

## 5

### ESTUDOS DE CASOS

Neste capítulo, se aplicará o modelo de Muhlbauer e os três modelos de fuzificação, explicados no capítulo dois e quatro, na análise de Risco de quatro dutos mencionados na referência [15], que serão identificados como dutos A-G, B-A, C-A e X-B. Algumas características dos dutos A-G, B-A, C-A e X-B, extraídos da referência [15] encontram-se na seguinte tabela:

características	Duto			
	A-G	B-A	C-A	X-B
Idade (anos)	16	13	13	1
Vida útil (anos)	40	20	20	20
Pressão de projeto (PSI)	853	2700	1350	995
MAOP	615	650	450	160
Pressão de operação (PSI)	611	640	426	156
Diâmetro (polegadas)	24	16	16	12 10
Espessura (mm)/extensão (km)	9.525/54	12.7/9.6	6.4/54.25 7.9/0.75 6.4/1	5.5/42 8.4/43
Perda máxima encontrada com inspeção PIG (% de espessura)	49	44	29	-
Taxa de corrosão média, avalia por CUPONS (mm/ano)	-	-	-	3.44
Vazão média (m <sup>3</sup> /h)	1956	670	800	180

Tabela 5.1: Informações principais dos dutos A-G, B-A, C-A, e X-B

#### 5.1

#### ANÁLISE DE RISCO DO DUTO A-G

A análise de Risco para qualquer trecho começará com o preenchimento das informações requeridas, como solicitadas nas figuras 2.11 e 2.12, para o qual, a fonte de informação utilizada será o trabalho realizado por Pezzi [15]. Nela estão informações sobre os dutos informador por exemplo, se estes possuem um sistema de proteção catódica aplicada segundo o uso padrão, se os dutos possuem as proteções externas, qual o tipo de revestimento, qual o tipo de proteção interna (se o duto apresenta inibidor de corrosão e monitoração por cupons) e a classe de

população. Com estas e outras informações procede-se a colocar valores numéricos na planilha de Risco gerada no capítulo dois, tal como está apresentado nas figuras 5.1 e 5.2.

LOCALIZAÇÃO : A-G		TRECHO NÚMERO		NÚMERO TOTAL DE TRECHOS
Dados necessários para calcular o nível de risco		1		20
		INÍCIO DO TRECHO		FIM DO TRECHO
<b>ÍNDICE DE DANOS POR TERCEIROS</b>		Pontuação		<b>51</b>
<b>Terra que cobre a tubulação</b>				<b>16</b>
<i>Profundidade de terra que cobre a tubulação (in)</i>		36	12	
<i>Outros mecanismos (in)</i>		12	4	
<b>Nível de Atividade</b>		15		<b>15</b>
<b>Facilidades da terra acima da tubulação</b>		10		<b>10</b>
<b>Sistema de uma chamada</b>		2		<b>2</b>
<b>Programa de educação pública</b>		3		<b>3</b>
<b>Condição da linha reta</b>		3		<b>3</b>
<b>Frequência de observação</b>		2		<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE DANO POR CORROSAO</b>				<b>62</b>
<b>Corrosão Atmosférica</b>				<b>14</b>
<i>Facilidade da corrosão</i>		3	3	
<i>Tipo de atmosfera</i>		6	6	
<i>Inspeção e revestimento</i>			5	
<i>A qualidade do revestimento</i>		3		
<i>A qualidade da aplicação do revestimento</i>		3		
<i>A qualidade do programa de inspeção</i>		3		
<i>A qualidade do programa de correção de defeitos</i>		3		
<b>Corrosão Interna</b>				<b>12</b>
<i>Produto da corrosividade</i>		3	3	
<i>Proteção Interna</i>		9	9	
<b>Corrosão de duto enterrado</b>				<b>36</b>
<i>Proteção catódica</i>		8	8	
<i>Condição do revestimento</i>			10	
<i>A qualidade do revestimento</i>		3		
<i>A qualidade da aplicação do revestimento</i>		3		
<i>A qualidade do programa de inspeção</i>		3		
<i>A qualidade do programa de correção de defeitos</i>		3		
<i>Corrosividade do solo</i>		0	0	
<i>Idade do sistema</i>		1	1	
<i>Fluxo de corrente para outros materiais enterrados</i>		2	2	
<i>Interferência de AC</i>		4	4	
<i>Efeitos da corrosão mecânica</i>		1	1	
<i>Testes dirigidos</i>			1	
<i>Distância entre testes</i>		0		
<i>Frequência de leitura dos testes</i>		1		

Figura 5.1: Informações do trecho A-G

<i>Estudos de corte de intervalo (anos)</i>	1	7		
<i>Ferramentas de inspeção interna (anos)</i>	B	2		
<b>ÍNDICE DE PROJETO</b>			<b>39</b>	
<b>Fator de segurança da tubulação</b>	10		<b>10</b>	
<b>Fator de segurança do sistema de tubulação</b>	B		<b>8</b>	
<b>Fadiga</b>	5		<b>5</b>	
<b>Fonte potencial de aparecimento de pressões picos (golpe de aríete)</b>	5		<b>5</b>	
<b>Teste hidrostático do sistema</b>			<b>5</b>	
<i>H</i>	5	5		
<i>Tempo que transcorreu do último teste hidrostático</i>	10	0		
<b>Movimento do solo</b>	B		<b>6</b>	
<b>ÍNDICE DE OPERAÇÕES INCORRETAS</b>			<b>83</b>	
<b>Projeto</b>			<b>17</b>	
<i>Identificações perigosas</i>	2	2		
<i>Potencial para alcançar o MAOP</i>	5	5		
<i>Sistemas de segurança</i>	6	6		
<i>Seleção do material</i>	2	2		
<i>Revisões</i>	2	2		
<b>Construção</b>	20		<b>20</b>	
<b>Operação</b>			<b>31</b>	
<i>Procedimento</i>	5	5		
<i>SCADA</i>	5	5		
<i>Prova DRUG</i>	2	2		
<i>Programas de segurança</i>	2	2		
<i>Estudos</i>	2	2		
<i>Treinamento</i>	8	8		
<i>Prevenir os erros mecânicos</i>	7	7		
<b>Manutenção</b>	15		<b>15</b>	
<b>FATOR DE IMPACTO DE DERRAMAMENTO</b>			<b>11</b>	
<b>Produto perigoso</b>		11	<b>11</b>	
<i>Produtos com perigos ACUTE</i>		5		
<i>Flamabilidade (NF)</i>	3			
<i>Reatividade (NF)</i>	0			
<i>Toxicidade (NF)</i>	2			
<i>Produtos com perigos CHRONIC (RQ)</i>	6	6		
<b>Fator de dispersão</b>			<b>1</b>	
<i>Vazamento de substâncias</i>		1		
<i>Substância em vapor</i>				
<i>Substância em líquido</i>	1			
* A permeabilidade do solo.				
* Máximo volume permitido				
<i>Classe de população</i>	1	1		

Figura 5.2: Informações do trecho A-G (continuação).

Da figura 5.2, observa-se que o resultado final do FIV para o duto A-G é de 11 pontos. Com isto, o valor do Risco flutuará no intervalo [0, 36.36]. Ele, será igual a zero quando a soma de índices for igual a zero, e será igual a 36.36 quando a soma de índices for igual a 400.

Este intervalo pequeno de flutuação do valor do Risco deve-se principalmente ao alto valor do FIV, o qual é influenciado pelas características do produto transportado, que é petróleo, e do meio que o rodeia, classificado como classe 1. A referência [78] menciona que para petróleo que contém H<sub>2</sub>S as pontuações de inflamabilidade, reatividade e toxicidade, dadas pela NFPA (Associação Americana de Proteção de Fogo) são 3, 0 e 2 respectivamente, e a pontuação do perigo crônico para o petróleo, recomendado por Muhlbauer, é igual a 6, com isto, a pontuação total do perigo do produto é igual a 11 (3+0+2+6). Cabe mencionar que o resultado do perigo de produto é inerente ao petróleo, assim, é impossível modificar este valor. Outra variável que influi no resultado do FIV, e que dificilmente pode ser mudado, é a variável classe de população. Segundo a referência [15], o duto A-G cruza, áreas populacionais, rodovias estaduais, ferrovias, estradas vicinais, rios, lagos, etc. Sendo assim, seria recomendável subdividir o trecho A-G de acordo com estas áreas. No entanto, na referência [15] não se menciona as classes de população para todas estas áreas, a exceção das áreas populacionais que têm uma classe 1.

Considerando que as variáveis: perigo do produto e classe de população não podem ser modificadas, o único fator que pode variar o resultado do FIV é a variável vazamento do produto. Para o caso do duto A-G, esta variável tem uma pontuação igual a 1, isto sucede quando o evento indesejado é a ruptura do duto, que ocasionaria um vazamento igual ao fluxo transportado. Cabe mencionar, que o valor para a variável vazamento do produto igual a 1 é o pior caso, sendo o melhor caso a pontuação igual a cinco. Se considera como cinco o valor para a variável vazamento do produto, o intervalo de valores para o Risco seria de [0, 181.81]. No entanto, segundo a metodologia do Muhlbauer, a mudança da pontuação da variável vazamento do produto de um para cinco, requer a diminuição do fluxo volumétrico transportado em uma proporção de 3000 vezes ao atual fluxo, no entanto, realizar isto na prática é impossível, sendo assim, o valor do FIV igual a 11 é um valor fixo que o

duto A-G leva consigo desde o início de sua operação até o momento que deixar de funcionar.

Uma forma razoável de evitar que a pontuação do FIV seja fixa é modificar a forma como o Muhlbauer calcula o FIV (expressão 2.3). Esta modificação baseia-se no raciocínio de que ações mitigadoras podem influenciar na pontuação da variável vazamento do produto, por exemplo, o fechamento automático de válvulas, detectores de vazamentos, etc. Com isto, quanto maior a quantidade de ações mitigadoras para evitar o vazamento do produto, maior será a pontuação da variável vazamento do produto, o que resultaria em uma diminuição no valor do FIV e por consequência o intervalo de valores do Risco aumentaria. No modelo Muhlbauer a influência do fechamento automático de válvulas é avaliado no índice do dano por operações incorretas.

Durante o preenchimento da informação necessária para os quatro índices de dano, observou-se que a referência [15] tinha informações requeridas para os índices de dano por corrosão, projeto e operações incorretas, mas, não tinha informações para as variáveis do índice de dano por terceiros. Neste cenário, para o duto A-G, considerou-se as avaliações subjetivas para as pontuações das variáveis do índice de dano por terceiro, objetivando prosseguir a análise de Risco. Sendo assim, com base nas informações das figuras 5.1 e 5.2, apresentam-se em seguida os resultados dos Riscos de danos por terceiros, corrosão, projeto e operações incorretas:

	Resultado
Soma de índices	234
FIV	11
Risco por danos de terceiros	4.6
Risco por dano de corrosão	5.6
Risco por dano de projeto	3.5
Risco por dano de operações incorretas	7.5
Risco total	21.3

Tabela 5.2: Resultados do Risco para o trecho A-G (1)

A tabela 5.2 é mais bem visualizada através da figura 5.3.

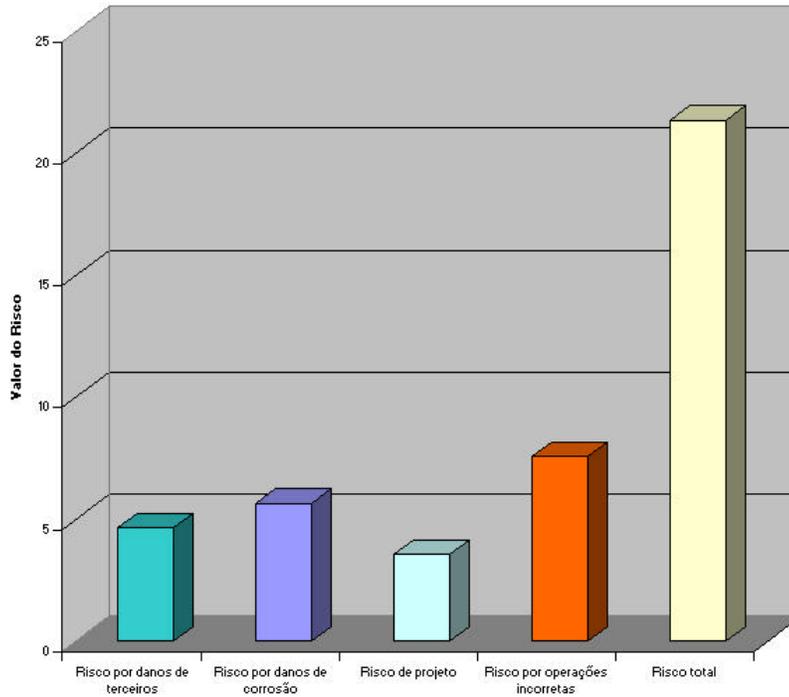


Figura 5.3: Influência do Risco por danos de terceiros, corrosão, projeto e operações incorretas no Risco total.

Desta figura, observa-se que o Risco por operações incorretas é a que mais influencia no Risco total. A primeira opção para diminuir o Risco poderia ser a realização de ações mitigadoras sobre este índice. No entanto, a figura 5.4 mostra que é recomendável realizar tarefas que diminuam o índice de danos por terceiros.

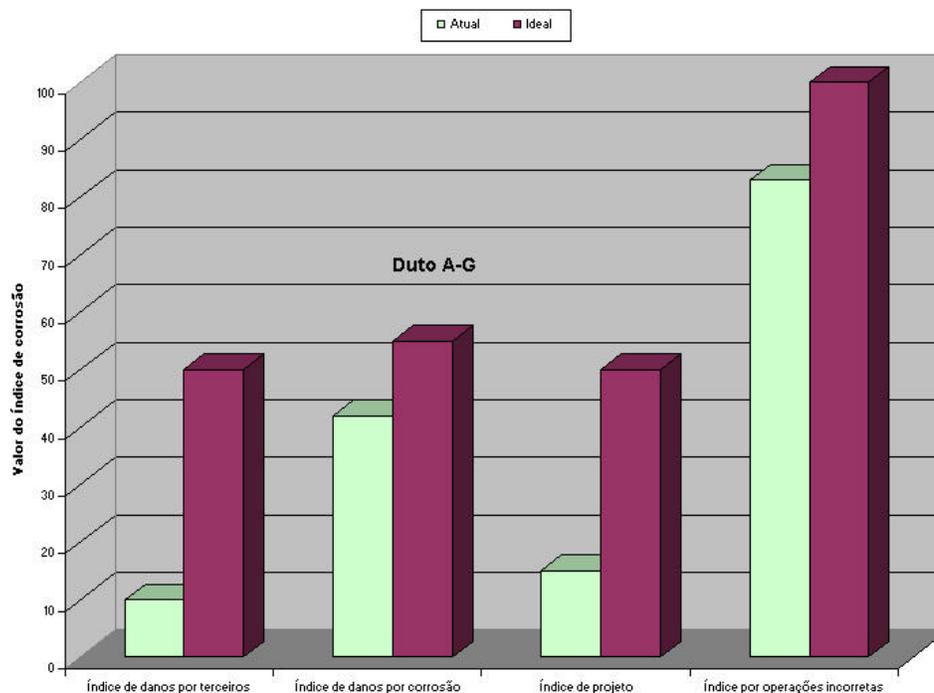


Figura 5.4: Resultado da pontuação de prevenção nos quatro índices.

Na figura 5.4, a barra de cor verde indica o valor do índice de prevenção utilizada no duto A-G e a barra escura indica o valor máximo possível que pode ser atingido. Assim, a diferença entre estas duas, indicará o que pode ser feito para diminuir o Risco. Na figura 5.4 observa-se que no índice de dano por terceiros existe uma maior possibilidade de realizar ações objetivando diminuir o Risco se comparada com a realização das tarefas do índice de operações incorretas. Assim, tarefas como o aumento da frequência de vigilância a uma vez por semana (atualmente considera-se que o duto tem vigilância de pelo menos uma vez ao mês) aumentaria a pontuação em 4 pontos. A realização dos programas de conscientização pública com encontros de uma vez ao ano, programa de comunicação regular com a comunidade e contato porta a porta, aumentaria a pontuação em sete pontos, etc.

O resultado do Risco total igual a 21.3, obtido na tabela 5.2, pode ser interpretado de duas formas.

Na primeira forma, observar-se que o resultado do Risco igual a 21.3 não está longe do limite superior do intervalo de valores que o Risco pode assumir que é de [0, 36.36], e como mencionado anteriormente, este limite superior é obtido para a melhor pontuação da soma de índices, que é de 400 e com um valor para FIV igual a 11. Considerando que a pontuação do FIV é um valor fixo desde o início da operação do duto, o nível do Risco será definido pelo nível da soma de índices. Assim, com base na pontuação soma de índices, que no duto A-G é igual a 234, que representa mais do 50% da pontuação máxima possível, pode ser interpretado como de nível médio, então o resultado do Risco igual a 21.3 pode-se considerar também como de nível médio.

A segunda forma de analisar os resultados da tabela 5.2 é baseada na matriz de Risco apresentada na figura 2.7. Nesta figura, a matriz de Risco que definirá o nível de Risco é baseado nos resultados do FIV e na soma de índices. Assim, com os valores de 11 e 234, para o FIV e a soma de índices respectivamente, o nível de Risco gerado por esta matriz seria de Risco alto. Nesta figura, também se observa, que com o valor

do FIV igual a 11, o nível de Risco para o duto A-G será sempre de nível alto, independente do valor da soma de índices, inclusive para um valor de índice igual a 400.

Destas duas opções de analisar os resultados dados na tabela 5.2, a primeira realiza uma análise de variação nos níveis de Risco baseado somente na variação nos resultados da soma de índices, enquanto, na segunda forma, a variação de níveis de Risco é baseada nas variações dos valores da soma de índices e do FIV. Com isto, o analista de Risco deverá decidir qual das duas gerará mais confiança nos resultados.

Para o mesmo duto AG, Pezzi [15] relata que mediante a aplicação do software IAP da BASS TRIGON obtém um nível de Risco *alto*, enquanto de acordo com as metodologias qualitativa e semi quantitativa da norma API 581, obtém-se os níveis de Risco *baixo e médio* respectivamente, tal como apresenta-se na seguinte figura.

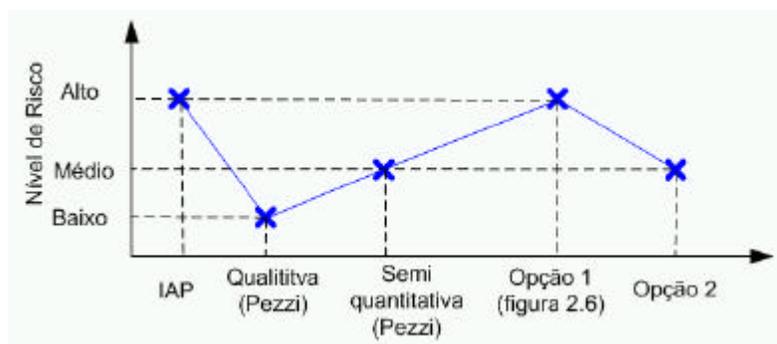


Figura 5.5: Comparação entre os resultados do Risco obtido por Pezzi [15] e o modelo Muhlbauer para o duto A-G

Destes cinco resultados, o nível de Risco apresentado pelo software IAP acredita-se que seja o resultado mais próximo da realidade para o duto AG, já que a metodologia do IAP é reconhecida a nível internacional por numerosas empresas operadoras de dutos. Considerando o exposto, o resultado que mais se aproxima do fornecido pelo IAP é dado pela matriz de Risco da figura 2.6, no entanto, apesar de existir coincidências nos resultados para o nível de Risco, estas duas metodologias apresentam algumas diferenças durante o procedimento de avaliação, como por

exemplo, o IAP considera na sua análise a avaliação do Risco ambiental, enquanto, na análise do resultado da primeira opção não é avaliada.

No que diz respeito aos resultados do nível de Risco baixo e médio para o duto AG, obtidos das metodologias qualitativas e quantitativas da norma API 581 respectivamente, podem ser considerados como resultados aproximados. Esta norma não é aplicável a sistemas de dutos, pois não considera a análise de dano por terceiros, a qual segundo as estatísticas é uma das razões importantes na falha de um duto.

A representação do Risco alto para o duto AG, calculado por Pezzi [15] mediante o software IAP, não facilita a tomada de decisão para a realização de ações mitigadoras, já que não indicam quais são os tipos de danos mais críticos. Isto não sucede quando o Risco é avaliado segundo o modelo de Muhlbauer, já que nele pode-se saber quais os tipos de danos são os mais influentes e em quais é possível realizar ações mitigadoras, tal como apresenta-se nas figuras 5.3 e 5.4.

Toda a análise até agora realizada foi somente avaliada mediante o modelo Muhlbauer, isto é, mediante as avaliações das expressões 2.1, 2.2 e 2.3 que consistem em operações de soma e divisão. No entanto, no capítulo três e quatro desta tese, introduziu-se a lógica fuzzy na avaliação do Risco em sistemas de tubulação mediante a inferência Mamdani e a teoria dos números fuzzy objetivando incorporar as incertezas das variáveis e/ou as regras do tipo SE-ENTÃO na solução do problema do Risco. Sendo assim, na continuação destas análises se fará uma análise considerando este tópico, e para facilitar a análise, se considerará somente o Risco por corrosão. Isto significa, que somente se avaliarão as variáveis do índice de dano por corrosão e do FIV. Sendo assim, se levará em consideração que o valor do índice de dano por corrosão é igual a 62 pontos e que Risco por corrosão é igual a 5.6, ambos obtidos pelo método Muhlbauer (ver tabela 5.2). Baseado nas informações das figuras 5.1 e 5.2, a seguir se mencionarão as regras fuzzy que foram ativadas para gerarem os valores da pontuação do índice de dano por corrosão e do FIV gerados pelo primeiro modelo apresentado no capítulo quarto.

Com os valores iguais a três e nove das pontuações das variáveis corrosividade do produto e proteção interna respectivamente, a pontuação da variável proteção interna, gerada pelo SLF com nome Corrosão interna (ver figura 4.11 ou tabela 4.1) é igual a 12. Este resultado é obtido pela ativação da seguinte regra: *Se corrosividade do produto é medianamente corrosivo e proteção interna é dado por monitoramento interno, injeção de inibidor e operações de medição, então, Risco por corrosão interna é de nível regular.* Neste caso, somente uma regra foi ativada das 40 que existem no SLF.

No SLF com nome Ambiente, os valores três e zero da variável corrosividade do produto e corrosividade do solo respectivamente, geram o valor de quatro como pontuação da variável Ambiente. Este resultado foi obtido pela ativação da regra: *Se corrosividade do produto é medianamente corrosivo e corrosividade do solo é de baixa resistividade, então, ambiente é medianamente corrosivo.*

Da realização destas duas análises de regras ativadas pelos SLF, observa-se que o valor lingüístico medianamente corrosivo tem diferentes pontuações para a variável ambiente e corrosividade do produto. Isto sucede, porque as duas variáveis influenciam no Risco da mesma forma, promovendo a corrosão, no entanto, com diferentes graus de influência.

Outra regra ativada com os dados da variável ambiente igual a quatro (obtido anteriormente) e para a variável %MAOP (pressão de operação / MAOP) igual a 98 %, o resultado do efeito da corrosão mecânica é igual a um. A regra ativada neste caso é: *Se Ambiente é medianamente corrosivo e MAOP é plena operação, então, o Efeito da corrosão mecânica é alto.* Neste caso, observa-se que o valor % MAOP igual a 98% encontra-se no limite do trabalho máximo permissível, caso esta se reduza a 75 % o valor do efeito da corrosão mecânica aumentaria para 2, o que significaria que o valor lingüístico da variável Efeito da corrosão mecânica seria de médio - alto. Este SLF somente considera duas variáveis do tipo atributos, o que significa que o seu valor lingüístico não pode ser alterado.

O SLF com nome Atributos da CA gera a pontuação igual 8.8, quando as pontuações das variáveis localização da tubulação e tipo de atmosfera são iguais a 3 e 6 respectivamente. Neste, a regra ativada foi a: *Se a localização do duto é boa e o tipo de atmosfera é mais ou menos severo (alta umidade e alta temperatura), então, o índice de atributos para corrosão atmosférica é médio.*

No seguinte, o SLF com nome condição do revestimento para corrosão atmosférica gera uma pontuação de 4.65, quando as pontuações das variáveis: qualidade, aplicação, inspeção e manutenção do defeito forem iguais a 1.25, a regra ativada é a seguinte: *Se qualidade do “r” (r = revestimento) é bom e aplicação do “r” é bom e inspeção do “r” é bom e manutenção do “r” é bom, então, condição do “r” é bom.*

Com os dados da variável distância de testes LEDS e frequência de leitura de testes iguais a zero e um, respectivamente, o SLF de nome testes dirigidos gera uma pontuação igual a 0.42, mediante a ativação da seguinte regra fuzzy: *Se a distância entre testes é longe e a frequência de inspeção é realizada algumas vezes, então, o teste dirigido é ruim.*

Os dois seguintes SLF com nomes prevenção de CTE e atributos de CTE geram resultados 26.4 e 8 respectivamente. Estes dois SLF têm 5 variáveis lingüísticas de entrada, a primeira tem 360 regras e a segunda 960 regras fuzzy. O primeiro SLF ativa 16 regras fuzzy para obter a resposta de 26.8, enquanto, a segunda ativa somente uma regra fuzzy para obter o valor de oito.

Em seguida se analisarão as variáveis associadas aos SLF que avaliam o FIV.

Com os dados das figuras 5.1 e 5.2 para inflamabilidade (3 pontos), reatividade (zero pontos) e toxicidade (dois pontos), o SLF com nome perigo imediato gera a pontuação igual a 5. Com estes dados de entrada a regra fuzzy ativada é: *Se*

*inflamabilidade é moderado e reatividade é estável e toxicidade é médio, então, o perigo do produto é médio.*

Baseado no resultado anterior, no qual a pontuação do perigo do produto é igual a 5, além, com a pontuação igual a seis para a variável perigo crônico, dado na tabela 5.2, o SLF com nome perigo total, gera a pontuação igual a 11.2. Neste caso ativou-se duas regras fuzzy das 42 existentes.

Finalmente, com as pontuações iguais a um para as variáveis, quantidade do produto vazado e nível de população, o SLF com nome dispersão gera a pontuação igual a um, através da ativação da regra fuzzy: *Se quantidade do produto vazado é alta e nível de população é baixo, então, a dispersão é alta.*

Em resumo, com 29 regras fuzzy ativadas, nos 16 SLF do primeiro modelo proposto para avaliar o Risco por corrosão, segundo os dados para as variáveis do índice de dano por corrosão e do FIV, o resultado gerado pelo primeiro modelo para o Risco por corrosão é igual a 27.4, para o FIV o resultado foi igual a 6.6 e para soma de índice por corrosão igual a 70. Comparando estes valores com os valores 5.63, 11 e 62 obtidos segundo o método Muhlbauer, pode-se observar um erro de 380%, 40% e 12% para o Risco por corrosão, FIV e soma de índice por corrosão respectivamente. Com os mesmos dados de entrada, os resultados do Risco por corrosão, FIV e soma de índices, gerados pelo segundo modelo composto por 25 SLF, são 7.3, 12.5 e 66.4 respectivamente, o que origina erros de 30%, 13% e 7%. Como se observa, os erros no segundo modelo, são muito menores que no primeiro, no entanto, ele perde a generalidade na análise do primeiro modelo, assim regras tipo: *Se a localização do duto é boa e o tipo de atmosfera é mais o menos severa, então, o índice de atributos para corrosão atmosférica é média*, serão substituídas por regras do tipo: *Se a localização do duto é  $A_i$  e o tipo de atmosfera é  $B_i$ , então, o índice de atributos para corrosão atmosférica é  $C_i$* , no qual  $A_i$ ,  $B_i$  e  $C_i$  são conjuntos fuzzy com difícil interpretação lingüísticas.

Nas avaliações das variáveis do trecho A-G (figuras 5.1 e 5.2) algumas variáveis podem estar rodeadas de incertezas, p. ex: a variável *Interferência de AC* avaliada inicialmente com um valor de **4**, pode-se assumir que esta variável alcance valores **3** ou **5**. A incorporação desta incerteza faz com que o resultado do Risco seja representado também mediante um valor com incerteza. Como caso de estudo, se considerará que no duto A-G, as avaliações das variáveis: *Interferência de AC*, *Estudo de casos especiais*, *Produto da corrosividade e Perigo crônico* apresentem uma incerteza de  $\pm 1$  nas suas avaliações. A influência no resultado do Risco depois de incorporar estas incertezas apresenta-se na figura 5.6, linha vermelha, enquanto, que a linha azul representa o valor do Risco sem as incertezas de  $\pm 1$ .

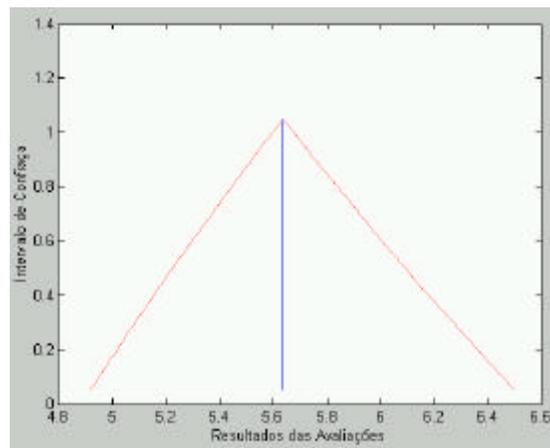


Figura 5.6: Resultados de Risco obtidos quando se introduz incerteza em 3 variáveis do índice de dano por corrosão e 2 variáveis do FIV.

Da figura 5.6 pode-se observar, que na situação mais pessimista (quando o intervalo de confiança igual a zero) o valor do Risco por corrosão, gerado pelo terceiro modelo, encontra-se no intervalo [4.8, 6.5], e no caso mais otimista (quando o intervalo de confiança é igual a 1) o valor do Risco coincide com o valor dado pelo método de Muhlbauer. Assim, o resultado final gerado pelo terceiro modelo converge com o resultado dado pelo modelo de Muhlbauer quando o intervalo de confiança alcançar o valor de um. Esta convergência pode ser obtida também no primeiro modelo

mediante o aumento da quantidade de conjuntos fuzzy, como for realizado no segundo modelo.

De forma similar ao realizado no índice de dano por corrosão; os modelos explicados nos capítulos quatro podem ser aplicados nos outros três índices de dano objetivando conhecer o Risco baseado no modelo Muhlbauer. Da aplicação dos três modelos no duto AG, obtém-se os seguintes resultados:

	Soma de índices	FIV	Risco
Modelo Muhlbauer	234	11	21.3
Primeiro modelo	208	6.6	94.8
Segundo modelo	228	12.2	19.6
Modelo 3 ( $\alpha=0$ ) MC	250.1	8.1	30.8
Modelo 3 ( $\alpha=0$ ) PC	211.5	14.7	14.3

Tabela 5.3: Resultado do Risco total no duto A-G (2)

A tabela 5.3, mostra que os resultados do segundo modelo são mais aproximados aos resultados gerados pelo modelo Muhlbauer, se comparados ao primeiro modelo, tal como mencionado no capítulo quatro. No que diz respeito ao terceiro modelo, a tabela 5.3 indica os resultados para quando o intervalo de confiança é igual a zero ( $\alpha=0$ ). Assim, na quarta fila da tabela 5.3 apresentam-se os resultados para o melhor cenário (MC), isto é, quanto se tem o maior valor para a soma de índices e menor valor para o FIV, já na sexta fila, apresenta-se os resultados para o pior cenário (PC). No caso onde  $\alpha$  fosse igual a 1, os resultados gerados pelo terceiro modelo coincidiriam com os gerados pelo Modelo Muhlbauer. Para obter os resultados baseados no terceiro modelo, considerou-se uma dispersão esquerda e direita ( $\alpha$  e  $\beta$  respectivamente da figura 3.30) iguais a 10% do valor meio “a” apresentado na figura 3.30.

Com os resultados da tabela 5.3, na figura 5.7 apresenta-se os níveis de Risco do duto A-G obtido com base na matriz de Risco estabelecida na figura 2.6.

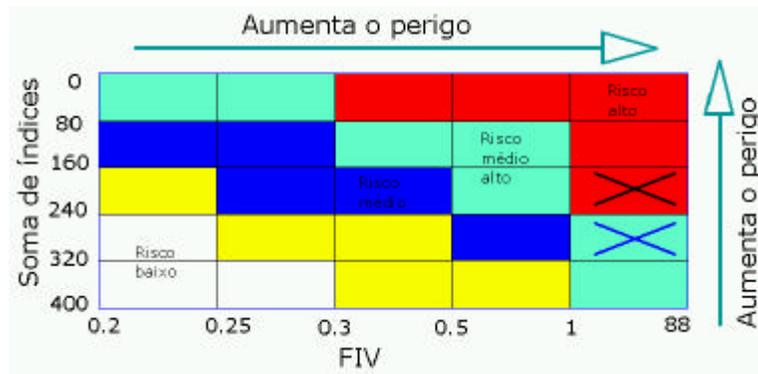


Figura 5.7: Níveis de Risco do duto A-G com base nos resultados dos três modelos explicados nos capítulo quatro.

Nela, observa-se que os resultados obtidos mediante o modelo Muhlbauer, primeiro, segundo e terceiro (PC) modelo indicam um nível de Risco alto, enquanto que o resultado do terceiro modelo (MC) indica que o duto A-G tem um nível de Risco igual a médio alto. Sendo assim, ainda que os resultados da tabela 5.3 apresentem diferentes resultados numéricos para os três modelos, estas indicam o mesmo nível de Risco. No entanto, os resultados destes níveis podem ser diferentes se fosse utilizada outra matriz de Risco, por exemplo, segundo a matriz de Risco apresentada na figura 2.7, os cinco resultados da tabela 5.3 indicam nível de Risco alto para o duto AG.

Na figura 5.8 apresenta-se uma comparação gráfica entre os resultados obtidos por Pezzi [15] e os mostrados na figura 5.7.

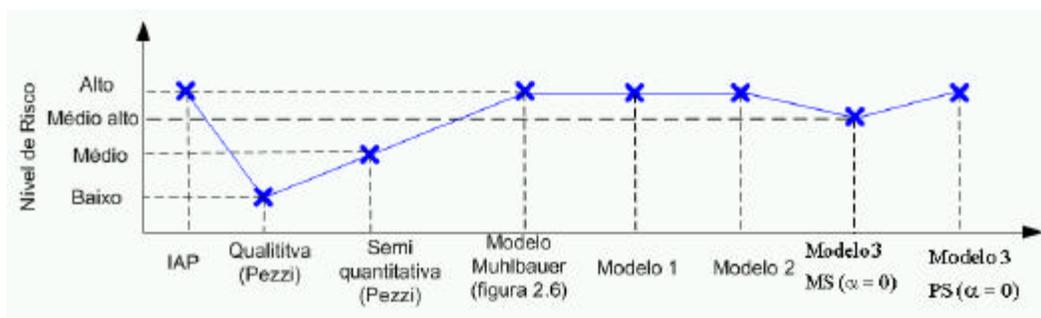


Figura 5.8: Comparação entre os resultados do nível de Risco obtido por Pezzi [15], modelo Muhlbauer e os três modelos mencionados no capítulo quatro.

Considerando que o resultado obtido pelo IAP seja o resultado mais confiável, os resultados do primeiro, segundo e terceiro (PS e MS) modelo são mais próximos ao

do modelo IAP, se comparados com os resultados obtidos pelo método qualitativo e semiquantitativo da norma API 581 obtido por Pezzi [15].

### 5.1.1

#### **ANALISE DE BENEFICIO/CUSTO NO DUTO A-G**

Na falta de informações do investimento realizado na execução das tarefas preventivas, se consideraram os valores dados na tabela 2.5 como uma referência nos investimentos necessários na realização das tarefas das nove variáveis do índice de dano por corrosão de duto enterrado.

Para facilitar a análise de B/C se utilizará o aplicativo explicado em 2.4. As pontuações dadas às variáveis preventivas e atributivas serão obtidas da figura 5.1 e 5.2, e os custos realizados nas atividades preventivas no duto A-G são apresentados na figura 5.9.

Da figura 5.9 observa-se que com um investimento igual a 62 UM obtém-se um benefício de 28 pontos, no entanto, a partir de uma análise de B/C conclui-se que com um investimento igual a 36 UM pode-se obter o mesmo benefício (figura 5.10). A otimização no investimento consegue-se realizando inspeções com PIG a cada ano ao invés de ter um bom programa que avalie a condição do revestimento,

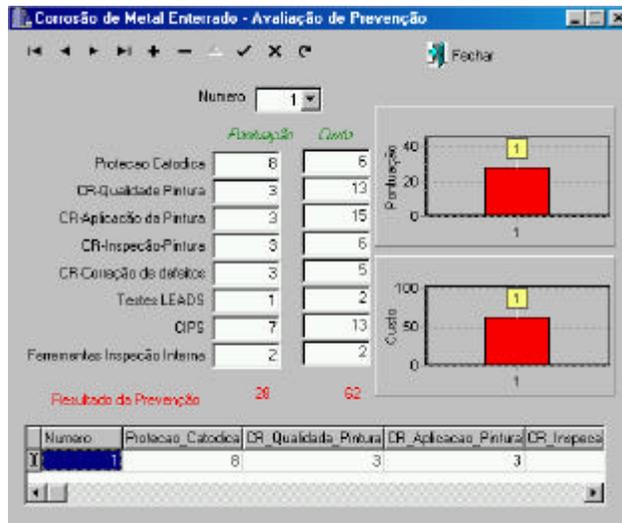


Figura 5.9: Pontuações e custos das oito variáveis do índice de dano por corrosão de duto enterrado.

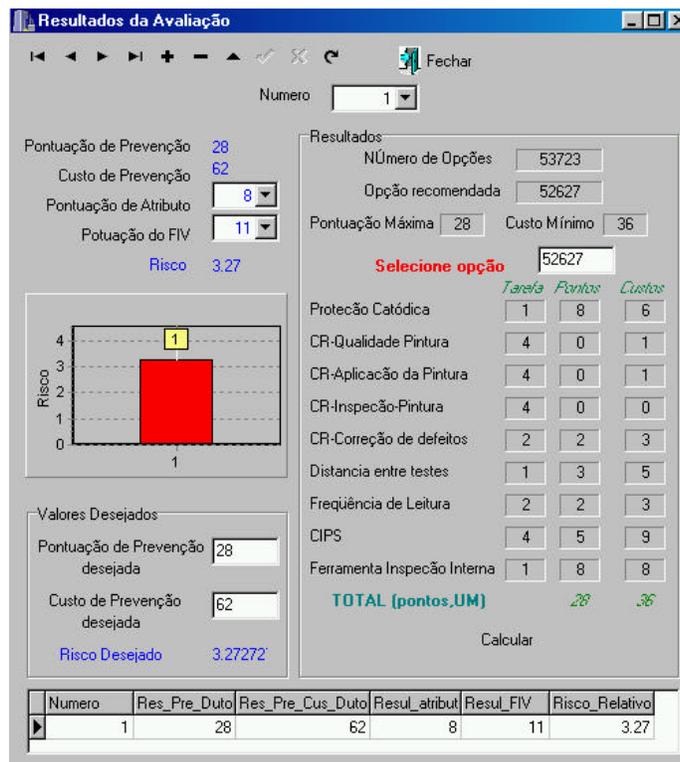


Figura 5.10: Resultados da análise Benefício/Custo para o Duto A-G.

Uma outra análise indica que com o mesmo investimento, de 62 UM, pode-se obter um benefício igual a 38 pontos, o que significa um aumento em 10 pontos. Isto é obtido realizando inspeção com PIG e estudos de perda de potencial a cada ano ao invés de investir na qualidade e aplicação do revestimento no duto.

Contudo, a alteração de algumas tarefas preventivas por outras tarefas produz uma melhora no benefício, no entanto, muitas vezes a análise de B/C não são realizados nas empresas operadoras de dutos, pois, estas preferem realizar um alto investimento econômico na execução das tarefas preventivas, a pagar multas provenientes de uma falha no duto, que na maioria dos casos são muito elevados. Por exemplo, o vazamento de quatro milhões de litros de óleo no Rio Iguaçu, no dia 16 de julho do ano 2000, originaram as multas administrativas impostas pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), no valor de R\$ 40 milhões, e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), de R\$ 168 milhões. A primeira já foi paga pela empresa de petróleo estatal brasileira, PETROBRAS, que recorreu da segunda, alegando duplicidade de sanções [42].

### 5.1.2

#### **CÁLCULO DO TEMPO DE INSPEÇÃO DEVIDO AO DANO POR CORROSÃO EXTERNA**

Com base no aplicativo exposto em 2.6.3 se procederá ao cálculo do tempo de inspeção, no duto AG que apresenta um defeito longitudinal externo devido a corrosão. A influência de outros tipos de danos como a fadiga, trincas, etc., não serão considerados neste trabalho. Os dados referentes à propriedade do material, dimensões geométricas do duto e do defeito, taxa de corrosão, tempo de operação do duto e pressão de operação serão obtidos da referência [15]. No que diz respeito ao coeficiente de segurança (**CS**) se considerará como igual a um, enquanto o resultado do Risco será referente a corrosão externa de duto enterrado, apresentado nas figuras 5.1 e 5.2. Para determinar o nível de Risco do duto será utilizada a matriz de Risco apresentada na figura 2.15. Com isto, os resultados para a soma dos índices igual a 36, correspondente à parte de corrosão de duto enterrado, e para o **FIV** igual a 11, da

figura 2.15 obtêm-se um Risco igual a quatro, que representa um nível de *médio alto*. Na figura 5.9 apresentam-se os resultados gerados pelo aplicativo.

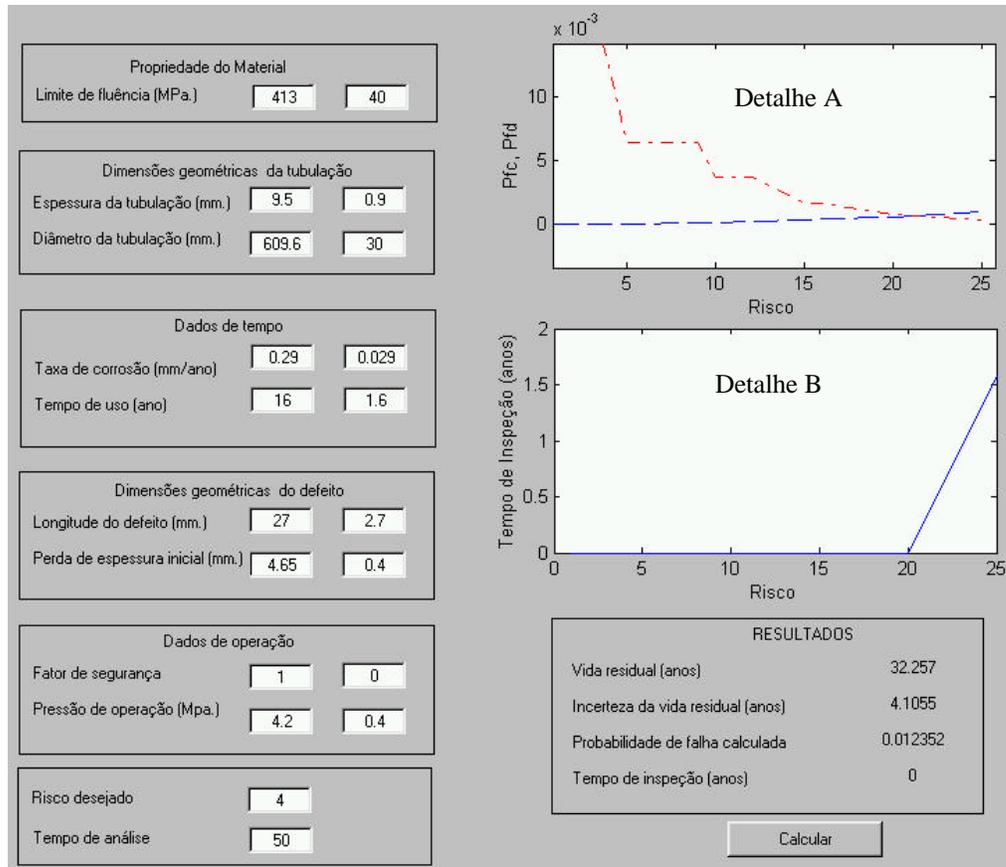


Figura 5.11: Resultado do tempo de inspeção para o duto A-G.

Nesta figura, o primeiro gráfico gerado pelo aplicativo (detalhe A da figura 5.11) indica que o duto AG pode operar em um Risco maior que 20, já que para Riscos iguais a 20 e 25 a **Pfd** é maior ou igual que **Pfc**, enquanto, para os outros Risco (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15 e 16) a **Pfd** é menor a **Pfc**. Assim, o duto AG, que tem um Risco igual a quatro, é impedido por ter sua **Pfc** maior que a **Pfd** (1.2 % maior a  $5 \times 10^{-6}$  %). Entretanto, se através da realização de ações preventivas no duto AG, o Risco for modificado (de quatro para vinte, isto é, do ponto A ao A1 na figura 5.10), permitirá que o duto continue a operar. Esta mudança de Risco implica uma alteração do valor do FIV de 11 para 0.3, no entanto, como mencionado anteriormente, o FIV é muito difícil de ser modificado, sendo assim, a única possibilidade de modificar o

Risco é mediante a alteração do valor da soma de índices de 36 para 48, tal como se apresenta na figura 5.12 (do ponto **A** para **A2**). Esta modificação da soma de índices fará com que o Risco mude de quatro para cinco, no entanto, será insuficiente por que a que sua **Pfc** ainda é maior a **Pfd** (ver figura 5.11).



Figura 5.12: Matriz de Risco para o dano por corrosão no duto A-G enterrado.

Sendo assim, para o duto AG recomenda-se variar o valor do FIV de 1.11 para um valor menor que 0.3, através de ações como a troca de fluido ou a realização de investimento para modificar a classe de operação, além, de aumentar o valor do índice de dano por corrosão de 36 a 48 pontos.

O segundo gráfico (detalhe B na figura 5.11) apresenta os resultados do tempo de inspeção, **TI**, para os diferentes Riscos. Por exemplo, quando o Risco for igual a 20, o **TI** será igual zero anos, para Risco 25 o tempo de inspeção será 1.5 anos. O aumento do **TI** de zero para 1.5 anos é com base na mudança do Risco de 20 para 25, o que significa realizar investimento para modificar o valor da soma de índices e do FIV.

Na parte inferior do segundo gráfico (figura 5.11), encontram-se os resultados. Nele observa-se que a vida residual do duto é de 32.2 anos, este resultado é obtido considerando uma taxa de corrosão radial constante. Este resultado é diferente de um outro, obtido segundo o modelo proposto por Freire [64], no qual a vida residual para as mesmas condições do duto AG é igual a 2 anos. Para o cálculo da vida residual, Freire considera as avaliações subjetivas de valores lingüísticos para a variável idade,

tensão, meio agressor, histórico do duto e o tempo da última inspeção realizada, Com estas avaliações e a inferência Mamdani da lógica fuzzy, Freire propõe um modelo básico para a determinação da vida residual de um duto exposto a dano por corrosão externa. As diferenças entre estes dois modelos, Kiefner (ver 2.6.1) e Freire [64], são: no primeiro considera as informações sobre o defeito externo do duto e pressão de operação, enquanto o segundo não a utiliza. No entanto, o segundo modelo considera as variáveis do histórico da corrosão do duto e o tempo transcorrido da última inspeção no duto que não são considerados no primeiro modelo. A influência destas duas variáveis no cálculo da vida residual é melhor realizada mediante modelos subjetivos, por exemplo, as regras do tipo SE-ENTÃO da lógica fuzzy, já que não existe um procedimento estabelecido para realizá-lo mediante a modelos quantitativos. Outra diferença entre estes dois modelos, é que o primeiro utiliza a variável taxa de corrosão radial, enquanto o segundo considera a variável tipo de ambiente, variável que influencia na taxa de corrosão.

Outros resultados obtidos do aplicativo (ver 2.6.3) são mencionados a seguir, na figura 5.13 apresenta-se a variação da **Pa**, **Po** e (**Pa-Po**) em função do tempo, na qual, a linha de cor azul representa a variação de **Pa**, a vermelha de **Po**, enquanto a verde a diferença entre **Pa** e **Po**,

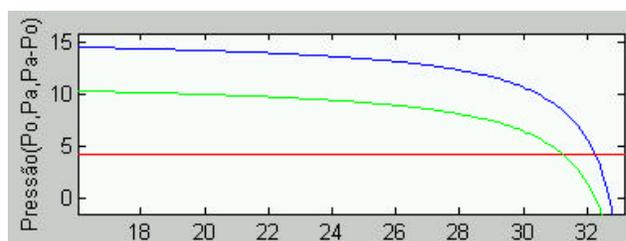


Figura 5.13: Variação da pressão admissível e de operação em função do tempo.

Na figura (5.13) observa-se que quando o tempo é igual a 32.2, a **Pa** (linha cor azul) torna-se igual a **Po** (linha cor vermelha), o que significa que o duto **AG** já não deveria continuar em operação. Menciona-se também que os resultados de **Pa** foram obtidos para um fator de segurança, **F**, igual a um, sendo assim, outros valores para **F**

poderiam modificar o resultado da vida residual do duto. Na figura 5.13, a variação de  $\mathbf{Pa-Po}$  é representado pela linha de cor verde. Na figura 5.14 apresenta-se a incerteza de  $\mathbf{Pa -Po}$  em função do tempo  $\mathbf{T}$ .

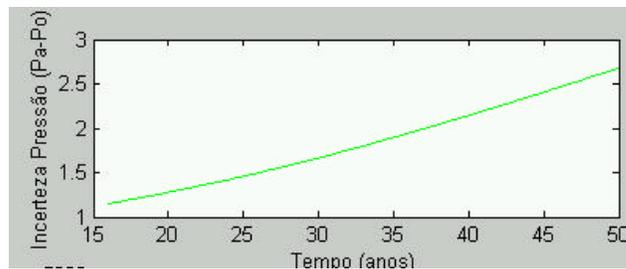


Figura 5.14: Variação da incerteza de  $\mathbf{Pa-Pa}$  em função do tempo .

Nela (figura 5.14) observa-se que conforme aumenta o tempo aumenta também a incerteza da  $\mathbf{Pa-Po}$ . Por exemplo, após transcorrido um tempo de 32.2 anos o duto AG estará no limite de operação em segurança. No entanto, devido a incerteza de  $\mathbf{Pa}$  e  $\mathbf{Po}$ , o duto pode já estar operando na área de falha. O resultado gráfico da figura 5.14 foi obtido supondo um coeficiente de variação para todas as variáveis independentes igual a 10% do valor médio, isto, por que na referência [15] não se menciona nenhuma informação acerca das incertezas. Na figura 5.15 apresenta-se a função densidade das variáveis aleatórias do tipo normal  $\overline{Po}$  (linha vermelha) e  $\overline{Pa}$  (linha azul).

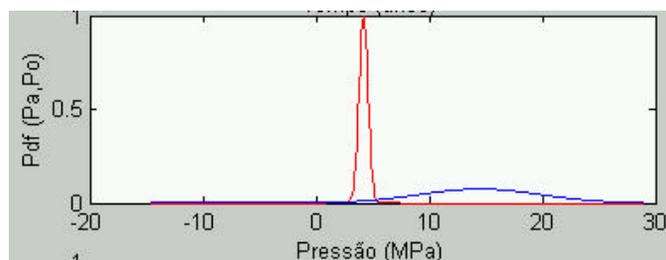


Figura 5.15: Função de densidade das variáveis aleatórias  $\mathbf{Pa}$  e  $\mathbf{Po}$ .

A influência da pressão de operação,  $\mathbf{Po}$ , na vida residual é apresentado na figura 5.16.

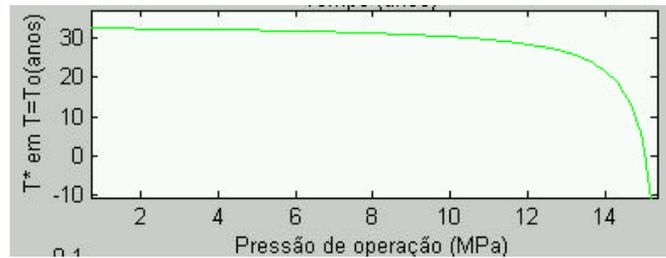


Figura 5.16: Variação da vida residual em função da pressão de operação.

Esta figura indica que o aumento de pressão da operação (**Po**) de treze para quinze MPa no duto AG origina uma brusca diminuição da vida residual. Por outro lado, o aumento da pressão de operação de 4.2 a 12 MPa reduz a vida residual de 32.2 para aproximadamente 30 anos, Isto permite ter uma grande possibilidade para escolher **Po** sem ocasionar o aumento do Risco de falha do duto. Esta gráfica mostra que não é recomendável diminuir a pressão de operação para valores menores de quatro MPa , já que o ganho da vida residual seria muito pouco.

Na figura 5.17 apresentam-se dois gráficos, o primeiro é a função de densidade acumulada e o segundo da função densidade, ambas referentes a variável aleatória da vida residual avaliada no tempo inicial, **To**.

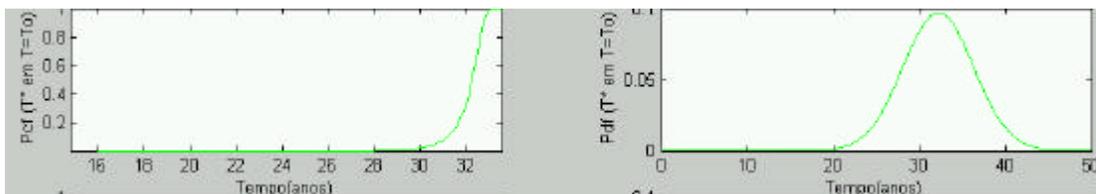


Figura 5.17: Função de densidade acumulada e função de densidade da variável aleatória vida residual.

O cálculo gráfico da **Pfc** é apresentado na figura 5.18. Nesta figura, observam-se os gráficos da função densidade das variáveis aleatórias tipo normal de  $\overline{VD}$  e  $\overline{T^*}$ , na qual, a área de interseção destes dois gráficos será igual a **Pfc**.

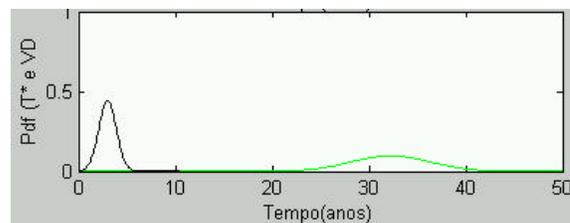


Figura 5.18: Função densidade para as variáveis aleatórias vida residual e vida desejada.

## 5.2

### ANÁLISE DE RISCO DO DUTO B-A, C-A e X-B

Depois de preencher as planilhas com os dados requeridos para avaliar o Risco segundo o modelo de Muhlbauer para os três trechos, além do trecho A-G, na tabela 5.4 apresentam-se os resultados obtidos:

	Trecho B-A	Trecho C-A	Trecho X-B	Trecho A-G
Índice de dano por terceiros	51	54	51	51
Índice de dano por corrosão	62	62	69	62
Índice de dano por projeto	61	61	70	39
Índice de dano por operações incorretas	83	83	83	83
FIV	11	22	5.5	11
Risco Total	23.3	11.8	49.6	21.3

Tabela 5.4: Resultados de Risco para os quatro trechos.

Dos resultados da tabela 5.4 observa-se que o resultado do FIV para os trechos C-A e X-B são diferentes dos resultados dos trechos B-A e A-G. Isto ocorre por que o trecho C-A tem uma classe de população nível dois e o trecho X-B apresenta uma pontuação para a variável quantidade do produto vazado igual a dois, enquanto que os trechos B-A e A-G apresentam uma classe de população nível um e uma pontuação para a variável quantidade do produto vazado igual a um.

Considerando que os valores do FIV para os quatro trechos permanecem inalteráveis desde o início de operação até o fim de sua vida útil, os intervalos de valores para o Risco nos quatro trechos são apresentados na seguinte tabela:

Trecho	Para o FIV igual a:	Intervalo de valores para o Risco	
		Valor do Risco para o pior caso (soma de índices igual a zero)	Valor do Risco para o melhor caso (soma de índices igual a 400)
B-A	11	0	36.6
C-A	22	0	18.1
X-B	5.5	0	72.7
A-G	11	0	36.6.

Tabela 5.5: Cálculo do intervalo de valores para o Risco nos quatro trechos.

Considerando o valor do Risco, quando a soma de índices for igual a 400, como o melhor caso (tabelas 5.5), na tabela 5.6 apresentam-se os resultados do Risco de cada trecho dividido pelo resultado do melhor caso (tabela 5.5, coluna quatro).

Trecho	Risco obtido para cada trecho	Risco no melhor caso (quando a soma de índices é igual a 400)	$R = \frac{\text{Risco obtido}}{\text{Risco no melhor caso}}$
B-A	23.3	36.6	63.6 %
C-A	11.8	18.1	65.1 %
X-B	49.6	72.7	68.2 %
A-G	21.3	36.6	58.1 %

Tabela 5.6: Cálculo da relação entre o Risco avaliado para cada trecho e o Risco mínimo possível.

Dos resultados da tabela 5.6 observa-se que os quatro trechos apresentam valores similares para R ( $R = \text{Risco obtido} / \text{Risco no melhor caso}$ ) apesar de existir uma grande diferença nos resultados para o Risco. O valor de R pode ser interpretado como um parâmetro para definir o nível de Risco, sendo que, zero seria um Risco muito alto e o valor de um seria Risco muito baixo. Assim, com os resultados obtidos para R dos quatro trechos, pode-se concluir que os trechos apresentem nível médio.

No entanto, se a análise for feita considerando a figura 2.7 do capítulo dois, os quatro trechos teriam o nível de Risco alto, já que os valores do FIV são maiores a um.

### 5.2.1

#### **CÁLCULO DO TEMPO DE INSPEÇÃO DEVIDO AO DANO POR CORROSÃO EXTERNA NOS DUTOS B-A, C-A E X-B**

De forma similar ao realizado na determinação do tempo de inspeção no duto A-G se realizará nos dutos B-A, C-A e X-B, na tabela 5.6, apresenta-se os resultados obtidos para a vida residual e o tempo de inspeção segundo os resultados de Risco de corrosão externa obtidas para cada duto.

	B-A	C-A	X-B
Soma de índices para a corrosão atmosférica	36	36	43
FIV	11	22	5.5
Risco (avaliado da figura 2.15)	4	4	4
Vida residual	29.9	45.4	1.59
Tempo de inspeção	0	0.16	0

Tabela 5.7: Resultados do tempo de inspeção para os trechos B-A, C-A e X-B.

Da tabela 5.7 conclui-se que o duto B-A e X-B deveriam deixar de operar, já que a **Pfc** é maior a **Pfd** para os Riscos avaliados. No que diz respeito ao duto C-A, apesar de possuir um Risco igual a quatro, pertencente ao nível alto, os resultados indicam que pode continuar operando. No entanto, um programa de inspeção devem ser programado para dentro de 0.16 anos. A aprovação da operacionalidade do duto C-A deve-se principalmente baixa taxa de corrosão que apresenta, 0.14 mpy, se comparados com 3.44 e 0.42 mpy dos outros dutos.

Observações finais dos quatro dutos:

- O duto X-B não tem informação de espessura realizada por PIG, já que o seu tempo de operação é de um ano. Sendo assim, a avaliação da espessura é realizada através da taxa média de corrosão medida por CUPONS. Na referência [15] indica que esta taxa média é igual a 3.44 mpy, no entanto, considerando que a espessura do duto é de 5.5 mm, o tempo de vida remanescente seria de menos de dois anos. Com isto, recomenda-se reavaliar a taxa de corrosão no duto A-G.
- No cálculo do fator de segurança do duto nos quatro trechos, Muhlbauer recomenda avaliar a espessura do duto necessária para resistir a pressão interna e mais outros carregamentos externos, por exemplo, o peso da terra que cobre ao duto, tensões produzidas por mudanças de temperatura, etc. As avaliações realizadas nos quatro trechos somente consideraram a espessura necessária para suportar a pressão interna.
- No cálculo do Risco dos dutos B-A, C-A, X-B e A-G realizados na referência [15], considerou-se, na análise de Risco, as conseqüências ambientais que poderiam ocorrer pela ruptura de qualquer destes dutos. Neste trabalho não se

analisou a consequência ambiental já que, este tópico pertence ao módulo especializado que está fora do escopo da presente tese.

- Nos dutos B-A, C-A, X-B e A-G os valores das pressões de projeto são muito maiores que as máximas pressões de operações (MAOP), no entanto, no duto A-G, a pressão de projeto somente é ligeiramente maior ao MAOP. Com isto, recomenda-se verificar a informação da pressão de projeto do duto A-G.
- Na referência [15] menciona-se que o tipo de aço utilizado para a construção dos quatros trechos é o API-5L X-60.