

3 FORMAS DE CORROSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as classificações utilizadas para corrosão em dutos considerando o mecanismo, morfologia, fenomenologia, dimensionamento e gerenciamento.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO

3.1.1. Mecanismos

Quanto ao mecanismo, a corrosão pode ser classificada como: **eletroquímica** e **química**. A principal diferença entre elas é a ocorrência do deslocamento de elétrons que só ocorre na corrosão eletroquímica.

Em dutos, é notada a ocorrência apenas da corrosão **eletroquímica** e como exemplos pode-se citar: corrosão em água ou soluções aquosas; corrosão atmosférica; corrosão pelo solo (processo corrosivo observado em dutos enterrados).

3.1.2. Morfologia

No que diz respeito a morfologia, a corrosão em duto pode ser classificada como: uniforme, *pitting*, intergranular, transgranular, filiforme, empolamento pelo hidrogênio, em torno do cordão de solda. As definições de cada um das classificações são apresentadas a seguir.

- a) **Uniforme** - Corrosão que se processa em toda extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura.

Segundo Gentil [28], esta terminologia é usada, por alguns, como corrosão generalizada, que, porém não deve ser empregada apenas para corrosão uniforme, pois pode-se ter, também corrosão por pite ou alveolar generalizada, isto é, em toda extensão da superfície corroída.

b) Localizada

i. *Pitting Corrosion* - As publicações estrangeiras usam somente o termo corrosão por pite (*pitting corrosion*) que engloba as 3 classificações apresentadas abaixo. No Brasil, estas três classificações apresentadas causam divergências de opiniões, pois em alguns processos corrosivos é difícil caracterizar se as cavidades formadas estão sob a forma de placas, alvéolos ou pites. Para este trabalho será considerada a terminologia estrangeira *pitting corrosion*.

- **Por placas** – Corrosão que se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda extensão formando placas com escavações.
- **Alveolar** – Corrosão que se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.
- **Puntiforme ou Pite** – Corrosão que ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.

ii. Corrosão Intergranular ou Intercristalina – Este tipo de corrosão localiza-se entre os grãos da estrutura cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando submetido a esforços mecânicos menores que o esperado, como é o caso da corrosão sob tensão fraturante (*stress corrosion cracking*, SCC).

iii. Corrosão Transgranular ou Transcristalina ou Intragranular – Este tipo de corrosão se processa nos grãos cristalinos da rede cristalina do material metálico, o qual, pela perda de suas propriedades mecânicas poderá fraturar à menor solicitação mecânica, assim como no caso da corrosão intergranular – sendo que seus efeitos são muito mais catastróficos que o caso da corrosão intergranular.

iv.Filiforme – Este tipo de corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam. Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com filmes poliméricos, tintas ou metais ocasionando o deslocamento do revestimento.

Ocorre com mais frequência em ambientes cuja umidade relativa do ar é maior que 85% e, em revestimentos mais permeáveis à penetração de oxigênio e água ou apresentando defeitos, como riscos.

v.Empolamento pelo Hidrogênio – O hidrogênio no estado atômico tem grande capacidade de difusão em materiais metálicos. Dessa forma, se o hidrogênio for gerado na superfície de um material, ele migra para o interior e acumula-se em defeitos existentes, como laminações ou inclusões não metálica. Esse hidrogênio pode ser resultante da decomposição da água de cristalização, contida em alguns tipos de revestimento de eletrodo, em processos de soldagem. Mas, também pode ser produto de alguns tipos de reações de corrosão, ou ainda, pode ser gerado pela ação de gases ricos em hidrogênio, ou por meio de outros processos.

O hidrogênio acumulado passa da forma atômica a molecular e provoca o aparecimento de altas pressões no interior da falha. Quando o acúmulo de hidrogênio ocorre em falhas próximas à superfície, a deformação pode provocar empolamentos, sendo comum denominar este processo de empolamento pelo hidrogênio.

vi.Em torno do cordão de solda – Tipo de corrosão que se observa na ZTA (zona termicamente afetada) [23].

As definições apresentadas anteriormente são ilustradas na figura 3.1.

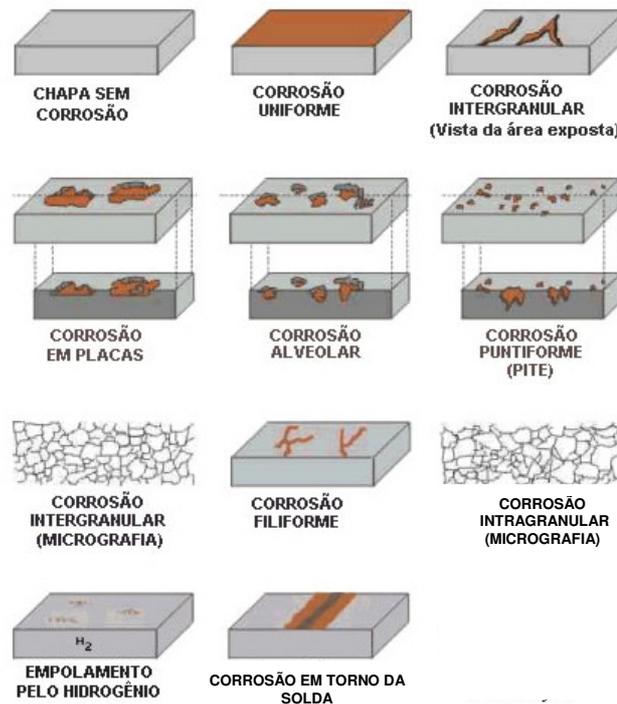


Figura 3.1 – Classificações da corrosão segundo sua morfologia [25]

3.1.3. Fenomenologia

Em relação aos fenômenos corrosivos, as classificações da corrosão em dutos são: galvânica, eletrolítica, seletiva, induzida por microorganismo, atmosférica, corrosão-erosão [3], sob fadiga, sob tensão, aeração diferencial e em frestas. Todos estes tipos de corrosão são observados em dutos, por isso a seguir serão apresentadas suas respectivas definições.

- a) **Corrosão Galvânica** - Corrosão que ocorre quando dois materiais metálicos, com diferentes potenciais, estão em contato em presença de um eletrólito. Este contato causa uma transferência de carga elétrica de um material para outro devido a diferença de potenciais elétricos.

Em dutos, a corrosão galvânica pode ser observada quando dois materiais metálicos estão em contato, surgindo assim áreas anódicas e catódicas. Essas áreas existem, por exemplo, quando um tubo novo está em contato com tubos antigos. Este tipo de corrosão também pode ocorrer devido a presença de tubos concretados em

alguns trechos do duto e a partir de metais diferentes usados durante a soldagem na tubulação.

- b) **Corrosão Eletrolítica** – Corrosão ocasionada em estruturas metálicas enterradas ou submersas, como resultado de correntes elétricas de interferência que também são chamadas de correntes de fuga, estranhas, parasitas, vagabundas ou espúrias. É importante informar que as correntes de fuga que causam maiores danos são as correntes contínuas ou as alternadas de baixa frequência.
- c) **Corrosão Seletiva** – Corrosão em que há remoção preferencial de um ou mais elementos de liga. Ocorre por influência metalúrgica, do ambiente a que o material está exposto e a química da água.

Em dutos, a corrosão seletiva pode ocorrer na região da solda ou em torno da costura. A ação corrosiva na região da costura é maior do que em suas adjacências.

d) **Corrosão Induzida por Microorganismos (MIC)** - Corrosão que pode ser desencadeada ou acelerada, pelo resultado da atividade metabólica dos microorganismos. Este tipo de corrosão pode causar várias formas de corrosão localizada, com altas taxas e podem ocorrer em locais onde não seria previsível.

Quando ocasionada por bactérias, que podem ser classificadas como aeróbias ou anaeróbias, a corrosão é chamada de corrosão bacteriana.

Em dutos, a corrosão induzida por microorganismos pode causar perdas de metal internas ou externas. As bactérias não atacam o aço diretamente, mas criam alterações no eletrólito o que aumenta a atividade de corrosão. Elas não só convertem sulfatos em ácido sulfúrico, que ataca o tubo, mas também consomem o hidrogênio, o que destrói o filme de polarização em proteção catódica e aumenta a corrente exigida para uma proteção catódica eficiente.

- e) **Corrosão por Aeração Diferencial** - Corrosão decorrente da exposição de um metal em uma solução apresentando diferentes concentrações ou pressões parciais de oxigênio.

A corrosão por aeração diferencial ocorre frequentemente em regiões intermediárias entre dois meios, como ar e água ou ar e solo, por exemplo: em tubulações parcialmente enterradas, tubulações sujeitas à deposição de partículas sólidas, etc. A figura 3.2 mostra uma região em que a probabilidade de ocorrer corrosão por aeração diferencial é alta caso não seja realizadas práticas de prevenção.



Figura 3.2 – Tubulação entrando no solo [28]

- f) **Corrosão em Frestas** – Corrosão localizada que ocorre em fissuras ou fendas entre duas superfícies metálicas ou entre superfícies metálicas e não metálicas.

Nos dutos, como se pode observar na figura 3.3, a corrosão em fresta pode ocorrer entre o suporte e a tubulação.

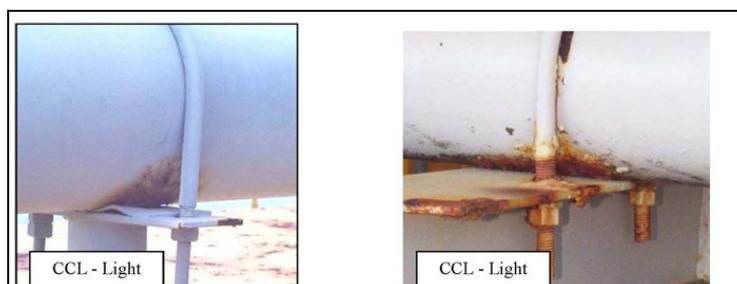


Figura 3.3 – Corrosão em Frestas [26]

- g) **Corrosão Atmosférica** - Processo corrosivo de estruturas metálicas aéreas. A ação desta corrosão depende fundamentalmente dos fatores: umidade relativa, substâncias poluentes (gases, particulados), temperatura, tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica e fatores climáticos.
- h) **Corrosão Associada a Solicitações Mecânicas** - Corrosão resultante da associação simultânea dos seguintes elementos: meio corrosivo, tensões aplicadas ou residuais e susceptibilidade dos materiais.

i. **Corrosão – Erosão** - Corrosão decorrente da ação combinada e simultânea de fenômenos físicos e químicos sendo caracterizada por sua aparência sob forma de sulcos, crateras, ondulações, furos arredondados e por um sentido direcional de ataque. A figura 3.4 mostra um exemplo desta corrosão.



Figura 3.4 – Corrosão – Erosão

Fonte: <http://www.ammonite-corrosion.com/degrade.html>

Em dutos, o processo erosão-corrosão ocorre mais intensamente em estrangulamentos ou em desvios de fluxos, como cotovelos, curvas e derivações.

ii. **Corrosão sob Fadiga** - Aparecimento de trincas nos metais ou ligas, decorrentes da associação de um processo corrosivo, geralmente de natureza eletroquímica, à aplicação de tensões cíclicas na estrutura.

Ocorre mais frequentemente em tubulações transportando vapores ou líquidos, de temperaturas variáveis.

iii. Corrosão sob Tensão (*Stress Corrosion Cracking*) -

Corrosão resultante da ação combinada de tensões e meios corrosivos. Neste tipo de corrosão, a perda de espessura é muitas vezes desprezível e a falha do material se manifesta por meio de trincas até chegar a fratura mesmo que submetido a esforços mecânicos menores que o esperado.

Em dutos existem dois tipos principais de corrosão sob tensão que causam a falha de dutos: corrosão sob tensão em *pH quase neutro* e corrosão sob tensão em *pH elevado*.

A corrosão sob tensão em pH elevado ocorre em uma faixa de potencial, entre -600 à -750 mV (Cu/CuSO₄), em solo com concentração elevada de carbonato/bicarbonato e em pH maior que nove e tipicamente, dentro de uma distância de até 20 quilômetros da estação de bombeio. Aqui as trincas se propagam de forma intergranular. A corrosão sob tensão em *pH elevado* também pode estar associada ao aumento de temperatura de operação.

A corrosão sob tensão em *pH quase neutro* é considerada a forma não clássica do fenômeno de corrosão sob tensão. Este processo corrosivo ocorre em uma faixa de pH que varia de 5.5 a 7.5 e em potenciais eletroquímicos na faixa de -760 à -790 mV (Cu/CuSO₄), condição em que a proteção catódica não é efetiva para proteção do duto. Aqui as trincas se propagam de forma transgranular. Este tipo de corrosão também ocorre predominantemente junto à estação de bombeio. A corrosão sob tensão em pH quase neutro também está associada a concentrações de CO₂ em água enterrada e climas mais frios.

A diferença entre os processos corrosivos sob tensão e sob fadiga ocorre devido a natureza das tensões. Enquanto a corrosão sob fadiga ocorre devido à aplicação de tensões dinâmicas (cíclicas ou alternadas), a corrosão sob tensão resulta da aplicação de tensões estáticas.

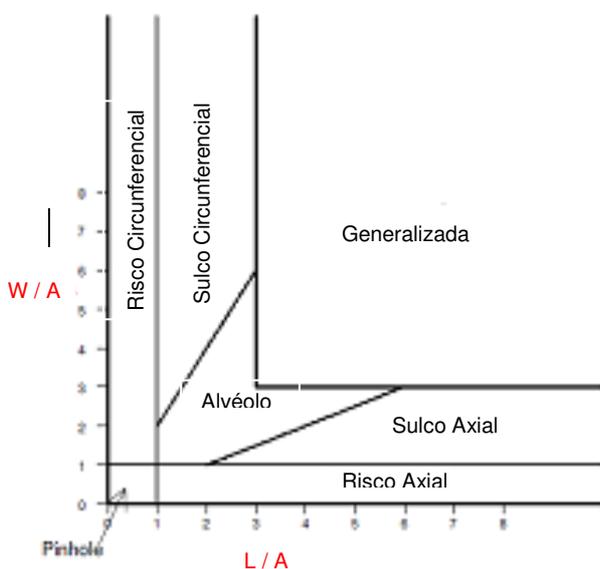
3.1.4. Dimensionamento

O documento *Specifications and Requirements for Intelligent Pig Inspection of Pipelines* [27] publicado pelo *Pipeline Operators Forum* (POF) propõe uma classificação para a perda de metal detectada no duto que considera a geometria da anomalia (largura e comprimento) comparando a mesma com a espessura do tubo onde a corrosão está localizada. Vale informar que a partir desta classificação que o operador do duto pode avaliar as especificações de capacidade de detecção e dimensionamento das ferramentas ILI disponíveis no mercado.

Segundo o documento do POF [27], as perdas de metal são classificadas como: alvéolo, generalizada, *pinhole*, risco axial, risco circunferencial, sulco axial e sulco circunferencial. Estas classificações são apresentadas na tabela 3.1 e na figura 3.5.

Tabela 3.1 – Classificação da perda de metal segundo o dimensionamento [27]

Classificação	Definição	Referência (Comprimento x Largura)
Generalizada (General)	{[W ≥ 3A] e [L ≥ 3A]}	4 A x 4 A
Alvéolo (Pitting)	{([1A ≤ W < 6A] e [1A ≤ L < 6A] e [0.5 < L/W < 2]) e não ([W ≥ 3A] e [L ≥ 3A])}	2 A x 2 A
Sulco Axial (Axial Grooving)	{[1A ≤ W < 3A] e [L/W ≥ 2]}	4 A x 2 A
Sulco Circunferencial (Circumferential Grooving)	{[L/W ≤ 0.5] e [1A ≤ L < 3A]}	2 A x 4 A
<i>Pinhole</i>	{[0 < W < 1A] e [0 < L < 1A]}	½ A x ½ A
Risco Axial (Axial Slotting)	{[0 < W < 1A] e [L ≥ 1A]}	2 A x ½ A
Risco Circunferencial (Circumferential Slotting)	{[W ≥ 1A] e [0 < L < 1A]}	½ A x 2 A



Notas:

- Se a espessura do tubo (w.t) é menor que 10 mm, então A= 10 mm.
- Se a espessura do tubo (w.t) é maior ou igual a 10 mm, então A= espessura do tubo (w.t.).
- W= largura (*width*) e L = comprimento (*length*)

Figura 3.5 – Classificação do documento POF para perda de metal segundo o dimensionamento [27]

3.1.5. Gerenciamento

As principais metodologias de gestão de integridade de dutos, como: Muhlbauer [11], API 1160 [2], ASME B31.8S [10], e regulamentações, como o RTDT [9], classificam a corrosão para o gerenciamento em: corrosão atmosférica, corrosão externa e corrosão interna.

- a) **Atmosférica** – Termo atribuído aos processos corrosivos em estruturas aéreas (localizadas externamente à parede do tubo).
- b) **Externa** – Termo atribuído aos processos corrosivos que ocorrem em dutos enterrados e estão localizadas na região externa à parede do tubo. A figura 3.6 mostra um exemplo desta corrosão



Figura 3.6 – Foto corrosão externa

Fonte: PipeWay Engenharia

- c) **Interna** – Termo atribuído aos processos corrosivos que ocorrem em dutos enterrados e estão localizadas na região interna à parede do tubo. A figura 3.7 mostra a foto de uma corrosão interna devido a níveis elevados de água salgada e CO₂.



Figura 3.7 – Corrosão interna [28]

No decorrer deste trabalho a classificação utilizada para a corrosão será a de gerenciamento (atmosférica, externa e interna). E vale ressaltar que a corrosão sob tensão está englobada no grupo corrosão externa.

3.2. PREVENÇÃO DE FALHAS POR CORROSÃO EM DUTOS

Para prevenir a corrosão em dutos Gentil [23] utilizou a proposta de Vernon que considera a localização da estrutura a ser analisada: atmosfera, submersa em água, subterrânea. Dentre as classificações da corrosão apresentadas anteriormente, no item 3.1, a que mais se aproxima da proposta de Vernon é a classificação quanto *ao Gerenciamento de Corrosão*, onde os dutos aéreos representam as estruturas localizadas na atmosfera e os dutos enterrados, as estruturas subterrâneas.

Os métodos de prevenção são específicos para cada tipo de corrosão. Por exemplo, para prevenir corrosão interna é uma prática comum efetuar a limpeza interna do duto com pigs de limpeza. No entanto, esta mesma prática é indicada no combate à corrosão atmosférica e externa. Por isto, para cada classificação da corrosão segundo o gerenciamento (interna, externa e atmosférica) foram apresentadas técnicas que auxiliam na prevenção e na redução da taxa de corrosão. Estes métodos foram agrupados em 4 categorias que se baseiam na utilização de revestimentos e na modificação do processo de corrosão, do meio corrosivo e do metal, como se pode ver na tabela 3.2.

O método baseado na modificação do processo apresenta os meios de proteção aos fenômenos corrosivos. Neste grupo foram listados os seguintes conjuntos de práticas preventivas: utilizar proteção catódica, anódica, isolamento elétrico [1], tubo camisa [1] e limpeza interna por pig; evitar o contato de metais heterogêneos, a existência de frestas, mudanças bruscas de direção no escoamento com a presença de sólidos em suspensão; prever soldas bem acabadas, drenagem de água, sobre-espessura de corrosão e fácil acesso para inspeção em regiões susceptíveis à corrosão; controlar correntes de interferência; reduzir os níveis de tensões para evitar, por exemplo, corrosão sob tensão e sob fadiga.

Já o método baseado na modificação do meio corrosivo visa a modificar sua agressividade através da alteração de suas características físicas ou químicas, ou da adição de compostos químicos ao meio corrosivo. Neste grupo foram listadas as seguintes práticas preventivas: emprego de inibidores de corrosão e desaeração; purificação ou diminuição da umidade do ar; redução de temperatura; controle do pH.

O método baseado na modificação do metal consiste na seleção do material metálico adequado para o meio corrosivo. Neste método estão incluídas as seguintes práticas: utilização de ligas resistentes à corrosão; aumento da pureza do material; aplicação de tratamentos térmicos para aumentar a resistência à corrosão.

Os revestimentos também foram apresentados como métodos de combate à corrosão e constituem-se em uma barreira entre o metal e o meio corrosivo.

Tabela 3.2 – Métodos de Proteção à Corrosão

CORROSÃO		
Atmosférica	Externa	Interna
Métodos baseados na modificação do processo corrosivo		
<ul style="list-style-type: none"> • Evitar que metais dissimilares estejam ligados entre si. • Prever fácil acesso às regiões susceptíveis à corrosão para realizar inspeção. • Prever soldas bem acabadas • Prever drenagem de água de qualquer origem. • Prever sobre-espessura de corrosão. • Evitar frestas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar que metais dissimilares estejam ligados entre si. • Prever fácil acesso às regiões susceptíveis à corrosão para realizar inspeção. • Prever soldas bem acabadas • Prever drenagem de água de qualquer origem. • Prever sobre-espessura de corrosão • Emprego de proteção catódica. • Uso de anodos [1] de sacrifício. • Reduzir os níveis de tensões para valores abaixo do limite mínimo para ocorrência de corrosão sob tensão, quando o limite existir. • Isolamento Elétrico [1]. • Pontos de Medição [1]. • Tubo camisa.[1] • Controle de correntes de interferência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar que metais dissimilares estejam ligados entre si. • Prever fácil acesso às regiões susceptíveis à corrosão para realizar inspeção. • Prever soldas bem acabadas. • Prever sobre-espessura de corrosão • Emprego de proteção catódica. • Evitar mudanças bruscas de direção no escoamento de fluidos contendo sólidos em suspensão. • Limpeza Interna (pig).
Métodos baseados na modificação do meio corrosivo		
<ul style="list-style-type: none"> • Purificação ou diminuição da umidade do ar. • Emprego de Inibidores de Corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Purificação ou diminuição da umidade do ar. • Emprego de desaeração. • Redução de Temperatura • Emprego de Inibidores de Corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Purificação ou diminuição da umidade do ar. • Emprego de desaeração. • Redução de Temperatura • Emprego de Inibidores de Corrosão. • Controle do pH.
Métodos baseados na modificação na modificação do metal		
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Pureza. • Utilização de ligas resistentes à corrosão. • Aplicação de tratamentos térmicos para o aumento da resistência à corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Pureza. • Utilização de ligas resistentes à corrosão. • Aplicação de tratamentos térmicos para o aumento da resistência à corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Pureza. • Utilização de ligas resistentes à corrosão. • Aplicação de tratamentos térmicos para o aumento da resistência à corrosão.
Métodos baseados nos revestimentos protetores		
<ul style="list-style-type: none"> • Emprego de revestimentos orgânicos [20,24], inorgânicos [28-29] e metálicos [28-29]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emprego de revestimentos orgânicos, inorgânicos e metálicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emprego de revestimentos Orgânicos, inorgânicos e metálicos.