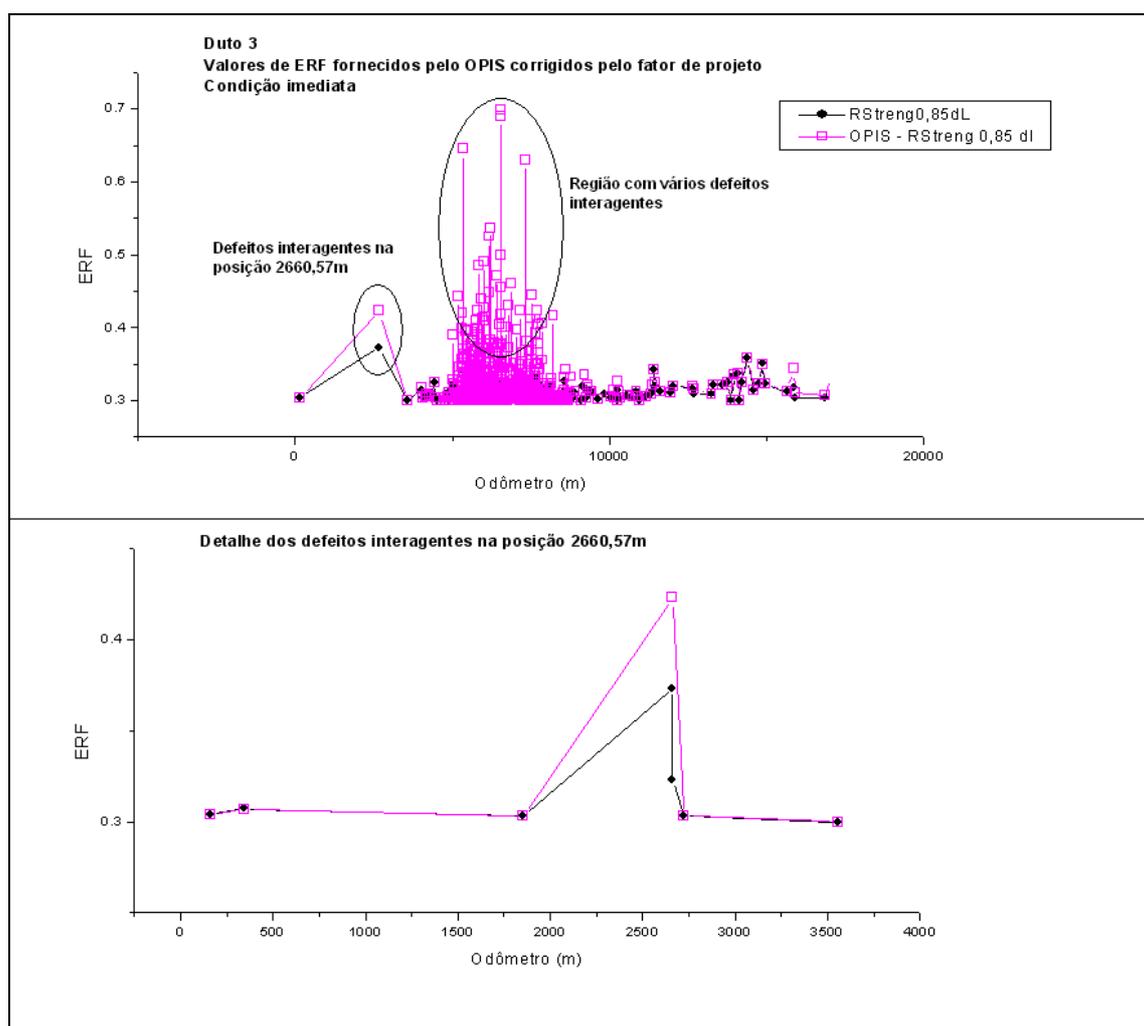


Figura 6.24 - Comparação dos valores de ERF imediato calculados analiticamente pelo Método RStreng 0,85dL com os apresentados pelo OPIS corrigidos pelo fator de projeto para o Duto 3

Ainda na avaliação da Figura 6.24, observa-se que na posição 2660,57m do Duto 3 coexistem dois defeitos defasados de 30 minutos conforme apresentado na Tabela 6.4. De

fato, na aplicação do Método RStreng sobre os dois defeitos de forma isolada obtém-se valores de ERF equivalentes a 0,373 e 0,323 respectivamente. Por outro lado, considerando a combinação dos defeitos apresentados na Tabela 6.4 obtém-se analiticamente um resultado de ERF equivalente a 0,423, evidenciando uma diferença de 13% sobre o maior valor de ERF obtido isoladamente. Essa análise leva à comprovação da grande relevância da premissa de interação de defeitos na avaliação da integridade de dutos com defeitos de corrosão. Além disso, a verificação feita para os defeitos situados na posição 2660,57m do Duto 3 leva à confirmação da aderência do programa OPIS ao modelo de interação de defeitos proposto e da aderência ao modelo analítico, considerando a necessidade de aplicar o fator de projeto sobre a pressão de falha fornecida pelo programa.

Distância (m)	Tipo de Defeito	Orientação (h:m)	Perda de Espessura (mm/mm)	Comprimento L do Defeito de Corrosão (mm)	Largura W do Defeito de Corrosão (mm)
2660.57	CI	7:00	0.66	88	34
2660.57	CI	7:30	0.80	34	35

Tabela 6.4 – Descrição dos defeitos interagentes na posição 2660,57m do Duto 3

## 6.5.

### Avaliação da pressão de falha em um momento futuro

O cálculo da pressão de falha imediata é uma característica de extrema relevância em um aplicativo desenvolvido para avaliar a integridade de dutos de aço, pois possibilita avaliar a resistência mecânica do duto no momento da inspeção. No entanto, para determinar o intervalo de tempo para re-inspeção, se faz necessário conhecer a evolução dos defeitos, garantindo assim que o duto se manterá dentro de condições seguras até ser inspecionado novamente. O cálculo da pressão de falha em um momento futuro assume um papel de grande importância nesse contexto, pois permite determinar o reparo de defeitos levando em consideração a manutenção da integridade do duto até a próxima inspeção.

Para a comparação da pressão de falha em um momento futuro, foi realizado o mesmo estudo comparativo apresentado anteriormente para avaliação da pressão de falha imediata, sendo realizada a comparação dos valores de ERF calculados por cada aplicativo com os valores obtidos analiticamente pela aplicação dos métodos semi-empíricos pertinentes. No cálculo da pressão de falha de forma analítica foram considerados defeitos

de dimensões equivalentes às dimensões inspecionadas, somadas ao produto do intervalo de tempo avaliado pelo valor da taxa de corrosão definida estatisticamente para cada duto, conforme apresentado na Tabela 6.2. Os resultados da comparação podem ser verificados nos gráficos a seguir, e estão organizados em função dos métodos semi-empíricos nos quais os aplicativos estão baseados.

### 6.5.1. Avaliação dos aplicativos quanto a ASME B31G

As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 apresentam os resultados da comparação dos valores analíticos de ERF futuro com os valores apresentados pelos aplicativos PLANPIG e CONFIABILIDADE.

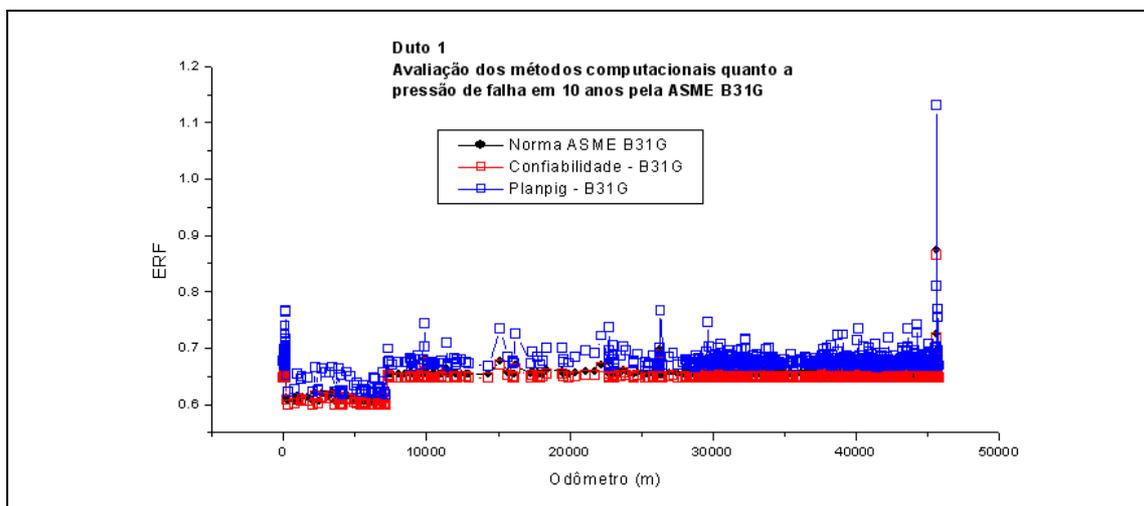


Figura 6.25 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF futuro para o Duto 1

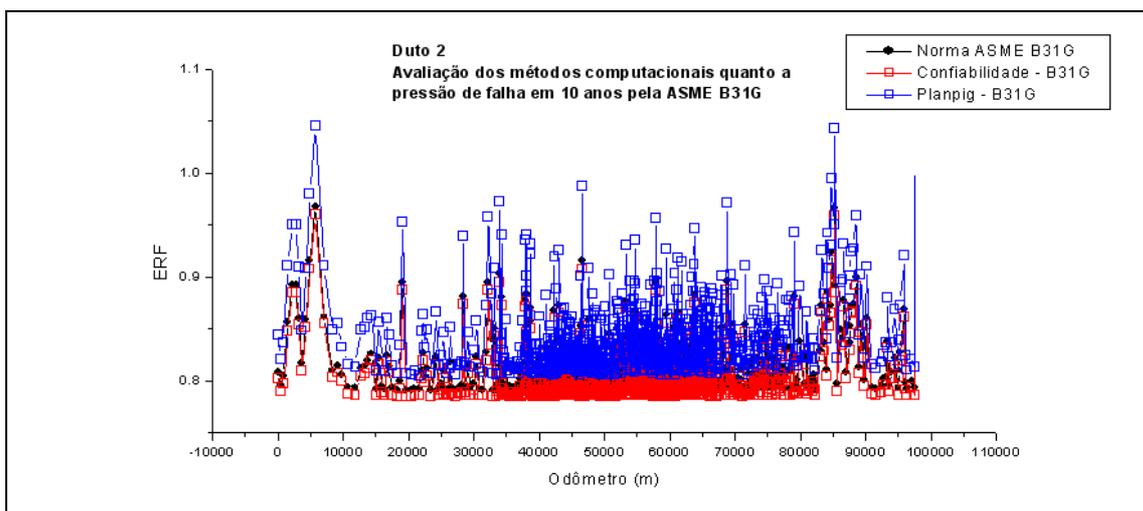


Figura 6.26 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF futuro para o Duto 2

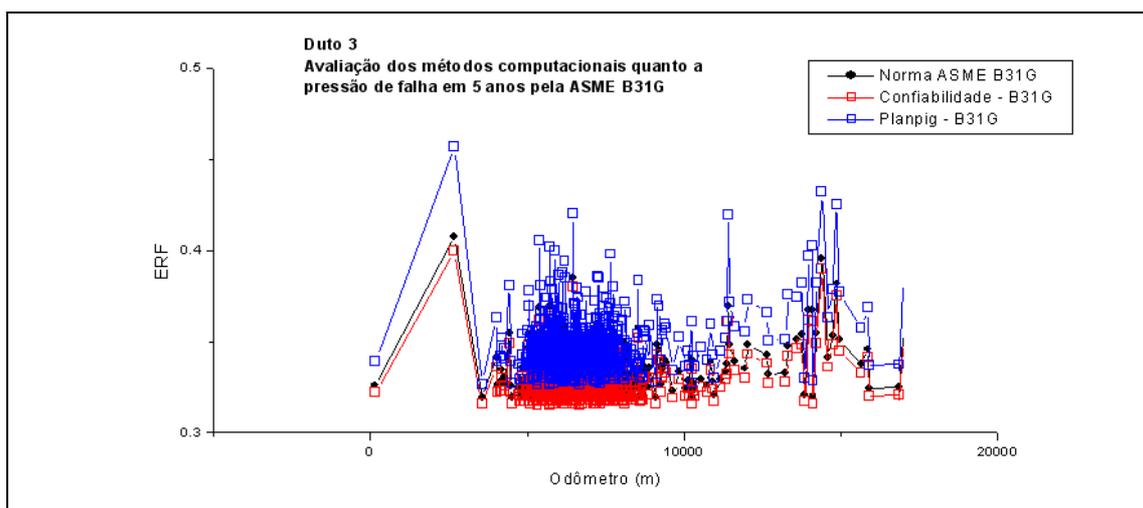


Figura 6.27 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da ASME B31G no cálculo do ERF futuro para o Duto 3

Da mesma forma como observado na avaliação da pressão de falha imediata, é possível verificar que o aplicativo CONFIABILIDADE apresenta um desvio de aproximadamente 1% nos valores de ERF sobre os resultados calculados analiticamente na opção ASME B31G. Essa divergência se mantém dentro dos limites estabelecidos no Capítulo 5 quanto ao critério de aderência, e pode ser atribuída a um erro sistêmico apresentado pelo programa na opção B31G.

Na avaliação futura, o PLANPIG apresenta valores de ERF superiores aos calculados analiticamente, da mesma forma como observada na avaliação imediata, pois considera no seu algoritmo a majoração dos valores de profundidade e comprimento dos defeitos pelos valores das incertezas associadas à medição realizada pelo PIG Instrumentado. A Figura 6.28 ilustra a comparação dos resultados de ERF em 10 anos para o Duto 2, entre os valores apresentados pelo PLANPIG e os calculados analiticamente com a correção do tamanho dos defeitos pela incerteza do PIG.

É possível confirmar que o PLANPIG considera nas opções **Integridade Imediata** e **Integridade Futura** a premissa de correção do tamanho dos defeitos pelas incertezas associadas ao PIG Instrumentado, considerando dessa forma uma abordagem extrema quanto à severidade dos defeitos.

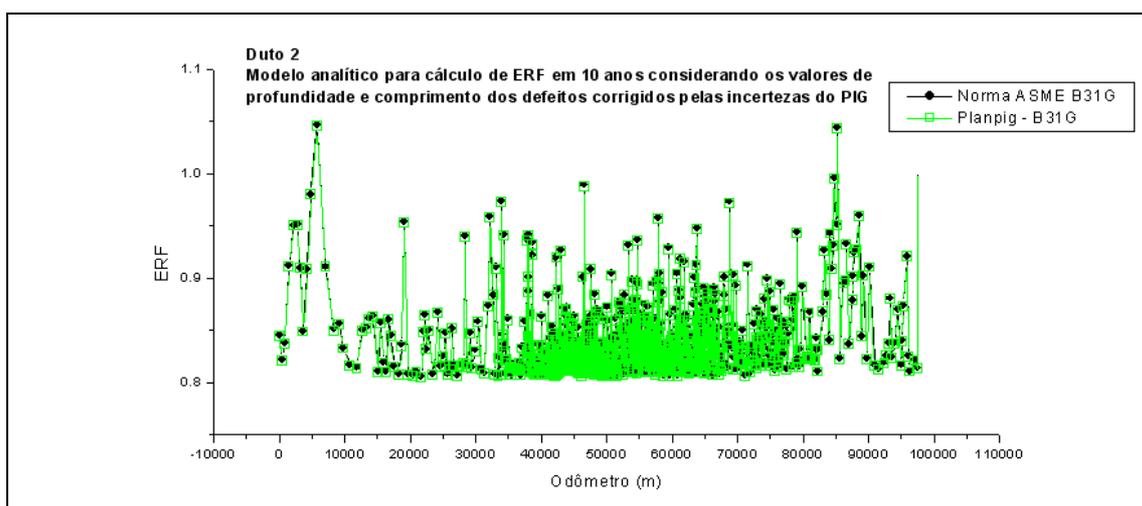


Figura 6.28 - Comparação dos valores de ERF para o Duto 2 em 10 anos calculados pelo PLANPIG na opção ASME B31G com os valores de ERF calculados analiticamente considerando a soma das incertezas do PIG nas dimensões do defeito

### 6.5.2. Avaliação dos aplicativos quanto a DNV RP F101

As Figuras 6.29, 6.30 e 6.31 apresentam os resultados da comparação dos valores de ERF futuro, calculados analiticamente, com os valores apresentados pelo aplicativo CONFIABILIDADE, que é o único dentre os avaliados que considera o algoritmo da DNV RP F101.

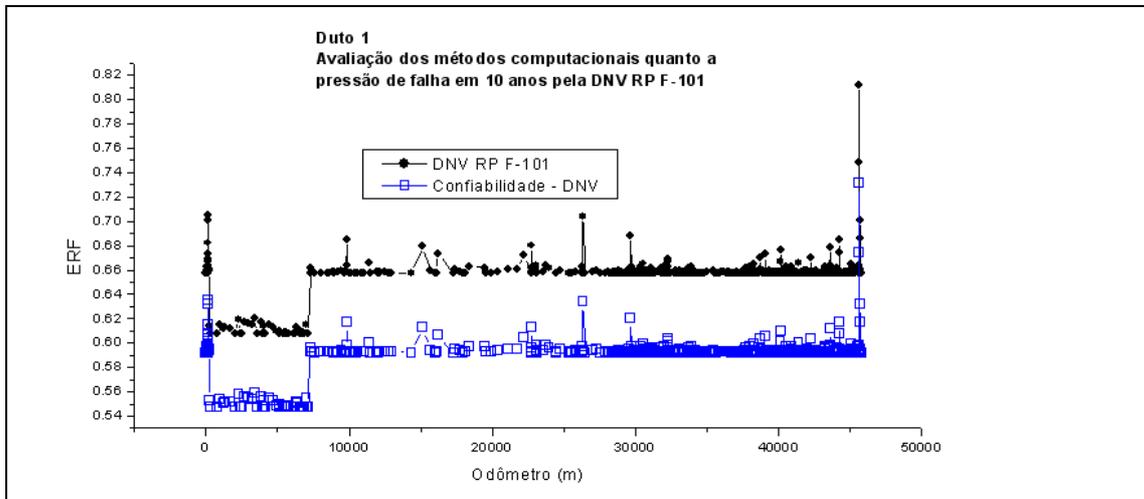


Figura 6.29 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF futuro para o Duto 1

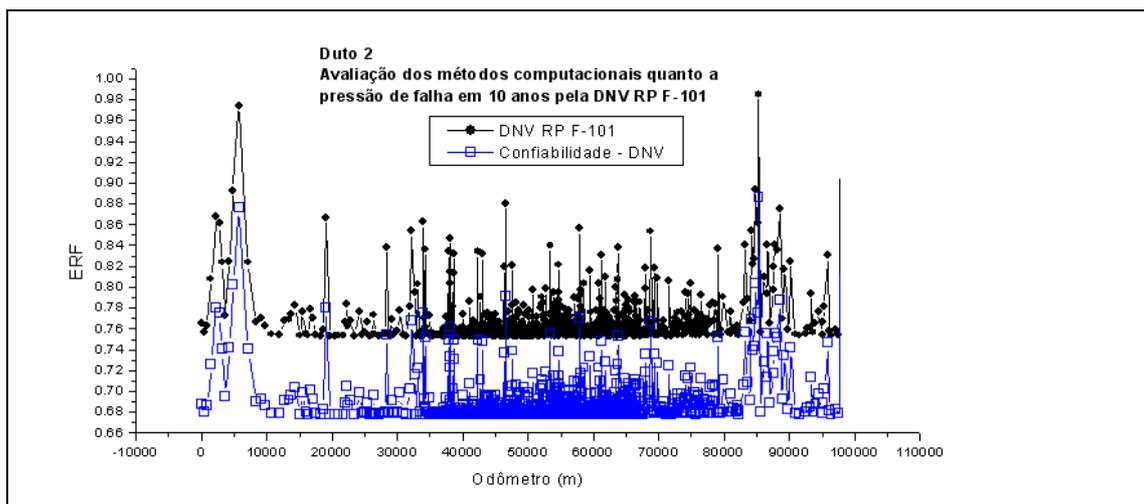


Figura 6.30 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF futuro para o Duto 2

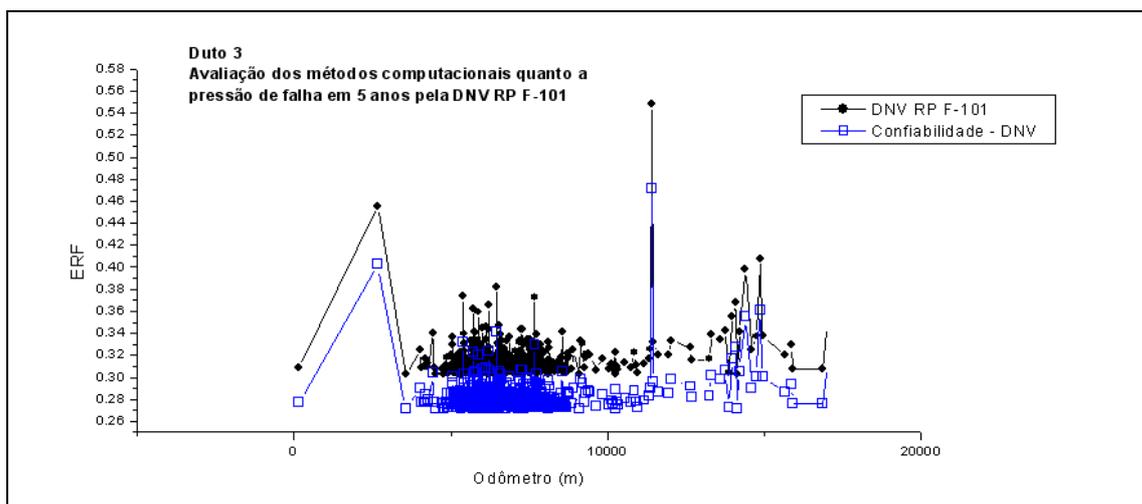


Figura 6.31 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo da DNV RP F101 no cálculo do ERF futuro para o Duto 3

Da mesma forma como observado no cálculo da pressão de falha imediata, o programa CONFIABILIDADE não considera em seu algoritmo o fator “*modelling factor*” no cálculo do ERF futuro, sendo necessário considerar esse fator na inserção do fator de projeto pretendido na tela de aquisição de dados do programa. A Figura 6.31 ilustra para o Duto 2 a comparação dos valores de ERF em 10 anos entre os resultados analíticos e os obtidos pelo CONFIABILIDADE com o fator de projeto corrigido pelo “*modelling factor*”.

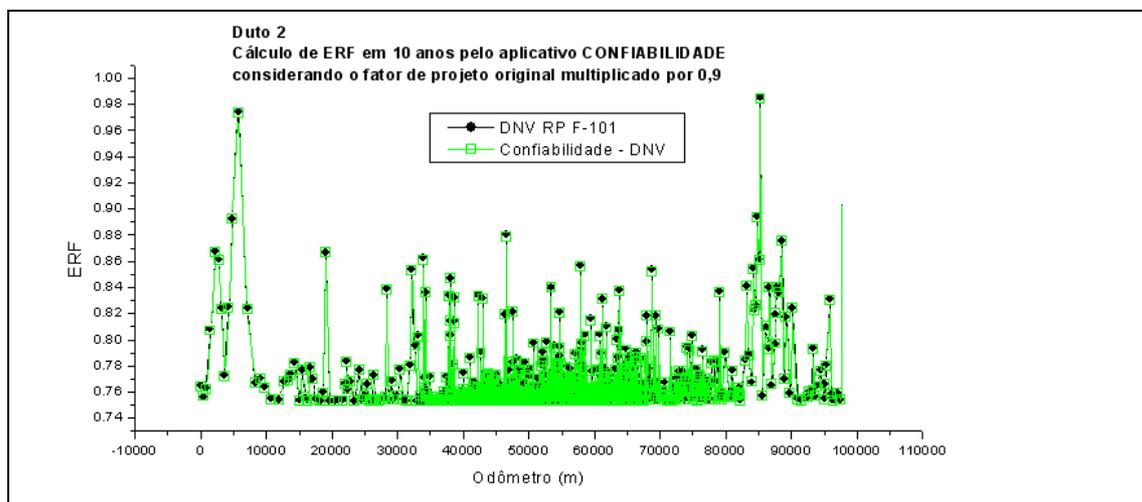


Figura 6.32 - ERF em 10 anos para o Duto 2 calculado pelo aplicativo CONFIABILIDADE com a multiplicação do fator de projeto original por 0,9

### 6.5.3. Avaliação dos aplicativos quanto ao Método RPA

As Figuras 6.33, 6.34 e 6.35 apresentam os resultados da comparação dos valores de ERF na condição futura, calculados analiticamente, com os valores apresentados pelo aplicativo PLANPIG na opção RPA.

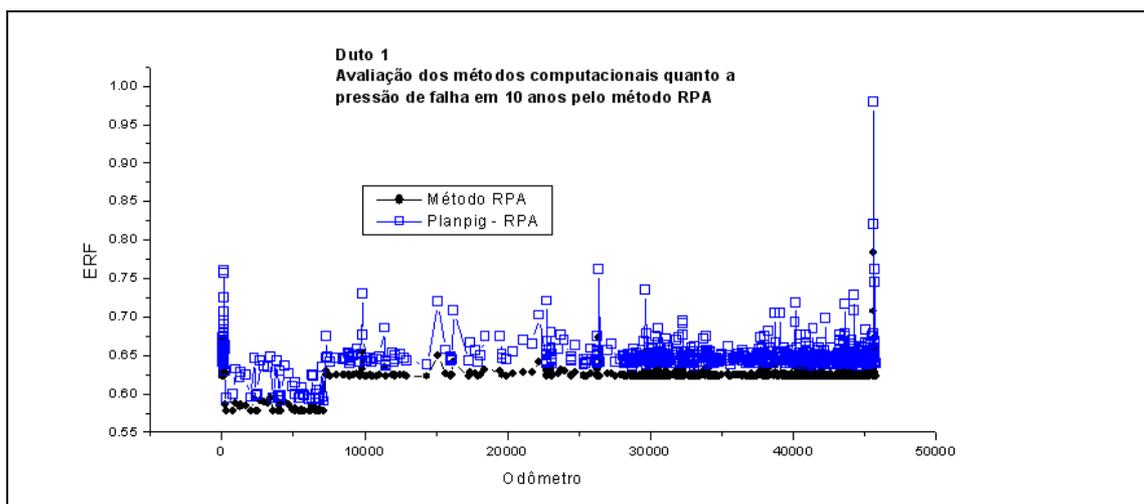


Figura 6.33 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF futuro para o Duto 1

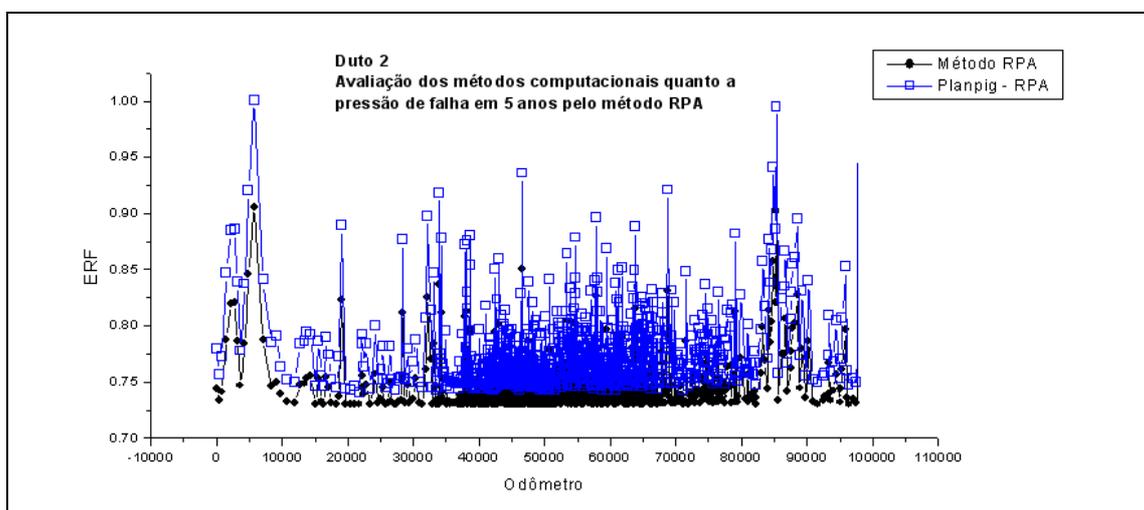


Figura 6.34 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF futuro para o Duto 2

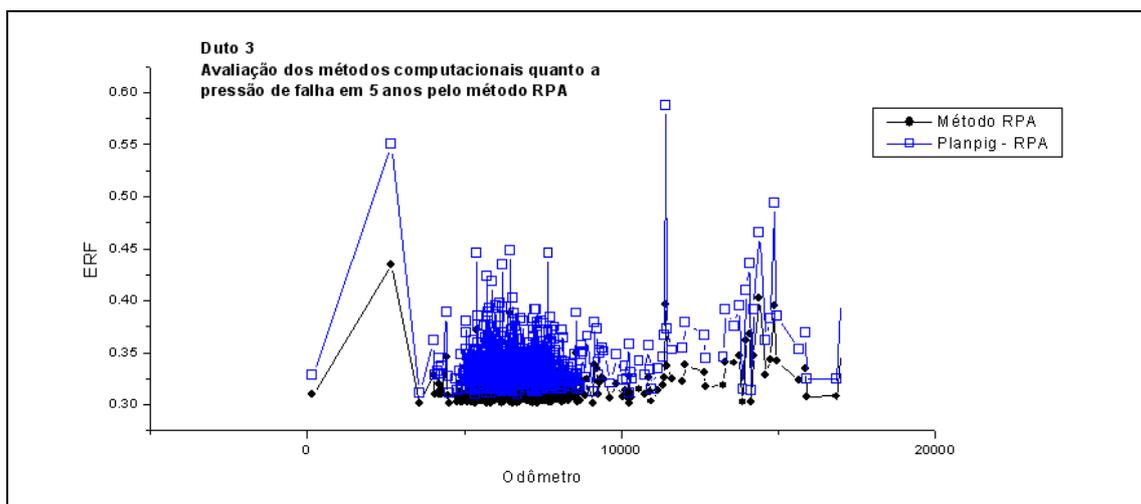


Figura 6.35 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RPA no cálculo do ERF futuro para o Duto 3

Mais uma vez é possível confirmar a premissa de correção do tamanho dos defeitos, levando em conta as incertezas do PIG, adotada pelo aplicativo PLANPIG. A Figura 6.36 ilustra a comparação dos valores de ERF obtidos pelo PLANPIG para o Duto 2 em 10 anos com os resultados analíticos sobre os defeitos corrigidos.

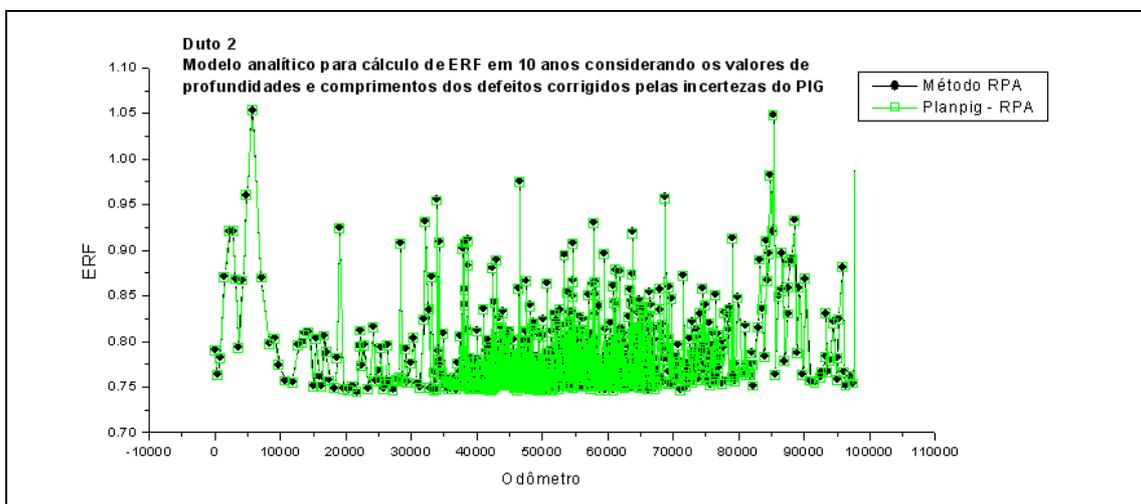


Figura 6.36 - Comparação dos valores de ERF em 10 anos calculados pelo PLANPIG na opção RPA com os valores de ERF calculados analiticamente considerando a soma das incertezas do PIG nas dimensões do defeito para o Duto 2

#### 6.5.4. Avaliação dos aplicativos quanto ao Método RStreng 0,85dL

As Figuras 6.37, 6.38 e 6.39 apresentam os resultados da comparação dos valores de ERF futuro calculados analiticamente com os valores apresentados pelos aplicativos OPIS e CONFIABILIDADE na opção Arco&Kiefner.

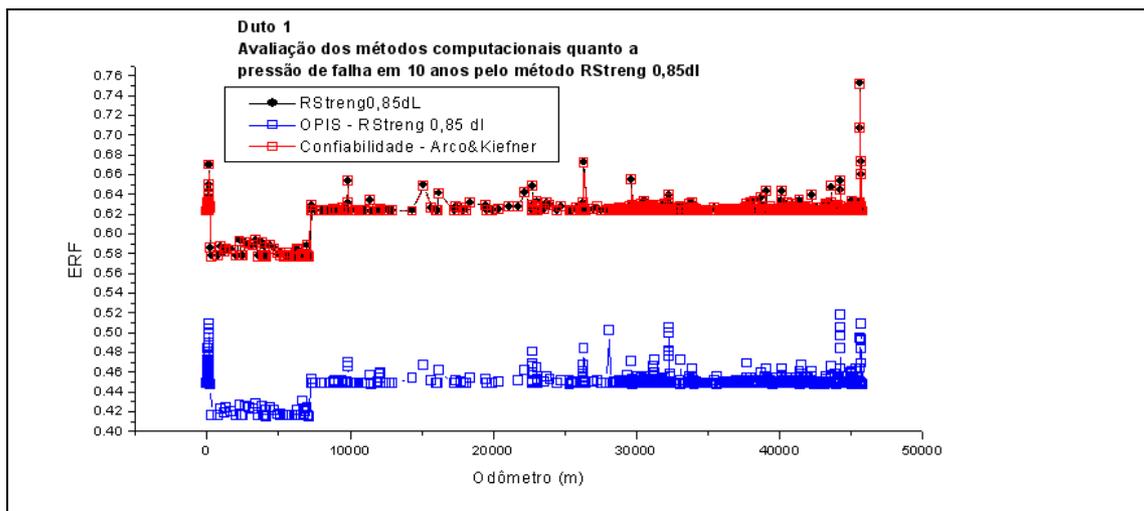


Figura 6.37 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF futuro para o Duto 1

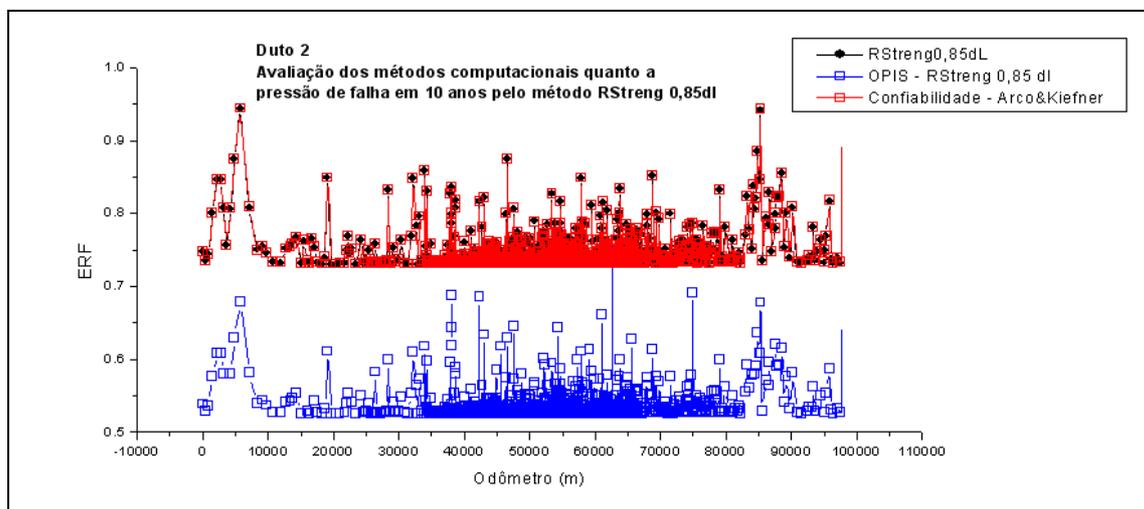


Figura 6.38 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF futuro para o Duto 2

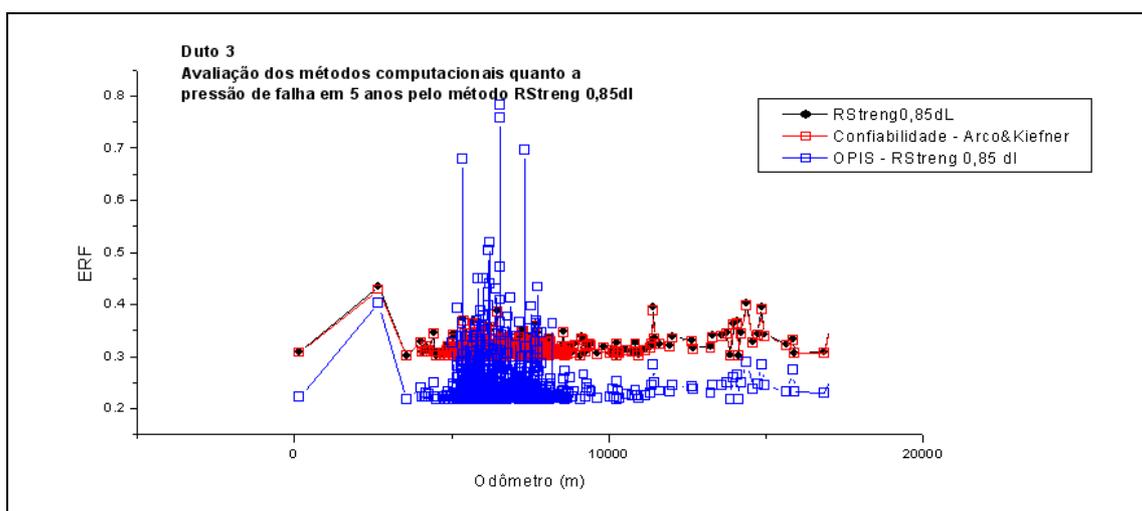


Figura 6.39 - Avaliação dos aplicativos que utilizam o algoritmo do Método RStreng 0,85dL no cálculo do ERF futuro para o Duto 3

Verifica-se que o aplicativo CONFIABILIDADE apresenta resultados satisfatórios no cálculo da pressão de falha futura na opção Arco&Kiefner, demonstrando a aderência ao modelo analítico também na condição futura.

Da mesma forma como avaliado na condição imediata, os resultados de ERF obtidos pelo OPIS apresentam valores inferiores comparados com os obtidos analiticamente. A Figura 6.40 ilustra a comparação dos valores de ERF obtidos analiticamente, com os fornecidos pelo OPIS corrigidos em função do fator de projeto.

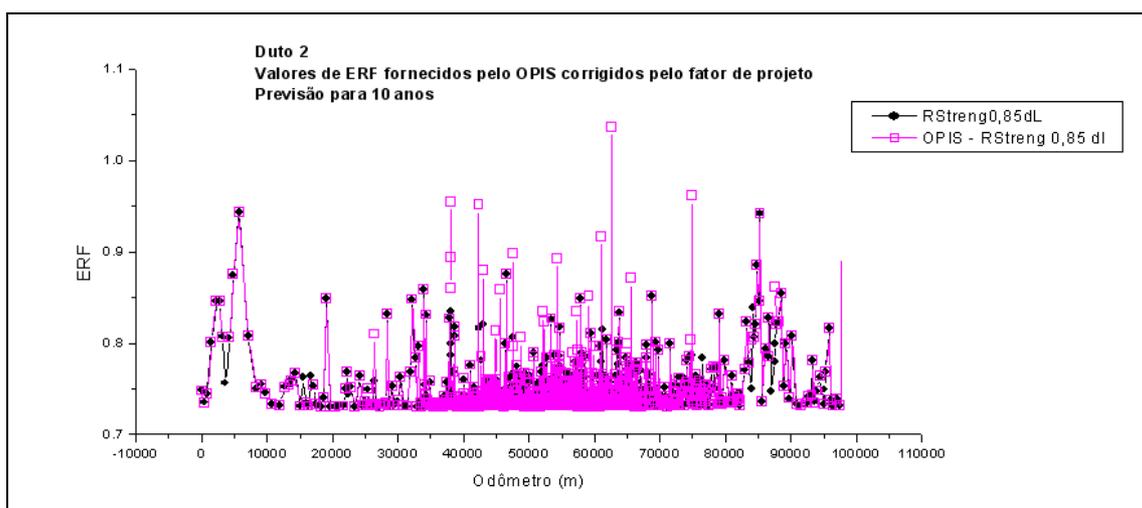


Figura 6.40 - Comparação dos valores de ERF em 10 anos calculados analiticamente pelo Método RStreng 0,85dL com os apresentados pelo OPIS corrigidos pelo fator de projeto para o Duto 2

Pela observação da Figura 6.40, é possível verificar, também para a condição futura, a aderência do programa ao modelo analítico no cálculo de ERF de defeitos isolados, considerando a correção da pressão de falha fornecida em função fator de projeto dado. Verifica-se também que o modelo de interação de defeitos se faz presente nas regiões contendo defeitos agrupados, tornando evidente a importância da adoção dessa premissa na avaliação da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão.

## **6.6. Avaliação da probabilidade de falha imediata**

No gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão, o cálculo da pressão de falha por métodos semi-empíricos não encerra a avaliação da integridade, mas é uma etapa importante que demanda qualidade nos dados a serem utilizados. Conforme apresentado no Capítulo 3, a pressão de falha é uma variável aleatória, que pode ser observada segundo uma distribuição Normal. Dessa forma, é preciso conhecer a influência que as incertezas inerentes aos dados utilizados nas análises exercem sobre a qualidade dos resultados. Face às atuais exigências sobre a confiabilidade dos equipamentos na indústria do petróleo, a determinação somente do fator de resistência remanescente para dutos com defeitos não satisfaz os desejos das operadoras, mas é preciso também conhecer o quão confiável é o duto. É nesse contexto que o cálculo da probabilidade de falha imediata se insere.

Esta etapa do estudo se propõe a avaliar os resultados de probabilidade de falha calculados pelos aplicativos avaliados neste trabalho para o momento da inspeção. De forma a estabelecer valores de referência para comparação, calculou-se analiticamente os valores de probabilidade de falha seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 3. Os gráficos 6.41, 6.42 e 6.43 apresentam os resultados de probabilidade de falha (POF) calculados analiticamente para os três dutos objetos do estudo.

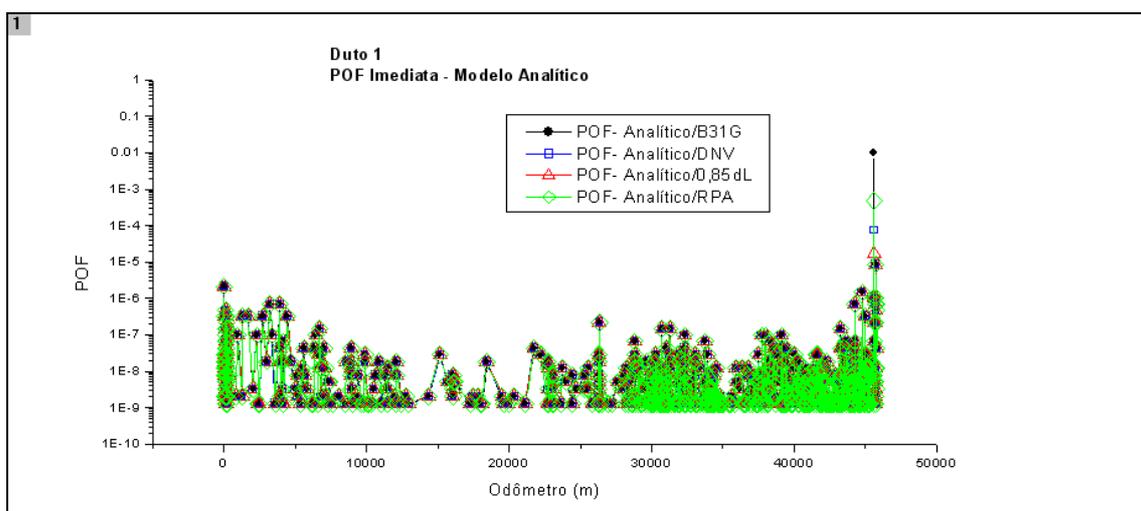


Figura 6.41 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para o Duto 1 no momento da inspeção

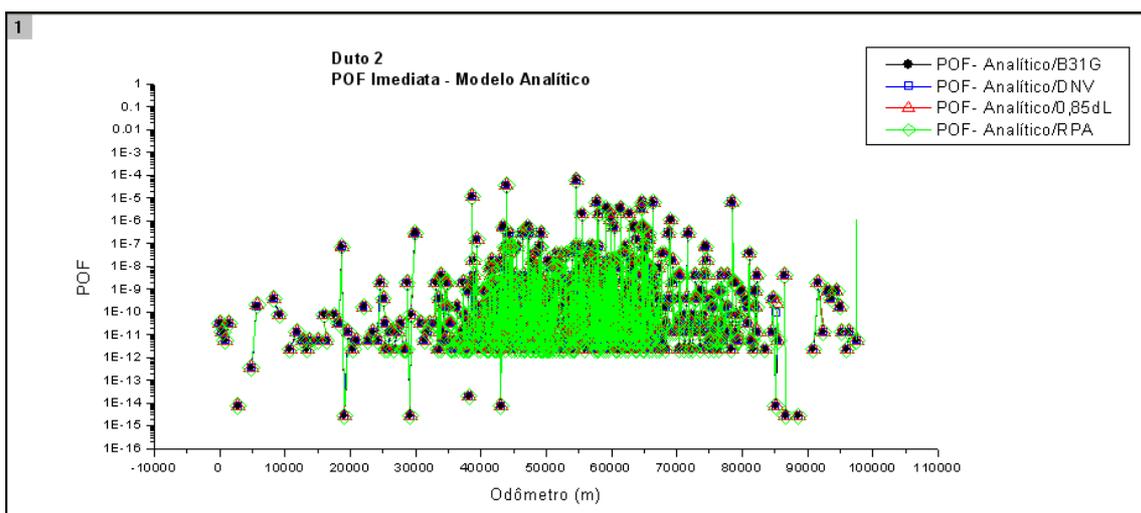


Figura 6.42 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para o Duto 2 no momento da inspeção

A partir da observação das Figuras 6.41 e 6.42, é possível verificar que os resultados de probabilidade de falha, calculados para os defeitos com maiores valores de ERF, apresentam visíveis diferenças em função dos diferentes modelos semi-empíricos de cálculo da pressão de falha. Essa observação é suportada pelo fato de que a probabilidade de falha é uma função da probabilidade de vazamento e da probabilidade de ruptura. Uma vez que a probabilidade de ruptura é uma função da expectância e da variância da pressão de falha, a utilização de diferentes metodologias no cálculo da pressão de falha será

refletida em diferentes valores de probabilidade de ruptura. Esse fato pode ser observado nos defeitos onde o modo de falha por ruptura se apresenta dominante.

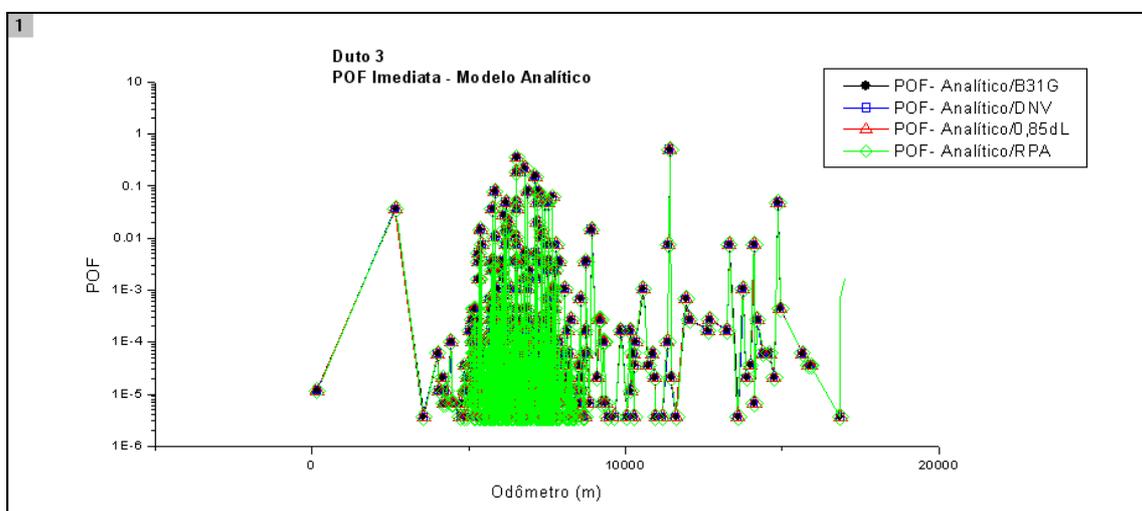


Figura 6.43 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para o Duto 3 no momento da inspeção

É possível verificar pela observação da Figura 6.43 que mesmo nos defeitos mais severos não se verificam diferenças visíveis nos resultados de probabilidade de falha calculados para o Duto 3. Esta observação é justificada por que a MAOP do Duto 3 foi consideravelmente reduzida em função da severidade dos defeitos, promovendo assim uma situação onde o modo de falha por vazamento se apresenta como dominante.

### 6.6.1. Avaliação segundo a ASME B31G

Seguindo a mesma abordagem adotada na avaliação da pressão de falha, as análises de POF serão apresentadas em função do método semi-empírico no qual os aplicativos foram desenvolvidos. Dessa forma, as Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 apresentam a comparação dos resultados de probabilidade de falha dos aplicativos que usam o algoritmo da ASME B31G.

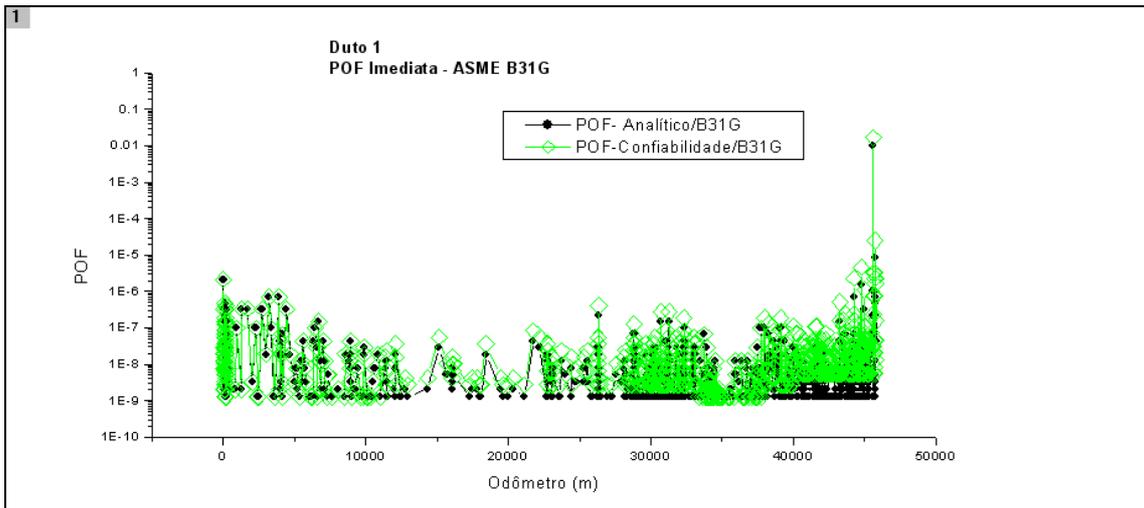


Figura 6.44 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 1 conf. a B31G

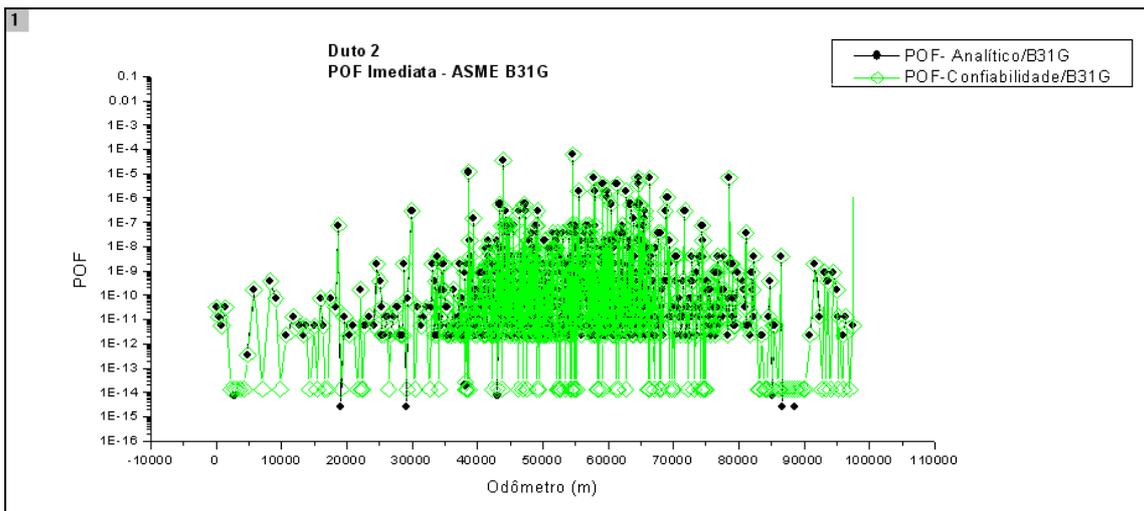


Figura 6.45 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 2 conf. a B31G

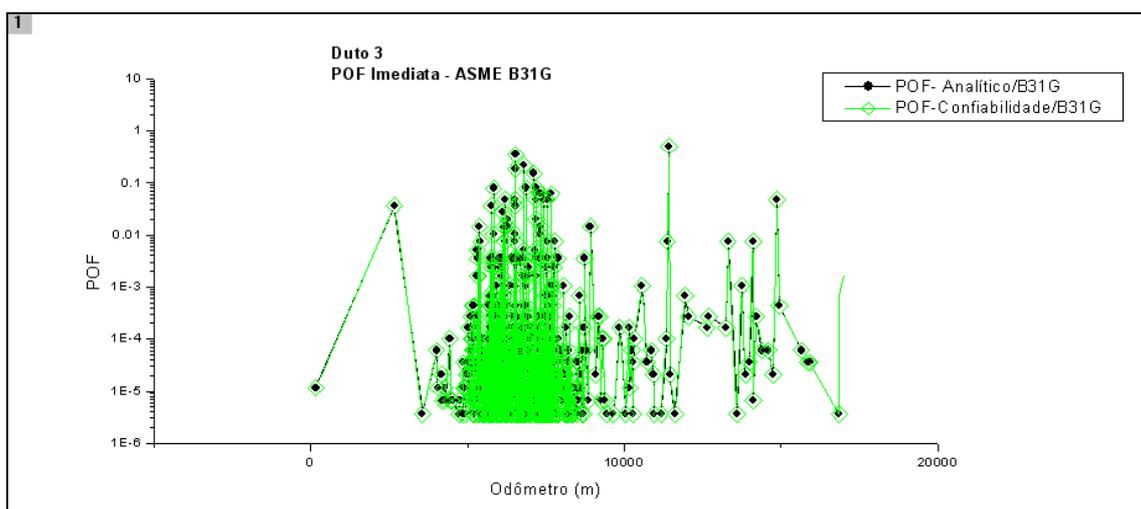


Figura 6.46 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 3 conf. a B31G

A partir da observação das Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 é possível verificar que o aplicativo CONFIABILIDADE apresentou resultados de POF compatíveis com os calculados analiticamente na condição imediata, o que confirma a aderência do programa ao modelo analítico.

O programa CONFIABILIDADE apresentou uma limitação na aquisição da incerteza da ferramenta de medição no comprimento dos defeitos, sendo realizada pelo aplicativo em função de um coeficiente de variação único para todos os defeitos. A consideração de um coeficiente de variação médio, obtido pela razão do desvio padrão do PIG pela média dos valores dos comprimentos dos defeitos medidos, não se mostrou adequada. Uma vez que os valores dos comprimentos dos defeitos inspecionados se apresentaram dentro de uma extensa faixa de valores, a definição de um coeficiente de variação médio para todos os defeitos se mostrou extremamente prejudicial para os defeitos com maiores comprimentos. Por outro lado, a opção de utilizar um coeficiente de variação de 0,001 para todos os defeitos se mostrou mais adequada, no entanto, favorecendo uma pequena divergência nos valores de POF para os defeitos onde o modo de falha por ruptura se apresenta de forma dominante, como é o caso do Duto 1, ilustrado na Figura 6.44.

Pela observação da Figura 6.44, é possível verificar que as particularidades inerentes a cada aplicativo se mostram visíveis em dutos onde o modo de falha por ruptura se apresenta como dominante. Com o objetivo de melhor conhecer as particularidades de cada

programa, desenvolveu-se um estudo da sensibilidade dos diferentes programas à severidade dos defeitos, para cada duto em particular, no cálculo da probabilidade de falha. O estudo foi definido em função da aplicação dos programas CONFIABILIDADE e OPIS sobre defeitos com 50mm de comprimento, tendo a sua profundidade ( $d/t$ ) variando de 0,01 a 0,80. Neste capítulo apenas os resultados obtidos para o Duto 2 serão apresentados. O estudo completo pode ser verificado no Anexo B.

A Figura 6.47 ilustra os resultados da aplicação dos programas que adotam a metodologia da ASME B31G no cálculo da probabilidade de falha imediata do Duto 2.

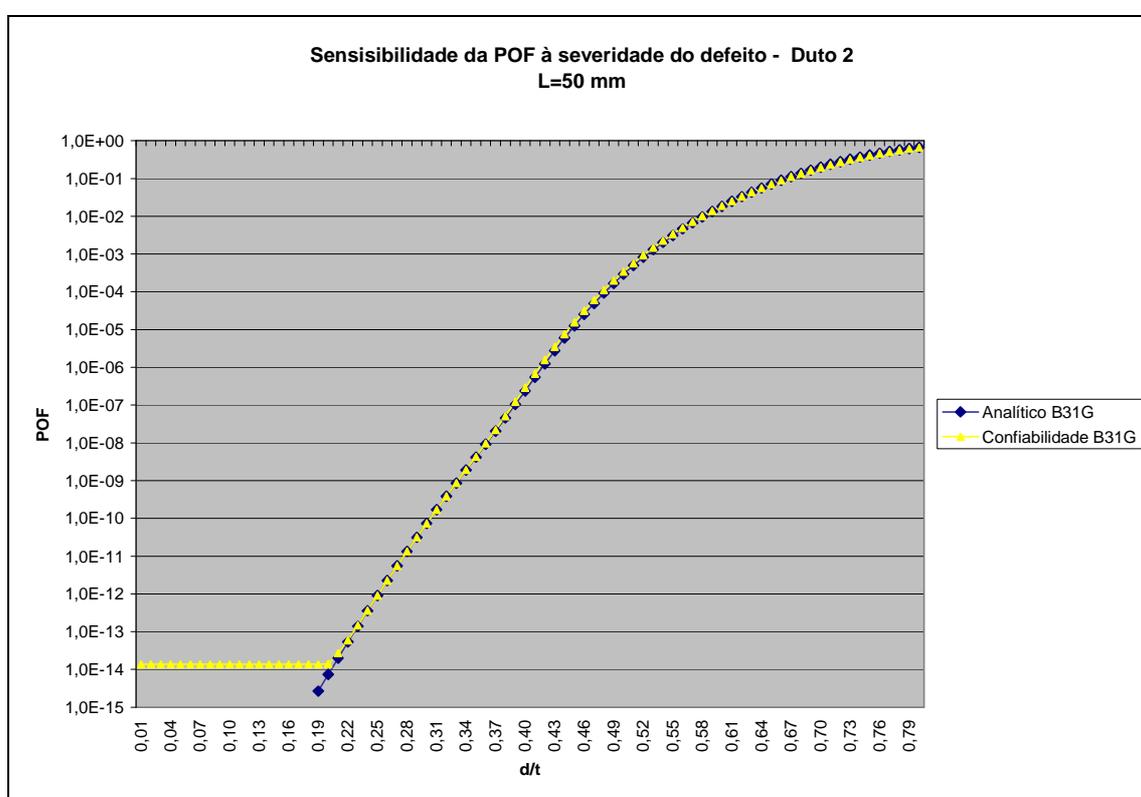


Figura 6.47 - Sensibilidade da POF imediata em função da severidade dos defeitos para o Duto 2 na opção B31G

O aplicativo CONFIABILIDADE se mostrou aderente ao modelo analítico em todos os pontos, uma vez que o programa considera a mesma premissa adotada pelo modelo analítico no cálculo da probabilidade de falha, que consiste na observação dos modos de falha por ruptura e por vazamento como fenômenos independentes, sendo a probabilidade de falha calculada a partir da combinação das probabilidades de vazamento e ruptura. A

aquisição da incerteza na mediação do comprimento dos defeitos pelo aplicativo CONFIABILIDADE não foi problema no estudo de sensibilidade apresentado no Anexo B, já que o comprimento adotado por todos os defeitos foi considerado o mesmo, permitindo a utilização do coeficiente de variação adequado.

### 6.6.2. Avaliação segundo a DNV RP F101

As Figuras 6.48, 6.49 e 6.50 apresentam a comparação dos valores de POF fornecidos pelo aplicativo CONFIABILIDADE com os calculados analiticamente. Os valores de POF fornecidos pelo aplicativo CONFIABILIDADE foram calculados considerando a utilização do “*modelling factor*” de 0,9.

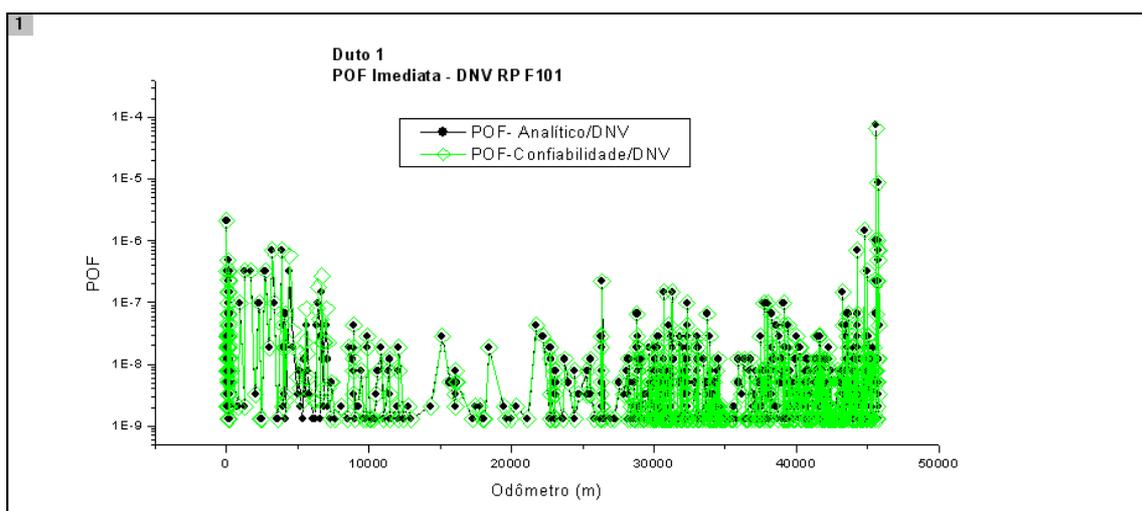


Figura 6.48 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 1 na opção DNV

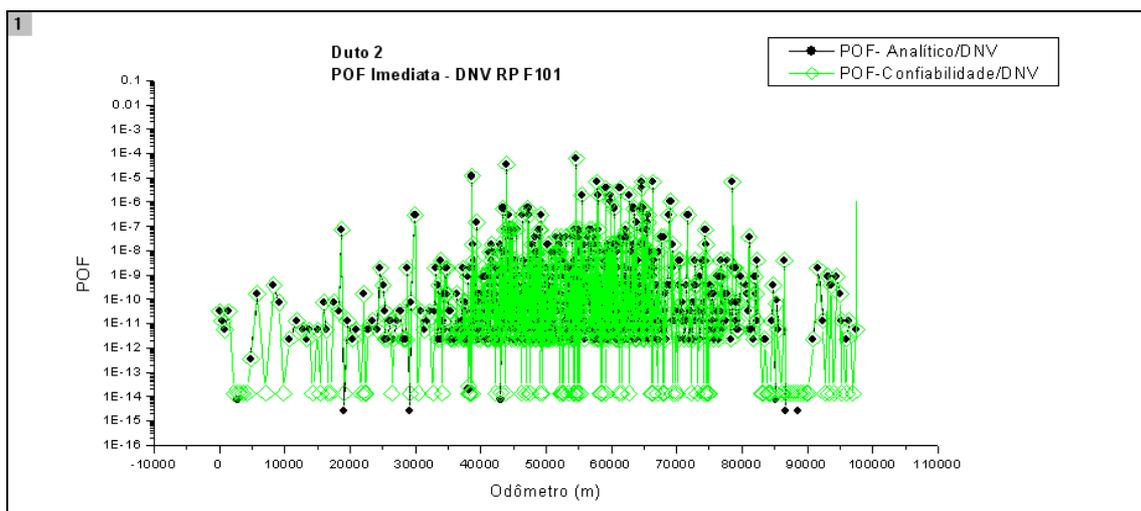


Figura 6.49 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 2 na opção DNV

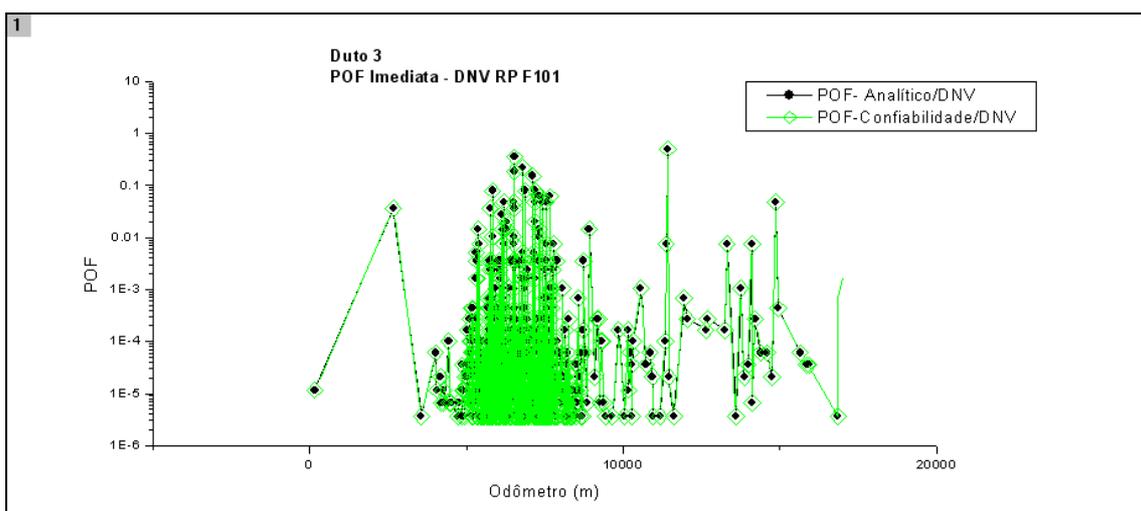


Figura 6.50 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 3 na opção DNV

Como pode ser observado, o programa CONFIABILIDADE apresentou resultados de POF congruentes com os calculados pelo modelo analítico, na maior parte dos pontos, o que comprova a aderência do aplicativo ao modelo analítico na opção DNV RP F101. Mais uma vez destaca-se a forma de aquisição da variância da medida de comprimento adotada pelo aplicativo CONFIABILIDADE, levando à observação de pontos divergentes nos defeitos críticos do Duto 2, conforme observado na Figura 6.49.

A Figura 6.51 ilustra a avaliação da sensibilidade do programa CONFIABILIDADE e do modelo analítico no cálculo de POF em função da severidade de um defeito com 50mm de comprimento, considerando todas as condições operacionais e de projeto pertinentes ao Duto 2.

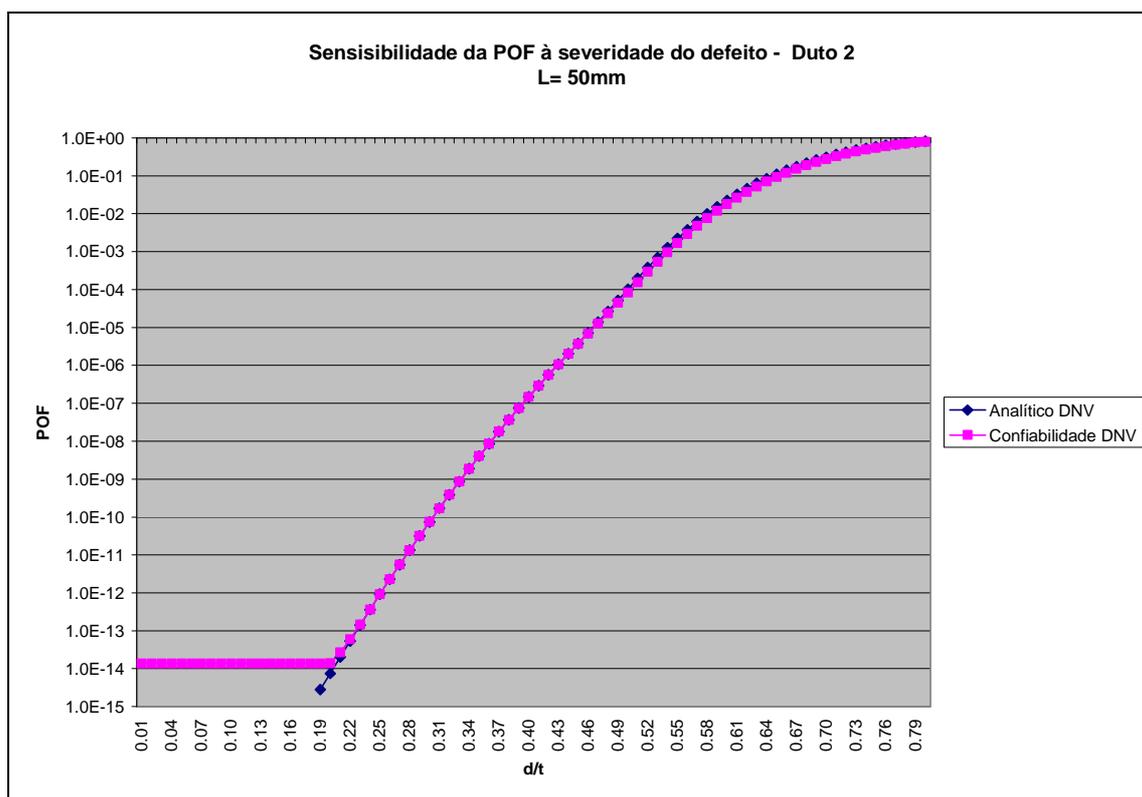


Figura 6.51 - Sensibilidade da POF imediata em função da severidade dos defeitos para o Duto 2 na opção DNV RP F101

### 6.6.3. Avaliação segundo o Método RPA

Quanto ao método RPA, somente o PLANPIG possibilita essa opção. Considerando que o PLANPIG não foi avaliado quanto aos resultados de probabilidade de falha, as Figuras 6.52, 6.53, 6.54 e 6.55 ilustram os resultados de POF calculados analiticamente.

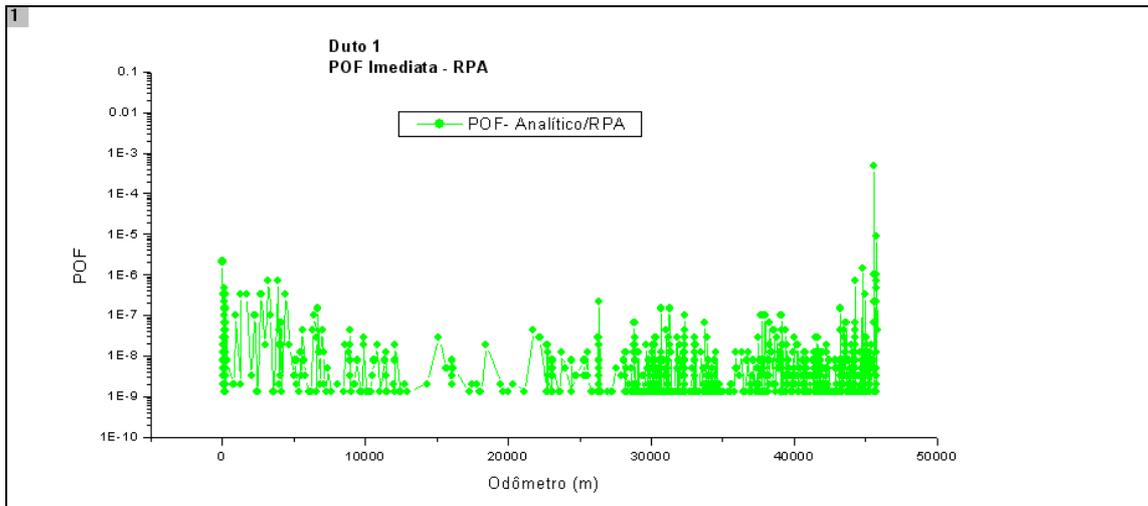


Figura 6.52 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 1 na opção RPA

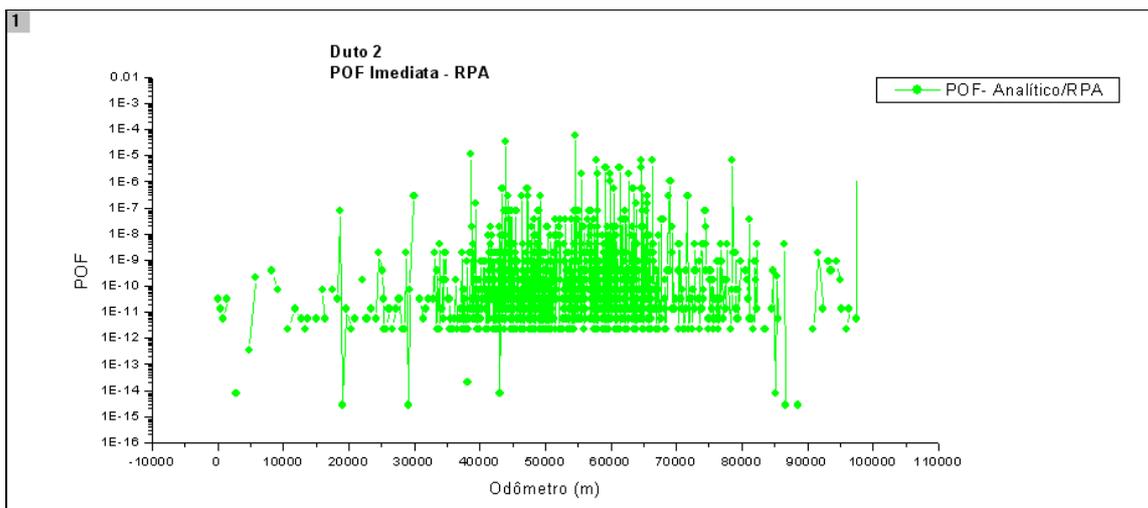


Figura 6.53 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 2 na opção RPA

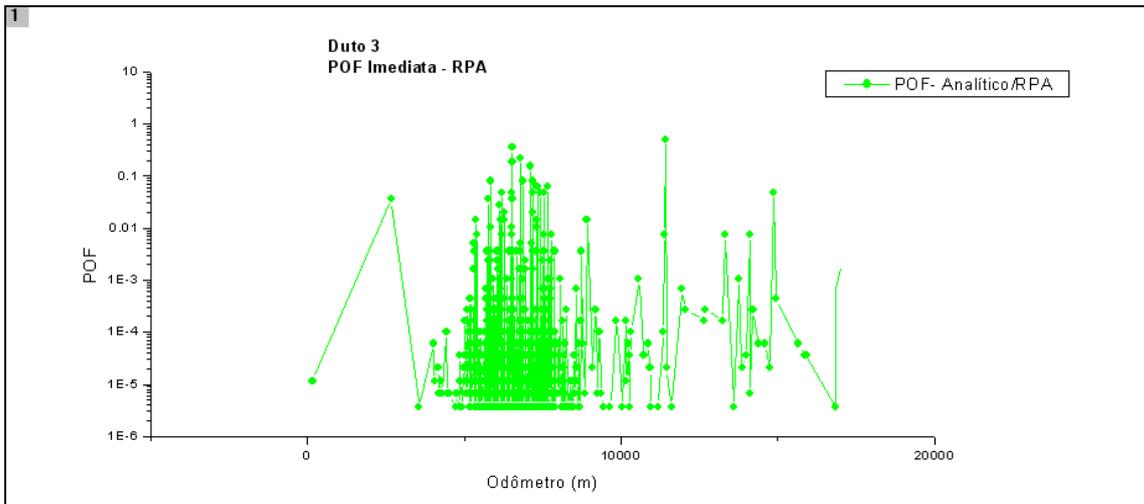


Figura 6.54 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 3 na opção RPA

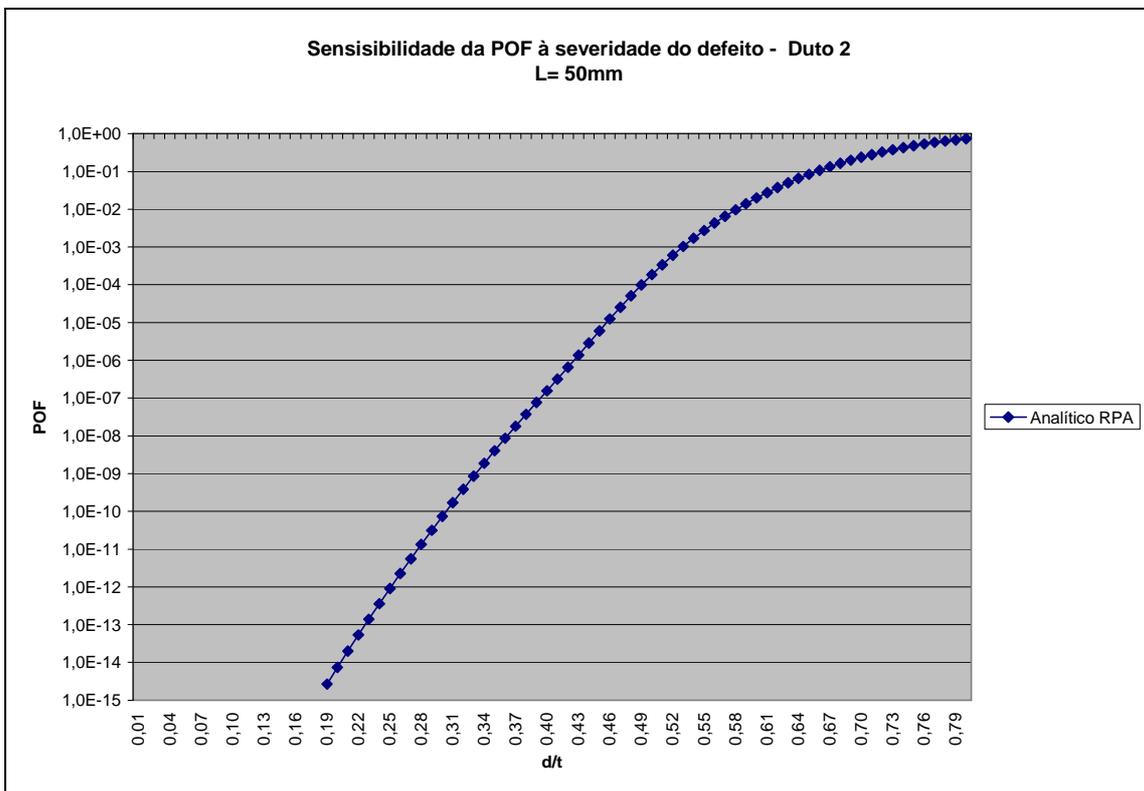


Figura 6.55 - Sensibilidade da POF imediata em função da severidade dos defeitos para o Duto 2 na opção RPA

#### 6.6.4. Avaliação segundo o Método RStreng 0,85dL

Na avaliação da POF com base no método RStreng 0,85dL, foi possível comparar os aplicativos OPIS e CONFIABILIDADE. No entanto, a operação de exportação de dados do aplicativo OPIS atribui valor zero no arquivo gerado a todos os resultados com valor inferior a  $1,0 \times 10^{-5}$ . Esse aspecto do programa traz um inconveniente na manipulação dos dados de probabilidade de falha, os quais se apresentam freqüentemente em ordens de grandezas inferiores a  $1,0 \times 10^{-5}$ . As Figuras 6.56, 6.57 e 6.58 ilustram a comparação dos resultados de POF calculados por cada aplicativo na opção RStreng 0,85dL.

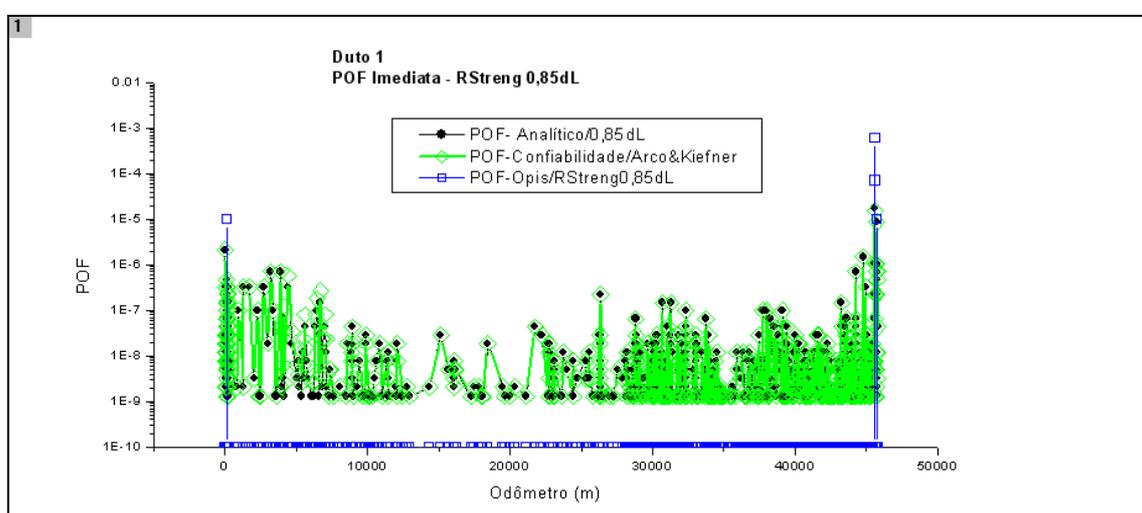


Figura 6.56 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 1 conf. 0,85dL

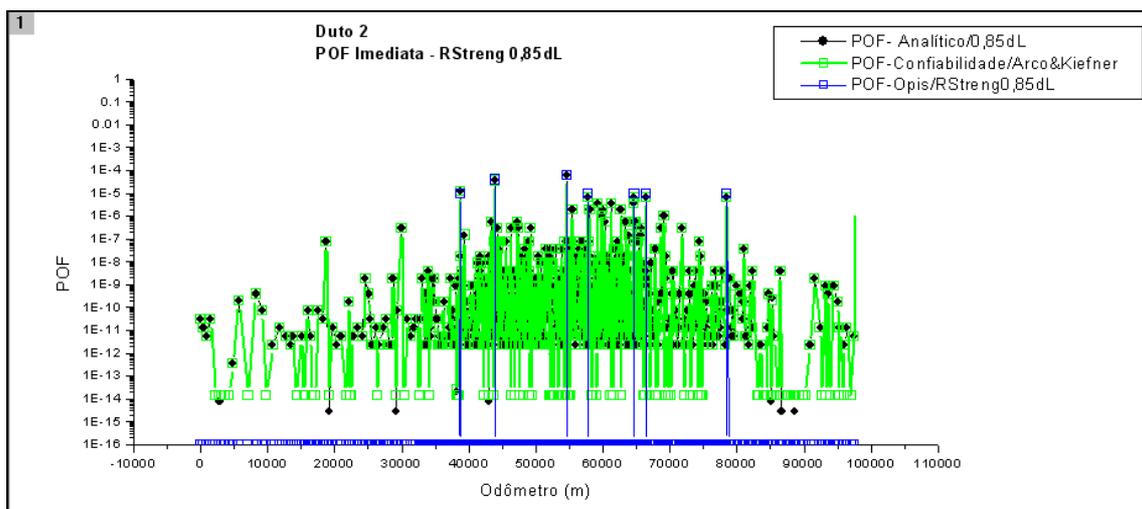


Figura 6.57 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 2 conf. 0,85dL

É possível verificar nas Figuras 6.56 e 6.57 que os resultados apresentados pelo aplicativo CONFIABILIDADE se apresentam plenamente alinhados aos valores calculados analiticamente. A observação dos resultados apresentados pelo OPIS ficou comprometida nas figuras acima em função da maioria dos valores de POF estarem abaixo de  $1,0 \times 10^{-5}$ . Na Figura 6.58, é possível verificar que os valores de POF calculados pelo aplicativo OPIS, que se apresentam acima de  $1,0 \times 10^{-5}$ , estão congruentes com os resultados analíticos e do aplicativo CONFIABILIDADE.

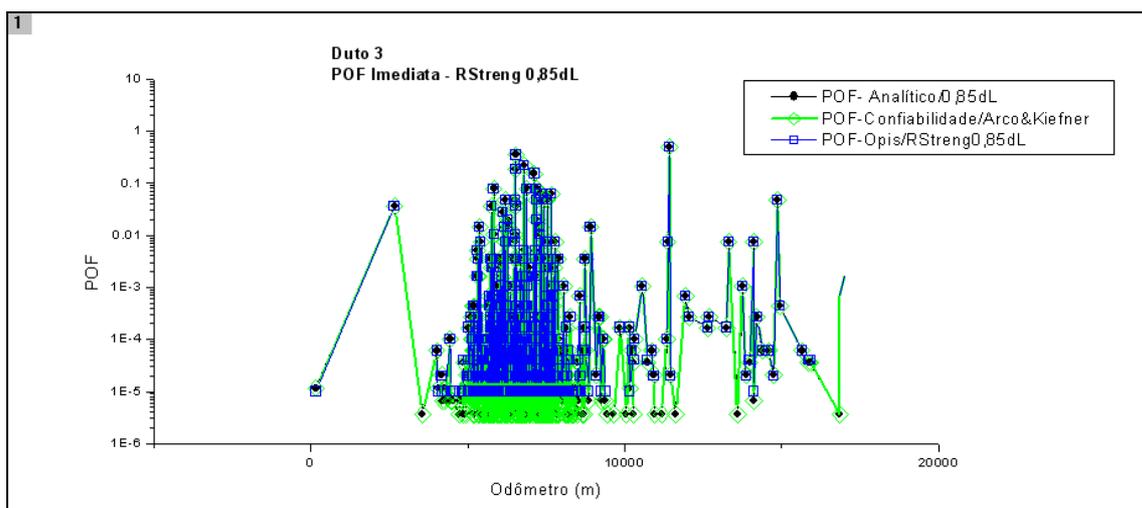


Figura 6.58 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 3 conf. 0,85dL

Apesar da dificuldade na manipulação dos resultados de POF calculados pelo OPIS, em uma avaliação visual do gráfico disponível na interface do programa, é possível verificar que o aplicativo apresenta grande aderência à metodologia analítica, e conseqüentemente com o aplicativo CONFIABILIDADE. A Figura 6.59 apresenta a visualização gráfica disponível na interface do programa. Em seguida, é possível observar na Figura 6.60 a avaliação do mesmo duto pelo método analítico onde se verifica a semelhança na forma gráfica com a Figura 6.59.

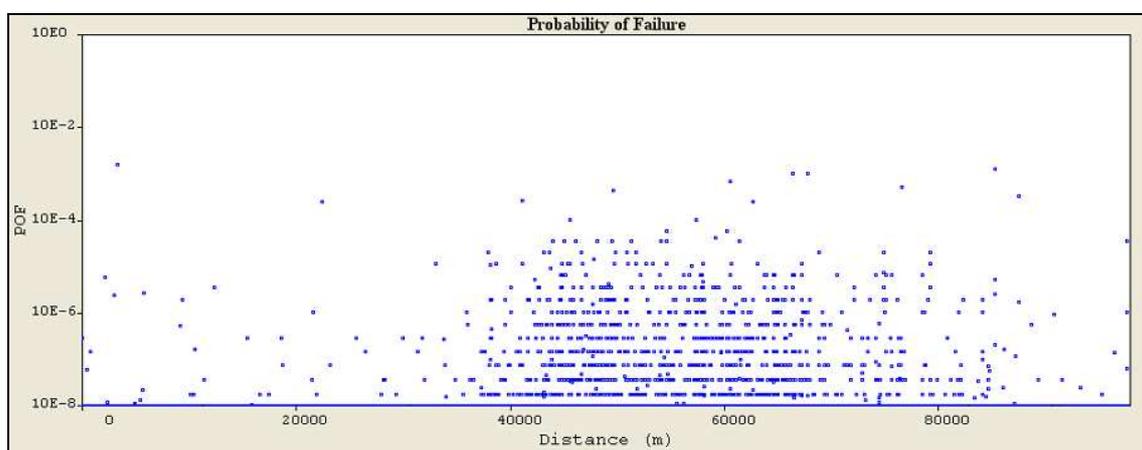


Figura 6.59 - Interface do programa OPIS ilustrando a distribuição dos valores de POF para o Duto2

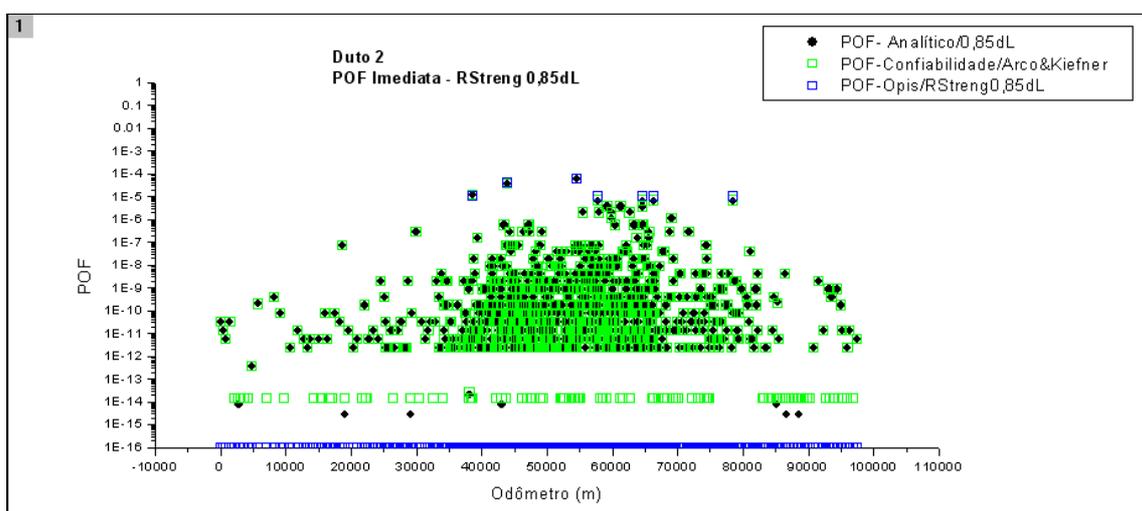


Figura 6.60 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha imediata para o Duto 2 conf. 0,85dL, na forma de pontos dispersos

Em seguida, é possível verificar na Figura 6.61 a sensibilidade dos programas CONFIABILIDADE e OPIS no cálculo da probabilidade de falha.

Como já verificado no Capítulo 5, o aplicativo OPIS calcula a probabilidade de falha (POF) em função do menor valor entre as probabilidades de vazamento (POL) e de ruptura (POR), considerando os modos de falha por vazamento e por ruptura como fenômenos associados.

Por outro lado, o aplicativo CONFIABILIDADE se apresenta também na opção RStreng 0,85dL totalmente aderente ao modelo analítico.

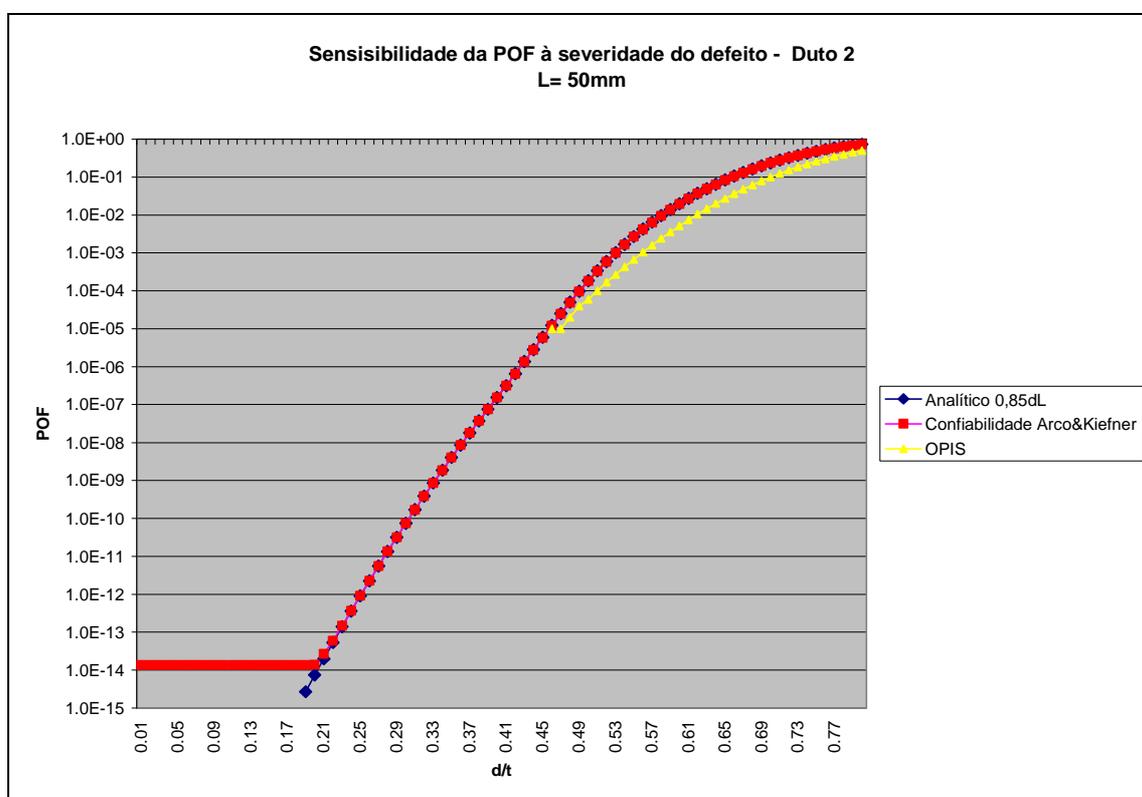


Figura 6.61 - Sensibilidade da POF imediata em função da severidade dos defeitos para o Duto 2 na opção RStreng 0,85dL

## 6.7. Avaliação da probabilidade de falha em um momento futuro

A possibilidade de cálculo da probabilidade de falha em um momento futuro é de grande valia nas atividades de gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão. Face aos altos custos demandados nas atividades de inspeção de dutos rígidos,

e em especial nos dutos submarinos, é crescente o uso de programas de inspeção baseada no risco como ferramenta para o gerenciamento da integridade. O cálculo da probabilidade de falha em um momento futuro é de fundamental importância para o planejamento das inspeções prioritárias a serem realizadas em uma determinada malha de dutos, de forma a priorizar os dutos que apresentarão um maior risco para o negócio de uma companhia operadora, em um determinado momento futuro de interesse.

Neste ponto do trabalho será apresentada a comparação dos valores de probabilidade de falha, em um momento futuro à inspeção, calculados pelos aplicativos OPIS e CONFIABILIDADE. Mantendo-se a metodologia adotada até aqui, as avaliações serão agrupadas em função dos métodos semi-empíricos nos quais os programas estão embasados, e comparações com resultados calculados analiticamente serão apresentadas. Os resultados de probabilidade de falha em um momento futuro, calculados analiticamente, podem ser observados nas Figuras 6.62, 6.63 e 6.64.

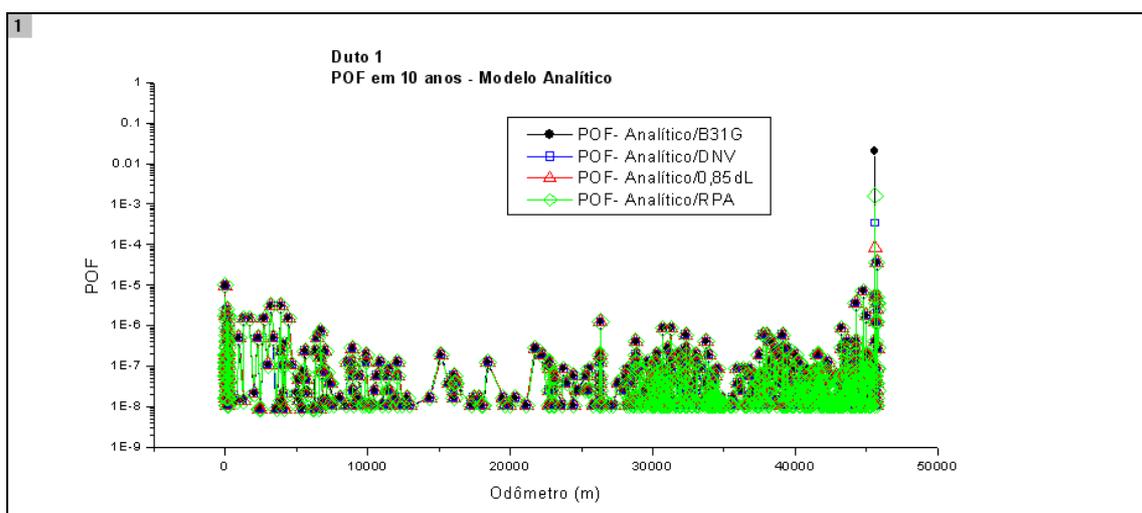


Figura 6.62 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para os defeitos do Duto 1 em 10 anos a contar do momento da inspeção

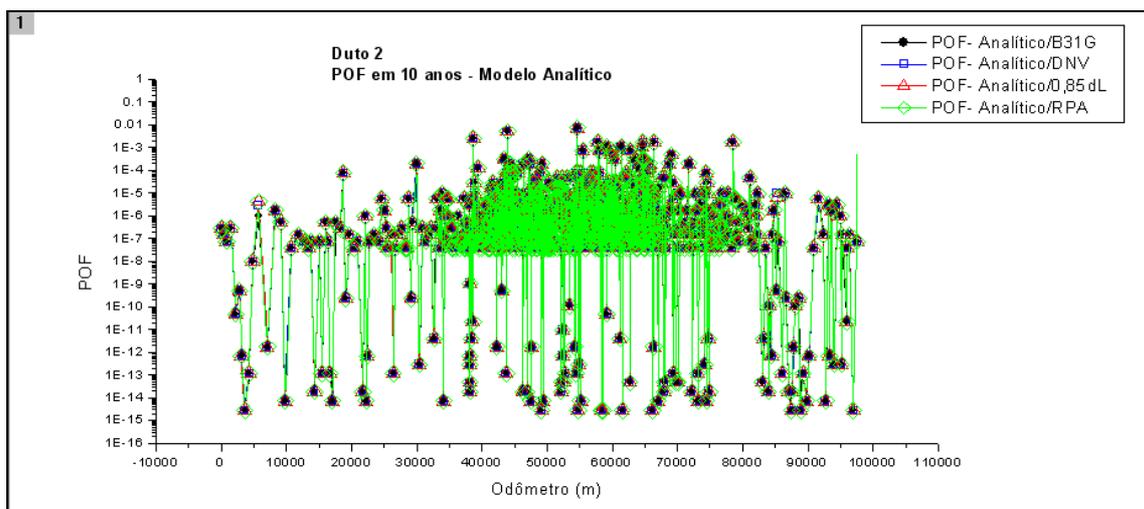


Figura 6.63 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para os defeitos do Duto 2 em 10 anos a contar do momento da inspeção

Da mesma forma como observado na comparação da probabilidade de falha imediata, é possível verificar que os resultados de probabilidade de falha futura, calculados para os defeitos com maiores valores de ERF, apresentam visíveis diferenças em função dos diferentes modelos semi-empíricos de cálculo da pressão de falha. Por outro lado, em dutos onde o modo de falha reinante é o de vazamento, não se verifica variações nos valores de POF apresentados para os diferentes métodos semi-empíricos, conforme observado para o Duto 3, ilustrado na Figura 6.64.

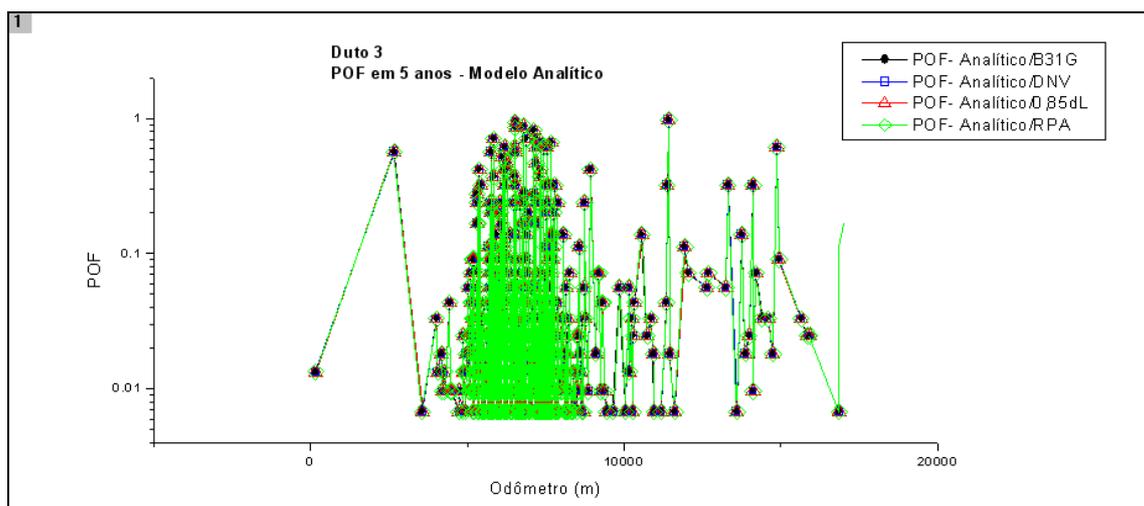


Figura 6.64 - Probabilidades de falha calculadas analiticamente para os defeitos do Duto 3 em 5 anos a contar do momento da inspeção

### 6.7.1. Avaliação segundo a ASME B31G

As Figuras 6.65, 6.66 e 6.67 apresentam a comparação dos resultados de probabilidade de falha em momentos futuros à inspeção, para os aplicativos CONFIABILIDADE na opção ASME B31G.

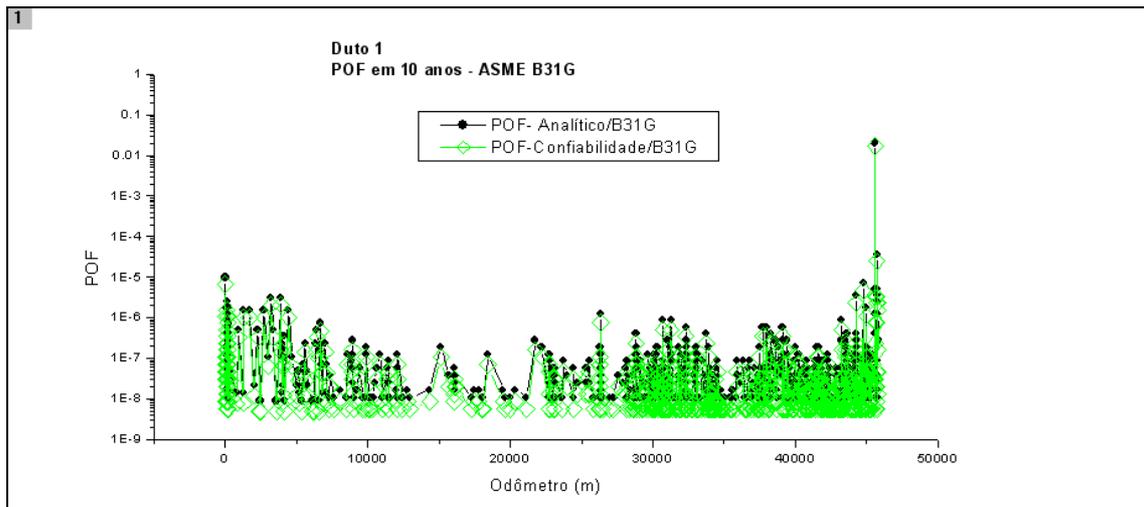


Figura 6.65 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 1 conf. B31G

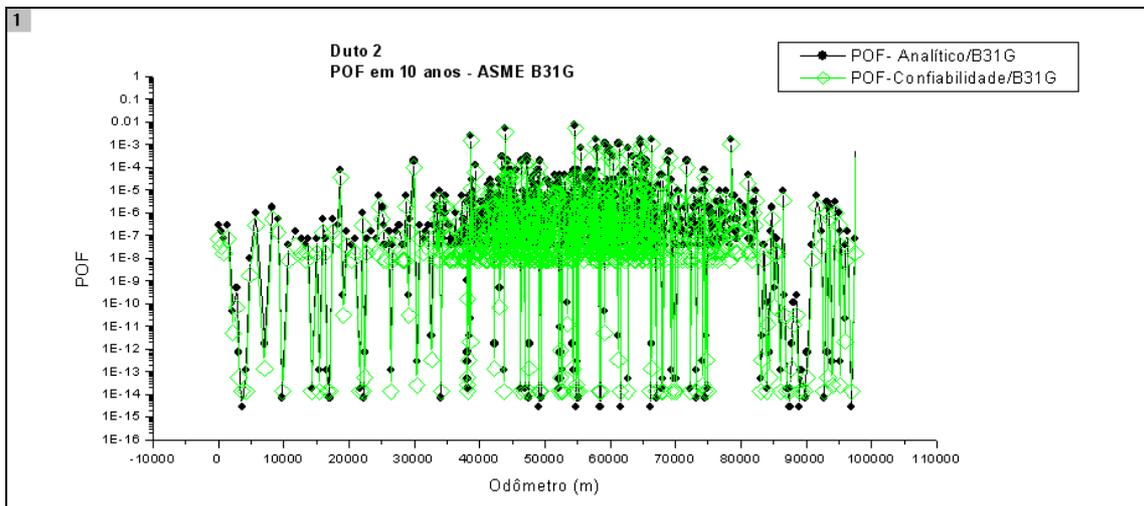


Figura 6.66 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 2 conf. B31G

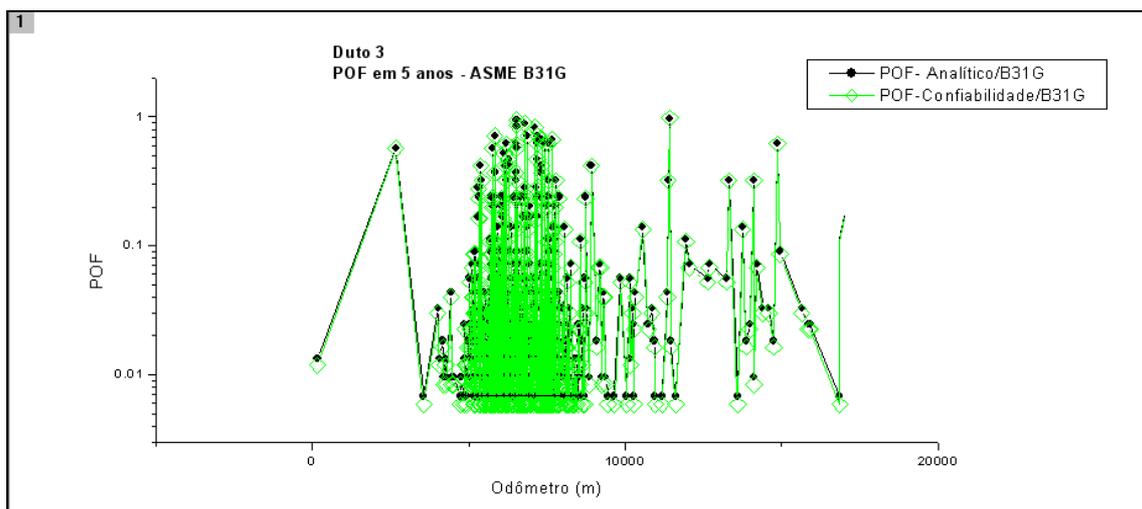


Figura 6.67 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 5 anos para o Duto 3 conf. B31G

A partir da observação das Figuras 6.65, 6.66 e 6.67, é possível verificar que os resultados de POF apresentados pelo programa CONFIABILIDADE se apresentam de forma coerente com os obtidos analiticamente. No entanto, as diferenças observadas na condição imediata se apresentam visivelmente aumentadas na condição futura. A Figura 6.68 ilustra a avaliação da sensibilidade do programa CONFIABILIDADE em função da severidade dos defeitos, no cálculo da probabilidade de falha futura para o Duto 2.

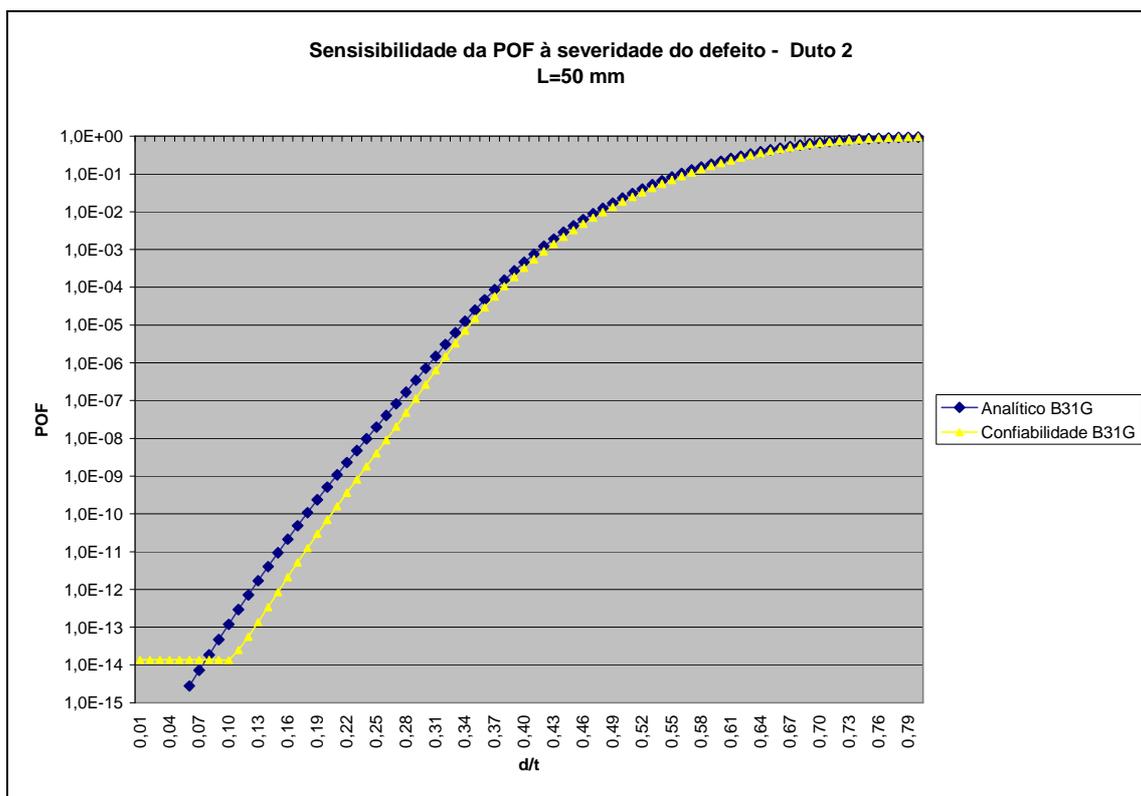


Figura 6.68 - Sensibilidade da POF em 10 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 2 na opção ASME B31G

É possível observar que existe uma tendência de descolamento das curvas construídas a partir da aplicação dos dois diferentes métodos. Considerando que as causas da divergência observada na condição futura residem nos diferentes modelos de crescimento do defeito, também como no cálculo da sua variância, conforme hipótese assumida no capítulo anterior, pressupõe-se que a discrepância deve se manter constante nas diferentes condições de severidade, uma vez que a variância da dimensão futura é uma função apenas da variância da ferramenta de inspeção e da taxa de crescimento do defeito. Para se verificar essa hipótese, é preciso ajustar o gráfico ilustrado na Figura 6.68 de forma a apresentar os valores em uma escala linear, conforme apresentado na Figura 6.69.

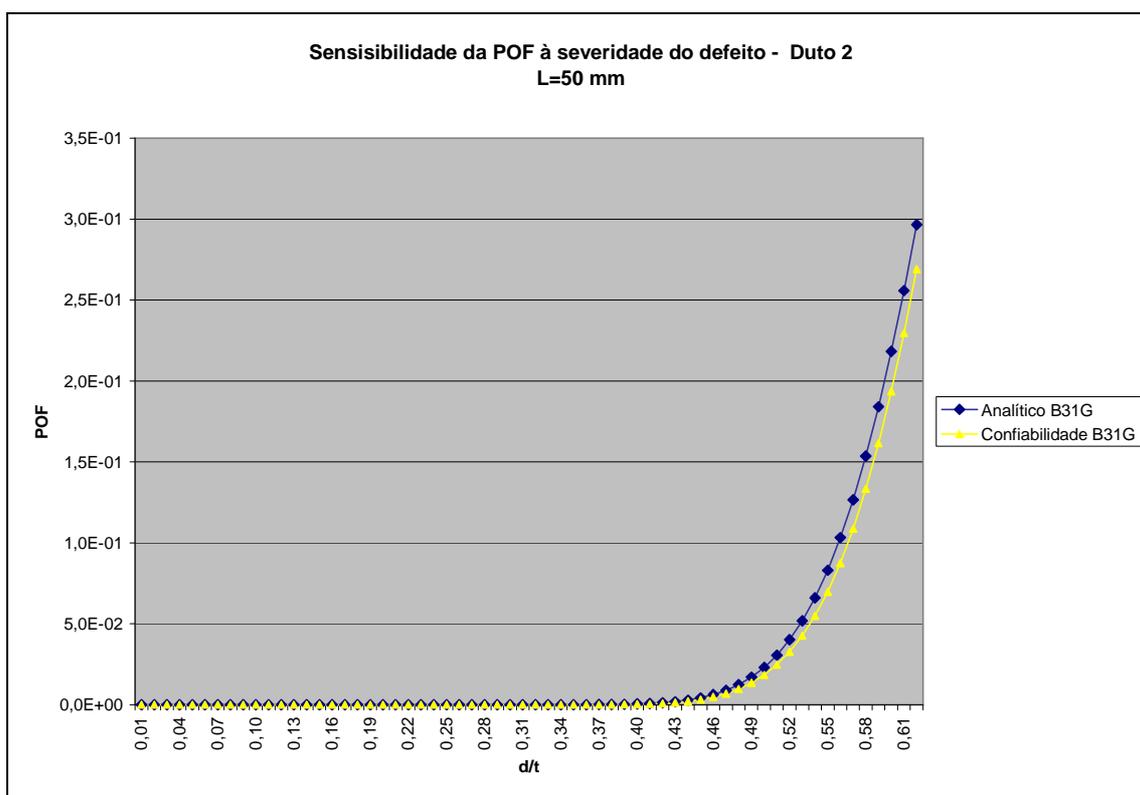


Figura 6.69 - Sensibilidade da POF em 10 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 2 na opção ASME B31G, apresentada em escala linear

A Figura 6.69 permite estabelecer três relações causa-efeito importantes a respeito da origem das divergências observadas na comparação dos resultados de POF fornecidos pelos programas com os obtidos analiticamente. Até o ponto referente a um defeito de profundidade equivalente a 40% da espessura nominal da parede, considera-se que o modo de falha reinante no Duto 2 é o de falha por vazamento. Dessa forma, a causa para a divergência entre os métodos é atribuída somente às diferenças no cálculo da variância da dimensão profundidade do defeito.

A partir do ponto referente a um defeito de profundidade equivalente a 40% da espessura de parede, o modo de falha por ruptura se mostra atuante, fornecendo as parcelas de erro referentes às diferenças no modelo de cálculo da POF e ao modelo de crescimento do defeito no comprimento.

Por outro lado, considerando que taxa de corrosão no comprimento do defeito adotado no modelo analítico é de valor equivalente à taxa na profundidade, a parcela de erro associada ao modelo de crescimento do defeito é menos sensível, no entanto, pode ser

observada visivelmente entre as curvas do modelo analítico e do aplicativo CONFIABILIDADE. Na situação de um defeito classificado como um canal axial, por exemplo, a divergência observada seria maior, uma vez que a taxa de corrosão no comprimento pode assumir valores até cinco vezes o valor da taxa de corrosão na profundidade.

A partir da hipótese estabelecida, presume-se que para um duto onde o modo de falha reinante seja o de vazamento para todas as condições de severidade, não se deve observar as parcelas de erro associadas ao o crescimento tridimensional do defeito e às diferenças no modelo de cálculo da POF, o que pode ser confirmado na avaliação da sensibilidade para o Duto 3, conforme apresentado nas Figuras 6.70 e 6.71.

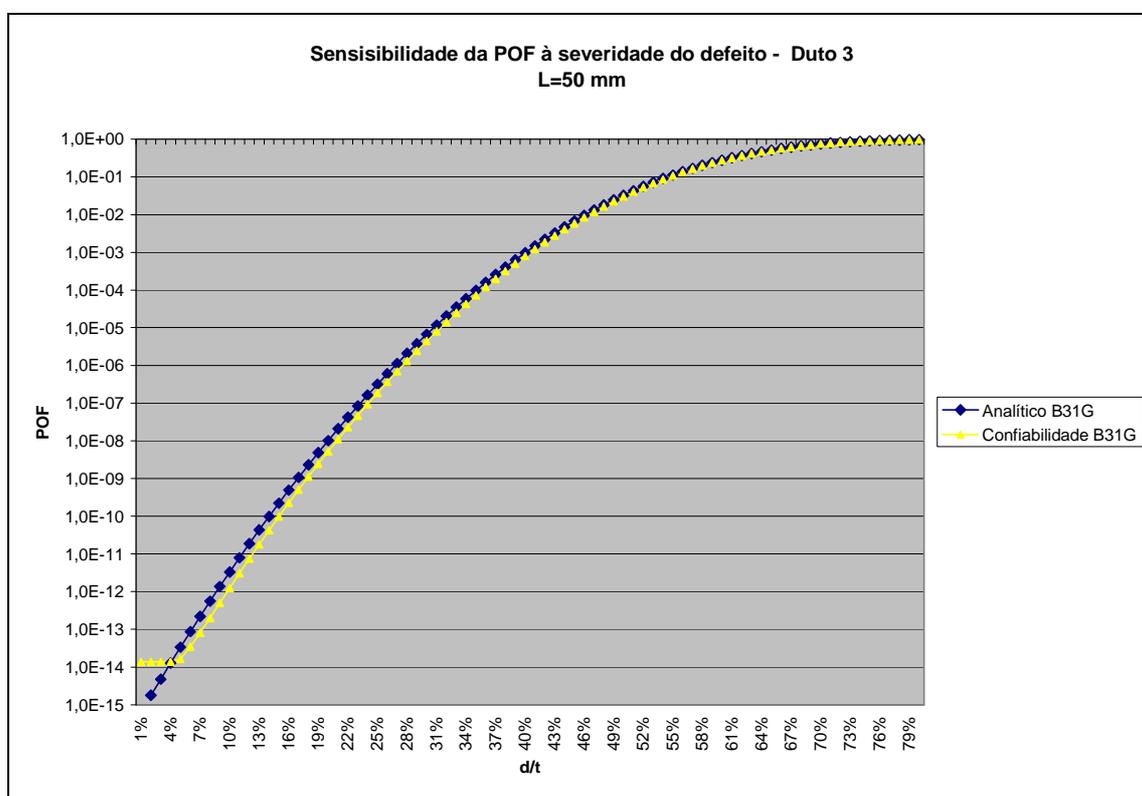


Figura 6.70 - Sensibilidade da POF em 5 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 3 na opção ASME B31G

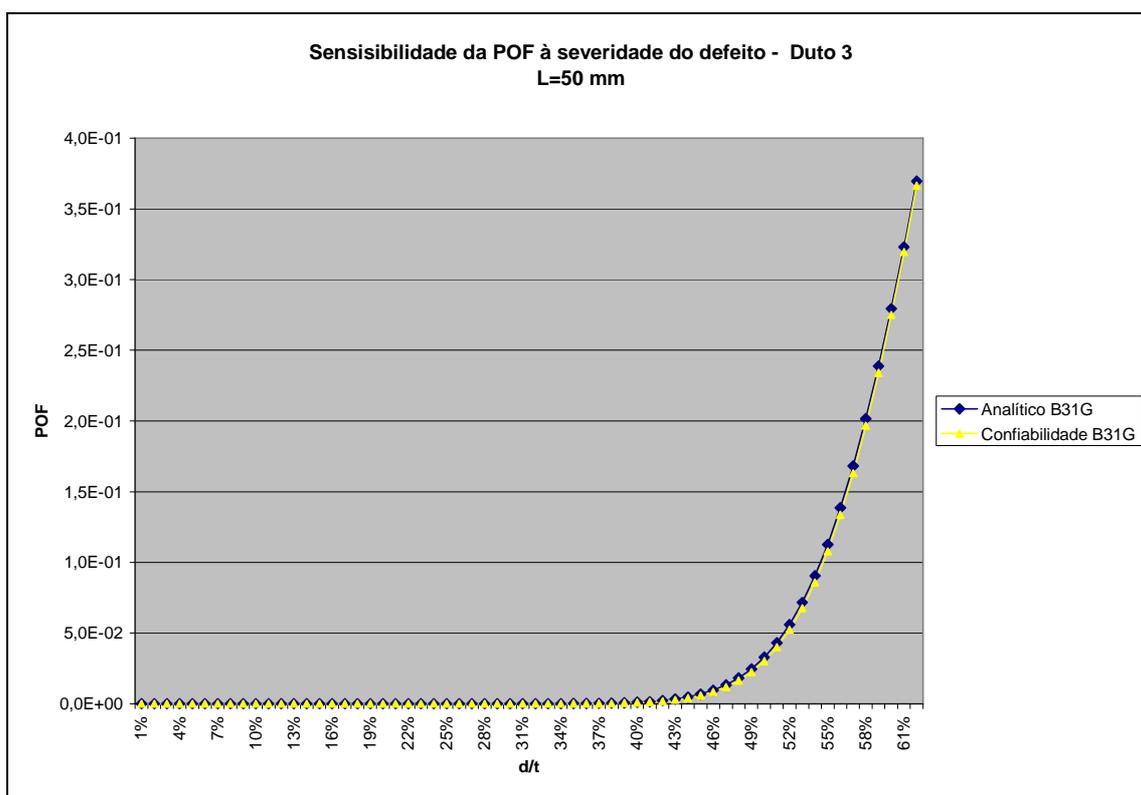


Figura 6.71 - Sensibilidade da POF em 5 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 3 na opção ASME B31G, apresentada em escala linear

## 6.7.2. Avaliação segundo a DNV RP F101

As Figuras 6.72, 6.73 e 6.74 apresentam a comparação dos resultados de probabilidade de falha em momentos futuros à inspeção, para o aplicativo CONFIABILIDADE na opção DNV RP F101. Os valores de POF fornecidos pelo aplicativo CONFIABILIDADE foram calculados considerando a utilização do “*modelling factor*” de 0,9.

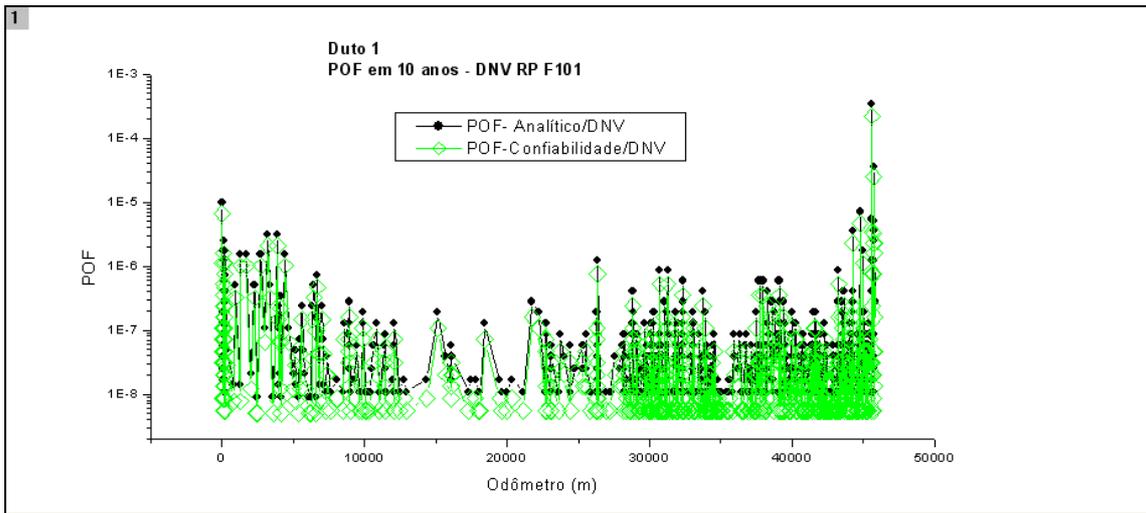


Figura 6.72 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 1 conf. DNV

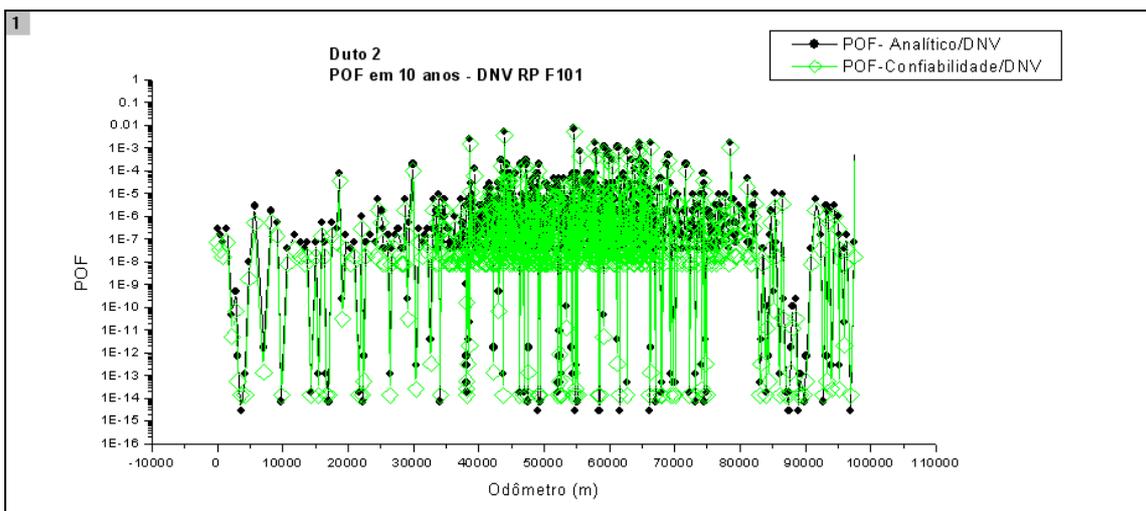


Figura 6.73 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 2 conf. DNV

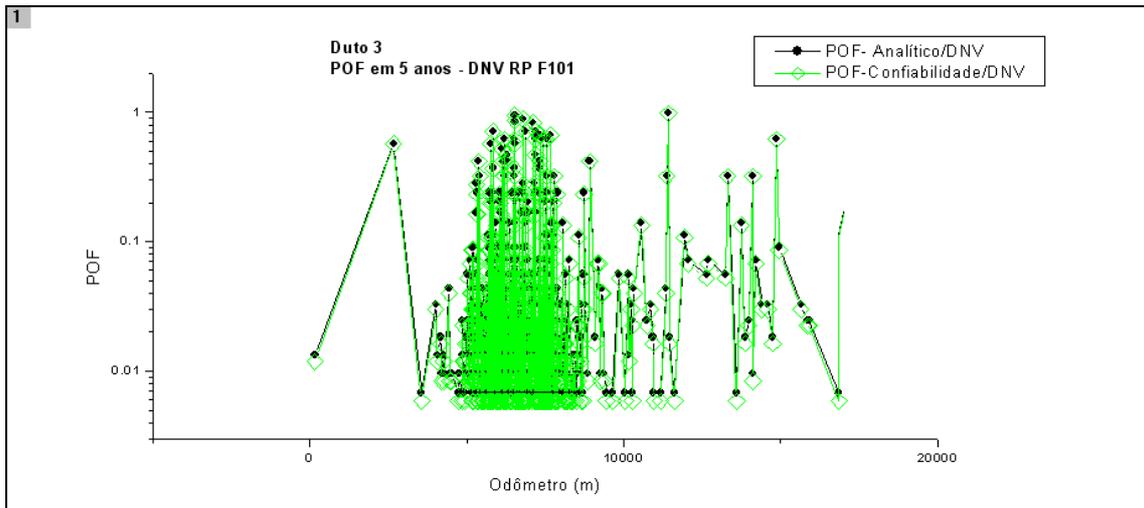


Figura 6.74 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 5 anos para o Duto 3 conf. DNV

É possível observar que, na opção DNV, o aplicativo CONFIABILIDADE apresenta aderência ao modelo analítico no cálculo da probabilidade de falha futura. No entanto, os erros associados às diferenças no modelo de crescimento de defeito e ao cálculo da variância das dimensões do defeito se fazem presentes conforme observado na Figura 6.75.

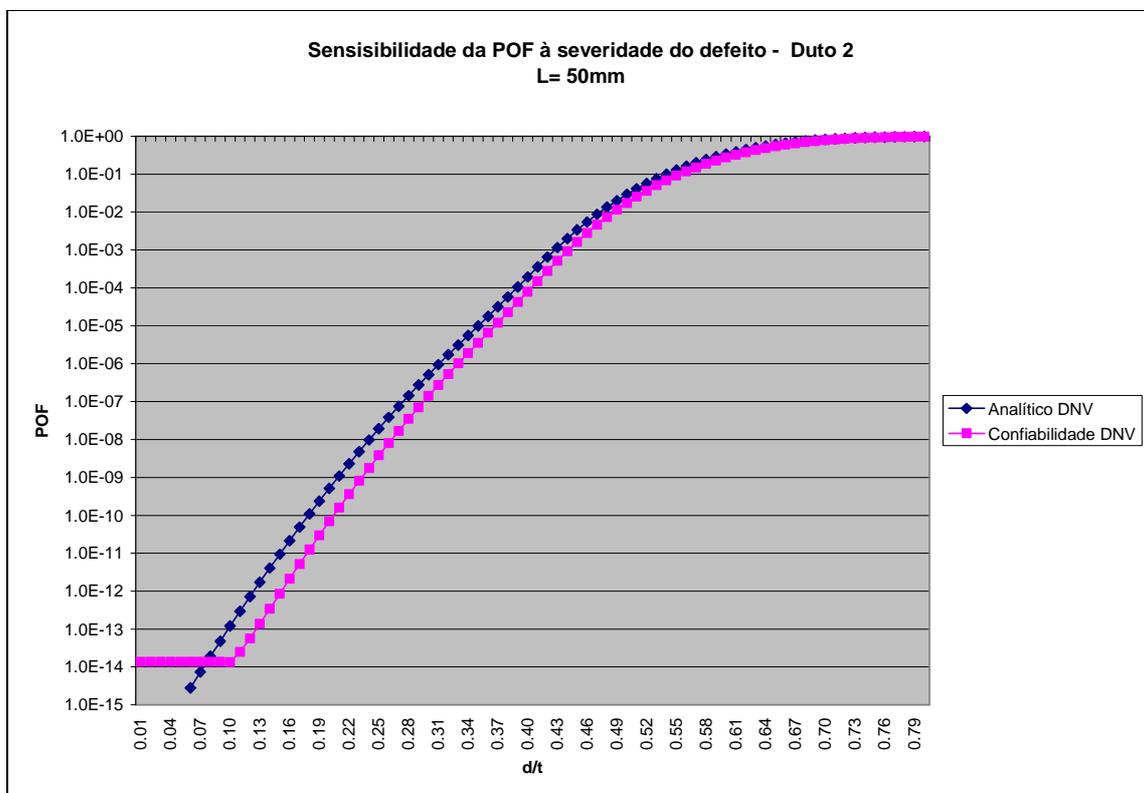


Figura 6.75 - Sensibilidade da POF em 10 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 2 na opção DNV RP F101

### 6.7.3. Avaliação segundo a Método RPA

As Figuras 6.76, 6.77, 6.78 e 6.79 apresentam os resultados de probabilidade de falha em momentos futuros à inspeção, obtidos analiticamente pelo método RPA.

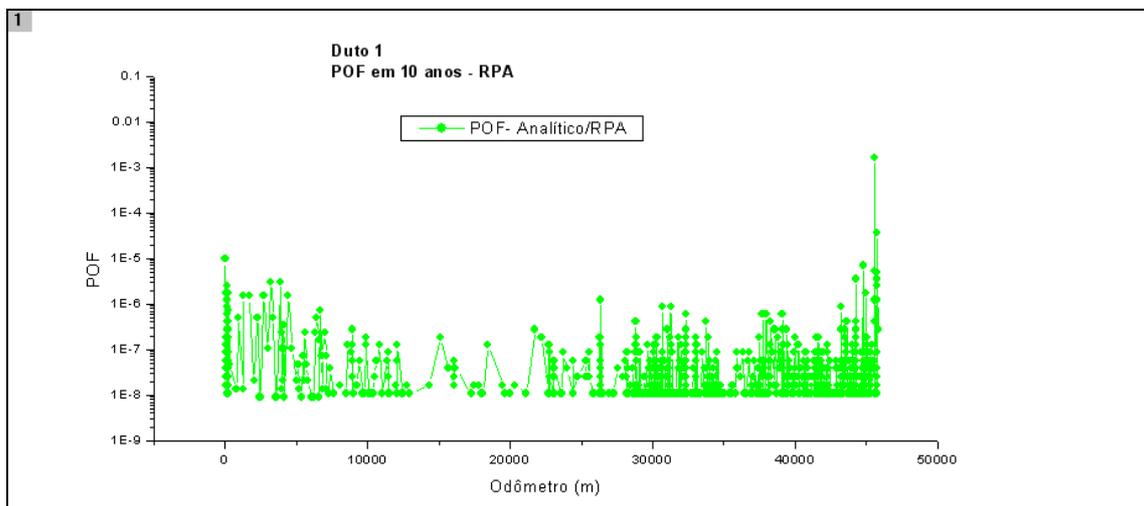


Figura 6.76 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 1 conforme o Método RPA

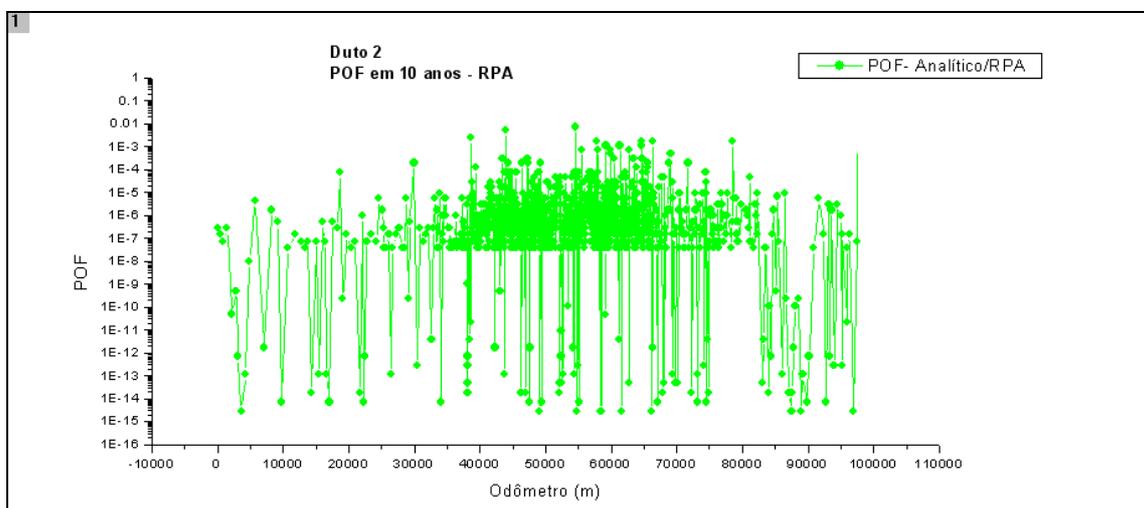


Figura 6.77 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 2 conforme o Método RPA

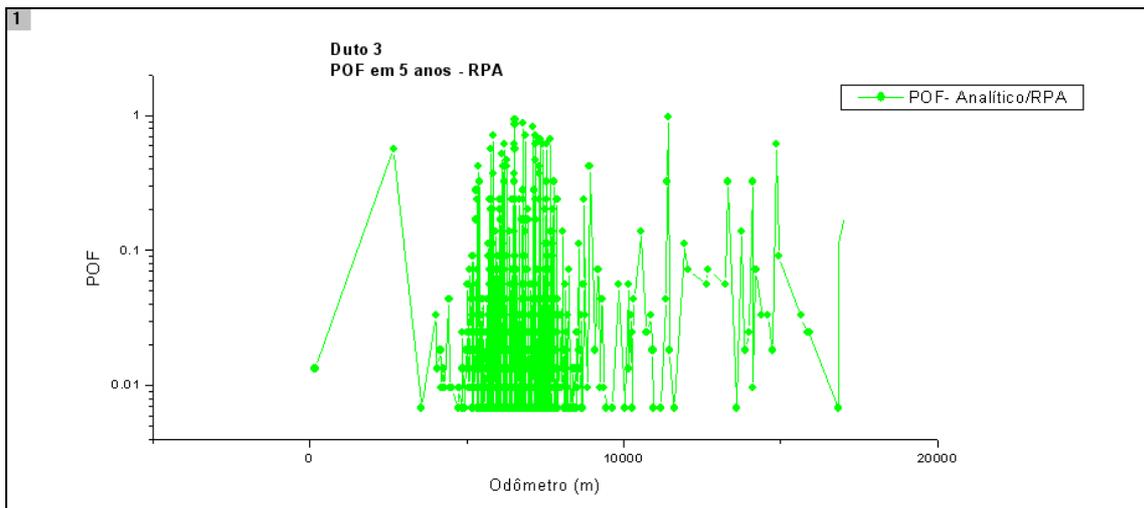


Figura 6.78 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 5 anos para o Duto 3 conforme o Método RPA

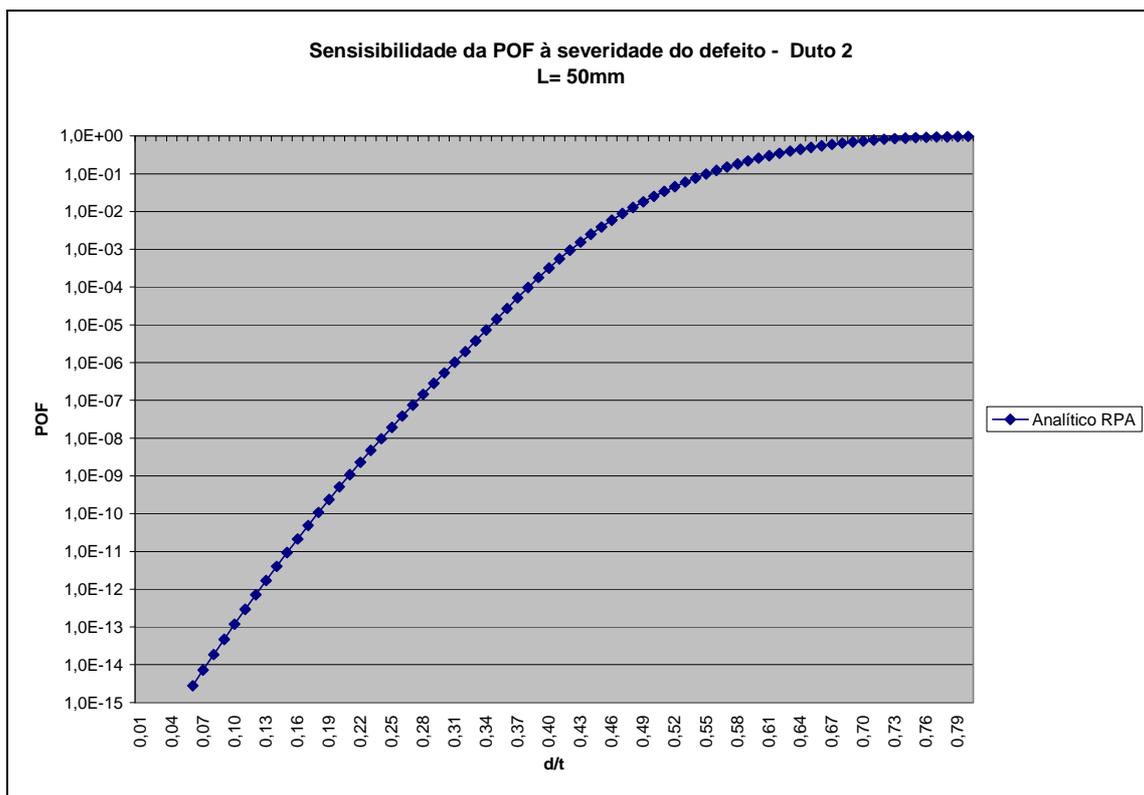


Figura 6.79 - Sensibilidade da POF em 10 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 2 na opção RPA

#### 6.7.4. Avaliação segundo o Método RStreng 0,85dL

Na avaliação da probabilidade de falha futura na opção RStreng 0,85dL, foi possível comparar os aplicativos OPIS e CONFIABILIDADE. As Figuras 6.80, 6.81 e 6.82 ilustram os resultados.

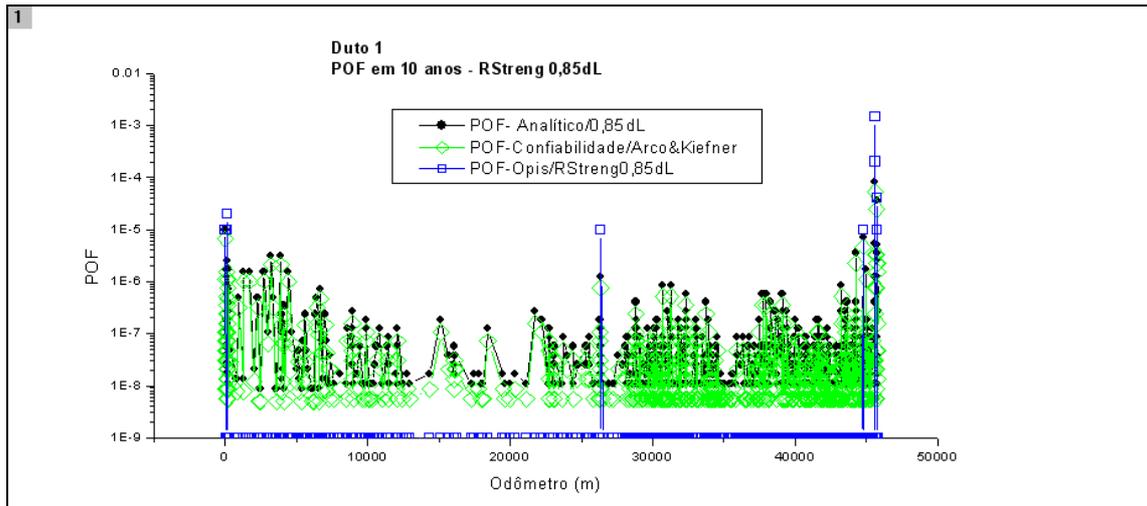


Figura 6.80 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 1 conforme o Método RStreng 0,85dL

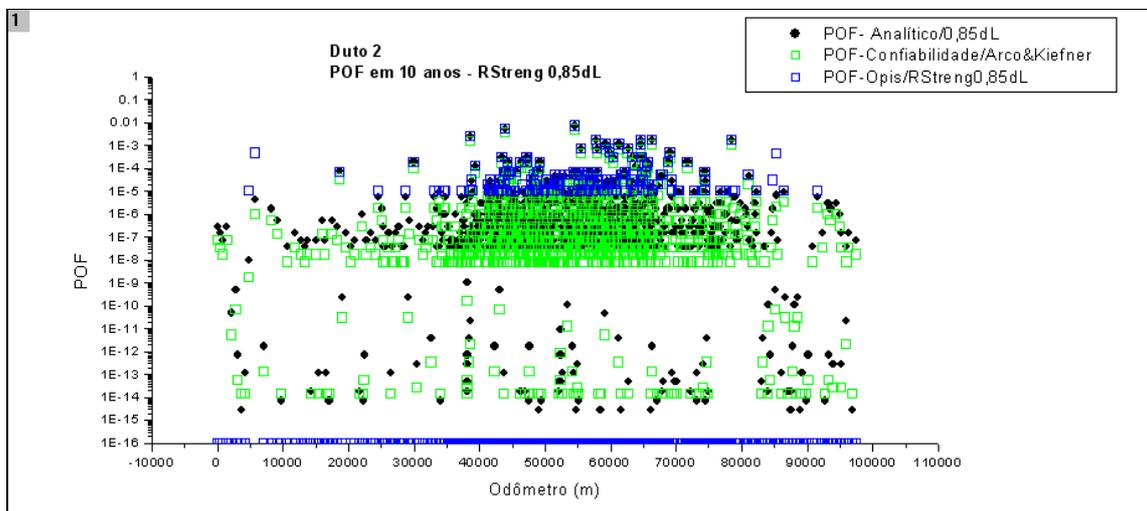


Figura 6.81 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 10 anos para o Duto 2 conforme o Método RStreng 0,85dL

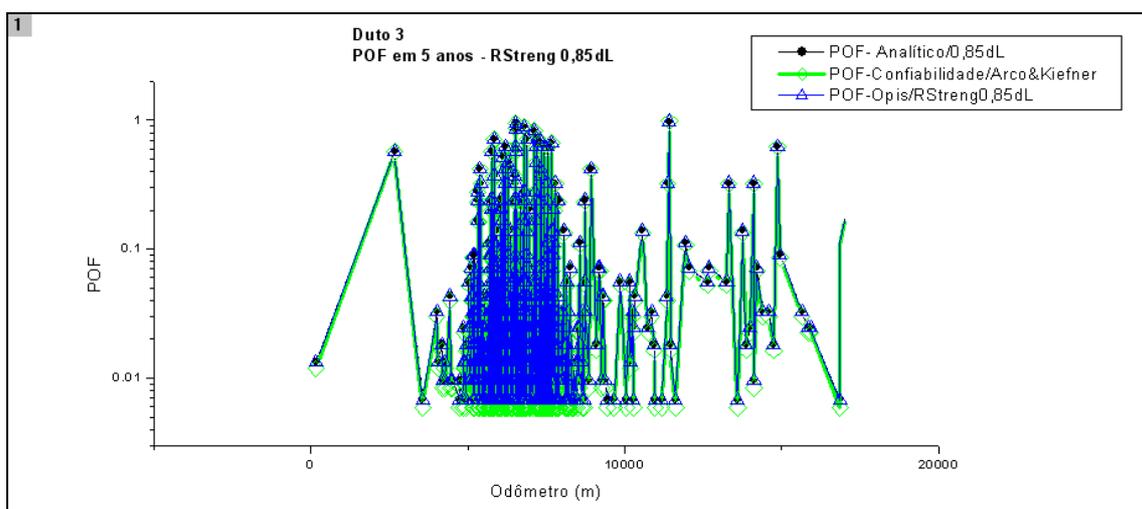


Figura 6.82 - Avaliação dos resultados de probabilidade de falha em 5 anos para o Duto 3 conforme o Meto RStreng 0,85dL

O programa CONFIABILIDADE se mostrou aderente ao modelo analítico no cálculo da probabilidade de falha futura na opção Arco&Kiefner. No entanto, os erros referentes ao modelo de crescimento tridimensional de defeito e à obtenção da variância das dimensões do defeito se mostram presentes.

Como já observado anteriormente, a manipulação dos dados gerados pelo programa OPIS ficou comprometida tendo em vista que o programa desconsidera resultados inferiores a  $1,0 \times 10^{-5}$  na exportação de dados, atribuindo valor zero no arquivo gerado. Este aspecto do programa impossibilitou a avaliação nos Dutos 1 e 2. Por outro lado, o programa se mostrou aderente ao modelo analítico na avaliação do Duto 3, onde o modo de falha por vazamento se mostra atuante.

A Figura 6.83 ilustra a avaliação da sensibilidade do programa à severidade dos defeitos no cálculo da POF em 10 anos para o Duto 2, evidenciando a não aderência do programa OPIS ao modelo analítico em defeitos onde o modo de falha por ruptura se mostra reinante.

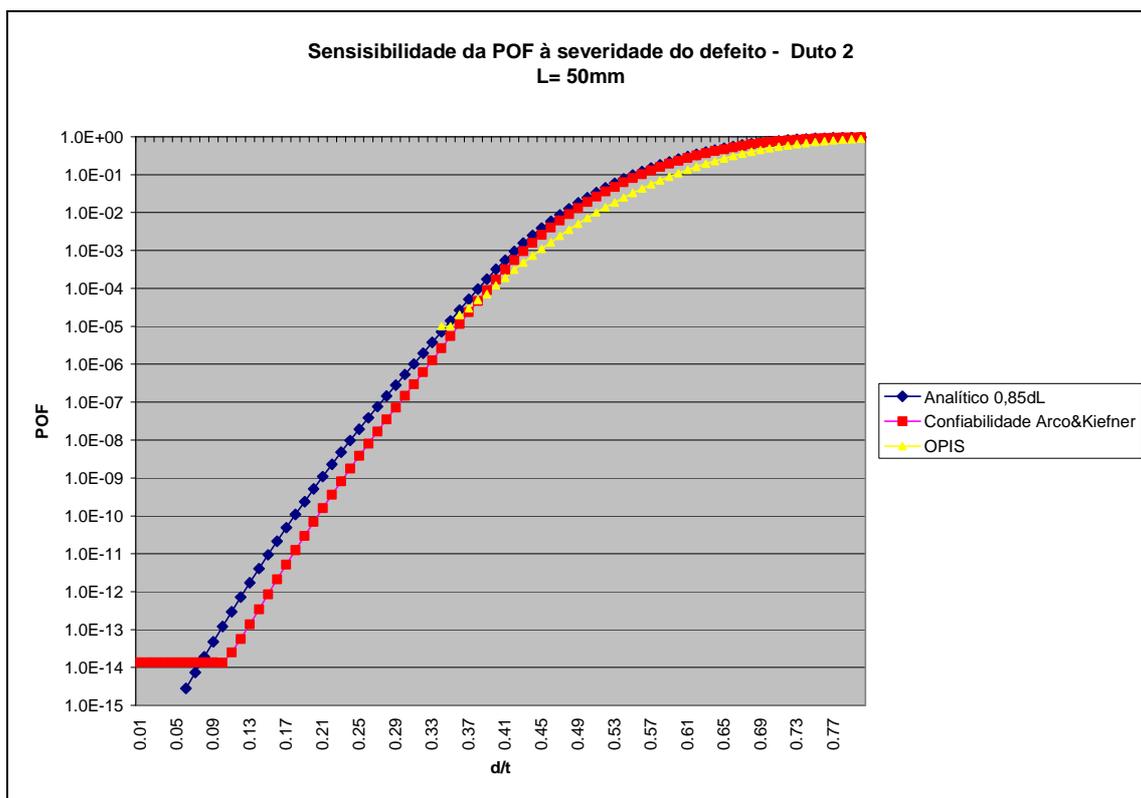


Figura 6.83 - Sensibilidade da POF em 10 anos em função da severidade dos defeitos iniciais para o Duto 2 na opção RStreng 0,85dL

## 6.8. Conclusões do estudo

O estudo apresentado neste Capítulo possibilitou conhecer os diversos aspectos dos aplicativos OPIS, CONFIABILIDADE e PLANPIG, fornecendo dessa forma subsídios aos profissionais da área de integridade, de forma a auxiliar na adequada seleção e utilização desses aplicativos.

A Tabela 6.5 sumariza os resultados obtidos com o estudo de comparação dos aplicativos PLANPIG, OPIS e CONFIABILIDADE.

FUNÇÃO	APLICATIVO	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO				
		Método semi-empírico avaliado	Aderência ao modelo analítico	OBSERVAÇÕES		
CALCULOS	PRESSÃO DE FALHA	IMEDIATA	PLANPIG	ASME B31G	Sim	=> No cálculo da pressão de falha, o programa majora o tamanho dos defeitos pela soma das incertezas associadas às medições feitas pelo PIG Instrumentado.
			Método RPA	Sim		
		OPIS	Método RStreng 0,85dL	Sim	=> O programa fornece valores de pressão de falha real. A aplicação do fator de projeto deve ser feita pelo usuário após o cálculo da pressão de falha pelo programa. => O programa utiliza impreterivelmente o modelo de interação de defeitos.	
		CONFIABILIDADE	ASME B31G	Sim		=> Na opção DNV, o "modelling factor" deve ser incluído no fator de projeto.
			DNV RP F101	Sim		
			Método RStreng 0,85dL	Sim		
	FUTURA	PLANPIG	ASME B31G	Sim	=> No cálculo da pressão de falha, o programa majora o tamanho dos defeitos pela soma das incertezas associadas às medições feitas pelo PIG Instrumentado.	
		Método RPA	Sim			
		OPIS	Método RStreng 0,85dL	Sim	=> O programa fornece valores de pressão de falha real. A aplicação do fator de projeto deve ser feita pelo usuário após o cálculo da pressão de falha pelo programa. O programa utiliza impreterivelmente o modelo de interação de defeitos.	
		CONFIABILIDADE	ASME B31G	Sim		=> Na opção DNV, o "modelling factor" deve ser incluído no fator de projeto.
			DNV RP F101	Sim		
			Método RStreng 0,85dL	Sim		
PROBABILIDADE DE FALHA	IMEDIATA	PLANPIG	ASME B31G	Ver comentário	=> O programa calcula as probabilidades de segurança PS e de vazamento PV como subprodutos do cálculo do tempo de re-inspeção.	
			Método RPA	Ver comentário		
		OPIS	Método RStreng 0,85dL	Ver comentário	=> O programa se apresentou aderente ao modelo analítico apenas em defeitos onde o modo de falha por vazamento se mostrou dominante. => Atribui valor zero na exportação de resultados inferiores a 1,0E-5.	
		CONFIABILIDADE	ASME B31G	Sim		=> A aquisição de um valor único de CoV para as dimensões de comprimento dos defeitos se apresentou como um inconveniente na aquisição da incerteza do PIG Instrumentado na medição do comprimento.
			DNV RP F101	Sim		
			Método RStreng 0,85dL	Sim		
	FUTURA	PLANPIG	ASME B31G	Ver comentário	=> O programa calcula as probabilidades de segurança PS e de vazamento PV como subprodutos do cálculo do tempo de re-inspeção.	
		Método RPA	Ver comentário			
		OPIS	Método RStreng 0,85dL	Ver comentário	=> O programa se apresentou aderente ao modelo analítico apenas em defeitos onde o modo de falha por vazamento se mostrou dominante. => Atribui valor zero na exportação de resultados inferiores a 1,0E <sup>-5</sup> .	
		CONFIABILIDADE	ASME B31G	Sim		=> A aquisição de um valor único de CoV para as dimensões de comprimento dos defeitos se apresentou como um inconveniente na aquisição da incerteza do PIG Instrumentado na medição do comprimento. => Foram observadas diferenças associadas ao cálculo da variância dos defeitos. => Foram observadas diferenças associadas ao modelo de crescimento dos defeitos.
			DNV RP F101	Sim		
			Método RStreng 0,85dL	Sim		

Tabela 6.5 - Tabela geral com os resultados da avaliação dos aplicativos para gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos reais de corrosão