

## **4 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO DUTO**

Para elaborar um plano de gestão da integridade é importante conhecer os métodos de inspeções que podem ser empregados, critérios para avaliar a criticidade das anomalias detectadas nas inspeções, métodos para monitorar a evolução das corrosões. Como também, ter o conhecimento de que ações devem ser efetuadas quando a anomalia é considerada uma ameaça à integridade do duto.

Em vista disso, serão abordados neste capítulo: os principais métodos empregados para avaliação da integridade do duto considerando apenas a falha por corrosão, a comparação técnico-econômica em que foram considerados os aspectos positivos e negativos de cada método de avaliação de integridade em relação ao mecanismo de falha por corrosão e os critérios para avaliar a severidade das perdas de metal.

Nos capítulos posteriores serão apresentadas, então, as metodologias para estimar a taxa de corrosão e as recomendações para ações mitigadoras e intervalos de inspeção.

### **4.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO DUTO**

#### **4.1.1. Inspeção Interna**

Este tipo de avaliação de integridade é requisitada na fase de construção e montagem, como indicam as normas ASME B31.4 [30], ASME B31.8 [17] e N-464H [31], e como método de inspeção para o gerenciamento de integridade pelas normas ASME B31.8S [10] e API 1160 [2] e por Muhlbauer [11]. Logo, a inspeção interna é empregada tanto na fase de construção e montagem como no ciclo operacional do duto. No que diz respeito à integridade do duto, a partir dos resultados da inspeção interna o operador pode: programar reparos por ordem

de severidade e decidir que ações mitigadoras devem ser tomadas; atestar a segurança operacional do duto; e monitorar a evolução ou surgimento de novas anomalias ao longo do duto quando são realizadas distintas inspeções internas em um mesmo trecho de um duto.

Para a realização deste método de avaliação é utilizado o *pig*, que é uma ferramenta que passa pelo interior dos dutos, impulsionado pelo fluido transportado ou eventualmente por um sistema tracionador. E sua grande vantagem é a possibilidade de inspecionar toda a extensão do duto.

Os pigs podem ser classificados em duas categorias: não instrumentados, que realizam a função de limpeza, separação de produtos e remoção de água; e instrumentados, que devido à presença de dispositivos ou sensores possuem capacidade de adquirir e registrar uma ou mais das seguintes informações dos dutos: mochas, ovalizações, acessórios e equipamentos (válvulas, drenos, suspiros, etc.), descontinuidades na parede do duto, raios de curvatura, espessura da parede, coordenadas geográficas, temperatura e pressão. Como curiosidade pode-se informar que os pigs também são conhecidos como: *smart pigs*, *diablo inteligente*, *chancho* e *marrano*.

Resumidamente, na inspeção interna ocorrem a detecção e o dimensionamento das anomalias e/ou dos acessórios do duto. Após a finalização da inspeção, os dados adquiridos são transferidos para um computador para que os mesmos sejam analisados por programas específicos. A partir da análise dos dados registrados pelo pig é gerado um relatório que apresenta as informações solicitadas pelo operador do duto. Em seguida são feitas correlações em campo, para uma amostra dos defeitos reportados, com a finalidade de validar e aprovar dos resultados da inspeção.

Como o foco deste trabalho é o gerenciamento de falha por corrosão em dutos, a seguir serão apresentados os pigs de detecção de perda de massa metálica, ou pigs de corrosão. Ou seja, aqui serão detalhados o pig MFL e o pig de ultra-som, que são os mais tradicionais, e o pig Palito que foi desenvolvido recentemente.

### a) Pig MFL

A inspeção MFL (*Magnetic Flux Leakage*), em dutos, é a mais antiga e a mais comum, e como o próprio nome diz baseia-se no vazamento do campo magnético. A técnica MFL consiste na aplicação de um campo magnético (transversal ou longitudinal) na parede do tubo até obter sua saturação magnética, à medida que a ferramenta se desloca, através do sistema de magnetização do pig (ímãs). Na presença de anomalias ocorre a fuga do campo magnético, que é medida pelos sensores e armazenada pelo sistema de registro de dados do pig. Portanto, a anomalia só é detectada se há fuga de campo magnético. A figura 4.1 ilustra um exemplo de um pig MFL.



Figura 4.1 – Foto Pig MFL

Fonte: PipeWay Engenharia

A geometria das anomalias e as características geométricas e construtivas do duto podem influenciar o resultado da inspeção realizada com o pig MFL, devido ao princípio da técnica. Por exemplo, se o duto inspecionado apresenta perdas de metal longitudinais extensas, estas discontinuidades devido a suas características podem não provocar a fuga do campo magnético ou mesmo gerar uma fuga com intensidade pequena, acarretando em um resultado que não corresponda à realidade do duto se aplicado um campo magnético longitudinal. Um segundo exemplo, a ser citado, é a utilização da técnica MFL em dutos com altas espessuras, pois o campo aplicado deve ser capaz de magnetizar os tubos por completo para que seja possível detectar as discontinuidades.

Os pigs MFL podem detectar perdas de metal e, em alguns casos, defeitos geométricos e metalúrgicos ou acessórios dos dutos, como válvulas, suportes, derivações, etc. Além disso, é possível discriminar se a corrosão é interna ou externa. Conseqüentemente, pode ser utilizado para detecção da corrosão

interna, externa e atmosférica (corrosão em trechos aéreos) que são as categorias utilizadas para o gerenciamento de corrosão neste trabalho.

A corrosão sob tensão, as trincas circunferenciais e longitudinais também podem ser detectadas pela técnica MFL, dependendo do sentido em que o campo magnético é aplicado no duto. Ou seja, trincas circunferenciais são detectadas com aplicação do campo magnético longitudinal e as trincas axiais com a aplicação do campo magnético transversal.

#### b) **Pig Ultra-Som**

Este pig utiliza a técnica de ultra-som que permite a medição direta da espessura do tubo. Nesta técnica o transdutor de ultra-som emite uma onda acústica que ao colidir com a parede do duto, produz dois efeitos: a geração de um eco nesta superfície, e a introdução de parte da energia sônica no material. Essa parte da onda percorre o material até atingir a superfície externa do tubo, gerando um segundo eco. O sistema eletrônico registra os tempos de cada eco, quantificando com precisão as distâncias percorridas. A figura 4.2 ilustra um exemplo de um pig UT.



Figura 4.2 – Pig Ultra-Som [32]

As inspeções com o pig ultra-som, assim como o pig MFL, tem como objetivo localizar, detectar e dimensionar perdas de espessura. Como parâmetro de comparação da acurácia de dimensionamento entre o pig UT e MFL podem-se utilizar os valores oferecidos pelo documento POF, que informa que a acurácia de uma ferramenta padrão MFL de alta resolução está entre 10 a 15%, enquanto para o pig UT este valor varia de 0.3 a 0.5 mm. Ao utilizar estas referências para um duto de 10 mm de espessura, a acurácia do pig MFL estaria entre 1.0 e 1.5 mm, enquanto a do pig UT estaria entre 0.3 a 0.5 mm. Notar que para o pig MFL a exatidão é dependente da espessura do tubo.

Deve-se considerar que as ferramentas convencionais de ultra-som exigem a utilização de acoplante, conseqüentemente não há aplicabilidade em gasodutos e até mesmo em dutos multifásicos. Atualmente, existem novas soluções para estas limitações, como o emprego de “colchão” de líquido, para que o pig desloque dentro dele ao longo do duto, e/ou o emprego da tecnologia EMAT (Transdutor Acústico Eletromagnético) [28,33].

De forma geral, a técnica de ultra-som depende do meio acoplante usado pela onda sônica, por isso parafinas e detritos podem degradar o dimensionamento do pig UT, devido a isto a limpeza do duto deve ser mais rigorosa do que para a inspeção MFL.. Além disto, esta tecnologia não apresenta um bom desempenho na superfície de uma parede de tubo com muita rugosidade, pois se, no ponto de encontro do feixe sônico com a parede do duto, a superfície for muito inclinada em relação ao eixo do duto, a reflexão se dará em outra direção e não será captada pelo transdutor.

Além de corrosões e laminações, os pigs de ultra-som podem detectar trincas circunferenciais e longitudinais, amassamentos, *blisters* [2,28], acessórios e equipamentos do duto (como derivação, curvas, solda, etc.). Portanto, este pig também pode ser utilizado para a detecção da corrosão interna, externa e atmosférica (corrosão em trechos aéreos) que são as categorias utilizadas para o gerenciamento de corrosão neste trabalho.

Como solução às limitações quanto à geometria das anomalias e às características do duto podem-se realizar alterações em alguma característica do transdutor do pig. Por exemplo, para inspecionar um duto cujos tubos apresentam pequenas espessuras deve-se aumentar a frequência do transdutor.

### c) **Pig Palito**

O pig Palito é empregado para detecção e dimensionamento de corrosões internas nos dutos. Essa nova tecnologia de pig possibilita a inspeção de tubulações com altas espessuras e com geometria complexa como: curvas de pequeno raio, mudanças de diâmetro ou outros obstáculos que impeçam o uso das ferramentas convencionais existentes no mercado.

Ao detectar a corrosão interna, o dimensionamento da mesma é feito a partir da variação das hastes (sensores palitos – sensores geométricos de alta resolução). A figura 4.3 ilustra um exemplo de um pig Palito.



Figura 4.3 – Foto Pig Palito  
Fonte: PipeWay Engenharia

Por ser uma ferramenta nova, o pig Palito não é citado nas normas americanas utilizadas como referência neste trabalho.

#### **4.1.2. Avaliação Direta**

É o método de avaliação de integridade que utiliza um processo estruturado através do qual o operador busca integrar conhecimentos – como as características físicas, do projeto e do histórico operacional – com os resultados de inspeção, exame e avaliação, para identificar áreas potenciais de ocorrência de mecanismos de degradação ao longo de um duto. Esta metodologia surgiu nos EUA como alternativa de avaliação de integridade para dutos enterrados e não pigáveis. No entanto, enquanto a inspeção interna detecta ocorrências relacionadas a diversas ameaças, a avaliação direta permite identificar adequadamente somente as ameaças previamente determinadas como prováveis ou possíveis.

A avaliação direta tem como objetivo evitar que as corrosões existentes no duto atinjam proporções que ameacem a sua integridade. Esta avaliação de integridade baseia-se na identificação e na localização de pontos ativos de corrosão, mesmo em estado inicial, a fim de permitir reparos e outras medidas remediadoras de forma preventiva.

Esta avaliação de integridade se subdivide em 4 etapas:

- pré-avaliação – coleta e integração de dados para determinar a aplicabilidade da avaliação direta, identificar regiões que serão inspecionadas e selecionar ferramentas para a execução da inspeção indireta.
- inspeção indireta – realização de inspeções, sobre o solo (executadas sem escavação), de avaliações numéricas ou de simulações computacionais para identificar e definir a severidade dos defeitos no revestimento e as áreas susceptíveis à corrosão.
- inspeção direta – análise dos resultados da inspeção indireta a fim de selecionar os locais de escavações, e avaliação da superfície do duto. Os resultados da inspeção *direta* são combinados com os da inspeção *indireta* para identificar e avaliar o impacto da corrosão no duto.
- pós-avaliação – definição dos intervalos de reavaliação e da efetividade do processo de avaliação direta.

A avaliação direta difere segundo as formas de corrosão. Desta forma, tem-se: avaliação direta para corrosão externa, avaliação direta para corrosão interna e avaliação direta para corrosão sob tensão. Vale ressaltar que no estudo que está sendo efetuado, a corrosão sob tensão está incluída no grupo corrosão externa.

A NACE publicou as seguintes normas como um guia para a realização da avaliação direta: NACE SP0502-2010 [34] (avaliação direta de corrosão externa); NACE SP0204-2008 [35] (avaliação direta de corrosão sob tensão); NACE SP0110-2010 [36] (avaliação direta de corrosão interna para dutos que transportam gás natural com água condensada, ou com água e hidrocarbonetos líquidos); NACE SP0206-2006 [37] (avaliação direta de corrosão interna para dutos que transportam gás natural seco); NACE SP0208-2008 [38] (avaliação direta de corrosão interna para oleodutos).

Dentre as referências bibliográficas utilizadas para o gerenciamento de integridade neste trabalho (Muhlbauer [11], ASME B31.8S [10] e API 1160 [2]), somente a norma ASME B31.8S [10] inclui a avaliação direta como um método para avaliação de integridade.

### 4.1.3. Teste Hidrostático

Este método de avaliação de integridade pode ser empregado em dutos novos e na requalificação de dutos existentes para diferentes condições operacionais e, para averiguação de resistência e estanqueidade após a execução dos reparos. Para a realização deste teste o operador de dutos pode seguir os requisitos e os procedimentos recomendados pelas normas: N-464 [31], ASME B31.4 [30], ASME B31.8 [17], NBR 12712 [39], ISO 13623 [40], API RP 1110 [41] e Z662-94 [42].

Resumidamente, o teste hidrostático consiste em tirar o produto de dentro do duto, enchê-lo com água e colocar esta água a uma determinada pressão, a qual deve ser suportada pelo duto sem rompimento e não deve diminuir ao longo do tempo de ensaio, o que significaria um vazamento. Aqui podem-se constatar algumas desvantagens deste método, pois o operador deve se preocupar com a obtenção e o descarte da água e ainda retirar o duto de operação.

Este método é empregado como uma alternativa para avaliar a integridade dos dutos inspecionados por outro método de avaliação que não garante confiabilidade satisfatória à integridade, dos dutos não-pigáveis e dos dutos cujas anomalias não são detectadas pelas inspeções ILI.

O teste hidrostático pode, além de substituir, complementar as inspeções internas por pig. No entanto, para a avaliação da corrosão interna e externa, a inspeção por pig é mais eficaz. Por isto, a seleção do teste hidrostático como ferramenta de avaliação de integridade requer a comprovação de cumprimento do programa de controle de corrosão.

Além da pouca efetividade na avaliação da integridade no que diz respeito à corrosão, o teste hidrostático apresenta outras desvantagens, como a remoção destrutiva de defeitos críticos antes de ocorrer a falha do duto, a possibilidade de crescimento subcrítico de trincas por fadiga, de corrosão sob tensão ou de corrosão, e também a reversão da pressão em testes subsequentes.

## 4.2. COMPARAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE

A escolha do(s) método(s) de avaliação de integridade de dutos mais adequado(s) depende de uma variedade de fatores técnicos e econômicos, portanto é importante que o operador de duto considere as condições físicas e operacionais do duto, os tipos de corrosões que devem ser analisados e o custo.

A comparação técnica-econômica das avaliações de integridade de dutos recomendadas pelas normas de integridade e Muhlbauer [11] é apresentada nas tabelas 4.1 e 4.2. A tabela 4.1 mostra a comparação dos fatores técnicos enquanto que a tabela 4.2 apresenta a comparação econômica.

Tabela 4.1 - Comparação técnica entre as avaliações de integridade de dutos

Aspectos Técnicos	Avaliação de Integridade		
	Inspeção Interna	Teste Hidrostático	Avaliação Direta
Dimensionamento das corrosões influenciado pela precisão das ferramentas	X		X
Detecta Corrosão Externa <sup>1</sup>	X	X	X
Detecta Corrosão Interna	X	X	X
Detecta Corrosão Atmosférica	X	X	X
Dimensiona as anomalias	X		X
Discrimina a natureza das anomalias (interna/externa)	X		
Identifica áreas susceptíveis à corrosão			X
Inspeciona toda extensão do duto	X	X	X <sup>2</sup>
Melhora a resistência do duto à corrosão sob tensão		X	
Método Destrutivo		X	
Permite monitorar a evolução ou surgimento de novas corrosões	X		X
Proporciona ao operador um histórico das anomalias do duto	X		X (apenas do trecho avaliado)
Remove defeitos menores que aqueles que falhariam na pressão de operação.		X	
Requer dutos adequados para inspeção por pig (dutos pigáveis)	X		

<sup>1</sup> Vale ressaltar que a corrosão sob tensão para este trabalho está englobada no grupo corrosão externa.

<sup>2</sup> Caso o duto tenha uma extensão muito pequena.

Aspectos Técnicos	Avaliação de Integridade		
	Inspeção Interna	Teste Hidrostático	Avaliação Direta
Requer interrupção da operação		X	
Requer limites mínimos e máximos de pressão	X	X	
Requer limites mínimos e máximos de temperatura	X		
Requer obtenção e descarte da água		X	
Requer que o duto esteja limpo	X		

Não foram encontradas referências de custos no Brasil para cada método de inspeção em dutos. Assim, serão apresentadas na tabela 4.2 as referências da malha dutoviária dos EUA em que são incluídos os custos da inspeção e das atividades de pré-inspeção (inclusão de lançador [1] de pig no duto no caso das inspeções internas, parada de operação do duto no caso do teste hidrostático, etc.), da supervisão operacional e da perda de produção.

Tabela 4.2 – Comparação econômica entre os principais métodos de avaliação de integridade de dutos [28]

Atividade	Estimativa de Custos para as Avaliações de Integridade de Dutos (\$ por 1.61 km) <sup>3</sup>					
	Gasoduto			Oleoduto		
	ILI	TH	AD	ILI	TH	AD
Preparação	500	1250 a 5000	-	2500	1250 a 5000	-
Inspeção	2000 a 3500	2000	2000 a 6000	2000 a 3500	2000	2000 a 6000
Supervisão Operacional	100	-	-	100	-	-
Perda de Produção	600	6890 a 22960	720 a 3600	-	27650 a 92160	-
Total	3200 a 5300	10140 a 29960	2720 a 9600	4600 a 6100	30900 a 99160	2000 a 6000

No que diz respeito aos custos, o teste hidrostático é, pela interrupção da operação do duto, o método com o custo total mais alto. Em compensação, a inspeção interna tem os maiores custos nas atividades de preparação para inspeção – como limpeza do duto, adequação do duto para a execução das inspeções (instalação de lançador/recebedor, instalação de válvulas que permitam a passagem de pigs, etc.). Também vale informar que em uma

<sup>3</sup> Notar que 1 mi (milha) equivale a 1.61 km.

inspeção por pig os custos podem variar de acordo com a técnica utilizada, o conteúdo do relatório, a extensão e o diâmetro do duto.

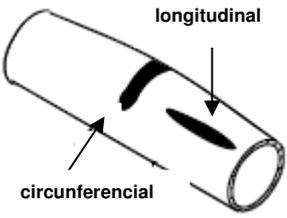
### 4.3. CRITÉRIOS PARA AVALIAR A CORROSÃO EM DUTOS

Após a realização das inspeções é necessário interpretar os resultados encontrados e avaliar se as corrosões são ou não aceitáveis para que o duto permaneça com sua integridade garantida antes da próxima inspeção. Vale destacar que os critérios de avaliação não são aplicados nas corrosões detectadas pelo teste hidrostático, pois este método de inspeção requer reparo imediato.

Segundo as referências [43-46], para o PDAM (*Pipeline Defect Assessment Manual*), os principais critérios de avaliação da corrosão são: ASME B31G original [47-48], ASME B31G modificado [47-48], RSTRENG [48], DNV-RP-F101 [49], KASTNER [50], BS 7910 [51], API 579 [52] e PAFFC [53]. As equações destes métodos não serão apresentadas neste trabalho, mas podem ser encontradas e consultadas em suas respectivas referências bibliográficas.

A tabela 4.3 relaciona os principais critérios de avaliação da criticidade da corrosão com as classificações de gerenciamento.

Tabela 4.3 – Critérios de avaliação considerando a classificação de gerenciamento de corrosão [43-46]

Tipo	Principais Critérios de Avaliação da Corrosão	
	Longitudinal	Circunferencial
Corrosão (interna / externa) 	ASME B31G [47-48] (Original/Modificado) RSTRENG [48] DNV-RP-F101 [49]	KASTNER [50]
Corrosão sob tensão	BS 7910 [51] ou API 579 [52] PAFFC ( <i>Pipe Axial Flaw Failure Criteria</i> ) [53]	