

5 ESTIMATIVA DA TAXA DE CORROSÃO

No sistema dutoviário, a taxa de corrosão pode ser prevista ou medida através de: monitoramento por cupons de corrosão ou dispositivos elétricos; modelos mecanicistas⁴ [54] e comparação dos resultados obtidos em inspeções ILI. No entanto, este trabalho aborda somente as metodologias utilizadas para estimar a taxa de corrosão a partir dos resultados obtidos por inspeção por pig tendo em vista que é procedimento dos operadores a realização das inspeções internas nos dutos. Além disto, o valor estimado para a taxa de corrosão, a partir das profundidades registradas por pigs instrumentados, fornece uma visão mais geral quando comparada aos cupons de corrosão e são mais práticas que os modelos mecânicos, pois as equações que propiciam o cálculo da taxa podem ser implementadas em planilhas tipo *Excel* e/ou softwares de gerenciamento de dutos. Ou seja, com os algoritmos prontos o operador necessita apenas inserir os dados que deverão ser utilizados para estimar a taxa de corrosão.

A taxa de corrosão em dutos pode ser estimada a partir de uma única ou múltiplas inspeções internas com pig instrumentado. Nestes casos, o valor da taxa de corrosão é determinado pelas diferenças de profundidades relacionando-as a um intervalo de tempo. Quando é utilizada uma única inspeção ILI para o cálculo da taxa de corrosão, o intervalo de tempo é definido como o período, em anos, compreendido entre a inspeção e o início da operação do duto. Todavia, quando são empregados os dados reportados em duas inspeções ILI, o intervalo de tempo é definido como o período, em anos, compreendido entre a inspeção atual e a inspeção anterior que está sendo analisada.

A taxa de corrosão pode ser determinada a partir das diferenças de profundidades médias das corrosões existentes no trecho analisado ou das diferenças de profundidade para cada defeito. Ao empregar as diferenças individuais das perdas de metal, para estimar a taxa de corrosão, faz-se

⁴ Exemplo de modelo mecanicista: NORSOK.

necessário o mapeamento (*matching*⁵) de anomalias, seja por sinal⁶ ou por tabelas⁷. A qualidade do mapeamento é importante, pois uma correspondência de anomalias não confiável expressaria uma magnitude imprecisa, e até mesmo incorreta, do processo corrosivo. A correspondência de anomalias por tabela apresenta menor confiabilidade em relação à comparação por sinal, no entanto não requer habilidades para interpretar o sinal e, é adequada quando a população dos defeitos que será considerada para o cálculo da taxa é muito grande.

Este capítulo analisa e compara 4 metodologias adequadas para o cálculo da taxa de corrosão a partir dos resultados de inspeções ILI, utilizando ou não o mapeamento das anomalias por tabela. Os métodos que serão abordados seguem: Estimativa da Taxa de Corrosão baseada no Princípio de Atividade Local [14], Estimativa da Taxa de Corrosão baseada no Cálculo do Parâmetro (α) [15], Estimativa da Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança para a Média e Estimativa da Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo [16]. Vale informar que para implementar as equações destas metodologias como também realizar, quando necessário, o ajuste das distribuições da taxa de corrosão foram utilizados os *softwares Excel*⁸ e *EasyFit*⁹.

⁵ Mapeamento (*matching*) é a correspondência das anomalias registradas em inspeções ILI.

⁶ O mapeamento por sinal é definido como a correspondência das anomalias do duto a partir da comparação entre os sinais registrados pelo pig, através dos softwares fornecidos pelas empresas de inspeção ILI.

⁷ O mapeamento por tabela é definido como a correspondência das anomalias do duto a partir da comparação entre as tabelas de anomalias informadas no relatório de inspeção interna do pig.

⁸ Programa de planilha eletrônica desenvolvido pela *Microsoft*.

⁹ Programa desenvolvido pela *Mathwave* que permite o ajuste de dados à uma distribuição de probabilidade como também selecionar o melhor modelo.

5.1.

Taxa de Corrosão baseada no Princípio de Atividade Local [14]

Este método é baseado no Princípio de Atividade Local em que a taxa de corrosão pode ser determinada em função da perda de metal média da região adjacente ou vizinhança que está sendo analisada. O conceito de vizinhança é expresso por seu parâmetro (n) e pelas características de localização de cada duto, ou seja, é dependente da quantidade e distribuição dos defeitos. O parâmetro de vizinhança deve ser selecionado a partir de uma pesquisa onde se procura uma região que possa apresentar uma taxa de corrosão semelhante para seus defeitos e, muito provavelmente, um trecho onde um mesmo mecanismo de corrosão esteja atuando com a mesma intensidade.

Para o emprego do parâmetro de vizinhança (n), deve-se respeitar a seguinte condição: o número de defeitos adjacentes, como ilustrado na figura 5.1, deve ser maior ou igual a 3 ($n \geq 3$). O valor do parâmetro de vizinhança não é limitado. No entanto, recomenda-se utilizar um valor de n onde o comprimento médio do segmento, área destacada na figura 5.1, não seja superior a 1 - 2 km.

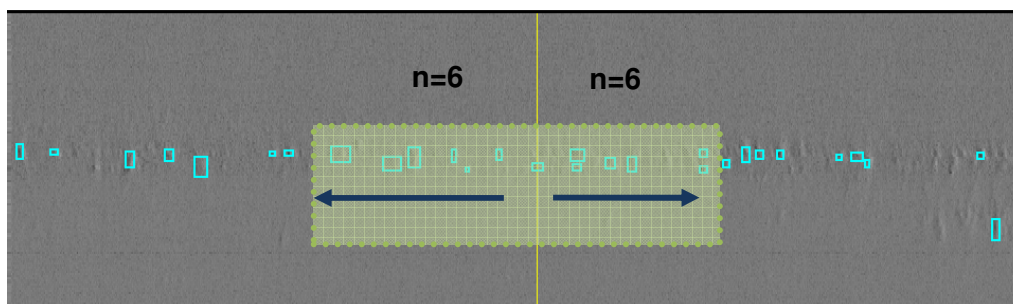


Figura 5.1 – Representação do parâmetro de vizinhança (n), para $n=6$

Para aplicação desta metodologia assume-se:

- Progressão linear do dano;
- Todas as corrosões externas ativas estão associadas com falhas no revestimento.

Em geral, a ocorrência da corrosão externa acontece pela ineficiência da proteção catódica associada a danos no revestimento externo do tubo. Ao assumir que as corrosões são originadas a partir da falha no revestimento, o método admite que a proteção catódica permanece estacionária durante o intervalo de tempo em que as inspeções ILI, que serão analisadas, foram realizadas no duto.

- Defeitos novos, consequentemente ainda pequenos¹⁰, são insignificantes e apenas corrosões ativas são consideradas.

A primeira suposição é explicada, pois o processo corrosivo inicial acarreta, geralmente, defeitos pequenos que não representam uma grande ameaça à integridade do duto ainda que a taxa de crescimento para os defeitos menores seja maior quando comparada aos defeitos de maior profundidade. Já a segunda suposição conduz que as profundidades reais da corrosão são crescentes ao longo do tempo.

- Os resultados que serão comparados devem ter sido obtidos de ferramentas com características semelhantes (tecnologia, exatidão ou acurácia dimensional, capacidade de detecção e outras especificações técnicas).

Para se obter uma estimativa da taxa de corrosão confiável é fundamental utilizar as perdas de metal detectadas por pigs com desempenhos similares, visto que as profundidades das anomalias são resultantes da profundidade real dos defeitos adicionada ao erro de medição ($d_{pig} = d_{real} + erro$). O erro de medição é oriundo da acurácia da ferramenta e dos diferentes métodos de identificação e dimensionamento (manual / automático), como também da técnica empregada na inspeção (Ultra-Som, MFL, Palito).

- As inspeções por pig instrumentado que serão comparadas deverão ter sido validadas através de correlação em campo.

A correlação em campo é realizada pelo operador do duto para localizar, identificar e inspecionar localmente uma amostra dos pontos informados na inspeção interna a fim de avaliar a incerteza e acurácia dos dados reportados. Assim, a validação das inspeções ILI indica que as dimensões informadas para as perdas de metal representam a profundidade, o comprimento e a largura real do defeito levando em consideração a acurácia da ferramenta. Logo, os dados proporcionarão estimativas de taxas de corrosão com confiabilidade conhecida.

¹⁰ Na referência [14] os autores citam apenas novos defeitos e não comentam sobre a magnitude da perda de metal.

- Duas amostras são usadas: uma para anomalias internas e outra para as externas.
- Quando há variação do tipo do revestimento (interno / externo), ainda, é recomendado subdividir as amostras tanto para as indicações de corrosão internas como para as externas;

Para aplicar as equações do método baseado no Princípio de Atividade Local, as amostras das inspeções 01 e 02 devem ser filtradas/ajustadas. O ajuste e o filtro de anomalias podem ser efetuados a partir da verificação da consistência dos dados, das avaliações e correções do erro sistemático de cada amostra e, de segmentações estratégicas. Cada um destes fatores será apresentado e discutido a seguir.

Para lidar com as imprecisões dos pigs e dos algoritmos utilizados para a análise e o dimensionamento das perdas de metal, o método que calcula a taxa de corrosão pelo Princípio de Atividade Local recomenda descartar defeitos que não atendam a equação [5.1].

$$d_i \geq \left(\frac{2 \cdot E_p}{1.28} \right) \quad [5.1]$$

Onde:

d_i = profundidade medida pelo pig (mm)

E_p = erro de medição [55] do pig (mm)

Aplicando a equação [5.1] para um pig que apresenta erro de medição igual a 1.0 mm, não serão utilizadas para o cálculo da taxa de corrosão as anomalias com profundidades menores que 1.56 mm. Para um duto com espessura de parede (w.t.¹¹) igual a 10 mm, os defeitos com profundidades inferiores a 16% w.t. não seriam considerados na estimativa da taxa de corrosão. Notar que este procedimento aumenta a profundidade média das amostras que serão utilizadas para estimar a taxa de corrosão.

Vale destacar que a equação [5.1] é válida para ferramentas com exatidão de 10%, com nível de confiança de 80%, assumindo ainda que a distribuição

das medições é uma distribuição normal cuja representação é mostrada na figura 5.2. Logo, o valor 1.28 da equação [5.1] representa o número de desvios padrões ao redor da perda de metal medida pelo pig.

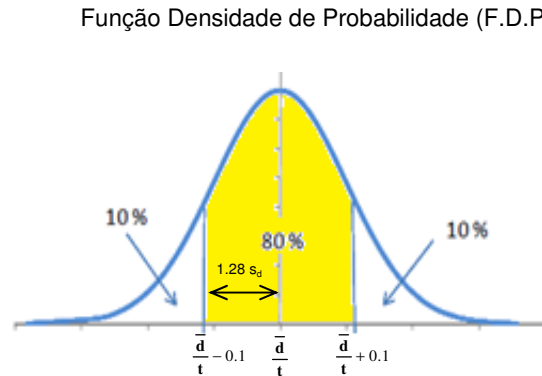


Figura 5.2 – Representação da distribuição normal para um pig com exatidão igual a 10% de t e nível de confiança igual a 80%

Portanto, o número de desvios padrões da equação [5.1] deve ser alterado caso a exatidão e o nível de confiança sejam diferentes de 10% t e 80%, respectivamente. Para calcular o número de desvios padrão (n_{std}) e o desvio padrão da ferramenta ($s_{(d/t)}$) pode-se aplicar as equações [5.2] e [5.3] apresentadas a seguir.

$$n_{std} = -\Phi^{-1}\left(\frac{1-NC}{2}\right) \quad [5.2]$$

$$s_{(d/t)} = \frac{\text{incerteza}_{-do_pig}}{n_{std}} \quad [5.3]$$

Onde:

n_{std} = número de desvios padrão

Φ^{-1} = distribuição normal padrão inversa

NC= nível de confiança

Por exemplo, para NC=80% determina-se pela distribuição normal que $n_{std}=1.28$. Assim, a partir da equação [5.3], para exatidão de 10% t , encontra-se que o desvio padrão da ferramenta ($s_{(d/t)}$) é igual a 7.8% t .

O registro e medição dos parâmetros dos defeitos de corrosão pelos pigs instrumentados podem apresentar tendência (*bias*), por isto o método que estima

¹¹ w.t. = wall thickness

a taxa de corrosão baseado no Princípio da Atividade Local determina que a tendência (*bias*) relativa à ferramenta deve ser identificada e corrigida, caso a mesma exista. Isto porque, através da tendência, que é a estimativa dos erros sistemáticos [55], é possível conhecer os erros inerentes ao dimensionamento e detecção da perda de metal.

Na figura 5.3 foram plotados os valores de profundidades medidos em campo, no eixo das abcissas, e os valores de profundidades registrados na inspeção ILI, no eixo das ordenadas, para que fossem identificados a tendência relativa à ferramenta e o efeito de sua correção.

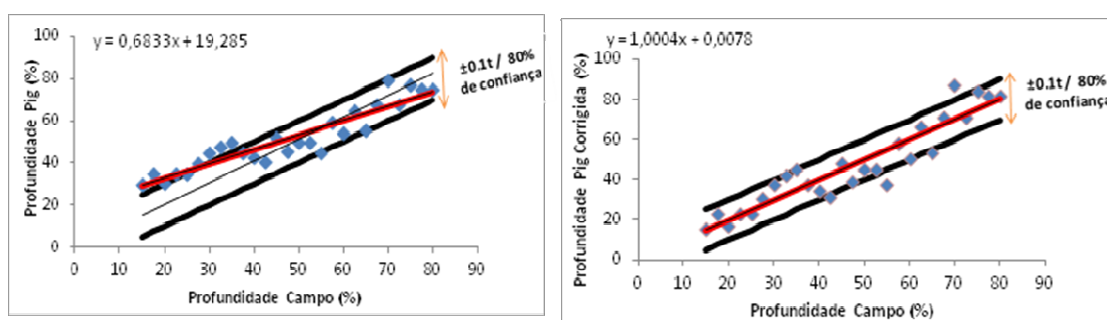


Figura 5.3 – Identificação e correção de medições tendenciosas do pig – dados simulados

No que diz respeito à segmentação da amostra é exigido que as corrosões sejam avaliadas segundo sua localização na parede do tubo - interna ou externa. Adicionalmente é recomendado utilizar subamostras, oriundas do conjunto de anomalias internas e externas, nos casos em que ocorram mudanças do tipo de revestimento e ainda quando houver distintos processos corrosivos, seja por diferentes mecanismos de corrosão ou por severidade de um mecanismo ao longo do duto. Como o método considera a atividade local da região analisada, não é exigida a segmentação dos dados por comprimento fixo, por exemplo, a cada 2.0 km.

A taxa de corrosão média é expressa pela razão entre a diferença dos valores médios de profundidade das amostras e o intervalo de tempo das inspeções, como mostra a equação [5.4].

$$\bar{r} = \frac{\bar{d}_2 - \bar{d}_1}{\Delta T} \quad [5.4]$$

Onde:

$\bar{r}$ = taxa de corrosão média (mm/ano)

$\bar{d}_2$ = média da profundidade da amostra 2 (mm)

$\bar{d}_1$ = média da profundidade da amostra 1 (mm)

ΔT = intervalo entre as inspeções (ano)

Para estimar a taxa de corrosão de cada anomalia (r_i), deve-se aplicar a equação [5.5] que relaciona a taxa de corrosão média com o coeficiente de atividade local (F_i), parâmetro que expressa a atividade do processo corrosivo do trecho analisado.

$$r_i = F_i \cdot \bar{r} \quad [5.5]$$

Onde:

r_i = taxa de corrosão da anomalia (mm/ano)

$\bar{r}$ = taxa de corrosão média (mm/ano) – expressa pela equação [5.4]

F_i = coeficiente de atividade local.

Para evitar que os valores da taxa de corrosão para cada anomalia sejam subestimados em áreas em que o processo corrosivo é severo, ou seja, em trechos em que o número de anomalias é alto (*hot spots*), aplica-se uma condição que relaciona a profundidade informada na inspeção mais recente (d_{2j}) com a profundidade média local ($\bar{d}_{2li}$) e o seu desvio padrão (σ_{2li}) no cálculo do coeficiente de atividade local (F_i), como mostra a equação [5.6].

$$d_{2j} \geq \bar{d}_{2li} + 1.75 \cdot \sigma_{2li}^{12} \quad [5.6]$$

Então, para cada corrosão registrada na inspeção mais recente é calculada a profundidade média local ($\bar{d}_{2li}$) e seu desvio padrão (σ_{2li}) a partir das equações [5.7] e [5.8], respectivamente.

$$\bar{d}_{2li} = \frac{\sum_{j=i-n}^{j=i+n} (d_{2j})}{2 \cdot n + 1} \quad [5.7]$$

$$\sigma_{2li} = \frac{\sqrt{\sum_{j=i-n}^{j=i+n} (d_{2j} - \bar{d}_{2li})^2}}{m - 1} \quad [5.8]$$

¹² O valor 1.75 corresponde ao número de desvio padrão a um nível de confiança igual a 92%.

Onde:

$\bar{d}_{2li}$ = profundidade média local (mm)

σ_{2li} = desvio padrão (mm)

d_{2j} = perda de metal registrada na inspeção ILI mais recente (mm)

n = parâmetro de vizinhança

$m = 2 \cdot n + 1$ = número de defeitos considerados para calcular a profundidade média local

Caso a equação [5.6] seja atendida, o coeficiente local de atividade deve ser calculado por meio da equação [5.9]. Notar que nesta equação são empregadas a média da população 2 ($\bar{d}_2$) e a profundidade reportada na segunda inspeção (d_{2j}).

$$F_i = 1 + \left| \frac{\bar{d}_2 - d_{2j}}{\bar{d}_2} \right| \quad [5.9]$$

Onde:

F_i = coeficiente de atividade local

$\bar{d}_2$ = média da profundidade da amostra 2 (mm)

d_{2j} = perda de metal registrada na inspeção ILI mais recente (mm)

Ao contrário, se a equação [5.6] não for atendida, o coeficiente local de atividade é calculado pela equação [5.10]. Notar que nesta equação são empregadas a média da população 2 ($\bar{d}_2$) e a profundidade média local calculada ($\bar{d}_{2li}$).

$$F_i = 1 + \left| \frac{\bar{d}_2 - \bar{d}_{2li}}{\bar{d}_2} \right| \quad [5.10]$$

Aqui vale destacar que o fator de coeficiente local será igual a 1 nos casos em que os valores da profundidade média local ($\bar{d}_{2li}$) e/ou da perda de metal registrada pelo pig na inspeção 02 (d_{2j}) são iguais ao valor da média da profundidade da amostra 2 ($\bar{d}_2$). Portanto, o valor da taxa de corrosão da anomalia (r_i) será igual a taxa de corrosão média ($\bar{r}$) visto que $r_i = F_i \cdot \bar{r}$.

Todo o procedimento descrito neste item para estimar a taxa de corrosão, baseado no Princípio de Atividade Local, é apresentado no fluxograma – figura 5.4.

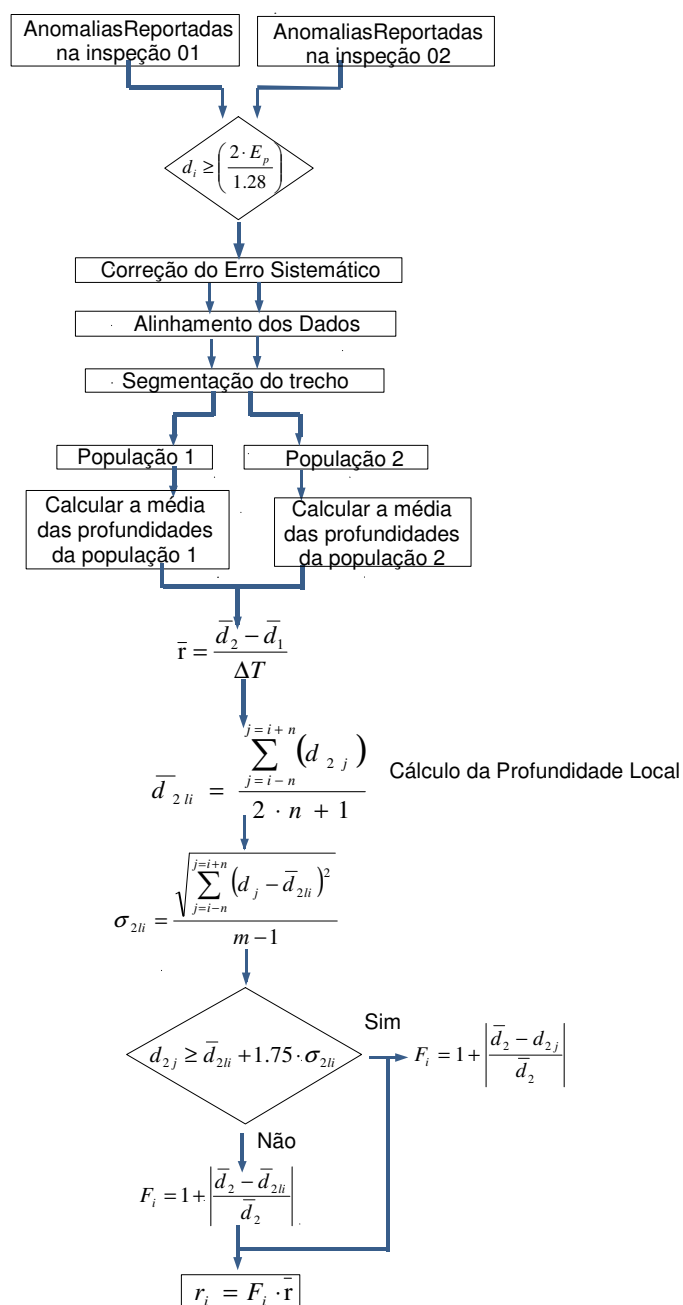


Figura 5.4 - Fluxograma da Estimativa Taxa de Corrosão pelo Princípio de Atividade Local [14]

5.2.

Taxa de Corrosão baseada no Cálculo do Parâmetro (α) [15]

Este método foi desenvolvido como parte do projeto de pesquisa EC 1-2 *Detailed Procedures for Comparing Successive ILI Runs to Establish Corrosion Growth Rates* patrocinado pelo PRCI (*Pipeline Research Council International*) e tem como objetivo definir uma distribuição de probabilidade [54] para taxa de corrosão em função de um parâmetro (α) que relaciona os erros de medição do pig com a taxa de corrosão calculada.

Nesta metodologia a taxa de corrosão é classificada como local ou por trechos. A taxa de corrosão é classificada como *local* quando a diferença de cada perda de metal é calculada através do mapeamento (*matching*) das anomalias que pode ser efetuado a partir da correlação dos sinais detectados pelo pig ou das tabelas de anomalias de duas inspeções ILI. Por sua vez, a taxa de corrosão é classificada *por trechos* quando a diferença dos valores de profundidade dos defeitos é calculada a partir da profundidade média das corrosões existentes no trecho selecionado, ou seja, não é realizada a correspondência das anomalias, pois é, comparada a média de cada população.

A seguir serão descritas cada etapa para o cálculo do parâmetro (α) que permite identificar a distribuição de probabilidade que melhor representa o crescimento da corrosão considerando os erros de medição do pig.

5.2.1.

Estimativa da Taxa de Corrosão Local

i. Cálculo da Incerteza da Taxa de Corrosão

Na metodologia que estima a taxa de corrosão a partir do parâmetro (α), o erro de medição inerente a cada profundidade registrada pelos pigs instrumentados é usado para representar a incerteza do valor da taxa de corrosão estimada a partir de duas inspeções ILI. Em [15], o desvio padrão é usado para quantificar a dispersão ao redor da média da taxa de corrosão e apresenta 3 alternativas para calculá-lo.

A primeira alternativa mostra que o desvio padrão da taxa de corrosão estimada pode ser calculado a partir do desvio padrão dos pigs que foram utilizados em cada inspeção, como mostra a equação [5.11].

$$\sigma_{local} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad [5.11]$$

Onde:

σ_{local} = Incerteza da taxa de corrosão local = desvio da taxa de corrosão local.

σ_1 = desvio padrão do pig utilizado na inspeção 01.

σ_2 = desvio padrão do pig utilizado na inspeção 02.

Os desvios padrões dos pigs podem ser obtidos a partir da acurácia informada nas especificações técnicas. Por exemplo, um pig instrumentado com exatidão de 10%t de incerteza e nível de confiança de 80%, apresenta um desvio padrão igual a 7.8%t. Deste modo, fazendo uso da equação [5.11], o desvio padrão para a taxa de corrosão estimada será igual a 11.0%t, caso as inspeções que serão usadas para estimar a taxa de corrosão tenham sido realizadas por ferramentas com desvios padrões iguais ($\sigma_1 = \sigma_2$).

Como segunda alternativa sugere-se que desvio padrão da taxa de corrosão estimada seja representado pelo desvio padrão das diferenças de profundidades das anomalias mapeadas. Ou seja, para esta alternativa, o desvio padrão da taxa estimada é igual ao desvio padrão resultante das diferenças de profundidade individuais calculadas pelo mapeamento das perdas de metal.

A terceira possibilidade indica que o desvio padrão da taxa de corrosão pode ser estimado a partir da comparação direta de defeitos que não sofrem modificações entre as inspeções por pig, por exemplo, defeitos de fabricação ou perdas de metal internas em dutos que transportam produtos não corrosivos como gás natural seco. Ou seja, se não há crescimento da corrosão consequentemente as diferenças de profundidades representariam o erro de medição inerente às incertezas da ferramenta.

ii. Conhecer a Distribuição da Taxa de Corrosão

Para esta metodologia de estimativa da taxa de corrosão foram adotadas as seguintes notações: R , D_1 e D_2 representam variáveis aleatórias que podem assumir uma gama de valores, enquanto que r , d_1 e d_2 são usados para representar valores específicos assumidos pelas variáveis aleatórias R , D_1 e D_2 , respectivamente. Assim, a taxa de corrosão (R) pode ser expressa por $R = \frac{D_2 - D_1}{\Delta T}$. Como D_1 e D_2 são variáveis aleatórias, a taxa de corrosão (R) também é uma variável aleatória que, por sua vez, é caracterizada pela função densidade de probabilidade (fdp) [54] como mostra a equação [5.12].

$$f_R(r) \approx \int_{all d_1} f_{D_2}(d_1 + r \cdot \Delta T) \cdot f_{D_1}(d_1) dd_1 \quad [5.12]$$

Onde:

f_{D_1} = função densidade de probabilidade que rege a variável D_1 referente às profundidades dos defeitos medidas na inspeção 01.

f_{D_2} = função densidade de probabilidade que rege a variável D_2 referente às profundidades dos defeitos medidas na inspeção 02.

d_1 = profundidade registrada na inspeção 01 (mm).

d_2 = profundidade registrada na inspeção 02 (mm), admitindo que $d_2 = d_1 + r \cdot \Delta T$

r = taxa de corrosão (mm/ano).

ΔT = intervalo de tempo entre as inspeções (ano).

Para a equação [5.12] admite-se que o erro de medição é representado pela distribuição normal e que as distribuições das profundidades em cada inspeção podem ser expressas por: $f_{D_1}(d_1) = N[d_{m1}, \sigma_1]$ e $f_{D_2}(d_2) = N[d_{m2}, \sigma_2]$, onde N indica distribuição normal com sua respectiva média (d_{m1} , d_{m2}) e desvio padrão (σ_1 , σ_2). Também é assumido que as profundidades registradas pelo pig, D_1 e D_2 , são variáveis aleatórias e independentes.

Se D_1 e D_2 são variáveis aleatórias normais (Gaussianas) e independentes, isto é, $f_{D1}(d_1) = N[d_{m1}, \sigma_1]$ e $f_{D2}(d_2) = N[d_{m2}, \sigma_2]$, então, a taxa de corrosão *local* também será uma variável normal. Esta proposição mostra que a equação [5.12] conduz à distribuição da taxa de corrosão representada pela equação [5.13].

$$f_R(r) = N\left[\frac{(d_{m2} - d_{m1})}{\Delta T}, \frac{\sigma}{\Delta T}\right] \quad [5.13]$$

Onde:

$d_{m2} - d_{m1}$ = diferença das médias de profundidade das anomalias registradas na inspeção 01 e 02.

σ_m = desvio padrão das diferenças das médias de profundidades que pode ser calculado a partir de uma das alternativas propostas no item 5.2.1.i

ΔT = intervalo de tempo entre as inspeções (ano).

A distribuição da taxa de corrosão, definida pela equação [5.12], não é restrita a valores positivos de taxa de corrosão. No entanto, valores negativos para taxa de corrosão não são significativos fisicamente, visto que, ao longo do tempo, as dimensões da corrosão crescem ou, pelo menos, permanecem constantes. Portanto, taxas negativas representam o erro de medição oriundo dos casos em que a profundidade registrada na inspeção 01 é maior que a profundidade reportada na inspeção 02.

Para eliminar os valores negativos da distribuição de probabilidade é alterado o limite da integral da equação [5.12]. Deste modo, ao invés de utilizar todas as anomalias da inspeção 01 usam-se apenas as corrosões em que a profundidade registrada na inspeção 01 é inferior à inspeção 02, como indicado na equação [5.14].

$$f_R(r) \approx \int_{d1 < d2} f_{D2}(d_1 + r \cdot \Delta T) \cdot f_{D1}(d_1) dd_1 \quad [5.14]$$

As equações [5.12] e [5.14] representam dois tipos de distribuição para a taxa de corrosão *local*: a distribuição *não filtrada* e a distribuição *filtrada*, onde:

- **Distribuição não-filtrada** – classificação atribuída à distribuição da taxa de corrosão *local* que não é restrita a valores negativos.
- **Distribuição filtrada** – classificação atribuída à distribuição da taxa de corrosão *local* em que são eliminados os valores negativos.

O parâmetro α_{local} que será apresentado no item seguinte permite indicar qual das distribuições (filtrada ou não filtrada) podem ser utilizadas para estimar o valor da taxa de corrosão *local*.

iii. Cálculo do Parâmetro α_{local}

Para avaliar o efeito do erro de medição com a taxa de corrosão estimada foi proposto o cálculo do parâmetro α_{local} que relaciona a incerteza de medição (ou erro de medição) com a taxa de corrosão calculada a partir dos resultados de inspeções por pig. Logo, o parâmetro α_{local} representa a confiabilidade do resultado obtido para a taxa de corrosão estimada: um alto valor de α_{local} indica erro relativo baixo e alto nível de confiança enquanto um valor baixo de α_{local} indica um alto erro relativo e baixo nível de confiança.

Para estimativa da taxa de corrosão local, o parâmetro α_{local} é calculado pela equação [5.15]

$$\alpha_{local} = \left(\frac{d_{m2} - d_{m1}}{\sigma_{local}} \right) \quad [5.15]$$

Onde:

$d_{m2} - d_{m1}$ = diferença das médias de profundidade das anomalias registradas na inspeção 01 e 02.

σ_{local} = Incerteza da taxa de corrosão local = desvio padrão que pode ser calculado a partir de uma das alternativas propostas no item 5.2.1.i

iv. Definição da Distribuição da Taxa de Corrosão considerando o Parâmetro α_{local}

Os critérios que permitem utilizar, ou não, as distribuições *filtradas* e *não filtradas*, como também identificar a que distribuição de probabilidade a distribuição da taxa de corrosão *local* deve ser ajustada, são apresentados a seguir. Estes critérios são definidos a partir do parâmetro α_{local} calculado pela equação [5.15], mostrada anteriormente.

- Para α_{local} até 0.25 – A distribuição da taxa de corrosão *local não-filtrada* não pode ser usada porque a mesma apresenta coeficiente de variação [54] muito alto o que indica uma alta dispersão em torno da média e provavelmente a taxa de corrosão, dada para muitos elementos da sua distribuição, será negativa. A distribuição da taxa de corrosão *local filtrada* também não pode ser usada porque o valor médio superestima a taxa devido à ampla margem. Isto sugere que a taxa de corrosão estimada é muito pequena quando comparada ao erro de medição encontrado e, portanto a distribuição da taxa de corrosão não pode ser definida.
- Para α_{local} entre 0.25 e 3.0 – A distribuição da taxa de corrosão *local não-filtrada* não pode ser usada porque também apresenta coeficiente de variação muito alto indicando uma alta dispersão em torno da média e provavelmente a taxa de corrosão será negativa. A distribuição da taxa de corrosão *local filtrada* poderá ser usada, mas ainda a taxa também é superestimada. Nesta faixa de α_{local} , deve-se utilizar a distribuição que forneça o melhor ajuste aos valores de taxa de corrosão calculados, e, então, pelo resultado do ajuste encontra-se a média e o desvio padrão da taxa de corrosão. Em [15], é informado, que neste caso, a distribuição Weibull é a que melhor representa a distribuição da taxa de corrosão.

- Para $\alpha_{\text{local}} > 3.0$ – A distribuição da taxa de corrosão *local não-filtrada* e *filtrada* podem ser usadas com ajuste da distribuição normal, onde a média da distribuição é igual à taxa de corrosão $r = \frac{d_{m2} - d_{m1}}{\Delta T}$ e o desvio padrão igual a $\frac{\sigma_{\text{local}}}{\Delta T}$, onde σ_{local} é calculado a partir de uma das alternativas propostas no item 5.2.1.i

5.2.2.

Estimativa da Taxa de Corrosão por Trecho

Este método não exige o mapeamento (*matching*) das anomalias, pois a diferença de profundidade é calculada a partir da profundidade média das perdas de metal existentes no trecho analisado.

Vale informar que para a metodologia que estima a taxa de corrosão *por trechos* foi incluído o índice *tre*, nas simbologias das variáveis. Por exemplo, $\sigma_{\text{tre}}, R_{\text{tre}}$.

i. Cálculo da Incerteza da Taxa de Corrosão

Como informado anteriormente no item 5.1.2.1, o erro de medição das ferramentas é usado para representar a incerteza do valor da taxa de corrosão estimada a partir de duas inspeções internas por pig. A incerteza de medição da taxa de corrosão estimada por trecho é representada pelo desvio padrão da média, ou seja, pelo desvio das profundidades médias do trecho que está sendo avaliado, como mostra a equação [5.16].

$$\sigma_{\text{tre}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \quad [5.16]$$

Onde:

σ_{tre} = incerteza da taxa de corrosão por trecho.

σ_1 = desvio padrão do pig utilizado na inspeção 01.

σ_2 = desvio padrão do pig utilizado na inspeção 02.

n_1 = número de anomalias da inspeção 01 presentes no trecho selecionado.

n_2 = número de anomalias da inspeção 02 presentes no trecho selecionado.

O desvio padrão da média de profundidade de cada inspeção é obtido pela razão entre o desvio padrão do pig e a raiz quadrada do número de defeitos existentes no trecho. Supondo que n_d defeitos estão sendo utilizados para o cálculo da taxa de corrosão e que o pig utilizado na inspeção tem um desvio padrão igual a σ_{pig} , encontra-se, então, $\sigma_{padr\tilde{a}o\ da\ m\acute{e}dia} = \frac{\sigma_{pig}}{\sqrt{n_d}}$, como o desvio padrão da média das profundidades. Notar que nesta abordagem a influência da incerteza de medição diminui à medida que o número de indicações de corrosão do trecho aumenta.

Ainda é válido mostrar que se o número de anomalias das populações comparadas for igual, ou seja, $n_1=n_2$, tem-se:

$$\sigma_{tre} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{n_d}} = \frac{\sigma_{local}}{\sqrt{n_d}} \quad [5.17]$$

Para esta metodologia de estimativa da taxa de corrosão foram adotadas as seguintes notações: R_{tre} , D_{tre1} e D_{tre2} representam uma variável aleatória que podem assumir uma gama de valores, enquanto que r_{tre} , d_{tre1} e d_{tre2} são usados para representar valores específicos assumidos pelas variáveis aleatórias R_{tre} , D_{tre1} e D_{tre2} , respectivamente.

Sabendo que a taxa de corrosão do trecho (R_{tre}) é expressa por $R_{tre} = \frac{D_{tre2} - D_{tre1}}{\Delta T}$, a distribuição de probabilidade da taxa de corrosão pode ser calculada a partir da equação [5.18]

$$f_{R_{tre}}(r_{tre}) \approx \int_{all\ d_{tre1}} f_{D_{tre2}}(d_{tre1} + r_{tre} \cdot \Delta T) \cdot f_{D_{tre1}}(d_{tre1}) dd_{tre1} \quad [5.18]$$

Onde:

$f_{D_{tre1}}$ = função densidade de probabilidade que rege a variável D_{tre1} referente à média de profundidades do trecho na inspeção 01.

$f_{D_{tre2}}$ = função densidade de probabilidade que rege a variável D_{tre2} referente à média de profundidades do trecho na inspeção 02.

d_{tre1} = profundidade do trecho na inspeção 01 (mm).

d_{tre2} = profundidade do trecho na inspeção 02 (mm), admitindo que

$$d_{tre2} = d_{tre1} + r_{tre} \cdot \Delta T$$

r_{tre} = taxa de corrosão média do trecho (mm/ano).

ΔT = intervalo de tempo entre as inspeções (ano).

Para a equação [5.18] foi admitido que o erro de medição é representado pela distribuição normal e que as distribuições das profundidades em cada inspeção podem ser expressas por: $f_{D_{tre1}}(d_{tre1}) = N[d_{mtre1}, \sigma_{tre1}]$ e $f_{D_{tre2}}(d_{tre2}) = N[d_{mtre2}, \sigma_{tre2}]$ onde N indica distribuição normal com sua respectiva média (d_{mtre1} , d_{mtre2}) e desvio padrão (σ_{tre1} , σ_{tre2}). Também é assumido que as profundidades registradas pelo pig, D_{tre1} e D_{tre2} , são variáveis aleatórias e independentes.

Se D_{tre1} e D_{tre2} são variáveis aleatórias normais (Gaussianas) e independentes, isto é, $f_{D_{tre1}}(d_{tre1}) = N[d_{mtre1}, \sigma_{tre1}]$ e $f_{D_{tre2}}(d_{tre2}) = N[d_{mtre2}, \sigma_{tre2}]$, então, a taxa de corrosão por trecho também será uma variável normal. Esta proposição mostra que a equação [5.18] conduz a distribuição da taxa de corrosão representada pela equação [5.19].

$$f_R(r_{tre}) = N\left[\frac{(d_{mtre2} - d_{mtre1})}{\Delta T}, \frac{\sigma_{tre}}{\Delta T}\right] \quad [5.19]$$

Onde:

$d_{mtre2} - d_{mtre1}$ = diferença das profundidades médias das anomalias registradas nos trechos analisados em cada inspeção.

σ_{tre} = Incerteza da taxa de corrosão por trecho = desvio padrão que pode ser calculado a partir da equação [5.16]

ΔT = intervalo de tempo entre as inspeções (ano).

Como já discutido para a estimativa da taxa de corrosão local, a distribuição da equação [5.18] não é restrita a taxas de corrosão positivas e os valores negativos representam o erro de medição oriundo nos casos em que a profundidade média do trecho da inspeção 01 é maior que a profundidade média do trecho da inspeção 02. Assim, para eliminar os valores negativos da distribuição de probabilidade é alterado o limite da integral da equação [5.18] e por consequência para representar a distribuição da taxa de corrosão são

utilizados apenas os trechos cujas profundidades médias da inspeção 01 é menor que as profundidades médias da inspeção 02.

$$f_{Rt}(r_{tre}) \approx \int_{d_{tre1} < d_{tre2}} f_{d_{tre2}}(d_{tre1} + r_{tre} \cdot \Delta t) \cdot f(d_{tre1}) dd_{tre1} \quad [5.20]$$

Aqui também a distribuição da taxa de corrosão *por trechos* é subdividida em distribuição *não filtrada* e a distribuição *filtrada*, onde:

- **Distribuição não-filtrada** – representa a distribuição da taxa de corrosão *por trechos* que não é restrita a valores negativos.
- **Distribuição filtrada** – representa a distribuição da taxa de corrosão *por trechos* em que são eliminados os valores negativos.

O parâmetro α_{tre} que será apresentado no item seguinte permite indicar qual das distribuições (filtrada ou não filtrada) podem ser utilizadas para estimar o valor da taxa de corrosão.

ii. Cálculo do Parâmetro α_{tre}

Para avaliar o efeito do erro de medição com a taxa de corrosão estimada foi proposto o cálculo do parâmetro α_{tre} que relaciona a incerteza de medição (ou erro de medição) com a taxa de corrosão calculada a partir dos resultados de inspeções por pig. Logo, o parâmetro α_{tre} representa a confiabilidade do resultado obtido para a taxa de corrosão por trecho estimada: um alto valor de α_{tre} indica erro relativo baixo e alto nível de confiança enquanto um valor baixo de α_{tre} indica um alto erro relativo e baixo nível de confiança.

$$\alpha_{tre} = \left(\frac{d_{mtre2} - d_{mtre1}}{\sigma_{tre}} \right) \quad [5.21]$$

Onde:

$d_{mtre2} - d_{mtre1}$ = diferença das profundidades médias das anomalias registradas nos trechos analisados em cada inspeção.

σ_{tre} = Incerteza da taxa de corrosão por trecho= desvio padrão que pode ser calculado a partir da equação [5.16]

iii. Definição da Distribuição da Taxa de Corrosão considerando o Parâmetro α_{tre}

Os critérios que permitem utilizar, ou não, as distribuições *filtradas* e *não filtradas*, como também identificar a que distribuição de probabilidade a distribuição da taxa de corrosão *por trechos* deve ser ajustada, são apresentados a seguir. Vale ressaltar que os mesmos critérios apresentados para o α_{local} são utilizados para definir a distribuição da taxa de corrosão *por trechos* a partir do parâmetro α_{tre} calculado pela equação [5.21], mostrada anteriormente.

- Para α_{tre} até 0.25 – A distribuição da taxa de corrosão *por trechos não-filtrada* não pode ser usada porque a mesma apresenta coeficiente de variação [54] muito alto o que indica uma alta dispersão em torno da média e provavelmente a taxa de corrosão poderá ser negativa. A distribuição da taxa de corrosão *por trechos filtrada* também não pode ser usada porque o valor médio superestima a taxa devido à ampla margem. Isto sugere que a taxa de corrosão estimada é muito pequena quando comparada ao erro de medição encontrado e, portanto a distribuição da taxa de corrosão não pode ser definida.
- Para α_{tre} entre 0.25 e 3.0 – A distribuição da taxa de corrosão *não-filtrada* não pode ser usada porque também apresenta coeficiente de variação muito alto indicando uma alta dispersão em torno da média e provavelmente a taxa de corrosão poderá ser negativa. A distribuição da taxa de corrosão *filtrada* pode ser usada, aqui a taxa também é superestimada. Nesta faixa de α_{tre} , deve-se utilizar a distribuição que forneça o melhor ajuste aos valores de taxa de corrosão calculados, então, pelo resultado do ajuste encontra-se a média e o desvio padrão da taxa de corrosão. Em [15], é informado, que neste caso, a distribuição Weibull é a que melhor representa a distribuição da taxa de corrosão.

- Para $\alpha_{tre} > 3.0$ – A distribuição da taxa de corrosão *por trechos não-filtrada e filtrada* podem ser usadas com ajuste da distribuição normal. Onde a média da distribuição é igual à taxa de corrosão $R_{tre} = \frac{d_{mtre2} - d_{mtre1}}{\Delta T}$ e o desvio padrão igual a $\frac{\sigma_{tre}}{\Delta T}$, onde σ_{tre} é calculado por meio da equação [5.16].

O resumo e o fluxograma da metodologia que estima a taxa de corrosão baseada no cálculo do parâmetro (α) [15] são apresentados na tabela 5.1 e na figura 5.5, respectivamente.

Tabela 5.1 – Resumo da estimativa da taxa de corrosão baseada no cálculo do parâmetro (α)

Parâmetro	Distribuição Taxa de Corrosão Local & por Trechos	
	Taxa de corrosão não-filtrada	Taxa de corrosão filtrada
$\alpha < 0.25$	✗	✗
$0.25 < \alpha < 3.0$	✗	✓
$\alpha > 3.0$	✓	✓

Legenda

- ✗ = Distribuição não pode ser usada
 ✓ = Distribuição pode ser usada

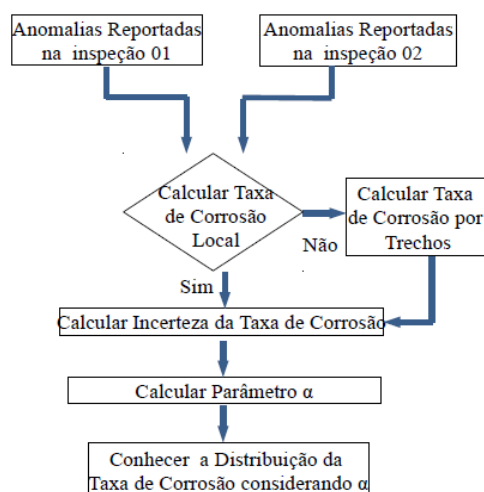


Figura 5.5 – Fluxograma Estimativa da Taxa de Corrosão baseada no Cálculo do Parâmetro (α)

5.3.

Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança para a Média

Neste método a taxa de corrosão é estimada com a aplicação de uma ferramenta estatística: o Intervalo de Confiança para a Média [54]. Esta metodologia fornece um intervalo de valores dentro do qual se encontra o parâmetro de interesse de uma população. Aqui, o parâmetro de interesse é a taxa de corrosão.

A equação [5.22] define o intervalo de confiança e mostra que a partir da média das amostras e dos limites superiores e inferiores calculados através do nível de confiança estabelecido, variabilidade dos dados e tamanho da amostra, é possível determinar o intervalo de confiança [54-55].

$$\bar{x} - z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n_a}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n_a}} \quad [5.22]$$

Onde:

$\bar{x}$ = média da amostra.

$z_{\alpha/2}$ = número de desvios padrões de uma distribuição, considerando o nível de confiança.

s = desvio padrão da amostra.

n_a = número de elementos da amostra.

μ = média da população (valor que será estimado).

A figura 5.6 mostra uma representação do intervalo de confiança.

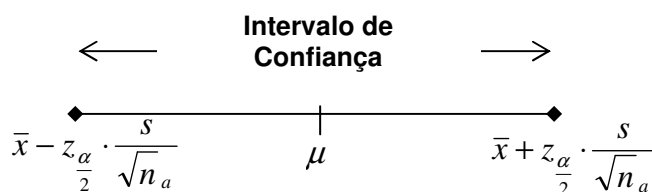


Figura 5.6 – Representação do Intervalo de confiança

O número de desvios padrões de uma distribuição ($z_{\alpha/2}$) é obtido, em função do nível de significância (α_s), nas tabelas de distribuição ou a partir de *softwares* de estatística ou matemática, como *Excel*, *Mathcad* e outros. Para pequenas amostras é necessário utilizar o número de desvios padrões da distribuição t de *Student*, já para grandes amostras ainda que a distribuição dos dados não siga a distribuição normal, deve-se utilizar o número de desvios padrões da distribuição normal segundo o nível de confiança adotado. A tabela 5.2 apresenta valores típicos de z (número de desvios padrões).

Tabela 5.2 - Valores típicos de z juntamente com os respectivos níveis de confiança e significância [54]

Z	3.3	3.00	2.00	1.96	1.65	1.00
Nível de Confiança (%)	99.90	99.7	95.45	95.00	90.00	68.27
Nível de Significância (%)	0.10	0.27	4.55	5.00	10.00	31.73

A probabilidade de não conter o parâmetro de interesse é definida como nível de significância (α_s), enquanto a probabilidade de conter a estimativa é chamada de nível de confiança ($1 - \alpha_s$). A partir destas definições, pode-se concluir que quanto menor o nível de significância, maior será o nível de confiança da estimativa. Por exemplo, para um grau de confiança igual a 90%, tem-se um nível de significância igual a 0.1. A figura 5.7 ilustra os termos: nível de confiança e nível de significância.

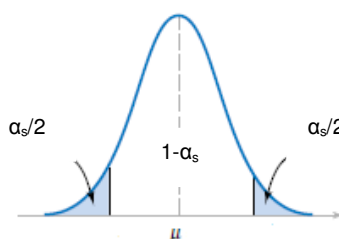


Figura 5.7 – Representação do nível de confiança e nível de significância de um intervalo de confiança [54]

A amplitude do intervalo de confiança é inversamente proporcional ao tamanho da amostra, isto significa que quanto maior o tamanho da amostra (n), mais estreito é o intervalo de confiança com relação à média. Desta forma, quanto maior a quantidade de perdas de metal consideradas na estimativa da taxa de corrosão, maior será a confiabilidade do valor obtido.

A teoria apresentada anteriormente pode ser utilizada para estimar a taxa de corrosão a partir dos resultados de ferramentas ILI.

Entretanto, antes de aplicar a estatística às perdas de metal que serão consideradas para o cálculo da taxa de corrosão devem ser agrupadas segundo sua natureza: interna e externa.

Para estimar a taxa de corrosão, a partir do intervalo de confiança, devem ser consideradas apenas as anomalias dimensionadas. Esta prática é recomendada para evitar diferenças de profundidades superestimadas ou subestimadas que influenciariam o valor estimado para a taxa de corrosão. Por exemplo, caso a profundidade registrada pelo pig na inspeção 01 seja igual a 30% w.t. e na inspeção 02, a mesma anomalia, não tenha sido dimensionada, a diferença de profundidade verificada seria negativa (-30%w.t). Ao inverter os resultados exemplificados, ou seja, ao considerar que na inspeção 02 a perda de metal registrada foi igual a 30%w.t., enquanto na inspeção 01 a anomalia não foi dimensionada, a diferença de profundidade verificada seria positiva (30%w.t).

Após agrupar as anomalias em amostras que representam as corrosões internas e externas é efetuado o mapeamento (*matching*) entre as anomalias reportadas nas inspeções que serão utilizadas para o cálculo da taxa de corrosão. O resultado do mapeamento das anomalias permite calcular a diferença entre as profundidades registradas em cada inspeção. É permitido aplicar filtros ao resultado do mapeamento com a finalidade de reduzir a influência do erro de medição que pode estar associado a acurácia do pig e aos métodos de dimensionamento empregados por cada empresa responsável pela inspeção. Por exemplo, diferenças de profundidades muito divergentes podem ser desconsideradas desde que seja comprovado que são provenientes de erros de dimensionamento.

A partir do resultado do mapeamento são calculados o valor médio e o desvio padrão das diferenças de profundidade o que permite estimar os limites superiores e inferiores da taxa de corrosão, segundo o intervalo de confiança desejado.

Aplicando a teoria do intervalo de confiança a partir da média aos dados das inspeções, pode-se estimar a taxa de corrosão segundo a equação [5.22], apresentada anteriormente. Onde:

$\bar{x}$ = média das diferenças de profundidade para as anomalias mapeadas, dimensionadas e que apresentaram a mesma discriminação (interna/externa) nas inspeções em comparação.

$z_{\alpha/2}$ = número de desvios padrões de uma distribuição, considerando o nível de confiança.

s = desvio padrão para as diferenças de profundidade das anomalias mapeadas.

n_a = número de anomalias mapeadas.

μ_r = taxa de corrosão estimada.

Os limites inferiores (l_i) e superiores (l_s) definidos pelo intervalo de confiança devem ser divididos por ΔT (intervalo de tempo entre as inspeções), para conhecer o intervalo em que está compreendida a estimativa da taxa de corrosão, como mostra a equação 5.23.

$$\frac{l_i}{\Delta T} \leq \mu_r \leq \frac{l_s}{\Delta T} \quad [5.23]$$

Na equação [5.23] os limites inferiores (l_i) e superiores (l_s) são representados por $\bar{x} - z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n_a}}$ e $\bar{x} + z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n_a}}$, respectivamente.

O fluxograma do método onde a taxa de corrosão é estimada a partir do Intervalo de Confiança para a Média é mostrado na figura 5.8.

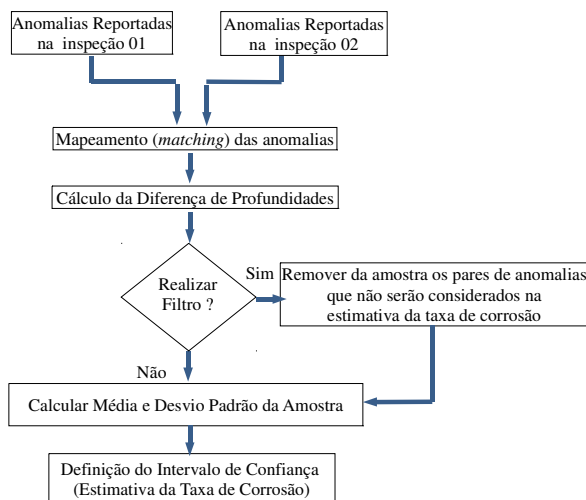


Figura 5.8 – Fluxograma Estimativa da Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança para Média

5.4.

Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo [16]

Neste método a taxa de corrosão é estimada a partir da distribuição de valor extremo [16,56] que é adequada para inferências estatísticas sobre os valores críticos (máximos ou mínimos) de fenômenos que causam falhas. Aplicando esta metodologia estatística ao cálculo da taxa de corrosão pode-se determinar a probabilidade de falha para a perda total da espessura de parede do tubo (ocorrência de um furo passante) e, conseqüentemente, conhecer antecipadamente o local ou o valor crítico onde haveria vazamento numa área com defeitos de corrosão.

Para estimar a taxa de corrosão a partir da distribuição de valor extremo podem ser utilizadas como variáveis os valores de espessura remanescente (t_r), os valores de taxas de corrosão de cada perda de metal (r_d) ou a profundidade de cada anomalia (d).

Quando os valores de espessura remanescente (t_r) são empregados para estimar a taxa de corrosão, os dados são ajustados à distribuição de valor extremo mínimo tipo I, pois neste caso, considera-se que a falha ocorrerá quando a espessura mínima para suportar tensões presentes no duto for atingida. Entretanto, ao obter a taxa de corrosão a partir da profundidade de cada anomalia (d) ou dos valores de taxas de corrosão de cada perda de metal (r_d), os dados são ajustados à distribuição de valor extremo máximo tipo I, isto porque a perda de metal acarretará falha no duto quando as taxas de corrosão ou profundidades máximas das anomalias detectadas pelo pig forem atingidas.

Observa-se, então, que a função de distribuição dependerá da variável utilizada para estimar a taxa de corrosão. A seguir, serão descritos e analisados os procedimentos em que a taxa de corrosão é estimada por ajuste de dados à distribuição de valor extremo mínimo tipo I e à distribuição de valor extremo máximo tipo I.

5.4.1.

Taxa de Corrosão a partir da Distribuição do Valor Extremo Mínimo tipo I

A espessura remanescente é definida como diferença entre a espessura de parede do tubo e a perda de metal, que neste estudo será detectada pelo pig. Logo, pode ser calculada pela equação [5.24] que segue.

$$t_r = t - \left(\frac{d}{t} \right) \cdot t \quad [5.24]$$

Onde:

t_r = espessura remanescente onde está localizada a anomalia.

$\frac{d}{t}$ = perda de metal reportada nos relatórios de inspeção por pig.

t = espessura de parede do tubo onde está localizada a anomalia.

Ao utilizar os valores de espessura remanescente (t_r), como exposto anteriormente, a taxa de corrosão é estimada a partir da distribuição de valor extremo mínimo tipo I, que é representada pela equação [5.25].

$$F(t_r) = 1 - \exp[-\exp(z(t_r))] \quad [5.25]$$

Onde:

$$z(t_r) \equiv z \equiv \frac{t_r - \psi_{tr}}{\delta_{tr}}$$

t_r = espessura remanescente onde está localizada a anomalia (mm).

ψ_{tr} = espessura remanescente estimada (mm).

δ_{tr} = dispersão da espessura remanescente (mm).

Nesta metodologia, os valores das espessuras remanescentes (t_r) de cada descontinuidade são ajustados à distribuição de valor extremo mínimo tipo I para que seja possível estimar a dispersão (δ_{tr}) da espessura remanescente de cada anomalia e o parâmetro (ψ_{tr}) que indica o valor mais provável da espessura remanescente. Posteriormente, a taxa de corrosão pode ser calculada a partir da equação [5.26].

$$r = \frac{t - \psi_{tr}}{\Delta T_{ope_insp}} \quad [5.26]$$

Onde:

r = taxa de corrosão estimada (mm/ano).

t = valor da espessura de parede do tubo onde está localizada a anomalia, considerando o início da operação do duto (mm).

ψ_{tr} = espessura remanescente estimada (mm).

ΔT_{ope_insp} = intervalo de tempo entre a entrada de operação do duto e a realização da inspeção (ano).

O ajuste dos valores da espessura remanescente (t_r) à distribuição de valor extremo mínimo tipo I pode ser realizado por programas de estatística, por exemplo, *EasyFit* e *MathCad*, como também através do métodos dos mínimos quadrados que permite o ajuste dos dados a uma reta, como demonstrado a seguir.

A equação [5.25] pode ser reescrita conforme a equação [5.27].

$$F(t_r) = 1 - e^{-e^z} \quad [5.27]$$

Simplificando a equação [5.27] tem-se:

$$1 - F(t_r) = e^{-e^z} \quad [5.28]$$

$$\frac{1}{1 - F(t_r)} = e^{e^z} \quad [5.29]$$

Aplicando $\ln$ em ambos os lados da equação [5.29], a equação [5.30] é obtida.

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t_r)}\right) = e^z \quad [5.30]$$

Aplicando $\ln$ em ambos os lados da equação [5.30], a equação [5.31] é obtida.

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t_r)}\right)\right) = z \quad [5.31]$$

Como $z = \frac{t_r - \psi_{tr}}{\delta_{tr}}$, encontra-se:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t_r)}\right)\right) = \frac{t_r - \psi_{tr}}{\delta_{tr}} = \frac{1}{\delta_{tr}}(t_r - \psi_{tr}) \quad [5.32]$$

Por analogia a equação da reta ($y = ax + b$), temos: $y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t_r)}\right)\right)$,

onde $x = t_r$, $a = \frac{1}{\delta_{tr}}$ e $b = \frac{\psi_{tr}}{\delta_{tr}}$.

Na equação [5.32], $F(t_r)$ é obtido através de métodos de ordenação, tais como a ordenação pelo posto médio ou pelo posto mediano. O posto de uma observação é a sua posição relativa às demais observações, quando os dados de uma amostra $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ estão em ordem crescente. O procedimento para obter o posto médio ou mediano é descrito a seguir.

Primeiro, os valores que correspondem às posições relativas (i) de cada evento são associados à amostra. Deste modo, o primeiro elemento da amostra recebe o valor 1 ($i=1$), o segundo elemento o valor 2 ($i=2$), e assim por diante, até que o último evento receba o valor n (número total da amostra). Em seguida, cada elemento da amostra é classificado em ordem crescente, a 3ª coluna da tabela 5.3 foi destacada para indicar esta etapa.

Com a ordenação dos valores de espessura remanescente, calcula-se o posto médio e o posto mediano a partir das equações [5.33] e [5.34]. Um exemplo dos resultados obtidos é mostrado na tabela 5.3.

$$F(t_r) = \frac{i}{n_t + 1} \quad \text{Posto Médio} \quad [5.33] \quad F(t_r) = \frac{i - 0.3}{n_t + 0.4} \quad \text{Posto Mediano} \quad [5.34]$$

Onde:

i = número de ordem das medições ordenadas crescentemente.

n_t = número total de dados.

Tabela 5.3 – Tabela resultante da aplicação dos métodos de ordenação – posto médio e posto mediano, para espessuras remanescentes.

i	Espessura Remanescente (t_r) (mm)	Espessura Remanescente Ordenada ($t_{r \text{ ordenada}}$) (mm)	Posto Médio ($F(t_{r_médio})$)	Posto Mediano ($F(t_{r_mediano})$)	$y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - F(t_r)} \right) \right)$	
					($F(t_{r_médio})$)	($F(t_{r_mediano})$)
1	4,00	2,40	0,090909	0,067308	-2,350619	-2,663843
2	3,50	2,94	0,181818	0,163462	-1,606090	-1,723263
3	4,80	3,50	0,272727	0,259615	-1,144278	-1,202023
4	2,40	3,84	0,363636	0,355769	-0,794106	-0,821667
5	2,94	4,00	0,454545	0,451923	-0,500651	-0,508595
6	3,84	4,14	0,545455	0,548077	-0,237677	-0,230365
7	4,14	4,21	0,636364	0,644231	0,011534	0,032925
8	4,21	4,21	0,727273	0,740385	0,261813	0,299033
9	4,21	4,46	0,818182	0,836538	0,533417	0,593977
10	4,46	4,80	0,909091	0,932692	0,874591	0,992689

Após a ordenação das espessuras remanescentes, é possível plotar um gráfico ou aplicar funções de programas de planilhas eletrônicas (por exemplo, o *Excel*), a fim de conhecer o coeficiente angular (a) e linear (b) da equação da reta definida na equação [5.32]. Isto pode ser exemplificado pela figura 5.9, que mostra um gráfico, construído a partir dos valores da tabela 5.3, cujo eixo horizontal representa os valores listados na coluna espessura remanescente ordenada ($t_{r \text{ ordenada}}$) e o eixo vertical representa os valores de y obtidos para ($F(t_{r_mediano})$).

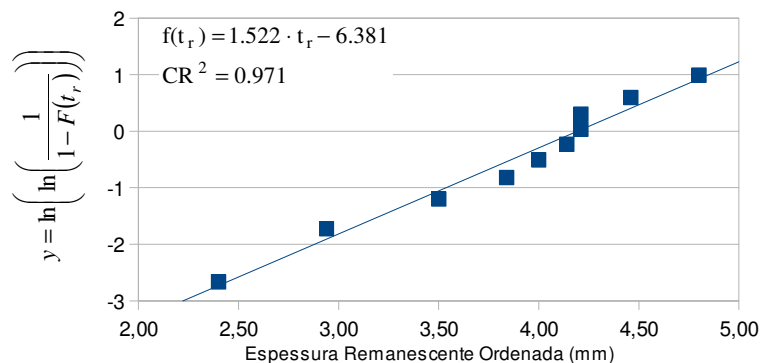


Figura 5.9 – Cálculo dos parâmetros (ψ_{tr} e δ_{tr}) da distribuição do valor extremo mínimo tipo I para as espessuras remanescentes

Conhecendo-se os coeficientes angular (a) e linear (b) da equação da reta é possível, então, calcular os parâmetros ψ_{tr} e δ_{tr} e, conseqüentemente estimar a taxa de corrosão. Pois, de acordo com as equações [5.26] e [5.32],

apresentadas anteriormente, tem-se: $a = \frac{1}{\delta_{tr}}$ e $b = \frac{\psi_{tr}}{\delta_{tr}}$ e $r = \frac{t - \psi_{tr}}{\Delta T_{ope_insp}}$.

Utilizando a figura 5.9, como exemplo, vê-se que o valor absoluto do coeficiente angular da reta (a) é igual a 1.522 e do coeficiente linear (b) igual a 6.381. Logo, δ_{tr} é igual 0.657 mm e ψ_{tr} é igual 4.193 mm. Por sua vez, a taxa de corrosão estimada será igual 0.108 mm/ano ao considerar $\Delta T = 20$ anos e $t = 6.35$ mm.

Os coeficientes da reta foram extraídos graficamente, no entanto, os mesmos podem ser calculados a partir das equações [5.35] e [5.36]

$$\text{coeficiente angular (a)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [5.35]$$

$$\text{coeficiente linear (b)} = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \quad [5.36]$$

Onde a variável x é representada pela espessura remanescente (t_r) e a variável y representa o valor obtido por $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t_r)}\right)\right)$, quando a estimativa da taxa de corrosão é feita a partir das espessuras remanescentes (t_r),

A qualidade do ajuste dos dados à distribuição de valor extremo mínimo tipo I pode ser avaliada por meio do coeficiente de correlação linear (CR^2). Então, quanto mais próximo da unidade CR^2 estiver, melhor será o ajuste. O exemplo ilustrado na figura 5.9 mostra que o coeficiente de correlação linear é igual a 0.971.

Quando os resultados de duas inspeções são utilizados para estimar a taxa de corrosão, também é possível efetuar o ajuste das espessuras remanescentes à distribuição de valor extremo mínimo tipo I. Para isto basta realizar o ajuste das espessuras remanescentes de cada inspeção. Ambos os ajustes resultam parâmetros ψ_{tr} distintos (espessuras remanescentes estimadas) que permitem estimar a taxa de corrosão, como mostra a equação [5.37]

$$r = \frac{\psi_{tr\ inspeção\ 01} - \psi_{tr\ inspeção\ 02}}{\Delta T} \quad [5.37]$$

Onde:

r = taxa de corrosão estimada (mm/ano).

$\psi_{tr\ inspeção\ 01}$ = espessura remanescente estimada pelo ajuste dos dados da inspeção 01 (primeira inspeção) (mm).

$\psi_{tr\ inspeção\ 02}$ = espessura remanescente estimada pelo ajuste dos dados da inspeção 02 (segunda inspeção) (mm).

ΔT = intervalo de tempo entre as inspeções (ano)

Por exemplo, para um duto que teve seu início de operação em 1985 foram ajustadas as espessuras remanescentes das inspeções ILI, realizadas em 2007 e 2010, à distribuição de valor extremo mínimo tipo I. Este ajuste forneceu os seguintes parâmetros: $\psi_{tr_2007} = 3.562$ mm e $\psi_{tr_2010} = 4.163$ mm. Aplicando a equação [5.37], encontra-se uma taxa de corrosão igual a 0.200 mm/ano.

5.4.2.

Taxa de Corrosão a partir da Distribuição do Valor Extremo Máximo tipo I

Este método é empregado quando a taxa de corrosão do duto é estimada a partir dos valores de taxas de corrosão de cada perda de metal (r_d) ou da profundidade de cada anomalia (d). Como informado anteriormente, para estas variáveis (r_d ou d), a taxa de corrosão será estimada a partir da distribuição de valor extremo máximo tipo I que é representada pela equação [5.38].

$$F(r_d \text{ ou } d) = \exp[-\exp(-z(r_d \text{ ou } d))] \quad [5.38]$$

Quando na equação [5.38] os valores das profundidades de cada anomalia são utilizados para estimar a taxa de corrosão, a variável z será representada

por $z \equiv \frac{d - \psi_d}{\delta_d}$, onde:

d = profundidade da anomalia reportada na inspeção por pig (mm)

ψ_d = profundidade estimada (mm).

δ_d = dispersão da profundidade (mm).

No entanto, caso na equação [5.38] as taxas de corrosão de cada perda de metal sejam empregadas para estimar a taxa de corrosão do duto, a variável z será representada por $z \equiv \frac{r_d - r}{\delta_{rd}}$, onde:

$$r_d = \frac{d_2 - d_1}{\Delta T} = \text{taxa de corrosão individual da anomalia (mm/ano), com } d_2,$$

d_1 e ΔT representando respectivamente, a profundidade registrada na 2ª inspeção, a profundidade registrada na 1ª inspeção e o intervalo de tempo entre as inspeções.

Vale informar que para conhecer as diferenças de profundidades é necessário efetuar o mapeamento das anomalias.

r = taxa de corrosão estimada (mm/ano).

δ_{rd} = dispersão da taxa de corrosão (mm/ano).

O ajuste dos valores de profundidade (d) de cada anomalia à distribuição de valor extremo máximo tipo I estima a dispersão (δ_d) da profundidade da anomalia e o parâmetro (ψ_d) que representa o valor mais provável da perda de metal. Conhecendo-se estes parâmetros, é possível, portanto estimar a taxa de corrosão haja vista que a mesma é expressa pela equação [5.39] que segue.

$$r = \frac{\psi_d}{\Delta T_{ope_insp}} \quad [5.39]$$

Onde:

r = taxa de corrosão estimada (mm/ano).

d = profundidade da anomalia reportada na inspeção por pig (mm)

ψ_d = profundidade estimada (mm).

ΔT_{ope_insp} = intervalo de tempo entre a entrada de operação do duto e a realização da inspeção (ano).

Uma segunda maneira de se calcular a taxa de corrosão a partir da distribuição de valor extremo máximo tipo I é realizando o ajuste das taxas de corrosão individuais das perdas de metal (r_d). Com esta alternativa, o ajuste fornece a estimativa da dispersão (δ_{rd}) da taxa de corrosão de cada anomalia e a estimativa da taxa de corrosão (r) que é encontrada, ou seja, não é necessário empregar uma nova equação.

O ajuste dos valores de profundidade (d) de cada anomalia ou das taxas de corrosão individual à distribuição de valor extremo máximo pode ser realizado por programas de estatística, por exemplo, *EasyFit* e *MathCad*. Este ajuste também pode ser efetuado através do método dos mínimos quadrados, como já foi demonstrado para a distribuição de valor extremo mínimo tipo I. Como as equações da distribuição de valor extremo mínimo diferem das equações para a distribuição de valor extremo máximo tipo I, uma nova demonstração será apresentada a seguir.

A equação [5.38] pode ser reescrita conforme a equação [5.40]

$$F(r_d \text{ ou } d) = e^{-e^{-z}} \quad [5.40]$$

Simplificando a equação [5.40] teremos:

$$\frac{1}{F(r_d \text{ ou } d)} = e^{e^{-z}} \quad [5.41]$$

Aplicando $\ln$ em ambos os lados da equação [5.41], a equação [5.42] é obtida.

$$\ln\left(\frac{1}{F(r_d \text{ ou } d)}\right) = e^{-z} \quad [5.42]$$

Aplicando $\ln$ em ambos os lados da equação [5.42], obtemos a equação [5.43] é obtida.

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(r_d \text{ ou } d)}\right)\right) = -z \quad [5.43]$$

Ao multiplicar ambos os lados da equação [5.43] por -1, encontra-se:

$$-\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(r_d \text{ ou } d)}\right)\right) = z \quad [5.44]$$

Conforme definição previamente estabelecida quando a taxa de corrosão é estimada a partir das profundidades das anomalias, $z \equiv \frac{d - \psi_d}{\delta_d}$. Já quando a taxa de corrosão do duto é estimada a partir das taxas de corrosão das perdas de metal, $z \equiv \frac{r_d - r}{\delta_{rd}}$.

Deste modo, a equação [5.44] pode ser escrita como:

$$-\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(r_d)}\right)\right) = \frac{d - \psi_d}{\delta_d} \quad [5.45]$$

ou

$$-\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(r_d)}\right)\right) = \frac{r_d - r}{\delta_{rd}} \quad [5.46]$$

Por analogia a equação da reta ($y = ax + b$), temos para a equação [5.45]

$y = -\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(d)}\right)\right)$, onde $x = d$, $a = \frac{1}{\delta_d}$ e $b = \frac{\psi_d}{\delta_d}$. Já para equação [5.46]

verifica-se $y = -\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(r_d)}\right)\right)$, onde $x = r_d$, $a = \frac{1}{\delta_{rd}}$ e $b = \frac{r}{\delta_{rd}}$.

Para conhecer os coeficientes das equações [5.45] e [5.46], primeiramente, suas variáveis (profundidade da anomalia ou taxa de corrosão individual) terão de ser classificadas em ordem crescente.

Com a ordenação das variáveis, as equações [5.45] e [5.46] podem ser calculadas a partir de $F(d)$ e $F(r_d)$ que são obtidos através de métodos de ordenação, tais como a ordenação pelo posto médio ou pelo posto mediano. Tais definições, já foram descritas no item 5.4.1 e seus cálculos não diferem da distribuição de valor extremo mínimo, portanto, são determinados pelas equações [5.33] e [5.34]. Isto é explicado porque para equações [5.33] e [5.34],

as variáveis são: o número total de anomalias e sua respectiva posição relativa (i). Desta forma, independente da distribuição que se esteja ajustando (distribuição de valor extremo máximo ou mínimo – tipo I) o posto médio ou mediano será igual, caso o número de anomalias utilizadas para estimar a taxa de corrosão seja o mesmo.

Na tabela 5.3 foram apresentadas as espessuras remanescentes (t_r) de um duto com espessura igual a 6.35 mm. A partir destes valores foram calculadas as profundidades registradas pelo pig instrumentado cujos valores são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Tabela resultante da aplicação dos métodos de ordenação – posto médio e posto mediano, para profundidades de anomalia.

i	Profundidade de Anomalia (d) (mm)	Profundidade de Anomalia ($d_{ordenada}$) (mm)	Posto Médio ($F(d_{med})$)	Posto Mediano ($F(d_{mediano})$)	$y = -\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(d)}\right)\right)$	
					($F(d_{med})$)	($F(d_{mediano})$)
1	2,35	1,55	0,090909	0,067308	-0,874591	-0,992689
2	2,85	1,89	0,181818	0,163462	-0,533417	-0,593977
3	1,55	2,14	0,272727	0,259615	-0,261813	-0,299033
4	3,95	2,14	0,363636	0,355769	-0,011534	-0,032925
5	3,41	2,21	0,454545	0,451923	0,237677	0,230365
6	2,51	2,35	0,545455	0,548077	0,500651	0,508595
7	2,21	2,51	0,636364	0,644231	0,794106	0,821667
8	2,14	2,85	0,727273	0,740385	1,144278	1,202023
9	2,14	3,41	0,818182	0,836538	1,606090	1,723263
10	1,89	3,95	0,909091	0,932692	2,350619	2,663843

Após a ordenação da profundidade de cada anomalia ou das taxas de corrosão individuais, é possível plotar um gráfico ou aplicar funções de programas de planilhas eletrônicas (por exemplo, o *Excel*), a fim de conhecer o coeficiente angular (a) e linear (b) da equação da reta definida nas equações [5.45] e [5.46].

A partir dos coeficientes angular (a) e linear (b) da equação da reta calcula-se, então, os parâmetros ψ_d e δ_d ou r e δ_{rd} .

Quando estimado a partir dos valores de profundidades, o parâmetro ψ_{rd} é determinado pelas equações [5.39] e [5.45], que mostram que o coeficiente

angular (a) é igual a $\frac{1}{\delta_d}$, o coeficiente linear (b) é igual a $\frac{\psi_d}{\delta_d}$ e a taxa de corrosão (r) é igual a $\frac{\psi_d}{\Delta T_{ope_insp}}$.

Quando estimado a partir das taxas de corrosão individuais, o parâmetro ψ_{rd} é obtido diretamente do ajuste, ou seja, conhecendo os coeficientes da reta, a taxa de corrosão é encontrada. Isto é explicado, pois o coeficiente angular (a) da reta é igual a $\frac{1}{\delta_{rd}}$ e coeficiente linear (b) é igual $\frac{r}{\delta_{rd}}$.

A figura 5.10 mostra um gráfico, construído a partir dos valores da tabela 5.4, cujo eixo horizontal representa os valores listados na coluna profundidade de anomalia ordenada ($d_{ordenada}$) e o eixo vertical representa os valores de y obtidos para $(F(d_{mediano}))$. Utilizando a figura 5.10, como exemplo, vê-se que o valor absoluto do coeficiente angular da reta (a) é igual a 1.522 e do coeficiente linear (b) igual a 3.281. Logo, δ_d é igual 0.657 mm e ψ_d é igual 2.156 mm. Por sua vez, a taxa de corrosão estimada será igual 0.108 mm/ano ao considerar $\Delta T=20$ anos e $t=6.35$ mm. Notar que a taxa de corrosão estimada a partir das espessuras remanescentes apresentou o mesmo valor que a taxa de corrosão estimada a partir das profundidades das anomalias.

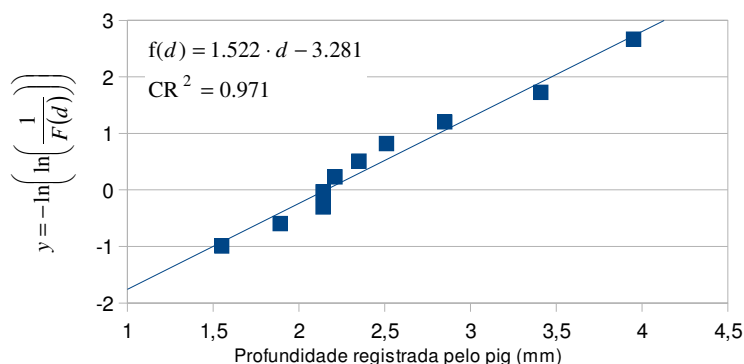


Figura 5.10 – Cálculo dos parâmetros (ψ_{rd} e δ_{rd}) da distribuição do valor extremo máximo tipo I para as profundidades registradas pelo pig instrumentado

Os coeficientes da reta podem ser determinados graficamente e a partir das equações [5.35] e [5.36], apresentadas anteriormente. A qualidade do ajuste é determinada pelo coeficiente de correlação linear (CR^2), considerando o

O fluxograma para o método em que a taxa de corrosão é estimada a partir da distribuição de valor extremo é mostrado na figura 5.11.

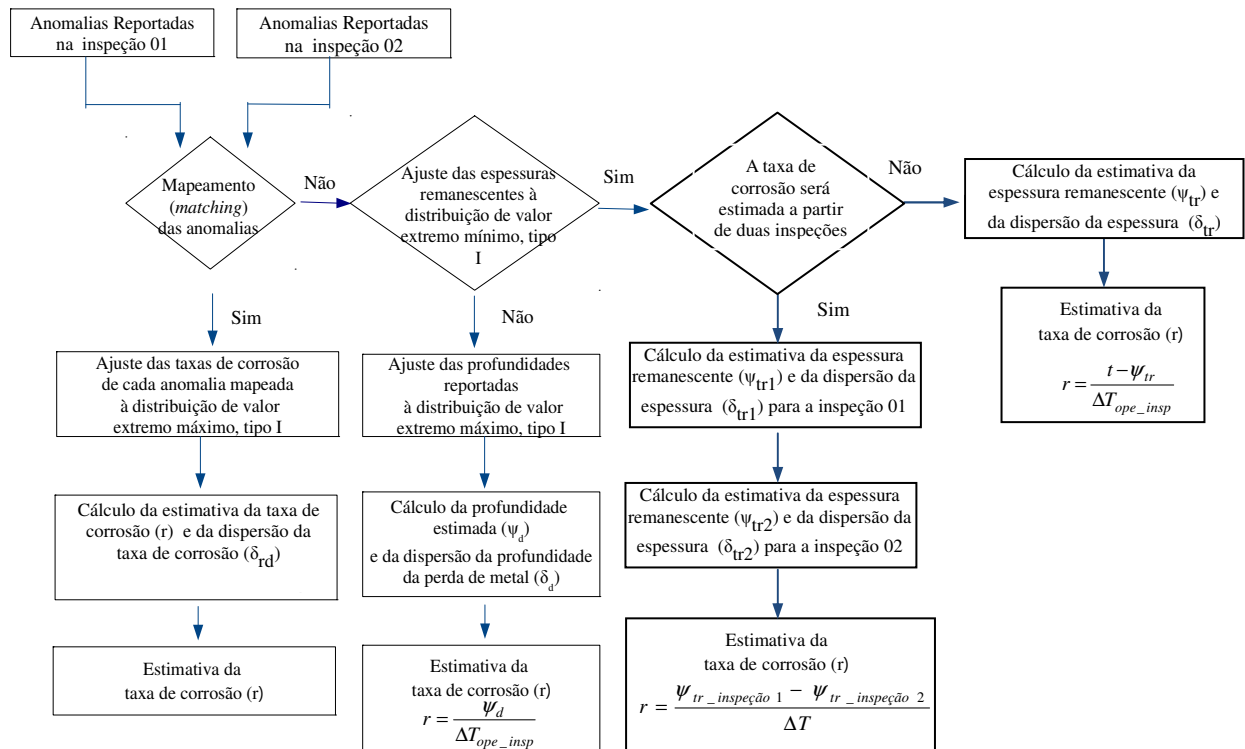


Figura 5.11 – Fluxograma Estimativa da Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo [16]

5.5. Estudo de Caso

Para comparar e avaliar cada método de estimativa da taxa de corrosão, descritos anteriormente, foram realizados cinco estudos de caso nos quais foram utilizados dados simulados pelo *software EasyFit* e dados de um duto existente. Os estudos de caso I e II foram efetuados para validar as equações empregadas para o cálculo da taxa de corrosão, enquanto os demais estudos exemplificam situações comuns em dutos.

As características de cada estudo de caso são apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Características dos Estudos de Caso

ESTUDOS DE CASO	
ID	Características
I	• Taxa de corrosão uniforme e constante ($\sigma=0$). • Perdas de metal simuladas. • Número das anomalias simuladas é igual em ambas inspeções ($n_1=n_2$).
II	• Taxa de corrosão uniforme e variável ($\sigma \neq 0$). • Perdas de metal simuladas. • Número das anomalias simuladas é igual em ambas inspeções ($n_1=n_2$).
III	• Taxa de corrosão não uniforme e constante ($\sigma=0$). • Perdas de metal simuladas. • Número das anomalias simuladas é igual em ambas inspeções ($n_1=n_2$).
IV	• Taxa de corrosão uniforme e variável ($\sigma \neq 0$). • Perdas de metal simuladas. • Número das anomalias simuladas difere entre as inspeções ($n_1 \neq n_2$).
V	• Resultados de inspeções reais

Com os resultados dos casos I e II será possível identificar se os métodos possuem limitações quando as perdas de metal apresentam diferenças de profundidades constantes com ($\sigma=0$) e ($\sigma \neq 0$) .

O estudo de caso III mostra a importância da segmentação do duto ao estimar a taxa de corrosão, principalmente, quando existem distintos processos corrosivos atuando no duto. Além disto, procura-se com este estudo verificar se as metodologias analisadas identificam os trechos que possuem diferentes valores de taxa de corrosão, o que auxiliará o operador de duto quando o mesmo não tiver esta informação.

O estudo de caso IV visa mostrar a influência da realização de mapeamento das perdas de metal (correspondência de anomalias) no valor obtido para a taxa de corrosão.

Finalmente, no caso V empregam-se os dados de inspeções reais aos métodos que estimam a taxa de corrosão.

5.5.1. Estudo de Caso I

Nesta análise foram simuladas perdas de metal a fim de obter uma taxa de corrosão *constante* ($\sigma=0$) ao longo do duto com um valor igual a 0.200 mm/ano. Assim, para a inspeção 01 foram geradas, a partir do *EasyFit*, 1000 perdas de metal com média igual a 2.43 mm e desvio padrão igual a 0.51 mm. Para gerar a população da inspeção 02, acrescentou-se 0.60 mm à profundidade de cada anomalia simulada da inspeção 01. O valor 0.60 mm foi adicionado com a finalidade de se obter uma taxa de corrosão igual a 0.200 mm/ano, para um intervalo de inspeção (ΔT), em anos, igual a 3.

Assumiu-se que o processo corrosivo está atuando em um duto, cuja operação iniciou em 1985, com espessura de parede igual a 6.35 mm e 4.0 km de extensão.

As características simuladas para as inspeções são apresentadas na tabela 5.6

Tabela 5.6 – Estudo de Caso I – Dados das Inspeções Simuladas

Id	Ano	Quantidade de Corrosão Reportada
		<i>Classificação Corrosão – Gerenciamento</i>
		Interna
Inspeção ILI 01	2007	1000
Inspeção ILI 02	2010	1000

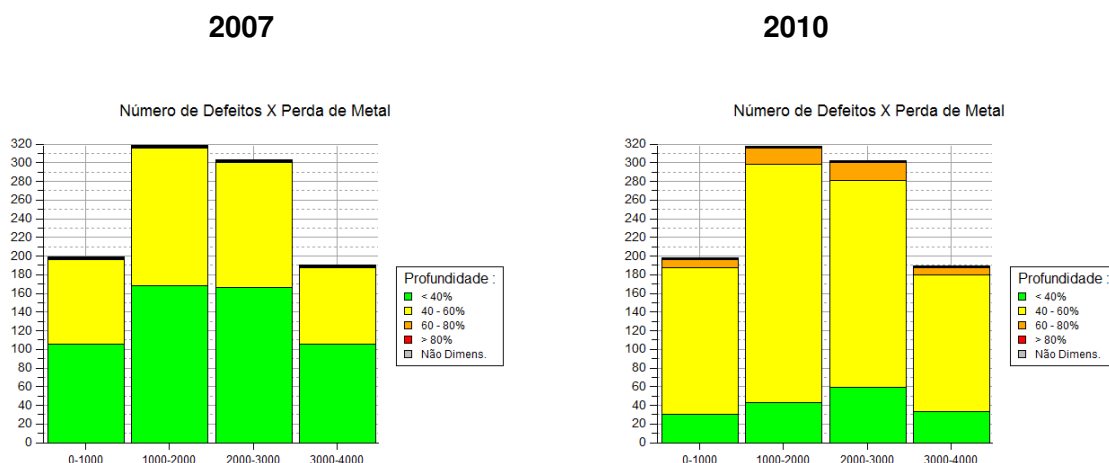


Figura 5.12 – Dados das inspeções – Estudo de Caso I

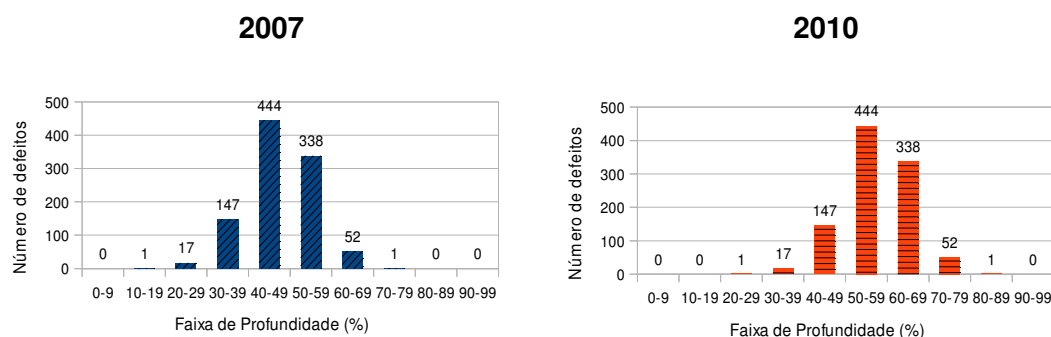


Figura 5.13 – Histograma das inspeções – Estudo de Caso I

Os resultados obtidos para a taxa de corrosão considerando toda extensão do duto são mostrados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Estudo de Caso I - Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 0.0 a 4.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)		
	Mínimo	Média	Máxima
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local		0,200	
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa		0,200	
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,200	0,200	0,200
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo			
a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2007		0,099	
a partir das diferenças de espessuras remanescentes		0,200	
a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2007		0,099	
a partir das taxa de corrosão individuais		0,200	
Quantidade Anomalias Inspeção 2007		1000	
Quantidade Anomalias Inspeção 2010		1000	

Como a taxa simulada é constante, o desvio padrão das diferenças de profundidades será igual a zero ($\sigma=0$), ou seja todos os valores de diferença de profundidades serão iguais a média, indicando valor constante. Consequentemente, para o método em que as taxas de corrosão individuais de cada anomalia são ajustadas à distribuição de valor extremo máximo tipo I e para o método baseado no parâmetro alfa (α), a taxa de corrosão estimada será igual a razão entre as diferenças de profundidades das anomalias e o intervalo entre as inspeções. Não sendo necessário, portanto, realizar o ajuste à distribuição de probabilidade.

Os resultados do estudo de caso I mostram que a taxa de corrosão estimada a partir do ajuste dos valores de profundidade ou das espessuras remanescentes à distribuição de valor extremo apresentou valor inferior quando comparado ao valor calculado a partir das diferenças das espessuras remanescentes de cada inspeção. Ou seja, quando se utilizam os resultados de uma única inspeção para estimar a taxa de corrosão, os valores obtidos foram menores que o valor simulado. Isto se deve ao intervalo de tempo (ΔT) arbitrado. Quando a taxa de corrosão é estimada a partir dos dados de uma única inspeção, ΔT é definido pelo intervalo de tempo compreendido entre a data da realização da inspeção e o início da operação do duto. Caso o ano do início da operação adotado fosse igual a 1996, então, ΔT seria igual a 11 anos, e consequentemente a estimativa da taxa de corrosão seria igual a 0.199 mm/ano. A taxa de corrosão estimada a partir de uma única inspeção também indica que no período compreendido entre o início da operação do duto e a realização da 1ª inspeção que o mecanismo de corrosão atuante não foi constante.

A metodologia do Princípio da Atividade Local estima a taxa de corrosão para cada anomalia, como mostra a figura 5.14, considerando a intensidade do processo corrosivo da região onde a perda de metal está localizada. Na tabela 5.7 é apresentado apenas o valor médio da taxa de corrosão que é representado pela diferença das médias de profundidades de cada população avaliada. Como mencionado em itens anteriores, o valor médio da taxa ($\bar{r}$) é importante pois a taxa de corrosão individual (r_i) é expressa, por $r_i = F_i \cdot \bar{r}$, onde F_i é o coeficiente de atividade local.

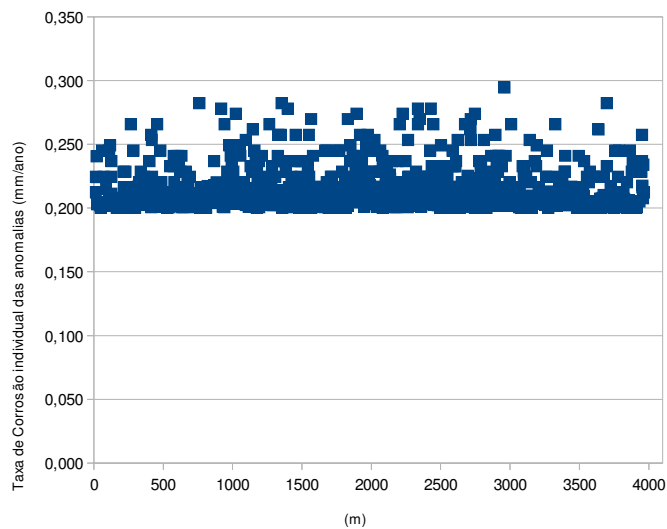


Figura 5.14 – Representação da taxa de corrosão estimada pelo Princípio da Atividade Local com parâmetro de vizinhança igual a 4 ($n=4$)

Como estudo de caso I emprega uma taxa constante é possível, então, utilizar o mesmo valor médio para toda extensão do duto, não foi necessário segmentar as amostras a fim de se obter trechos com atividade local semelhante.

5.5.2. Estudo de Caso II

Nesta análise foram simuladas perdas de metal a fim de obter uma taxa de corrosão *variável* ($\sigma \neq 0$) ao longo do duto com um valor igual a 0.200 mm/ano. Assumiu-se que o processo corrosivo está atuando em duto, cuja operação iniciou em 1985, com espessura de parede igual a 6.35 mm e 4.0 km de extensão.

Os estudos de caso I e II diferem entre si devido aos resultados da segunda inspeção.

Com auxílio do *software EasyFit* foram simuladas diferenças de profundidades com média igual a 9.46 %w.t. (0.60 mm) e com um desvio padrão igual a 0.20 % w.t. (0.01mm), o que representaria em 3 anos uma taxa de corrosão igual a 0.200 mm/ano. As diferenças de profundidades simuladas foram somadas às profundidades da inspeção anterior (2007) para que fossem obtidas as perdas de metal da inspeção mais recente (2010). O valor da taxa de corrosão calculado aqui será igual ao do estudo de caso I, a diferença é que nesta análise a taxa de corrosão não terá um valor constante ($\sigma=0$), logo será variável ($\sigma \neq 0$).

As características dos dados simulados são apresentadas na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Estudo de Caso II – Dados das Inspeções Simuladas

Id	Ano	Quantidade de Corrosão Reportada
		<i>Classificação Corrosão – Gerenciamento</i>
		Interna
Inspeção ILI 01	2007	1000
Inspeção ILI 02	2010	1000

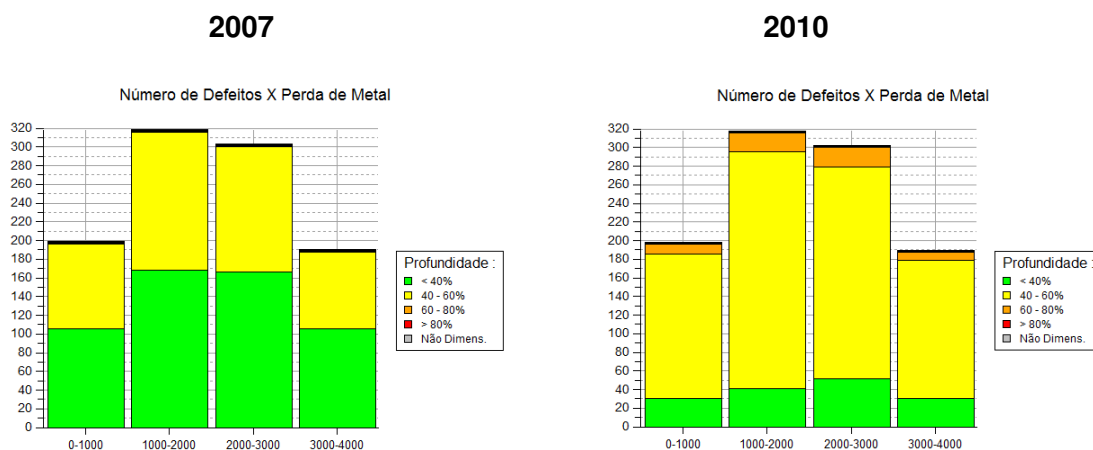


Figura 5.15 – Dados das inspeções – Estudo de Caso II

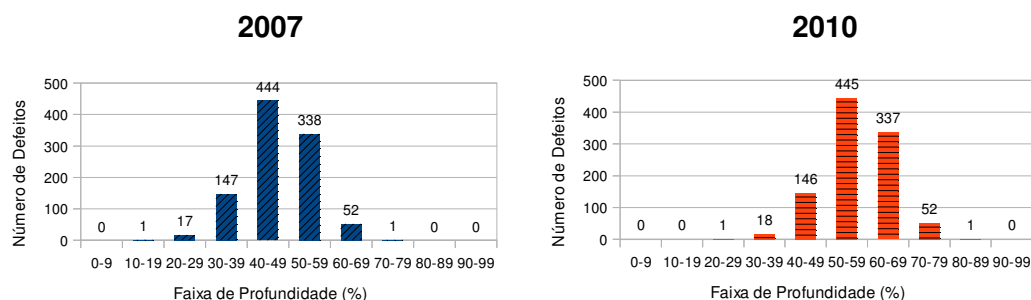


Figura 5.16 – Histograma das inspeções – Estudo de Caso II

Os resultados obtidos para a taxa de corrosão considerando toda extensão do duto são mostrados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Estudo de Caso II – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 0.0 a 4.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)		
	Mínimo	Média	Máxima
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,200		
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,200		
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,200	0,200	0,200
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo			
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2007</i>	0,099		
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,200		
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2007</i>	0,099		
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,198		
Quantidade Anomalias Inspeção 2007	1000		
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	1000		

A tabela 5.9 mostra que os resultados foram os mesmos obtidos no estudo de caso I, pois o valor da taxa é igual 0.200 mm/ano em ambos os casos. No entanto, para o estudo de caso II, a taxa de corrosão simulada é variável ($\sigma \neq 0$) e por isso, foi possível aplicar todas equações e procedimentos das metodologias que estão sendo analisadas neste trabalho para estimar a taxa de corrosão.

5.5.3. Estudo de Caso III

Até aqui foram analisados dutos que apresentavam taxa de corrosão uniforme, seja ela constante ou variável. Todavia, no estudo de caso III as profundidades foram simuladas a fim de se obter taxas de corrosão distintas em dois trechos do duto. Desta forma, o duto simulado apresenta uma taxa de corrosão igual a 0.200 mm/ano (km 0 a km 2) e a 0.500 mm/ano (km 2 a km 4). Assumiu-se também que o duto simulado possui tubos com espessura de parede igual a 15.9 mm e teve seu início de operação em 1980.

Simulou-se as profundidades da 1ª inspeção, a partir do *EasyFit*, com isto foram geradas 512 perdas de metal com média igual a 3.50 mm (22% w.t.) e desvio padrão igual a 0.31 mm (1.94% w.t.) para o trecho entre o km 0.0 e km 2.0 e 488 perdas de metal com média igual a 8.89 mm (56% w.t.) e desvio padrão igual a 0.29 mm (1.83% w.t.) para o trecho entre o km 2.0 e km 4.0.

Com auxílio do *software EasyFit*, também foram geradas diferenças de profundidades com média igual a 6.29 %w.t. (1.00 mm) e com um desvio padrão igual a 0.06 % w.t. (0.01mm) para as anomalias localizadas no trecho entre o km 0.0 e o km 2.0. Para o trecho compreendido entre o km 2.0 e km 4.0, foram simuladas diferenças de profundidades com média igual a 15.72 %w.t. (2.50 mm) e com um desvio padrão igual a 0.03 % w.t. (0.005 mm). As diferenças de profundidades simuladas foram somadas às profundidades da inspeção anterior (2005) para que fossem obtidas as perdas de metal da inspeção mais recente (2010).

A figura 5.17 ilustra a distribuição das profundidades das anomalias ao longo do duto.

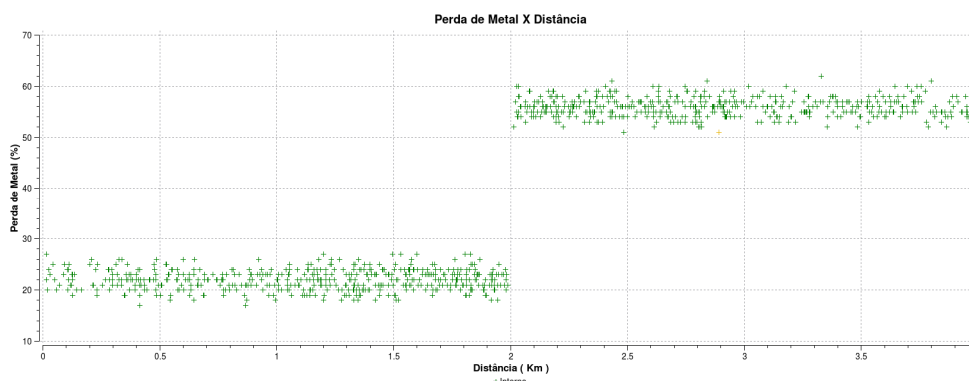


Figura.5.17 – Gráfico Perda de Metal x Distância da inspeção 2005

As características simuladas para as inspeções são apresentadas na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Estudo de Caso III – Dados das Inspeções Simuladas

Id	Ano	Quantidade de Corrosão Reportada
		Classificação Corrosão – Gerenciamento
		Interna
Inspeção ILI 01	2005	1000
Inspeção ILI 02	2010	1000

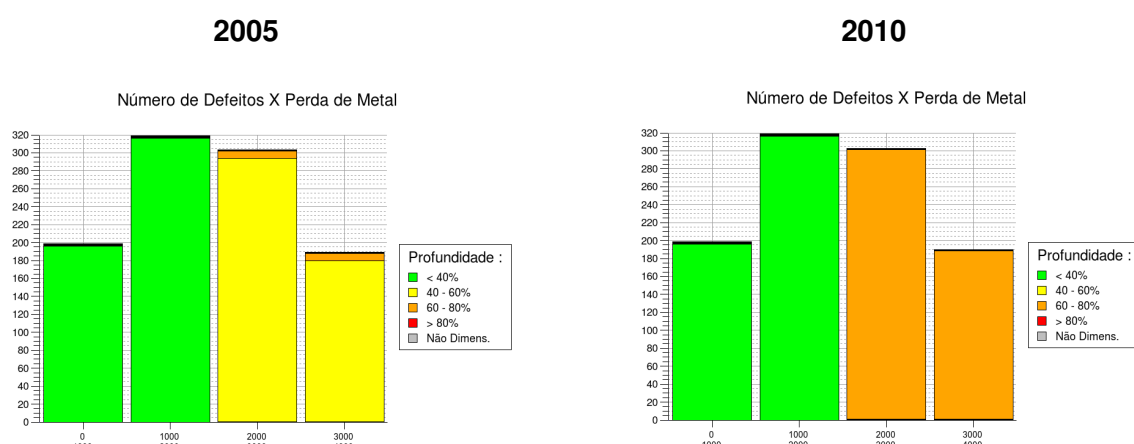


Figura 5.18 – Dados das inspeções – Estudo de Caso III

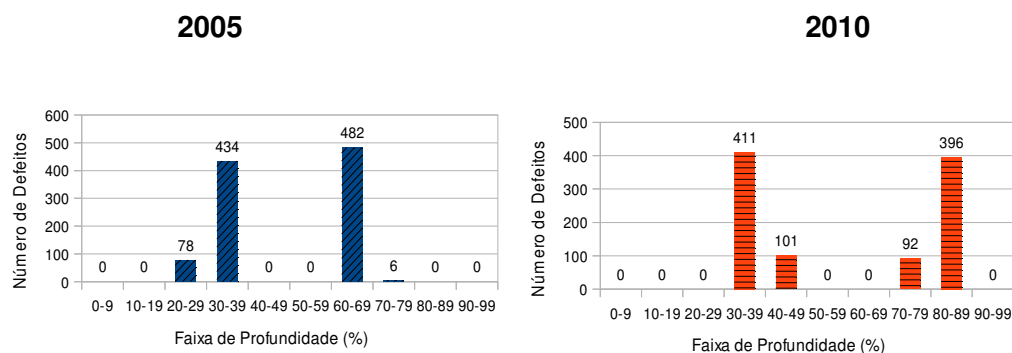


Figura 5.19 – Histograma das inspeções – Estudo de Caso III

Os resultados obtidos para a taxa de corrosão considerando toda extensão do duto são mostrados na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Estudo de Caso III – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 0 a 4.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)		
	Mínimo	Média	Máxima
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,346		
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,353		
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,337	0,346	0,356
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo			
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2005</i>	0,186		
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,259		
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2005</i>	0,186		
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,258		
Quantidade Anomalias Inspeção 2005	1000		
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	1000		

Notar que como o duto não foi segmentado para efetuar a análise, a estimativa encontrada é conservadora para o trecho em que o valor da taxa de corrosão é igual a 0.200 mm/ano. Por outro lado, o valor é subestimado para os trechos com taxa de corrosão igual a 0.500 mm/ano.

Foi possível identificar que existem processos corrosivos com magnitudes distintas no duto ao realizar o ajuste dos dados de inspeção à distribuição de valor extremo a partir do método dos mínimos quadrados, haja vista que o gráfico (figura 5.20) não é contínuo. Como já comentado no item 5.4, a qualidade do ajuste é determinada pelo coeficiente de correlação linear (CR^2), considerando o seguinte critério: quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de correlação linear, melhor a qualidade do ajuste. Logo, a figura 5.20 mostra que o ajuste dos dados à equação da distribuição de valor extremo não é adequado, tendo em vista que o coeficiente de correlação linear (CR^2) é igual a 0.673.

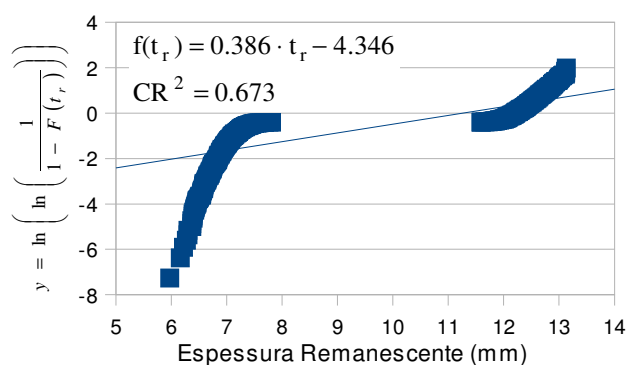


Figura 5.20 – Ajuste dos valores de espessura remanescente da inspeção 2005 à distribuição de valor extremo mínimo

Como constatado pelos resultados do estudo de caso III é importante comparar e avaliar a taxa de corrosão de forma segmentada, visto que as características do duto podem influenciar no crescimento ou estabilização da corrosão e, além disso, variam ao longo de sua extensão devido a diversos fatores, como as formas de proteção e prevenção empregadas, tipo de solo, fluxo de produto transportado, etc.

O duto simulado no caso III foi segmentado de forma dinâmica [11] considerando a variação dos processos corrosivos. Os resultados obtidos após a segmentação são apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13.

Tabela 5.12 – Estudo de Caso III – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 0.0 a 2.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)		
	Mínimo	Média	Máxima
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local		0,200	
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa		0,200	
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,200	0,200	0,200
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo			
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2005</i>		0,134	
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>		0,200	
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2005</i>		0,134	
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>		0,199	
Quantidade Anomalias Inspeção 2005		512	
Quantidade Anomalias Inspeção 2010		512	

Tabela 5.13 – Estudo de Caso III – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 2.0 a 4.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)		
	Mínimo	Média	Máxima
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local		0,500	
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa		0,500	
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,500	0,500	0,500
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo			
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2005</i>		0,350	
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>		0,500	
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2005</i>		0,350	
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>		0,500	
Quantidade Anomalias Inspeção 2005		488	
Quantidade Anomalias Inspeção 2010		488	

Pode-se verificar que ao segmentar o duto foi encontrado o valor da taxa de corrosão simulado para cada trecho.

5.5.4. Estudo de Caso IV

Nas análises anteriores as perdas de metal tinham correspondência entre si, em outras palavras, a taxa de corrosão foi estimada unicamente a partir das diferenças de profundidades encontradas para cada anomalia. No entanto, é comum entre duas inspeções ILI, ainda que sejam realizadas pela mesma empresa, encontrar quantidade de anomalias diferentes em cada inspeção. Isto pode ser explicado pela acurácia de detecção do pig, emprego de distintos critérios de dimensionamentos e identificação das anomalias. Por exemplo, enquanto em uma inspeção foram reportadas perdas de metal individuais, uma segunda inspeção reporta *clusters* (duas ou mais perdas de metal adjacentes na parede de uma tubulação ou em uma solda). Todavia, ainda que o número de anomalias seja igual em ambas inspeções isto não necessariamente indicará que as mesmas perdas de metal foram registradas nas inspeções.

Para o estudo de caso IV, foram acrescentadas aleatoriamente 110 perdas de metal ao total de anomalias da inspeção 02, do estudo de caso II. A partir do *EasyFit*, as anomalias adicionadas foram geradas com uma profundidade média igual a 37%w.t. (2.35 mm) e desvio padrão igual a 10%w.t. (0.64 mm).

O estudo de caso IV tem como objetivo comparar os valores obtidos para a taxa de corrosão quando são utilizadas anomalias mapeadas e não mapeadas. Além disto, será aplicado o método que estima a taxa de corrosão por trechos baseada no Cálculo do Parâmetro (α), visto que nos estudos de casos anteriores foi empregada apenas a abordagem da taxa de corrosão local.

O duto simulado para o caso IV apresenta as mesmas características do caso II. Ou seja, espessura de parede igual a 6.35 mm, 4.0 km de extensão, início da operação em 1985 e taxa de corrosão simulada igual a 0.200 mm/ano.

As características dos dados simulados são apresentadas na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Estudo de Caso IV – Dados das Inspeções Simuladas

Id	Ano	Quantidade de Corrosão Reportada
		<i>Classificação Corrosão – Gerenciamento</i>
		Interna
Inspeção ILI 01	2007	1000
Inspeção ILI 02	2010	1110

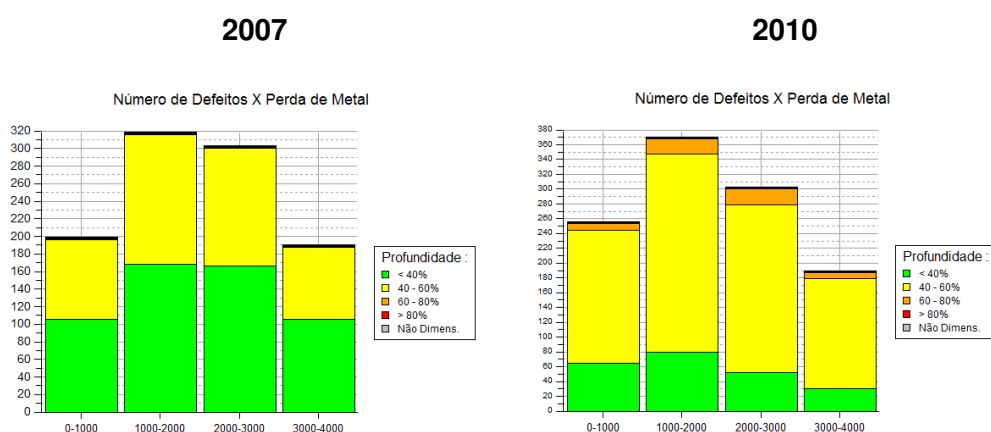


Figura 5.21 – Dados das inspeções – Estudo de Caso IV

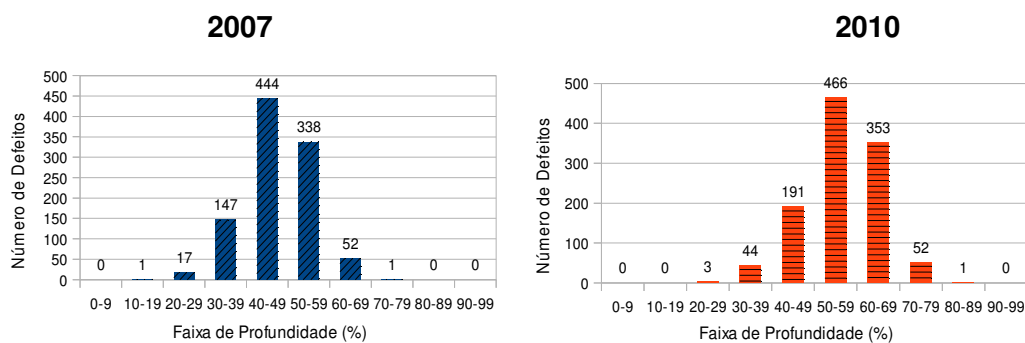


Figura 5.22 – Histograma das inspeções – Estudo de Caso IV

Os valores estimados para a taxa de corrosão considerando toda extensão do duto são mostrados na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Estudo de Caso IV – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Trecho: 0.0 a 4.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,200			0,167
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,200			0,179
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,200	0,200	0,200	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2007</i>				0,099
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,200			0,169
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2007</i>				0, 099
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,198			
Quantidade Anomalias Inspeção 2007	1000			1000
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	1000			1110

Nota:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Neste estudo as anomalias simuladas foram subdivididas em 2 amostras: amostra mapeada e amostra não-mapeada. Na amostra mapeada estão englobadas apenas as anomalias que obtiveram correspondência nas inspeções que estão sendo utilizadas para estimar a taxa de corrosão. Já a amostra não-mapeada é representada por todas as perdas de metal informadas no relatório da inspeção ILI.

Para cada uma das metodologias que estimam a taxa de corrosão foram utilizadas então a amostra contendo apenas as anomalias mapeadas e a amostra que com todas as anomalias registradas pelo pig. Ao comparar os resultados encontrados, verificou-se que os valores estimados para as anomalias *mapeadas* foram mais conservadores que os valores estimados quando são consideradas todas as anomalias do trecho analisado.

Como nos estudos de casos anteriores (I, II e III), o ajuste das profundidades da 1ª inspeção como também das espessuras remanescentes da 1ª inspeção, neste caso, 2005 à distribuição de valor extremos resultou valores inferiores ao valor simulado. Como já comentado anteriormente, a taxa de

corrosão estimada a partir de uma única inspeção é influenciada pelo intervalo de tempo (ΔT) arbitrado e pelo mecanismo de corrosão atuante no duto desde o início da operação até a realização da inspeção que está sendo utilizada para estimar os valores da taxa de corrosão.

Por outro lado, quando os resultados de duas inspeções são utilizados para estimar a taxa de corrosão a partir da distribuição do valor extremo, o valor estimado é similar ao valor simulado (0.200 mm/ano).

Ao analisar os resultados das amostras (*mapeadas e não mapeadas*), separadamente, verifica-se há uma equivalência entre os métodos para estimar a taxa de corrosão.

Existem casos em que o valor estimado para a taxa de corrosão a partir da inspeção por pig é menor que o valor previsto, quando isto ocorre é possível corrigir o valor encontrado a partir do teorema de Bayes, conforme procedimento apresentado por Carvajalino (2004) [16]. Nesta abordagem, o valor da taxa de corrosão corrigido é expresso pela equação [5.47].

$$r_{\text{corrigida}} = \Pr(r_1 | Ef_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{calculada}} + \Pr(r_2 | Ef_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{caminho_medio}} + \Pr(r_3 | Ef_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{esperada}} \quad [5.47]$$

Onde:

$r_{\text{corrigida}}$ = valor da taxa de corrosão corrigido

$\Pr(r_n | Ef_{\text{inspeção}})$ = probabilidades da taxa de corrosão dada uma eficiência da inspeção.

$r_{\text{caminho_medio}}$ = valor da taxa de corrosão que representa o *caminho médio* entre a taxa de corrosão real e a calculada.

r_{esperada} = valor real da taxa de corrosão

As probabilidades da taxa de corrosão são determinadas a partir das probabilidades *a priori* [$\Pr(r_n)$] e das probabilidades condicionais [$\Pr(Ef_{\text{inspeção}} | r_n)$], como mostra a equação [5.48]

$$\Pr(r_n | Ef_{\text{inspeção}}) = \frac{\Pr(Ef_{\text{inspeção}} | r_n) \cdot \Pr(r_n)}{\sum \Pr(Ef_{\text{inspeção}} | r_n) \cdot \Pr(r_n)} \quad [5.48]$$

As probabilidades *a priori* expressam o nível de confiança do valor real que será utilizado como referência para a correção e as probabilidades condicionais representam a eficiência da inspeção. Os valores de cada uma destas probabilidades são apresentados nas tabelas 5.16 e 5.17.

Tabela 5.16 – Probabilidade *a priori* [16]

Estado	Baixa Confiança	Média Confiança	Alta Confiança
A taxa medida é verdadeira	0.33	0.1	0.02
A taxa é o <i>médio caminho</i> entre a taxa medida e a taxa esperada	0.33	0.2	0.08
A taxa esperada é verdadeira	0.33	0.7	0.9

Tabela 5.17 – Probabilidade condicional que define a eficiência da inspeção [16] [57]

Estado de Dano Real	Eficiência Pobre (Ineficiente)	Eficiência Baixa	Eficiência Média	Eficiência Usual	Eficiência Alta
Taxa real menor que a taxa prevista	0,33	0,40	0,50	0,70	0,90
Taxa real entre uma ou duas vezes a taxa prevista	0,33	0,33	0,30	0,20	0,09
Taxa real entre duas ou quatro vezes a taxa prevista	0,33	0,27	0,20	0,10	0,01

Onde:

Eficiência Alta = representa os métodos de inspeção que irão identificar corretamente o verdadeiro estado dos danos com confiabilidade de 80 a 100%.

Eficiência Usual = representa os métodos de inspeção que irão identificar corretamente o verdadeiro estado dos danos com confiabilidade de 60 a 80%.

Eficiência Média = representa os métodos de inspeção que irão identificar corretamente o verdadeiro estado dos danos com confiabilidade de 40 a 60%.

Eficiência Baixa = representa os métodos de inspeção que irão identificar corretamente o verdadeiro estado dos danos com confiabilidade de 20 a 40%.

Eficiência Pobre (Ineficiente) = representa os métodos de inspeção que irão fornecer nenhuma ou quase nenhuma informação sendo considerados ineficazes para detectar os danos com confiabilidade inferior ou igual a 20%.

Para inspeções com pigs instrumentados de alta resolução a classificação mais adequada é a eficiência usual.

A seguir será aplicado o procedimento de correção da taxa de corrosão descrito anteriormente, admitindo que um operador do duto, a partir dos resultados das inspeções por pig, tenha estimado uma taxa de corrosão igual a 0.170 mm/ano quando o valor previsto para mesma é igual a 0.250 mm.

Assumindo uma alta confiança no valor esperado, então, a partir da tabela 5.16 determina-se $\Pr(r_1)=0.02$, $\Pr(r_2)=0.08$ e $\Pr(r_3)=0.9$.

A eficiência da inspeção foi classificada como usual, considerando que as perdas de metal foram detectadas a partir de uma inspeção ILI com pig de alta resolução com 80% de confiabilidade. Com isto, a partir da tabela 5.17 encontra-se as probabilidades condicionais $\Pr(r_1|Ef_{inspeção})=0.7$, $\Pr(r_2|Ef_{inspeção})=0.2$ e $\Pr(r_3|Ef_{inspeção})=0.1$.

Substituindo os valores de probabilidades, na equação [5.48] tem-se:

$$\Pr(r_1 | Ef_{inspeção}) = \frac{\Pr(Ef_{inspeção} | r_1) \cdot \Pr(r_1)}{\sum \Pr(Ef_{inspeção} | r_i) \cdot \Pr(r_i)} = \frac{0.7 \cdot 0.02}{0.7 \cdot 0.02 + 0.2 \cdot 0.08 + 0.1 \cdot 0.9} = 0,117$$

$$\Pr(r_2 | Ef_{inspeção}) = \frac{\Pr(Ef_{inspeção} | r_2) \cdot \Pr(r_2)}{\sum \Pr(Ef_{inspeção} | r_i) \cdot \Pr(r_i)} = \frac{0.2 \cdot 0.08}{0.7 \cdot 0.02 + 0.2 \cdot 0.08 + 0.1 \cdot 0.9} = 0,133$$

$$\Pr(r_3 | Ef_{inspeção}) = \frac{\Pr(Ef_{inspeção} | r_3) \cdot \Pr(r_3)}{\sum \Pr(Ef_{inspeção} | r_i) \cdot \Pr(r_i)} = \frac{0.9 \cdot 0.1}{0.7 \cdot 0.02 + 0.2 \cdot 0.08 + 0.1 \cdot 0.9} = 0,750$$

No exemplo, a taxa de corrosão estimada é igual a 0.170 mm/ano e o valor esperado (simulado) é igual a 0.250 mm/ano. Por definição $r_{caminho_medio}$ é o valor da taxa de corrosão que representa o *caminho médio* entre a taxa de corrosão real e a calculado, portanto será representado pela média entre o valor calculado e o valor esperado, resultando o valor 0.210 mm/ano.

Pela equação [5.47] temos que:

$$r_{\text{corrigida}} = \Pr(r_1 | E_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{calculada}} + \Pr(r_2 | E_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{caminho_medio}} + \Pr(r_3 | E_{\text{inspeção}}) \cdot r_{\text{esperada}}$$

$$r_{\text{corrigida}} = 0.117 \cdot r_{\text{calculada}} + 0.133 \cdot r_{\text{caminho_medio}} + 0.750 \cdot r_{\text{esperada}}$$

$$r_{\text{corrigida}} = 0.117 \cdot 0.170 + 0.133 \cdot 0.210 + 0.750 \cdot 0.250 = 0.235 \text{ mm/ano}$$

Pode-se notar que com a correção, o valor estimado para a taxa de corrosão se aproximou do valor simulado (0.250 mm/ano).

5.5.5. Estudo de Caso V

Aqui as metodologias para estimar a taxa de corrosão serão aplicadas em dados de inspeções realizadas em um duto existente, cujas características seguem abaixo.

Material: API 5L GrB

Diâmetro: 8"

Extensão: 11.0 km

Espessura de Parede do Duto: 7.1 mm e 8.2 mm

Os resultados das inspeções que serão utilizados para estimar a taxa de corrosão são apresentados na tabela 5.18.

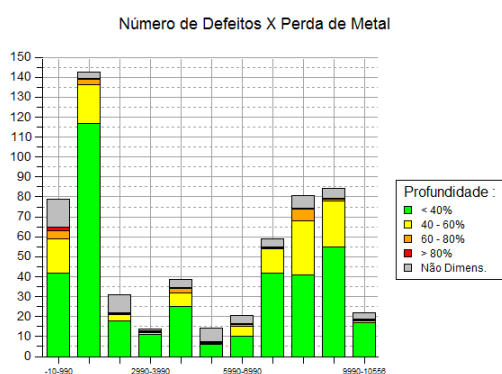
Tabela 5.18 – Estudo de Caso V - Dados das Inspeções Simuladas

Id	Ano	Quantidade de Corrosão Reportada <i>Classificação Corrosão – Gerenciamento</i>	
		Interna	Atmosférica /Externa
Inspeção 01	2006	89	469
Inspeção 02	2010	90	718

Nota:

- Não há informação sobre a localização dos trechos em que o duto é aéreo, por isto as corrosões externas e atmosféricas foram agrupadas numa única coluna.

2006



2010

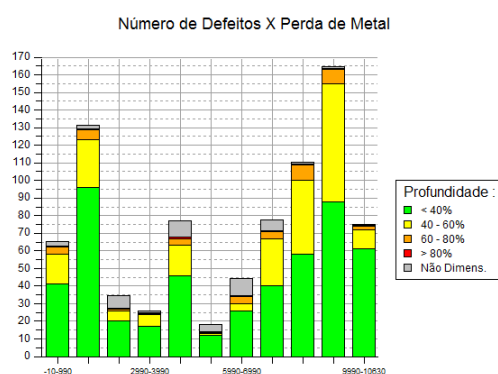


Figura 5.23 – Dados das inspeções – Estudo de Caso V

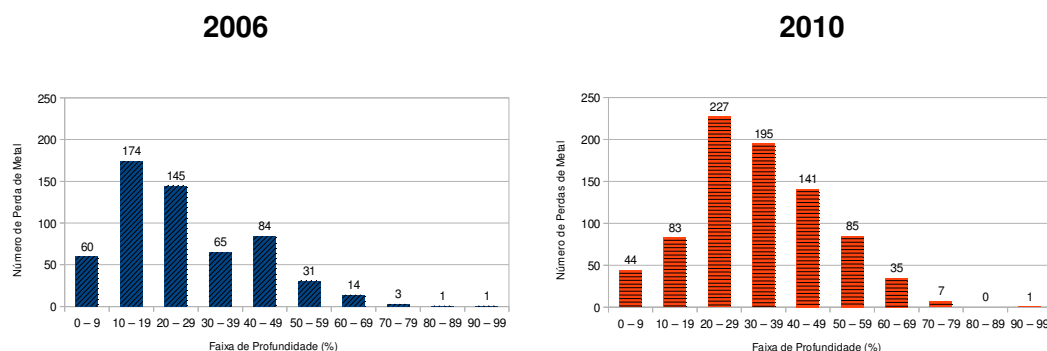


Figura 5.24 – Histograma das inspeções – Estudo de Caso V

No duto, em estudo, foram realizadas ações mitigadoras como: instalação de reparos (dupla calha tipo B) e substituição de tubos. Com a substituição de tubos, consequentemente, foram removidas do duto 105 perdas de metal – 101 externas e 4 internas. Estas anomalias foram descartadas do cálculo para estimar a taxa de corrosão.

Além das anomalias removidas, não serão consideradas no cálculo as 19 anomalias que tiveram diferença de profundidade absoluta maior ou igual 30% w.t.¹³, a localização destas anomalias, ao longo do duto, é mostrada na figura 5.26. Para estas perdas de metal é necessário realizar correlação em campo para que seja possível conhecer o valor real da perda de metal.

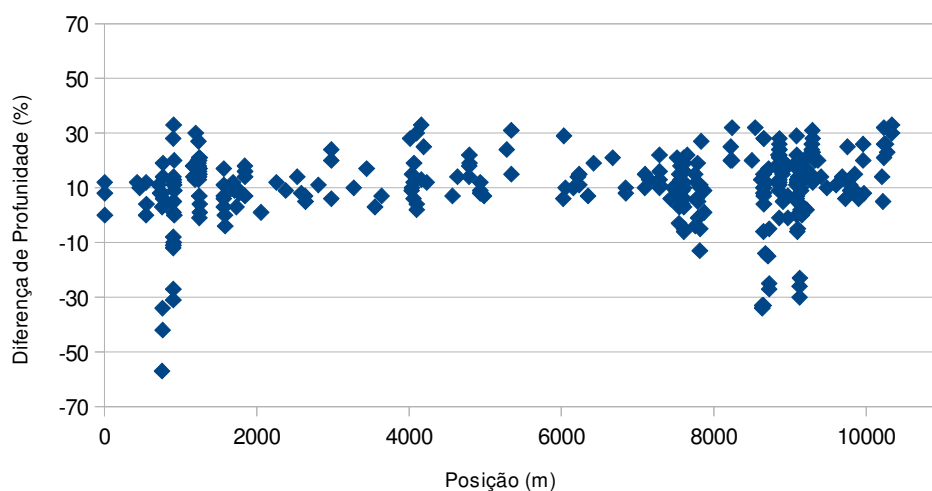


Figura 5.25- Diferença de profundidade entre as anomalias que foram reportadas nas 2 inspeções em estudo

¹³ O valor selecionado para filtrar as diferenças de profundidade é específico a cada aplicação, portanto o valor adotado neste estudo de caso não deve ser utilizado como padrão. No estudo, o critério de seleção do filtro foi adotado a partir da comparação dos sinais registrados pelo pig.

Resumindo, antes de aplicar as metodologias que estimam a taxa de corrosão foram realizados filtros no conjunto de perdas de metal reportadas em cada inspeção. Assim, serão consideradas para o cálculo da taxa de corrosão, apenas as perdas de metal dimensionadas, que não haviam sido removidas por substituição de tubos e ainda apresentaram diferenças de profundidade absoluta menores que 30% w.t..

Para estimar a taxa de corrosão por segmentos, neste estudo de caso, o duto foi segmentado em 7 trechos cujo critério foi a mudança da espessura de parede do tubo. Utilizando este critério (segmentação dinâmica), o duto em estudo foi seccionado em 7 trechos – 4 trechos com espessura de tubo igual a 8.2 mm e 3 trechos com espessura de tubo igual a 7.1 mm. Vale ressaltar que as perdas de metal foram registradas apenas nos trechos em que a espessura do tubo é igual a 8.2 mm, isto é justificável, pois os trechos onde a espessura de tubo é igual a 7.1 mm possuem uma extensão pequena.

Os resultados obtidos para as perdas de metal externas, tanto para toda extensão do duto como para cada trecho, são mostrados nas tabelas 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23.

Tabela 5.19 – Estudo de Caso V – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Corrosão Externa – Trecho: 0.0 a 11.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,227			0,102
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,278			0,119
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,203	0,227	0,252	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,051
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,239			0,114
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,051
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,206			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	278			346
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	278			698

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo

Tabela 5.20 – Estudo de Caso V – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Corrosão Externa – Trecho: 0.0 a 3.78 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,198			0,050
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,235			0,085
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,157	0,198	0,239	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,047
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,224			0,089
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,047
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,170			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	86			117
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	86			216

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Tabela 5.21 – Estudo de Caso V – Resultados da Estimativa da Taxa de corrosão – Corrosão Externa – Trecho: 3.78 a 4.96 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,282			0,087
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,290			0,056
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,217	0,282	0,348	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,047
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,298			0,101
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,047
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,213			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	22			25
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	22			60

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Tabela 5.22 – Estudo de Caso V – Resultados da Estimativa da Taxa de corrosão – Corrosão Externa – Trecho: 4.98 a 9.5 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,226			0,142
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,290			0,148
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,190	0,226	0,262	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,055
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,232			0,140
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,055
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,221			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	152			185
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	152			312

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Tabela 5.23 – Estudo de Caso V – Resultados da Estimativa da Taxa de corrosão – Corrosão Externa – Trecho: 9.51 a 11.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,313			0,179
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,327			0,220
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,233	0,313	0,393	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,043
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,303			0,182
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,043
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,234			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	18			19
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	18			109

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Os resultados obtidos, considerando toda extensão do duto, para as perdas de metal internas são mostrados na tabela 5.24. Não serão apresentados os resultados encontrados para cada trecho, pois a pequena quantidade de perdas de metal internas detectadas dificulta a elaboração de uma hipótese para quando o cálculo é feito para cada segmento.

Tabela 5.24 – Resultados da Estimativa da Taxa de Corrosão – Corrosão Interna – Trecho: 0 a 11.0 km

Metodologia	Taxa Estimada (mm/ano)			
	Mapeadas			Não Mapeadas
	Mínimo	Média	Máxima	Média
Taxa de Corrosão baseada na Profundidade Local	0,154			0,314
Taxa de Corrosão baseada no parâmetro alfa	0,126			0,318
Taxa de Corrosão a partir do Intervalo de Confiança	0,059	0,154	0,250	
Taxa de Corrosão a partir da Distribuição de Valor Extremo				
<i>a partir das espessuras remanescentes da inspeção 2006</i>				0,048
<i>a partir das diferenças de espessuras remanescentes</i>	0,190			0,362
<i>a partir das profundidades das anomalias da inspeção 2006</i>				0,048
<i>a partir das taxa de corrosão individuais</i>	0,122			
Quantidade Anomalias Inspeção 2006	17			50
Quantidade Anomalias Inspeção 2010	17			47

Notas:

- Mapeadas – definição dada às perdas de metal que foram reportadas nas duas inspeções em estudo.

Para a corrosão externa verificou-se que quando é realizado o mapeamento (*matching*) das perdas de metal, o valor estimado para a taxa de corrosão foi conservador em relação ao valor estimado pelas metodologias que permitem o cálculo sem que a comparação de anomalias seja efetuada. Entretanto, o mesmo não ocorreu com a estimativa da taxa das corrosões internas. Isto é explicado, pois a diferença entre as médias das profundidades das perdas de metal internas *não-mapeadas* foi mais alta que a diferença das profundidades calculadas para as anomalias *mapeadas*.

Embora se tenha notado uma diferença entre os valores da taxa de corrosão estimados a partir das perdas de metal mapeadas e os valores encontrados por metodologias onde a comparação de anomalias não é exigida,

foi observado que existe uma equivalência entre a taxa de corrosão quando comparadas as taxas de corrosão de cada grupo. Ou seja, ao comparar apenas os resultados das anomalias mapeadas verifica-se uma correspondência entre os valores estimados, o mesmo ocorre quando é efetuada a comparação dos valores da taxa de corrosão obtidos apenas pelos métodos em que os dados das inspeções são utilizados sem o mapeamento de anomalias.

Tal como ocorrido nos estudos de caso com dados simulados, para o estudo de caso V observou-se que quando a taxa de corrosão é estimada a partir dos resultados de uma única inspeção, ou seja, quando o ajuste à distribuição de valor extremo é efetuado apenas para os valores das profundidades e das espessuras remanescentes de uma única inspeção, a taxa de corrosão apresenta um valor inferior quando comparado aos valores obtidos quando se empregam os dados de duas inspeções ILI. Isto é influenciado pelo mecanismo de corrosão atuante no duto desde o início da operação até a realização da inspeção que está sendo utilizada para estimar os valores da taxa de corrosão.