

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL FEITOSA MENDES ROCHA
JACIMINLHA DOS SANTOS DA SILVA

ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL DE
VASO DE PRESSÃO SUJEITO À PERDA DE ESPESSURA

VITÓRIA
2017

RAFAEL FEITOSA MENDES ROCHA
JACIMINLHA DOS SANTOS DA SILVA

ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL DE VASO DE PRESSÃO SUJEITO À PERDA DE ESPESSURA

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo,
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. MSC. Rafael Milanezi
de Andrade

VITÓRIA
2017

**RAFAEL FEITOSA MENDES ROCHA
JACIMINLHA DOS SANTOS DA SILVA**

**ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL DE VASO DE
PRESSÃO SUJEITO À PERDA DE ESPESSURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Apresentado em 20 de Julho de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. MSC. Rafael Milanezi de Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. DR. Marcelo Camargo Severo de Macedo
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Paulo Rogério Tavares da Silva, Eng. Metalúrgico e DR.
Petrobras
Examinador

RESUMO

Quando o mecanismo de dano de perda de espessura está associado a operação de um vaso de pressão é imprescindível realizar o acompanhamento e avaliação deste processo com objetivo de garantir a operação segura durante toda a vida útil do equipamento, evitando importantes perdas materiais, econômicas, pessoais e ambientais. Um dos dados que permite avaliar a integridade de um vaso de pressão é a taxa em que a perda de espessura está ocorrendo, a qual se pode obter de diversas formas, dentre estas, a medição de espessura. Neste trabalho, discute-se o tratamento de um conjunto de dados de medição propostos a partir de medições reais para avaliar a vida residual de um vaso separador cujo fluido de operação é o gás natural úmido com frações de CO_2 e H_2S . Devido a constatação posterior da existência de injeção de inibidor de corrosão no sistema, impossibilitando afirmar que as reduções observadas são decorrentes de processo corrosivo, as espessuras foram propostas no início dos cálculos e o processo de perda de espessura é modelado, de forma teórica, como corrosão uniforme. Em momento posterior, são apresentados os resultados de análise obtidos através de diferentes métodos, indicados por norma ou conhecidos conceitos estatísticos. Os dados apresentados indicam que o método descrito na API 510, norma do Instituto de Petróleo Americano que trata, dentre outros temas, da inspeção e avaliação de integridade de vasos de pressão, é de fácil aplicação a medida que estabelece formulações para determinar taxa de perda de espessura e vida residual a partir da razão entre a diferença de duas espessuras medidas pelo tempo entre uma medição e outra, porém apresenta resultados mais conservadores e suscetíveis a desvios. Para as espessuras avaliadas, a aplicação de regressão linear, apresenta uma aproximação que utiliza todo o histórico de dados disponíveis, com taxas de perda de espessura menos severas e vida residual maior.

Palavras chaves: Estatística, vida residual, vaso de pressão, espessura.

ABSTRACT

When the mechanism of loss of thickness damage is associated with the operation of a pressure vessel, it is essential to carry out the monitoring and evaluation of this process in order to ensure safe operation throughout the life of the equipment, avoiding important material, economic, personal and environmental losses. One of the data that allows to evaluating the integrity of a pressure vessel is the rate at which the thickness loss is occurring, which can be obtained in several ways, among them, the thickness measurement. In this paper, we discuss the treatment of a set of measurement data proposed from real measurements to evaluate the residual life of a separating vessel whose operating fluid is the wet natural gas with fractions of CO₂ and H₂S. Due to the subsequent verification of the existence of corrosion inhibitor injection in the system, it is impossible to state that the observed reductions are due to corrosive process, the thicknesses were proposed at the beginning of the calculations and the thickness loss process is theoretically modeled as corrosion. Subsequently, the results of analysis obtained through different methods, indicated by standard or known statistical concepts, are presented. The data presented indicate that the method described in API 510, an American Petroleum Institute standard that addresses, among other topics, the inspection and evaluation of pressure vessel integrity, is easy to apply as it formulates formulations to determinate corrosion rate and residual life from the ratio between the difference of two thicknesses measured by the time between one measurement and another, but presents results more conservatives and susceptibles to deviations. For the thicknesses evaluated, the linear regression application presents an approximation that uses the entire history of available data, with less severe thickness loss rates and longer residual life.

Keywords: Statistic, residual life, pressure vessel, thickness.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de calibração do aparelho de medição	18
Tabela 2 - Rc em função do número n de medições.....	27
Tabela 3 - Dados operacionais.....	32
Tabela 4 - Dados de Projeto.....	32
Tabela 5 – Valores de Espessuras propostos para estudo	33
Tabela 6 - Taxas de perda de espessura pela API 510	36
Tabela 7 - Valores significantes de r	37
Tabela 8 - Cálculos de coeficiente de correlação dos Tamos	38
Tabela 9 - Cálculo de coeficientes de correlação do Casco.....	39
Tabela 10 - Cálculo de Parâmetros das Retas de Regressão.....	40
Tabela 11 - Identificação de valores espúrios	44
Tabela 12 - Coeficiente de correlação após dados expurgados.....	45
Tabela 13 - Novos parâmetros de regressão linear	46
Tabela 14 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 1	47
Tabela 15 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 9.....	47
Tabela 16 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 13.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Corrosão.....	13
Figura 2 - Vasos de pressão	15
Figura 3 - Configurações de Tampos	15
Figura 4 - Medição de Espessura por Ultrassom	16
Figura 5 - Espectro de frequências sonoras.....	17
Figura 6 - Cabeçote padrão.....	17
Figura 7 - Interpretação gráfica do modelo.....	23
Figura 8 - Modelo espessura x tempo	24
Figura 9 - Vaso de pressão avaliado	32
Figura 10 - Pontos de medição	33
Figura 11 - Reta de Regressão do Ponto 1	41
Figura 12 - Reta de Regressão do Ponto 3.....	41
Figura 13 - Reta de Regressão do Ponto 4.....	41
Figura 14 - Reta de Regressão do Ponto 9.....	42
Figura 15 - Reta de Regressão do Ponto 12.....	42
Figura 16 – Reta de Regressão do Ponto 13	42
Figura 17 - Reta de Regressão do Ponto 14.....	43
Figura 18 - Reta de regressão para o ponto 1 e limite de confiança 95%.....	47
Figura 19 - Reta de regressão para o ponto 9 e limite de confiança 95%.....	48
Figura 20 - Reta de regressão para o ponto 13 e limite de confiança 95%.....	48
Figura 21 - Limite de Confiança e Vida Residual	50
Figura 22 - Comparativo entre VRs encontradas	51
Figura 23 - Curva inferior de confiança para o Ponto 1.....	52
Figura 24 - Vida Residual a partir do Limite de Confiança	53
Figura 25 - Efeito do expurgo de dados espúrios.....	54

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	9
1.1 – MOTIVAÇÃO	10
1.2 – OBJETIVOS.....	11
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 – CORROSÃO	12
2.2 – CORROSÃO UNIFORME.....	14
2.3 – VASOS DE PRESSÃO	14
2.4 – MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM	16
3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS	19
3.1 – AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL – API 510.....	19
3.2 – AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL – ESTATÍSTICA	20
3.3 – REGRESSÃO LINEAR	22
3.4 – PROPAGAÇÃO E MINIMIZAÇÃO DOS ERROS.....	26
3.5 – LIMITES DE CONFIANÇA.....	28
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO AVALIADO	31
4.2 – HISTÓRICO DE MEDIÇÕES PROPOSTAS E TABULAÇÃO DE DADOS ...	33
5 – RESULTADOS	34
5.1 – ESPESSURAS MÍNIMAS	34
5.2 – TAXA DE PERDA DE ESPESSURA E VIDA RESIDUAL – API 510	35
5.3 – TAXA DE PERDA DE ESPESSURA E VIDA RESIDUAL – REGRESSÃO ..	37
5.4 – DADOS ESPÚRIOS E INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS	44
5.5 – DISCUSSÃO DE RESULTADOS	51
6 – CONCLUSÕES	57
7 – BIBLIOGRAFIA	57

1 – INTRODUÇÃO

A perda de espessura, geralmente por corrosão, constitui uma das principais causas de falhas em equipamentos e tubulações instaladas em áreas industriais. Os danos decorrentes deste processo impactam previsões operacionais de produção, geram altos custos de manutenção e, adicionalmente, podem resultar em elevados riscos à saúde e ao meio-ambiente (MAINIER, 2008).

Devido aos riscos apontados, normas como a NR-13, editada pelo Ministério do Trabalho, determinam periodicidade mínima de inspeção de vasos de pressão e a exigência do registro de seus resultados em Relatórios de Inspeção com pareceres conclusivos quanto a integridade do vaso até a próxima inspeção. Ou seja, exige-se o gerenciamento dos processos que podem causar danos ao equipamento.

Não existem atualmente normas nacionais que apresentem um procedimento detalhado para o gerenciamento de processos de perda de espessura. Assim, cada empresa adota seu próprio procedimento baseado em normas internacionais, procedimentos internos ou estudos diversos (ARAUJO, 2012).

Sendo assim, qualquer seja o processo de gerenciamento adotado, a taxa em que o dano ocorre surge como um elemento de grande importância, pois permite planejar e determinar, além dos intervalos de inspeção, o momento de intervenção com alguma proteção redundante, como pintura interna, instalação de anodos, dentre outros. Portanto, devido a importância fundamental de estimar esta taxa correta e precisamente, este foi o tema escolhido para o desenvolvimento deste trabalho.

O trabalho foi organizado em sete capítulos, sendo o primeiro esta Introdução. O capítulo 2 apresenta uma Revisão Bibliográfica sobre os temas necessários ao desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3, apresentam-se os Fundamentos Teóricos e Práticos utilizados para a obtenção dos resultados propostos. O capítulo 4, por sua vez, descreve os Materiais e Métodos para levantamento dos dados que serão tratados. O capítulo 5 discorre sobre os Resultados alcançados e discussões decorrentes destes, enquanto as Conclusões e Bibliografias consultadas são descritas nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

1.1 – MOTIVAÇÃO

A larga utilização de materiais metálicos, devido aos avanços tecnológicos e demandas da industrialização, aumenta, na mesma proporção, a importância de considerar os custos envolvidos na deterioração dos mesmos. Processos de deterioração como o de corrosão, por exemplo, representam, em todo o mundo, um elevado custo. Segundo Gentil (2003), baseados no Produto Interno Bruto (PIB) do ano 2000, o custo da corrosão estima-se em 3,5% deste. No Brasil, esta cifra equivale a US\$ 20,79 bilhões enquanto nos EUA a estimativa sobe para vultuosos US\$ 346,37 bilhões.

É possível reduzir os custos apontados através de adequadas técnicas de controle e prevenção. Para os vasos de pressão esta demanda é atendida pela medição de espessura de seus componentes e a posterior determinação da vida útil residual, garantindo a utilização segura do equipamento pelo maior tempo possível.

Diferentes métodos para o tratamento dos dados de espessura e cálculo da vida residual resultam em conclusões com maior ou menor grau de conservadorismo, o que pode implicar na substituição precoce de equipamentos e aumento do consumo de recursos naturais; na adoção de soluções atenuantes como pintura, proteção catódica, redução de periodicidade de inspeção e utilização de técnicas de inspeção mais sensíveis e caras. Por outro lado, resultados que não representem a real situação do objeto avaliado criam condições para falhas catastróficas com efeitos financeiros e ambientais. (GENTIL, 2003)

Este projeto busca demonstrar que há métodos mais eficazes, confiáveis e robustos para avaliação dos dados de espessura e avaliação de vida residual de vasos de pressão que não aqueles apresentados e confortavelmente aceitos pela simplicidade e respaldo em Normas.

Embora exista o procedimento da Norma Internacional API 510, pretende-se mostrar que se trata de processo muito simples, conservador e facilmente influenciável por erros de medição ou subjetividade na análise. Conforme apresentado por Jambo (2009), enfatizando a perda de espessura por corrosão, existe a necessidade de inserir a inferência estatística na análise deste tipo de degradação, para melhor utilização de dados e tomada de decisões mais efetivas e assertivas. Esta

necessidade tem sido atendida em parte, conforme pesquisa realizada, na publicação de alguns artigos, podendo-se relacionar Araujo (2012) dissertando sobre a integridade de dutos, Junior (2002) tratando da integridade de um conjunto de tubulações em instalações da Petrobras e Vivanco (1994) avaliando a espessura de feixes de permutador da Refinaria de Paulinea (REPLAN).

Este projeto de graduação apresenta um estudo de caso de análise de diferentes métodos presentes na literatura científica e técnica para avaliar a vida remanescente de um vaso de pressão real com um conjunto de dados de espessuras propostos, dentro da ordem de grandeza dos valores reais, para modelar um teórico comportamento corrosivo uniforme, visto a constatação de que o eventual processo corrosivo real é mitigado pela injeção de anticorrosivo no sistema e, provavelmente, por erros de medição, incertezas de aparelhos e demais influências que não permitem caracterizar tanto a existência de corrosão quanto a de sua forma uniforme. O processo é realizado a partir do tratamento do conjunto de valores de espessura de cada ponto de medição e determinação das taxas de perda de espessura através do cálculo dos parâmetros de regressão linear. O desenvolvimento apresenta, ainda, metodologia para expurgo de dados espúrios e determinação de limites de confiança para os resultados.

1.2 – OBJETIVOS

Apresentar estudo de caso de avaliação de métodos de determinação de taxas de perda de espessura a partir de um histórico de espessuras proposto.

A aplicação dos métodos propostos, e eventuais variações, na avaliação de espessuras propostas para um equipamento permitirá a comparação entre os mesmos.

Os objetivos específicos são a comparação entre o método proposto pela API-510 e as metodologias estatísticas apresentadas, sendo estas, a obtenção da taxa de redução de espessura por regressão linear e o tratamento dos dados espúrios com posterior apresentação dos resultados deste processo.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta os conceitos que embasam o desenvolvimento do trabalho. Em linhas gerais, conforme já exposto, o projeto de graduação aplica os estudos de estatística para tratamento de dados já desenvolvidos por diversos autores, dentre estes, Costa Neto (1987), Toledo (1985), Vuolo (1996) e Levin (2004), aplicado a um conjunto de pares ordenados (espessura e tempo) propostos para as datas de inspeção de um determinado vaso de pressão.

Reconhece-se, porém, nos conceitos apresentados e nos trabalhos de referência, a existência de limitações para o método proposto: necessidade de tamanhos de amostra adequados; tratamento estatístico conforme o tamanho da amostra; determinação e validação de parâmetros de correlação; considerações, baseadas na literatura, acerca a distribuição de erros do sistema de medição, dentre outros.

O trabalho também identifica a necessidade de correta seleção de dados para aplicação da sistemática, garantindo que o equipamento está de fato submetido ao mecanismo de corrosão apontado e com variações acima das incertezas de medição de aparelhos, de forma a conferir clareza aos conceitos apresentados. Por este motivo, é realizado, no início do desenvolvimento do estudo de caso proposto, a consideração teórica de que as perdas de espessuras indicadas podem ser modeladas, para efeitos didáticos, como corrosão uniforme, motivo pelo qual o trabalho apresenta uma breve revisão das definições de corrosão, corrosão uniforme e medição de espessura por ultrassom.

2.1 – CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como deterioração de um material, sendo ele normalmente material metálico, causada por reações químicas ou eletroquímicas entre o material e o meio ambiente. Esse processo contínuo, causado pela interação físico – química, pode ocasionar mudanças no material tais como desgaste, alteração química e danificações estruturais como trincas tornando impossível a utilização no material (GENTIL, 2003).

Segundo Telles (2003) em equipamentos de processos o maior responsável pelos problemas mais sérios de corrosão é o próprio fluido do equipamento. Porém a corrosão pode também ser ocasionada pela atmosfera externa, geralmente em contato com água ou ambiente úmido, contato com outra superfície metálica diferente, ou o conjunto dessas situações. A corrosão ocasiona a destruição total ou parcial do material ao decorrer de um determinado tempo por ser um processo contínuo, sendo assim motivo de graves prejuízos na indústria pela constante substituição de peças corroídas. Também existem prejuízos causados por parada não programada de equipamentos, perdas com vazamentos, perda de eficiência causada por incrustações provocando aumento do atrito e redução da transferência de calor, contaminação por resíduos de corrosão.

Segundo Gentil (2003), pode-se classificar a corrosão, por morfologia, basicamente de doze (12) formas diferentes (Figura 1), são elas: uniforme; em placas, alveolar, pite, intergranular, transgranular, filiforme, esfoliação, grafítica, dezincificação, empolamento, em torno de solda.



Fonte: GENTIL (2003)

2.2 – CORROSÃO UNIFORME

Esta é a forma que o estudo de caso assume, teoricamente, como característica do mecanismo de dano do vaso de pressão proposto, que uniformemente e quase homogeneamente, se apresenta com a mesma perda de espessura por toda a superfície metálica exposta a determinado processo corrosivo.

A corrosão uniforme normalmente pode ser estimada conforme dados de experiências anteriores. Este tipo de corrosão normalmente é medido em micrometro por ano ($\mu\text{m/a}$) e possibilita, com os valores medidos, calcular uma expectativa de vida dos componentes de um determinado equipamento, determinando a espessura residual (GENTIL, 2003).

Segundo Gentil (2003), a corrosão uniforme também é utilizada com a terminologia de corrosão generalizada por algumas literaturas, no entanto deve se observar que esta terminologia também é usada para denominar a corrosão por pite ou alveolar generalizada, isto é, em toda a região corroída.

2.3 – VASOS DE PRESSÃO

O equipamento objeto do desenvolvimento do trabalho é um vaso de pressão, definido por Telles (1996) como recipiente caracterizado pela estanqueidade e variedades de configurações, dimensões e finalidades que apresenta a funcionalidade de contenção de fluidos sob pressão, como ilustrado na Figura 2. De forma mais específica restringiu-se esta definição a vasos de pressão utilizados como equipamentos de processo, ou seja, utilizados na indústria de transformação física e/ou química de materiais sólidos ou fluidos.

A estanqueidade de um vaso de pressão é decorrente da existência de um invólucro externo e sem descontinuidades, identificado comumente como parede de pressão, que será responsável pelo aprisionamento do fluido pressurizado.

Segundo Telles (1996), a parede de pressão de um vaso é constituída por elementos denominados cascos e tampos de fechamento. O casco é caracterizado por seu formato de superfície de revolução e as formas básicas de cilindros, cones ou esferas,

embora a primeira seja a mais usual pela facilidade de transporte, adequação à maioria das finalidades e melhor aproveitamento de matéria prima.

As dimensões do diâmetro interno e o comprimento entre as linhas traçadas de um ponto de tangência do casco com um tampo de fechamento e com o outro tampo, o chamado comprimento entre tangentes (CET), dentre outras informações, caracterizam este tipo de equipamento.

Figura 2 - Vasos de pressão



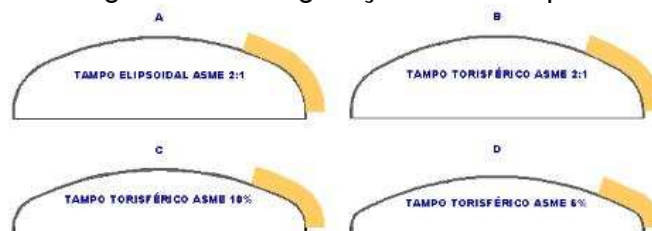
Fonte: Asvotec (2017)

<http://www.asvotec.com.br/produtos/caldeiraria/vaso-de-pressao>.

Acessado em 01/06/2017.

O fechamento dos cascos cilíndricos é realizado por tampos, indicados na Figura 3, com configurações elípticas, torisféricas, hemisféricas, cônicas ou planas, e a escolha entre eles é determinada por aspectos econômicos relacionados com o diâmetro, pressão de trabalho e recursos disponíveis para construção (TELLES, 1996).

Figura 3 - Configurações de Tampos



Fonte: Oliveira (2004)

2.4 – MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM

O ensaio por ultrassom é caracterizado por não produzir danos no elemento a ser ensaiado, ou seja, é uma aplicação não destrutiva, cuja dinâmica é a introdução de um feixe sônico de frequência elevada no material, possibilitando a detecção de falhas internas e superficiais (SANTIN, 2003).

A ampla utilização desta técnica, apresentada na Figura 4, se deve ao fato de dispensar o acesso à parede oposta do equipamento ou tubulação para sua execução, permitindo a realização com o equipamento em operação e reduzindo a perda de produção devido às atividades de inspeção. Outros fatores importantes são a simplicidade da execução, facilidade de treinamento de pessoal e rapidez na execução (SANTIN, 2003).

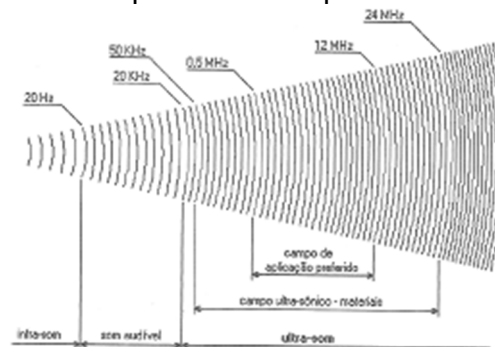
Figura 4 - Medição de Espessura por Ultrassom



Fonte: Catalogo GE (2009)

Conforme Santin (2003), o princípio físico do ensaio está relacionado com as características gerais das ondas ultrassônicas (Figura 5), a propagação destas e a velocidade sônica. Sendo assim, definem-se as ondas ultrassônicas como ondas mecânicas, originadas a partir de oscilações de partículas atômicas ou moleculares em torno de uma posição de equilíbrio. Conforme a repetição destas vibrações em um certo período de tempo, pode-se determinar a frequência e classificar estas ondas em infrassom, som audível e ultrassom.

Figura 5 - Espectro de frequências sonoras

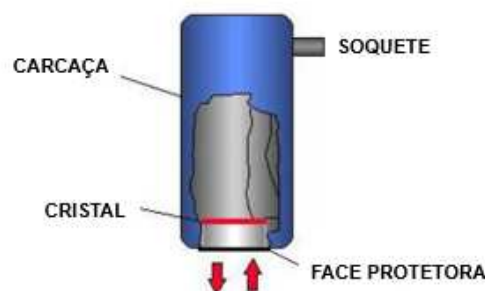


Fonte: Santin (2003)

A característica do feixe sônico de reflexão na superfície, refração ao atravessar a interface entre duas substâncias que possuem diferentes velocidades sônicas e difração em bordas ou ao redor de obstáculos desempenha papel preponderante na obtenção dos resultados do ensaio.

Os aparelhos utilizados para aplicação do ensaio de ultrassom monitoram as reflexões sônicas inseridas no material através de um cabeçote que é acoplado à peça para detectar discontinuidades, este mesmo princípio é utilizado na medição de espessuras. Os cabeçotes são conectados no aparelho ultrassom por meio de cabos coaxiais e compostos de cristal piezelétrico (capaz de gerar vibrações mecânicas se excitado por uma diferença de potencial elétrico), bloco amortecedor, face protetora ou bloco de retardamento, conectores elétricos e carcaça. Para medição de espessuras os cabeçotes utilizados são do tipo duplo-cristal, apresentado na Figura 6, em que dois cristais, isolados elétrica e acusticamente, atuam de forma independente, um emitindo as ondas e outro receptando; e são selecionados em função da faixa de espessuras a ser medida, do material e da temperatura da peça (SANTIN, 2003).

Figura 6 - Cabeçote padrão



Fonte: Santin (2003)

De acordo com Santin (2003), alguns fatores relevantes na realização do ensaio, podendo influenciar nos resultados, são:

- Calibração do aparelho: requer cuidados como a utilização de um bloco de calibração adequado (material e espessura);
- Preparação de superfície: Condição imposta para evitar interferências no acoplamento do cabeçote e garantida pela remoção de tintas, carepas, óxidos e outras impurezas;
- Execução do ensaio: Dependente de correta execução;
- Procedimento do ensaio: Atendimento de requisitos normativos, ASME Section V e Petrobras N-1594;
- Qualificação do pessoal: Necessidade de qualificação e certificação do inspetor pelo Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Ensaio Não Destrutivos – SNQC END.

As especificações dos aparelhos normalmente utilizados para medição das espessuras tratadas neste trabalho são:

- Kraukramer DM4-DL e cabeçotes Krautkramer DA 401;
- GE DM5E e cabeçotes GE DA 501.

Para os aparelhos indicados, de desempenho e características equivalentes, utilizou-se a resolução setada no aparelho de 0,1 mm com os valores de desvios e incertezas indicados na Tabela 1 a seguir, oriundos do respectivo certificado de calibração do aparelho e considerados na análise dos dados de espessuras propostos.

Tabela 1 – Dados de calibração do aparelho de medição

Fabricante	Modelo	Resolução mínima (mm)	Valor Real Padrão (mm)	Valor Verdadeiro (mm)	Desvio (mm)	Incerteza Medição (mm)
Krautkramer	DM4-DL	0,01	5	5	0	0,02
			10	10	0	
			15	14,99	0,01	
			25	24,99	0,01	
			50	49,98	0,02	
			75	74,97	0,03	
			100	99,99	0,01	

Fonte: Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos Petrobras (2017)

3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS

3.1 – AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL – API 510

A atividade de inspeção de equipamentos, na qual está compreendida a medição de espessura, é baseada em algumas normas de associações internacionais. O código API 510 - Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration, com última edição em 2014 pela American Petroleum Institute estabelece, dentre outros temas, o método de obtenção da taxa de perda de espessura a partir de dados de medições de espessura.

A taxa da deterioração, neste caso, é determinada pela razão da diferença entre duas medidas de espessura sobre o intervalo de tempo entre elas (API 510, 2014).

Segundo Boateng (2014), considerando a modelagem teórica de corrosão uniforme proposta, há dois equacionamentos básicos para a taxa de perda de espessura, a long-term (LT) e a short-term (ST), enquanto a primeira considera o intervalo entre a espessura atual e a espessura inicial a segunda considera o intervalo entre a espessura atual e a imediatamente anterior:

$$\text{taxa long-term (LT)} = \frac{\text{espessura}_{\text{inicial}} - \text{espessura}_{\text{atual}}}{\text{tempo entre as duas medições consideradas}} \quad (1)$$

$$\text{taxa short-term (ST)} = \frac{\text{espessura}_{\text{anterior}} - \text{espessura}_{\text{atual}}}{\text{tempo entre as duas medições consideradas}} \quad (2)$$

Um dos resultados práticos da obtenção das referidas taxas em um equipamento é a determinação da vida residual do mesmo, que consiste em determinar em quanto tempo será atingida a espessura mínima calculada para determinado componente do objeto inspecionado, ou seja, por quanto tempo o vaso de pressão poderá operar em segurança.

A vida residual pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\text{Vida Residual (VR)} = \frac{\text{espessura}_{\text{atual}} - \text{espessura}_{\text{mínima}}}{\text{taxa de perda de espessura}} \quad (3)$$

A simplicidade deste procedimento, demonstrado por Boateng (2014), explica a aplicação frequente deste método na avaliação de taxas de corrosão nas áreas industriais, como a de petróleo e gás, por exemplo.

Durante o desenvolvimento do trabalho, os resultados obtidos com a determinação destas taxas de perda de espessura por métodos estatísticos são comparados com os resultados obtidos pela aplicação dos procedimentos descritos até aqui.

3.2 – AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL – ESTATÍSTICA

Outros métodos de determinação da taxa de deterioração da espessura do material podem ser desenvolvidos e implementados, conforme previsto na Norma API 510 (2014), baseados em métodos estatísticos e assegurando-se que os dados são representativos da situação atual do equipamento. A Norma também ressalva que métodos estatísticos podem não ser aplicáveis se o objeto estudado estiver sujeito a processo de perda de espessura localizada significativa.

Intuitivamente, considerando um modelo de deterioração uniforme, é esperada uma relação linear entre a variável dependente (espessura) em relação a variável interdependente (tempo), o que indica a proposição do modelo de regressão linear como ferramenta estatística para o cálculo da taxa de desgaste. Esta consideração será validada nos cálculos posteriores através da determinação e avaliação do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Para tratamento de um conjunto de dados experimentais, representados pelas medidas de espessura propostas no estudo é necessário fixar critérios para escolher o valor representativo e seu domínio de variação.

A determinação do valor representativo para as espessuras encontradas representa o primeiro desafio para o desenvolvimento do trabalho. Em grande parte das vezes, este valor não é nenhum dos valores medidos. Conceituando o valor verdadeiro de uma grandeza, conforme Vuolo (1996), como o valor exato da grandeza medida é crível afirmar que este valor é inalcançável na prática, sendo possível apenas obter uma estimativa deste valor.

Desta forma, conforme Vuolo (1996), determinar o valor representativo de uma grandeza é definir o valor que mais se aproxima do valor verdadeiro, o chamado valor esperado, cuja melhor definição é a média de várias medições, expurgando os valores espúrios. E, da mesma maneira, define-se o desvio como a diferença entre um valor medido e aquele adotado como valor real.

Traduzindo para um conjunto de dados obtidos através de medição de espessuras por ultrassom, se em cada data de inspeção forem realizadas várias medidas em uma mesma região de medição, o valor mais provável de cada registro de espessura medida seria a média destas várias medições. Nesse caso o valor da espessura registrada seria um valor médio de várias medidas e não de uma medição particular única. O erro associado a cada registro de espessura em cada data neste caso é a variância das espessuras medidas.

Assim, se em uma determinada data as espessuras medidas repetidamente em uma mesma região de medição forem $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ o valor mais provável x_p da espessura medida e o erro Δx a ela associado, são:

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (5)$$

Onde, $\bar{x}$ é a média das espessuras.

No entanto, frequentemente, sendo o caso proposto neste estudo de caso, há disponibilidade de apenas uma medição por data para cada componente do equipamento. Nesta condição, o valor mais provável de cada espessura registrada não pode mais ser determinado pela média, bem como o erro não pode ser calculado pela variância das medições repetidas em uma mesma data e região de medição. Sendo assim, o valor mais provável será aquele que minimiza a soma dos quadrados dos desvios e o erro, a diferença entre o valor medido em cada data de inspeção e o valor previsto pela reta de regressão linear (VUOLO, 1996).

3.3 – REGRESSÃO LINEAR

Regressão linear é uma técnica estatística que relaciona matematicamente duas variáveis: a y denominada variável dependente e a x denominada variável independente (MIRANDA, 2008).

Para utilização da técnica, os pares ordenados de variáveis x e y são plotados em um gráfico de dispersão e analisando a distribuição dos mesmos pode-se visualizar com maior ou menor clareza uma reta com aspecto ascendente ou descendente (MIRANDA, 2008).

Segundo Miranda (2008), os pontos plotados no gráfico de dispersão podem ser representados por uma reta que melhor se ajusta aos mesmos. A equação desta reta é o produto da regressão linear e pode ser modelada pela seguinte expressão:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

y = variável dependente;

x = variável independente;

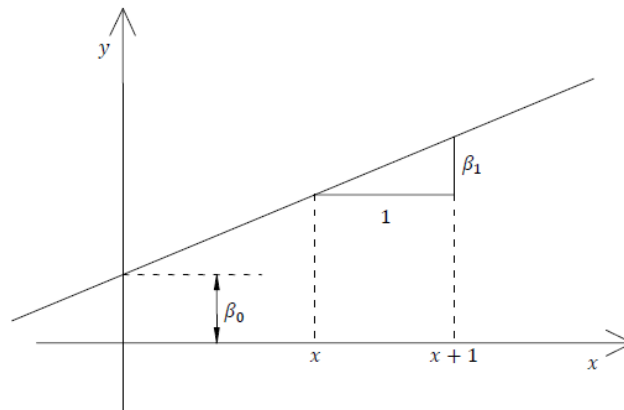
β_0 = coeficiente linear (intercepto da reta);

β_1 = coeficiente angular (inclinação da reta);

ε = fatores que afetam y de modo aleatório.

Graficamente, o modelo pode ser representado, na Figura 7, por:

Figura 7 - Interpretação gráfica do modelo



Fonte: RODRIGUES (2012)

Dependendo da relação entre as variáveis e da intensidade com que se relacionam, a reta obtida é um melhor ou pior modelo para traduzir a relação entre elas (RODRIGUES, 2012).

Conforme apresentado por Miranda (2008), para evitar que a avaliação da correlação linear entre as duas variáveis estudadas se torne subjetiva, esta etapa do trabalho é realizada através da determinação de um parâmetro, utilizado no meio científico, denominado coeficiente correlação de Pearson e indicado por r . O valor de r pode variar de -1 a 1 em qualquer conjunto de dados e quanto mais próximo r estiver do valor 1 ou de -1, mais forte será a correlação; do contrário, quanto mais perto de zero, mais fraca ela é considerada (LEVIN, 2004).

O valor de r , de acordo com LEVIN (2004), é obtido pela expressão:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (7)$$

Na qual:

n = quantidade de pares ordenados;

x = variável independente – tempo (t);

y = variável dependente – espessura (x).

Aplicados os conceitos apresentados ao caso específico de determinação da taxa de perda de espessura a partir de um conjunto de dados de espessura e assumindo até

aqui que a reta é o modelo mais adequado e simples para a relação entre as variáveis t (tempo) e x (espessura), pode-se estabelecer a reta $x = b_0 + b_1 t$, na qual b_0 e b_1 são parâmetros do modelo e:

t_i = valor da variável independente – tempo;

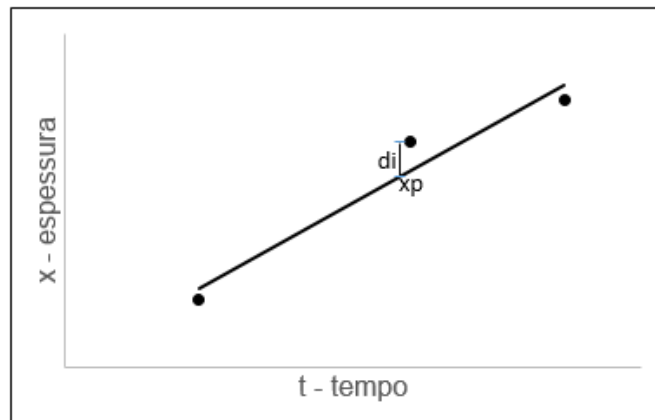
x_i = valor da variável dependente – espessura;

x_p = imagem de um x_i qualquer sobre a reta $x = b_0 + b_1 t$ – valor provável;

$d_i = x_i - x_p$ (desvio) – distância vertical do ponto à reta.

Esquemáticamente, pode-se apresentar na Figura 8:

Figura 8 - Modelo espessura x tempo



Fonte: Autores (2017)

Conforme equacionamento utilizado por Miranda (2008), baseado no conceito estabelecido de obtenção do valor provável através da soma do quadrado dos desvios D de n pontos da reta estimada, obtém-se:

$$D = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (8)$$

$$D = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - (b_0 + b_1 t))^2 \quad (9)$$

Sendo o objetivo, encontrar b_0 e b_1 tais que minimizem D , deve-se calcular o valor mínimo de D , função de b_0 e b_1 , derivando em relação a estes e resolvendo as equações igualadas a 0 (zero).

Daí,

$$\frac{\partial D}{\partial b_0} = \sum_{i=1}^n -2 \cdot (x_i - b_0 - b_1 t_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial D}{\partial b_1} = \sum_{i=1}^n -2(x_i - b_0 - b_1 t_i)t_i = 0 \quad (11)$$

$$-2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - b_0 - b_1 t_i) = 0 \quad (12)$$

$$-2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i t_i - b_0 t_i - b_1 t_i^2) = 0 \quad (13)$$

$$n \cdot b_0 + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

$$b_0 \cdot \sum_{i=1}^n t_i + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i x_i \quad (15)$$

Resolvendo o sistema, apresenta-se:

$$b_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i x_i - \sum_{i=1}^n t_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (16)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - b_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (17)$$

Neste ponto, cabe destacar que b_1 representa a inclinação da reta e, portanto, a taxa de perda de espessura desejada (JUNIOR et.al, 2002).

Portanto, o valor mais provável de uma espessura x_p em determinado intervalo de tempo será dado por:

$$x_p = \bar{x} - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \right] \cdot (t - \bar{t}) \quad (18)$$

Sendo:

x_i = espessura na data i ;

t_i = tempo acumulado, em anos, até a data i ;

$\bar{x}$ = média das espessuras;

$\bar{t}$ = média dos tempos acumulados;

t = tempo acumulado até da data na qual a espessura x_p foi obtida;

n = número de pares ordenados (tempo/espessura).

É possível deduzir que o erro Δx de cada medição será dado pelo desvio observado entre o valor medido x e o valor mais provável, ou seja, é a diferença entre o valor medido e aquele previsto pela reta de regressão que relaciona a espessura com tempo.

$$\Delta x = x - \bar{x} - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \right] \cdot (t - \bar{t}) \quad (19)$$

3.4 – PROPAGAÇÃO E MINIMIZAÇÃO DOS ERROS

Retornando ao conceito de erro de medição como a diferença entre o valor medido e um valor de referência (SILVA, 2012) apresentado neste trabalho como o valor provável definido pela reta de regressão, pode-se avaliá-lo em duas parcelas: erro sistemático e erro aleatório.

Enquanto a parcela de erro sistemático é causada por fontes conhecidas ou desconhecidas, permanecendo constante ou variando previsivelmente em medições repetidas, o erro aleatório caracteriza-se pela imprevisibilidade em sua variação (SILVA, 2012).

Estes erros, quando observados em um determinado sistema de medição, são consequências de perturbações externas e internas. Os fatores externos alteram diretamente o comportamento do sistema de medição ou influem diretamente a grandeza medida. De forma geral, estas influências estão relacionadas aos seguintes componentes do sistema: matéria-prima, meio ambiente, método, executante e equipamento de medição (SILVA, 2012).

Portanto, como exposto até aqui, a existência de erros é inerente ao processo quando se realiza uma sequência de medições de um mesmo objeto. É razoável, portanto, se utilizar de certos critérios que analisam cada ponto da amostra com a finalidade de verificar se eles deverão ou não fazer parte da mesma. Estes critérios de aceitação já são apresentados na literatura e entre os mais utilizados observam-se, por exemplo, o Critério de Chauvenet, o Critério de Dixon e o Critério de Grubbs (SILVA, 2012). Dentre estes, o mais simples é o Critério de Chauvenet, escolhido para aplicação neste trabalho.

Conforme Silva (2012), o critério de Chauvenet é um dos métodos mais utilizados para analisar os pontos da amostra com objetivo de identificação de resultados que, por influência de distorções significativas, afetem a média, exatidão e repetitividade do processo, ou seja, uma acentuada dispersão. A Equação 20 apresenta o critério citado:

$$R = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S(x)} \quad (20)$$

Onde:

R = Índice calculado para comparação;

x_i = Valor a ser testado;

$\bar{x}$ = Média aritmética da amostra;

$S(x)$ = Desvio padrão amostral.

Assumindo R_c como o limite de rejeição de Chauvenet, o valor de x deverá ser excluído do conjunto de dados, se o valor de R correspondente for maior do que o valor de R_c (VUOLO, 1996), apresentado a seguir na Tabela 2 em função do número de medições n em cada ponto.

Tabela 2 - R_c em função do número n de medições

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
Rc	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

Fonte: SILVA (2012)

Retornando ao conceito apresentado por Vuolo (1996), um determinado erro η é considerado uma quantidade desconhecida e possível de determinar somente em

termos de probabilidade, que podem ser distribuídas e caracterizadas por uma função de probabilidades de $H(\eta)$.

O erro η , tal como definido e apresentado anteriormente, possui diversas causas e assume um valor experimental resultado da soma de uma quantidade variável de erros elementares. É fato que estes diversos erros elementares podem assumir as mais variadas distribuições, tais como a gaussiana, a retangular e a triangular, mas é demonstrável que a superposição dos erros elementares independentes tende a resultar em uma distribuição gaussiana, portanto, utilizada amplamente para representar os erros experimentais e também denominada função normal de erros (VUOLO, 1996).

Adicionalmente, segundo Silva (2012) e Costa Neto (1977), pequenas amostras podem resultar em distribuições normais menos precisas, podendo ser utilizado um modelo mais adequado, conhecido como distribuição t de Student, na qual cada tamanho de amostra apresenta um valor de t representativo que determinará características específicas de distribuição para cada tamanho de amostra. Quanto maior a amostra, mais próxima da Distribuição Normal está a distribuição t de Student.

Esta breve introdução acerca das distribuições ganha importância no desenvolvimento do trabalho visto que determinam alguns parâmetros necessários para a obtenção de resultados importantes, por exemplo, limite de confiança e teste de significância do coeficiente de correlação r.

3.5 – LIMITES DE CONFIANÇA

Conforme Jambo (2009), ao apresentar as técnicas estatísticas de maior interesse para os estudos de perda de espessura por corrosão, a análise de regressão relacionando o comportamento de uma variável dependente com uma determinada variável independente possibilita, dentre outros, descrição do comportamento do processo de deterioração e previsão da faixa de valores dentro da qual a resposta da variável se encontra assumindo-se um valor específico para a variável independente, com um nível preestabelecido de confiança.

A reta $x = b_0 + b_1 t$, que se obtém pelo método dos mínimos quadrados, já definida no presente trabalho como a melhor estimativa possível da perda de espessura com o

tempo, pode não ser a reta que representa o verdadeiro processo de redução de espessura, o processo real pode seguir outra reta qualquer, pois para n pares ordenados (espessura x tempo), é possível traçar por regressão linear, com esses n pontos, um número r de retas em função de n . Como exemplo, usando-se 2 registros pode-se traçar a combinação de n pares 2 a 2, utilizando 3 registros pode-se traçar a combinação de n pares 3 a 3 e assim sucessivamente. Assim o total T de retas e, portanto, de taxas de perda de espessura, que podem ser obtidas com 6 registros de medição em cada ponto, como apresentado no desenvolvimento do trabalho, é $T = C_2^6 + C_3^6 + C_4^6 + C_5^6 + C_6^6 = C_0^6 + C_1^6 + C_2^6 + C_3^6 + C_4^6 + C_5^6 + C_6^6 - C_0^6 - C_1^6$ ou $T = 2^6 - 1 - 6 = 57$ retas.

Conforme Costa Neto (1977), a determinação do limite de confiança resulta, neste contexto, em um intervalo que representa uma faixa em que estará contida determinada porcentagem das retas possíveis para cada espessura determinada pela reta de regressão traçada para descrever a perda de espessura com o tempo. Esse intervalo de confiança distribui-se simetricamente e verticalmente em torno de cada valor de x previsto pelo modelo linear.

Para o desenvolvimento do trabalho, considera-se o limite de confiança de 95 % que, conforme Levin (2004), representa um procedimento convencional de obtenção de um intervalo mais amplo, embora menos preciso, mas com maior probabilidade de que a região estabelecida contenha 95% das taxas de redução de espessura (retas) possíveis.

Obtém-se o limite de confiança das taxas calculadas, conforme o procedimento definido por Costa Neto (1977), utilizando a expressão a seguir, que resulta para cada ponto definido pela reta de regressão na delimitação de uma região de confiança:

$$x_{95} = (b_0 + b_1 \cdot t) \pm T_{n-2, \alpha/2} \cdot S_R \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (21)$$

Sendo:

x_{95} = Limite de confiança 95% para a espessura estimada pelo modelo linear no tempo acumulado tempo t ;

$T_{n-2, \alpha/2}$ = Valor da distribuição T de Student com $n - 2$ graus de liberdade (gl) e no nível de significância $\alpha/2$. Sendo $\alpha = (100-95) = 5$;

$\bar{t}$ = Média dos tempos acumulados;

t_i = Tempo no qual os limites de confiança serão calculados para cada espessura estimada pelo modelo linear;

S_R = Variância residual calculada pela expressão:

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - b_1 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{n - 2}} \quad (22)$$

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

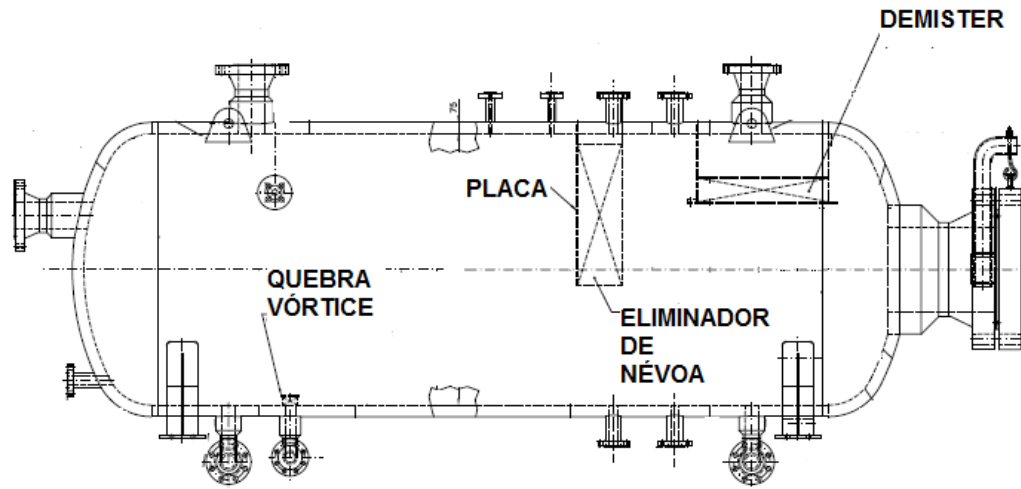
4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO AVALIADO

O método desenvolvido no decorrer do trabalho é aplicado a um vaso de pressão real, mostrado na Figura 9, instalado em uma plataforma fixa de produção de gás e submetido a um fluxo de gás natural úmido com teores de CO₂ que variam entre 0,91 e 1,25% do volume do gás e H₂S com pressão parcial de 0,04 KPa. Contudo, os dados de espessura reais do equipamento indicam, fisicamente, uma correspondência pobre com o processo corrosivo esperado ou proposto, devido à baixa taxa de perda de espessura observada. Verificou-se durante o desenvolvimento do trabalho que a baixa corrosividade se devia à prática de injeção de inibidor de corrosão no processo, à montante do equipamento. Com o intuito de possibilitar atingir o objetivo do trabalho, que é a comparação entre o método da API-510 e as metodologias estatísticas apresentadas, os valores de espessura foram ajustados a partir destes valores reais, com o objetivo de simular um processo de perda de espessura mais consistente ao longo do tempo. Além disso, verificou-se a necessidade de se preservar parcialmente os desvios reais apresentados para tornar possível e didática a aplicação da metodologia de tratamento de dados espúrios.

Sendo assim, é necessário caracterizar o equipamento para avaliar a influência da metodologia estatística em comparação ao método de determinação de taxa de corrosão e vida residual da API-510.

O referido equipamento apresenta no processo a função de Separador de Teste, denominação utilizada para o Separador que recebe o alinhamento de fluxo de produção de determinado poço para avaliação de parâmetros de interesse ao Planejamento e Controle da Produção, como por exemplo, o potencial de produção.

Figura 9 - Vaso de pressão avaliado



Fonte: Fabricante JARAGUA (2003)

As características operacionais principais do vaso estão apresentadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Dados operacionais

Fluido de Trabalho	Gás Natural
Densidade do Fluido (Kg/m³)	80,8
Pressão Normal de Operação (KPa)	8921
Temperatura Normal de Operação (° C)	22

Fonte: Fabricante JARAGUA (2003)

As características do projeto do equipamento, conforme o código ASME seção VIII, editado em 2001, estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de Projeto

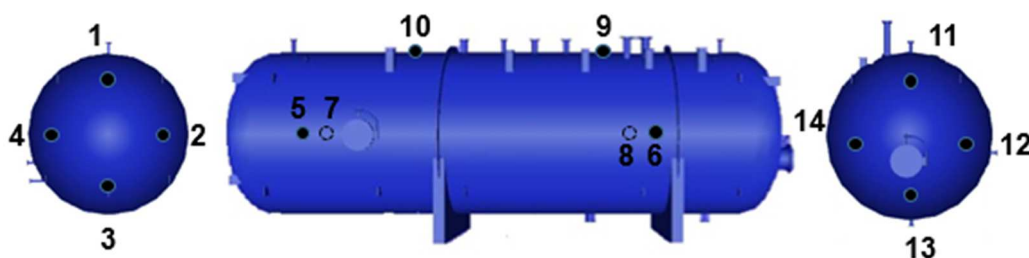
Código de projeto	ASME Section VIII Divisão 2
Pressão de Projeto (KPa)	10259
Temperatura de Projeto (° C)	50
Diâmetro Interno (mm)	1760
Tangente à Tangente (mm)	4400
Tipo de Tampos	Elíptico 2:1
Radiografia Casco e Tampos	Total
Eficiência de Juntas Casco e Tampos	1,0
Espessura Nominal Casco (mm)	75,0
Espessura Nominal Tampos Conformados (mm)	75,0
Sobre espessura de corrosão (mm)	6,0
Temperatura Mínima - Bocais (° C)	-42,0
Temperatura Mínima - Casco e Tampos (° C)	-12,2

Fonte: Fabricante JARAGUA (2003)

4.2 – HISTÓRICO DE MEDIÇÕES PROPOSTAS E TABULAÇÃO DE DADOS

A Figura 10, logo abaixo, indica a localização dos pontos de medição de espessura reais e a Tabela 5 apresenta os dados, com as modificações propostas no item anterior, utilizados na aplicação dos métodos apresentados neste estudo de caso.

Figura 10 - Pontos de medição



Fonte: Autores (2017)

Tabela 5 – Valores de Espessuras propostos para estudo

Ponto de Medição	Localização	Espessura em 17/12/2008 (mm)	Espessura em 30/06/2010 (mm)	Espessura em 11/04/2011 (mm)	Espessura em 21/06/2013 (mm)	Espessura em 02/02/2015 (mm)	Espessura em 11/05/2016 (mm)
1	Tampo Esquerdo	73,5	73,3	73,3	73,1	72,9	72,8
2	Tampo Esquerdo	72,7	72,5	72,4	72,6	72,3	71,8
3	Tampo Esquerdo	73,5	73,4	73,3	73,2	73,1	72,9
4	Tampo Esquerdo	73,4	73,3	73,2	73,0	73,1	72,7
5	Casco	76,7	76,5	76,4	75,8	76,2	75,8
6	Casco	75,7	75,5	75,3	76,5	75,1	75,0
7	Casco	76,1	75,9	75,8	76,8	75,6	75,2
8	Casco	76,7	76,5	76,5	75,4	76,4	76,2
9	Casco	76,7	75,6	75,5	75,4	75,3	75,0
10	Casco	76,1	75,9	75,8	75,7	75,7	75,3
11	Tampo Direito	73,8	73,6	73,7	73,4	73,3	75,7
12	Tampo Direito	73,7	73,5	73,5	73,4	73,3	73,0
13	Tampo Direito	74,7	74,5	74,3	74,2	73,9	74,0
14	Tampo Direito	73,6	73,4	73,4	73,2	73	72,9

Fonte: Autores a partir das espessuras reais fornecidas pelo Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos Petrobras (2017)

5 – RESULTADOS

5.1 – ESPESSURAS MÍNIMAS

O primeiro resultado apresentado é o cálculo das espessuras mínimas para cada componente do vaso de pressão avaliado: tampo direito, tampo esquerdo e casco. Estes dados são necessários para o cálculo de vida residual do equipamento utilizando qualquer um dos métodos descritos neste trabalho.

As pressões máximas de trabalho, espessuras e demais características de um vaso de pressão são definidas em seu respectivo código de projeto. Para o vaso de pressão avaliado, conforme apresentado anteriormente, utiliza-se no projeto o código ASME Seção VIII Divisão 2 editado em 2001, mencionado no texto da ASME BPVC – Boiler and Pressure Vessel Code, contudo para simplificação dos cálculos e utilizando o mesmo método atualmente utilizado na determinação das espessuras mínimas do equipamento pela equipe responsável pela inspeção do vaso, são utilizadas as formulações propostas na Divisão 1 do referido código de projeto.

Então, para o cálculo da espessura mínima t_c do casco são utilizadas as formulações descritas no parágrafo UG 27 do código ASME Seção VIII Divisão 1, aplicadas para a pressão mais limitante para operação segura do vaso de pressão, neste caso a pressão de projeto, estabelecida em 10259 KPa (1488 PSI).

Para as tensões circunferências aplicadas às juntas longitudinais do casco:

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} = 2,31 \text{ pol} = 58,6 \text{ mm} \quad (23)$$

Sendo:

P = Pressão interna máxima = Pressão de Projeto = 1488 PSI;

R = raio interno do casco = 880 mm = 34,6 pol;

S = Tensão Admissível Aço SA 516 Gr 70 = 23262 psi;

E = eficiência de junta das soldas = 1,0.

Para as tensões longitudinais aplicadas às juntas circunferenciais do casco:

$$t_c = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0,4 \cdot P} = 1,05 \text{ pol} = 27,7 \text{ mm} \quad (24)$$

Sendo:

P = Pressão interna máxima = Pressão de Projeto = 1488 PSI;

R = raio interno do casco = 880 mm = 34,6 pol;

S = Tensão Admissível Aço SA 516 Gr 70 = 23262 psi;

E = eficiência de junta das soldas = 1,0.

Dessa forma, para o casco do vaso de pressão apresentado, a espessura mínima t_c considerada será a de 58,6 mm.

A espessura mínima dos tampos direito e esquerdo t_t , em procedimento análogo ao realizado para o casco, calcula-se utilizando a formulação específica para tampos elipsoidais apresentada no parágrafo UG 32 do código ASME VIII:

$$t_t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} = 2,23 \text{ pol} = 56,8 \text{ mm} \quad (25)$$

Sendo:

P = Pressão interna máxima = Pressão de Projeto = 1488 psi;

D = diâmetro interno do casco = 1760 mm = 69,3 pol;

S = Tensão Admissível Aço SA 516 Gr 70 = 23262 psi;

E = eficiência de junta das soldas = 1,0.

Limitando, desta forma, a espessura mínima t_t dos tampos em 56,8 mm.

5.2 – TAXA DE PERDA DE ESPESSURA E VIDA RESIDUAL – API 510

Utilizando as Equações (1) e (2) e os dados apresentados na Tabela 5 são calculadas as taxas de redução de espessura para os 14 pontos de medição disponíveis. Os pontos 1, 2, 3 e 4 estão localizados no tampo esquerdo, por sua vez os pontos 5, 6, 7, 8, 9, e 10 são localizados no casco do equipamento e, por fim, os pontos 11, 12, 13 e 14 localizam-se no tampo direito. A Tabela 6 indica o resultado dos cálculos.

Tabela 6 - Taxas de perda de espessura pela API 510

Ponto de Medição	Localização	Espessura inicial 12/2008 (mm)	Espessura atual 05/2016 (mm)	Taxa corrosão equação 1 (mm/ano)	Espessura inicial 02/2015 (mm)	Espessura atual 05/2016 (mm)	Taxa corrosão equação 2 (mm/ano)
1	Tampo esquerdo - superior	73,5	72,8	0,113	72,9	72,8	0,060
2	Tampo esquerdo - lateral	72,7	71,8	0,146	72,3	71,8	0,299
3	Tampo esquerdo - lateral	73,5	72,9	0,097	73,1	72,9	0,120
4	Tampo esquerdo - inferior	73,4	72,7	0,113	73,1	72,7	0,240
5	Casco - lateral direita	76,7	75,8	0,146	76,2	75,8	0,240
6	Casco - lateral direita	75,7	75,0	0,113	75,3	75,0	0,180
7	Casco - lateral esquerda	76,1	75,2	0,146	75,6	75,2	0,240
8	Casco - lateral esquerda	76,7	76,2	0,081	76,4	76,2	0,120
9	Casco - superior	76,7	75,0	0,276	75,3	75,0	0,180
10	Casco - superior	76,1	75,3	0,130	75,7	75,3	0,240
11	Tampo direito - superior	73,8	75,7	-0,308	73,3	75,7	-1,437
12	Tampo direito - lateral	73,7	73,0	0,113	73,3	73,0	0,180
13	Tampo direito - lateral	74,7	74,0	0,113	73,9	74,0	-0,060
14	Tampo direito - inferior	73,6	72,9	0,113	73	72,9	0,060

Fonte: Autores (2017)

O cálculo da vida residual é realizado para cada componente do equipamento: tampo esquerdo, tampo direito e casco. Conforme também apresentado por Boateng (2014), a taxa de perda de espessura considerada é a maior entre as apresentadas para um conjunto de pontos de um mesmo componente do vaso.

Desta forma, para o tampo esquerdo encontra-se a taxa de redução de espessura de 0,299 mm/ano no ponto 2, para o casco a taxa é de 0,276 mm/ano no ponto 9 e para o tampo direito, 0,180 mm/ano, no ponto 13. A vida residual VR, avaliada pela Equação (3), para cada componente, é apresentada a seguir:

$$VR_{\text{tampo esquerdo}} = \frac{71,8 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,299 \text{ mm/ano}} = 50,2 \text{ anos} \quad (26)$$

$$VR_{\text{casco}} = \frac{75,0 \text{ mm} - 58,6 \text{ mm}}{0,276 \text{ mm/ano}} = 59,4 \text{ anos} \quad (27)$$

$$VR_{\text{tampo direito}} = \frac{73,0 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,180 \text{ mm/ano}} = 90,0 \text{ anos} \quad (28)$$

Analisando os resultados isolados de cada parte do equipamento, pode-se concluir que a vida residual do vaso de pressão determinada pelo método proposto pela API 510 com as espessuras propostas é de 59,4 anos.

5.3 – TAXA DE PERDA DE ESPESSURA E VIDA RESIDUAL – REGRESSÃO

Inicialmente, calcula-se o coeficiente de correlação r para identificar a aderência do conjunto de dados de cada ponto de medição ao comportamento linear proposto esperado para o processo em estudo.

Para estabelecer o valor mínimo de r que determina a validação dos dados, referenciando valores adotados em outros trabalhos, como o de Junior (2002) ao adotar r de 0,65 no estudo de regressão linear para taxas de corrosão uniforme de tubulações de transporte de hidrocarboneto, e definição de correlação média forte para valores de r a partir de 0,6 apresentada por vários autores como, por exemplo, Correa (2009) e Levin (2004), este trabalho adota, para os primeiros resultados, a validação dos dados para coeficientes de correlação acima de 0,81.

Não por acaso, conforme Levin (2004), o valor de 0,81 é o limite mínimo aceito para o teste de significância do coeficiente de correlação r , que tem objetivo de verificar se a associação obtida entre o tempo (t) e a espessura (x) existe de fato na população de dados obtidas para cada ponto de medição.

Segundo Levin (2004), este valor é extraído da Tabela 7 abaixo a partir do número de graus de liberdade gl , definido como o número de pares ordenados $n - 2$. Neste trabalho, com uma população de seis (06) dados para cada ponto de medição, obteve-se o valor de gl igual a quatro (04).

Tabela 7 - Valores significantes de r

Graus de Liberdade gl	Coefficiente de correlação r
Nível de significância = 0,05	
1	0,9969
2	0,9500
3	0,8783
4	0,8114
5	0,7545
10	0,5760
20	0,4227
50	0,2732

Fonte: Levin (2004)

Foram, então, determinados os coeficientes de correlação r para os oito (08) pontos do tampo esquerdo (1 a 4) e tampo direito (11 a 14), cujos cálculos estão apresentados na Tabela 8, indicando também em negrito os valores que atendem o critério definido acima:

Tabela 8 - Cálculos de coeficiente de correlação dos Tamos

Ponto de Medição	Medição	Tempo t (anos)	Espessura x (mm)	t.x	t ²	x ²	r
1 tampo esquerdo superior	1	0,00	73,5	0	0,00	5402,3	-0,95
	2	1,53	73,3	112,46	2,35	5372,9	
	3	2,32	73,3	169,69	5,36	5372,9	
	4	4,51	73,1	329,85	20,36	5343,6	
	5	6,13	72,9	446,88	37,58	5314,4	
	6	7,40	72,8	538,72	54,76	5299,8	
2 tampo esquerdo direita	1	0,00	72,7	0	0	5285,3	-0,77
	2	1,53	72,5	111,23	2,35	5256,3	
	3	2,32	72,4	167,61	5,36	5241,8	
	4	4,51	72,6	327,6	20,36	5270,8	
	5	6,13	72,3	443,2	37,58	5227,3	
	6	7,40	71,8	531,32	54,76	5155,2	
3 tampo esquerdo esquerda	1	0,00	73,5	0	0,00	5402,3	-0,98
	2	1,53	73,4	112,61	2,35	5387,6	
	3	2,32	73,3	169,69	5,36	5372,9	
	4	4,51	73,2	330,3	20,36	5358,2	
	5	6,13	73,1	448,1	37,58	5343,6	
	6	7,40	72,9	539,46	54,76	5314,4	
4 tampo esquerdo inferior	1	0,00	73,4	0	0,00	5387,6	-0,90
	2	1,53	73,3	112,46	2,35	5372,9	
	3	2,32	73,2	169,46	5,36	5358,2	
	4	4,51	73	329,4	20,36	5329	
	5	6,13	73,1	448,1	37,58	5343,6	
	6	7,40	72,7	537,98	54,76	5285,3	
11 tampo direito superior	1	0,00	73,8	0	0,00	5446,4	-0,48
	2	1,53	73,6	112,92	2,35	5417	
	3	2,32	73,7	170,62	5,36	5431,7	
	4	4,51	73,4	331,2	20,36	5387,6	
	5	6,13	73,3	449,33	37,58	5372,9	
	6	7,40	75,7	560,18	54,76	5730,5	
12 tampo direito esquerda	1	0,00	73,7	0	0,00	5431,7	-0,95
	2	1,53	73,5	112,77	2,35	5402,3	
	3	2,32	73,5	170,16	5,36	5402,3	
	4	4,51	73,4	331,2	20,36	5387,6	
	5	6,13	73,3	449,33	37,58	5372,9	
	6	7,40	73	540,2	54,76	5329	
13 tampo direito direita	1	0,00	74,7	0	0,00	5580,1	-0,95
	2	1,53	74,5	114,3	2,35	5550,3	
	3	2,32	74,3	172,01	5,36	5520,5	
	4	4,51	74,2	334,81	20,36	5505,6	
	5	6,13	73,9	453,01	37,58	5461,2	
	6	7,40	74	547,6	54,76	5476	
14 tampo direito inferior	1	0,00	73,6	0	0,00	5417	-0,85
	2	1,53	73,4	112,61	2,35	5387,6	
	3	2,32	73,4	169,93	5,36	5387,6	
	4	4,51	73,2	330,3	20,36	5358,2	
	5	6,13	73	447,49	37,58	5329	
	6	7,40	72,9	539,46	54,76	5314,4	

Fonte: Autores (2017)

E posteriormente, para os seis (06) pontos do casco (5 a 10) apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 - Cálculo de coeficientes de correlação do Casco

Ponto de Medição	Medição	Tempo t (anos)	Espessura x (mm)	t.x	t ²	x ²	r
5 Casco Geratriz lateral direita	1	0,00	76,7	0	0,00	5882,9	-0,70
	2	1,53	76,5	117,37	2,35	5852,3	
	3	2,32	76,4	176,87	5,36	5837	
	4	4,51	75,8	342,03	20,36	5745,6	
	5	6,13	76,2	467,11	37,58	5806,4	
	6	7,40	75,8	560,92	54,76	5745,6	
6 Casco Geratriz lateral direita	1	0,00	75,7	0	0,00	5730,5	-0,27
	2	1,53	75,5	115,84	2,35	5700,3	
	3	2,32	75,3	174,32	5,36	5670,1	
	4	4,51	76,5	345,19	20,36	5852,3	
	5	6,13	75,3	461,59	37,58	5670,1	
	6	7,40	75	555	54,76	5625	
7 Casco Geratriz lateral esquerda	1	0,00	76,1	0	0,00	5791,2	-0,42
	2	1,53	75,9	116,45	2,35	5760,8	
	3	2,32	75,8	175,48	5,36	5745,6	
	4	4,51	76,8	346,55	20,36	5898,2	
	5	6,13	75,6	463,43	37,58	5715,4	
	6	7,40	75,2	556,48	54,76	5655	
8 Casco Geratriz lateral esquerda	1	0,00	76,7	0	0,00	5882,9	-0,46
	2	1,53	76,5	117,37	2,35	5852,3	
	3	2,32	76,5	177,1	5,36	5852,3	
	4	4,51	75,4	340,23	20,36	5685,2	
	5	6,13	76,4	468,33	37,58	5837	
	6	7,40	76,2	563,88	54,76	5806,4	
9 Casco Geratriz superior	1	0,00	76,7	0	0,00	5882,9	-0,85
	2	1,53	75,6	115,99	2,35	5715,4	
	3	2,32	75,5	174,79	5,36	5700,3	
	4	4,51	75,4	340,23	20,36	5685,2	
	5	6,13	75,3	461,59	37,58	5670,1	
	6	7,40	75	555	54,76	5625	
10 Casco Geratriz superior	1	0,00	75,7	0	0,00	5730,5	-0,71
	2	1,53	75,9	116,45	2,35	5760,8	
	3	2,32	75,8	175,48	5,36	5745,6	
	4	4,51	75,7	341,58	20,36	5730,5	
	5	6,13	75,7	464,04	37,58	5730,5	
	6	7,40	75,3	557,22	54,76	5670,1	

Fonte: Autores (2017)

As tabelas de r demonstram, para os critérios adotados, que os pontos representativos para o cálculo da taxa de redução de espessura de cada componente do vaso de pressão são os pontos 1, 3, 4, 9, 12, 13 e 14. O passo posterior, referenciando procedimento similar ao de Junior (2002), é o cálculo dos parâmetros da reta de regressão b_0 e b_1 (taxa de perda de espessura), representação das retas e cálculo da vida residual VR a partir dos pontos representativos definidos.

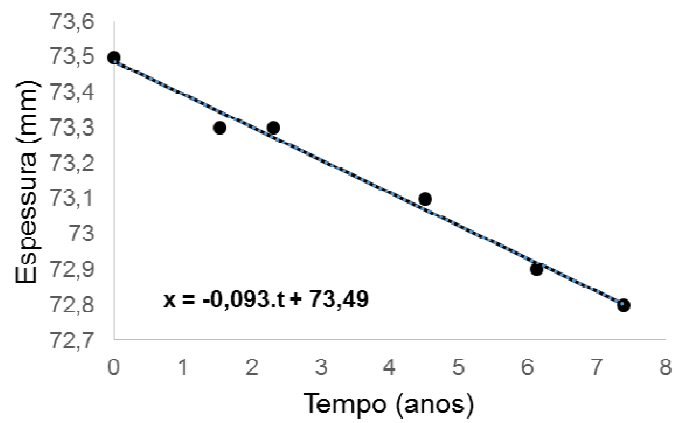
Os parâmetros da reta de regressão indicados na Tabela 10, obtém-se através das Equações (16) e (17) e são graficamente apresentados nas retas de regressão das Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 a seguir.

Tabela 10 - Cálculo de Parâmetros das Retas de Regressão

Ponto de Medição	Medição	tempo t_i (anos)	Espessura x_i (mm)	b_0 (mm)	taxa perda de espessura - b_1 (mm/ano)
1 tampo esquerdo superior	1	0	73,5	73,49	-0,093
	2	1,53	73,3		
	3	2,31	73,3		
	4	4,51	73,1		
	5	6,13	72,9		
	6	7,40	72,8		
3 tampo esquerdo esquerda	1	0	73,5	73,51	-0,075
	2	1,53	73,4		
	3	2,32	73,3		
	4	4,51	73,2		
	5	6,13	73,1		
	6	7,40	72,9		
4 tampo esquerdo inferior	1	0	73,4	73,41	-0,080
	2	1,53	73,3		
	3	2,31	73,2		
	4	4,51	73,0		
	5	6,13	73,1		
	6	7,40	72,7		
9 Casco Geratriz superior	1	0	76,7	76,22	-0,174
	2	1,53	75,6		
	3	2,32	75,5		
	4	4,51	75,4		
	5	6,13	75,3		
	6	7,40	75,0		
12 tampo direito esquerda	1	0	73,7	73,69	-0,079
	2	1,53	73,5		
	3	2,32	73,5		
	4	4,51	73,4		
	5	6,13	73,3		
	6	7,40	73,0		
13 tampo direito direita	1	0	74,7	74,63	-0,101
	2	1,53	74,5		
	3	2,32	74,3		
	4	4,51	74,2		
	5	6,13	73,9		
	6	7,40	74,0		
14 tampo direito inferior	1	0	73,6	73,59	-0,093
	2	1,53	73,4		
	3	2,32	73,4		
	4	4,51	73,2		
	5	6,13	73,0		
	6	7,40	72,9		

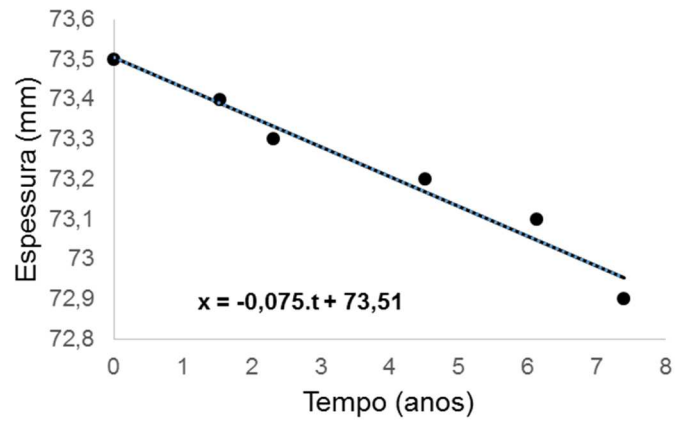
Fonte: Autores (2017)

Figura 11 - Reta de Regressão do Ponto 1



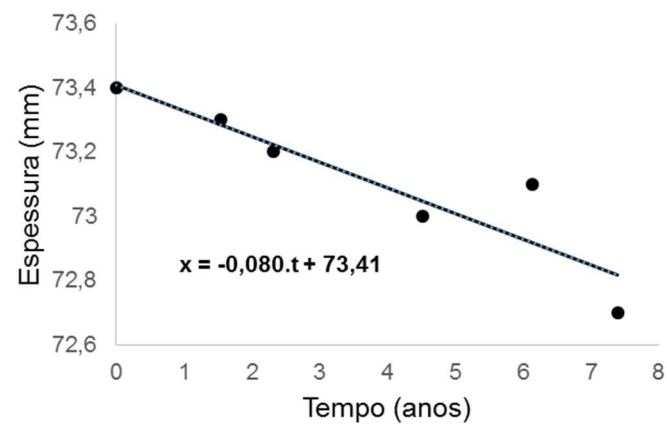
Fonte: Autores (2017)

Figura 12 - Reta de Regressão do Ponto 3



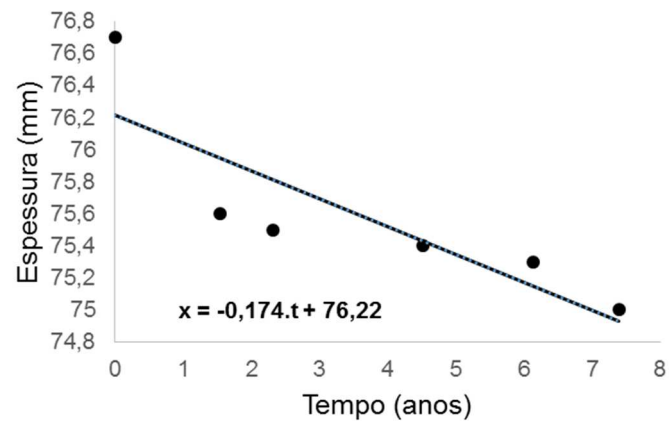
Fonte: Autores (2017)

Figura 13 - Reta de Regressão do Ponto 4



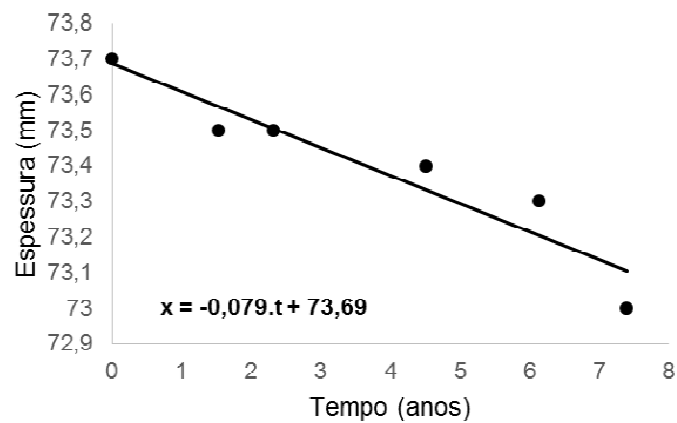
Fonte: Autores (2017)

Figura 14 - Reta de Regressão do Ponto 9



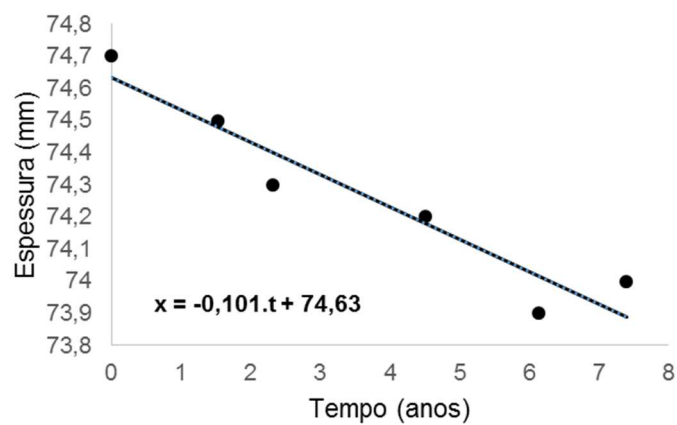
Fonte: Autores (2017)

Figura 15 - Reta de Regressão do Ponto 12



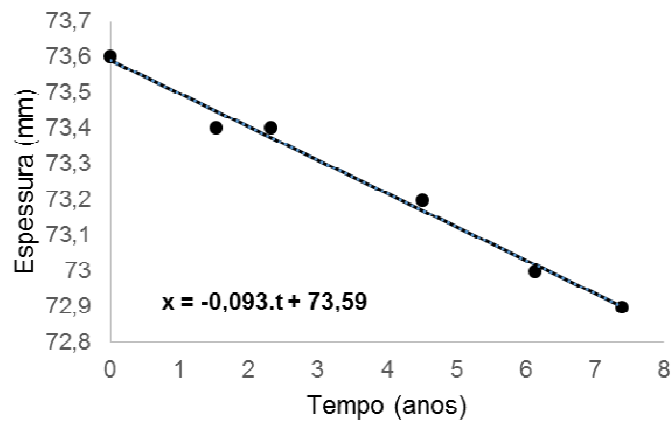
Fonte: Autores (2017)

Figura 16 – Reta de Regressão do Ponto 13



Fonte: Autores (2017)

Figura 17 - Reta de Regressão do Ponto 14



Fonte: Autores (2017)

Dessa forma, com os resultados iniciais do método baseado em regressão linear, para o tampo esquerdo encontra-se a taxa de perda de espessura de 0,093 mm/ano no ponto 1, para o casco a taxa é de 0,174 mm/ano no ponto 9 e para o tampo direito, 0,101 mm/ano, no ponto 13. A vida residual VR, avaliada pela Equação (3), para cada componente, é apresentada a seguir:

$$VR_{\text{tampo esquerdo}} = \frac{72,8 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,093 \text{ mm/ano}} = 172,0 \text{ anos} \quad (29)$$

$$VR_{\text{casco}} = \frac{75,0 \text{ mm} - 58,6 \text{ mm}}{0,174 \text{ mm/ano}} = 94,2 \text{ anos} \quad (30)$$

$$VR_{\text{tampo direito}} = \frac{74,0 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,101 \text{ mm/ano}} = 170,3 \text{ anos} \quad (31)$$

De imediato, observa-se que a robustez determinada pelo embasamento estatístico resulta em limites menos conservadores para a vida residual do equipamento, estabelecida, neste caso, em 94,2 anos.

A etapa subsequente do trabalho consiste em avaliar se eventuais erros ou valores espúrios obtidos no processo podem ser mitigados, resultando em correlações mais fortes; e a avaliação de novos conceitos, como o limite de confiança dos resultados.

5.4 – DADOS ESPÚRIOS E INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS

Para avaliar a existência e necessidade de expurgo de dados espúrios aplica-se a Equação (20) para determinar o valor de R de cada medida de espessura. Os valores a serem expurgados estão destacados em negrito na Tabela 11, seguindo o critério de R_i superior ao R_c estabelecido pelo método de Chauvenet.

Tabela 11 - Identificação de valores espúrios

Ponto Medição	Localização	Espessura medida (mm)						Desvio padrão S(x)	R_i					
		1	2	3	4	5	6		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	Tampo esquerdo - superior	73,5	73,3	73,3	73,1	72,9	72,8	0,266	1,31	0,56	0,56	0,19	0,94	1,31
2	Tampo esquerdo - direita	72,7	72,5	72,4	72,6	72,3	71,8	0,319	0,99	0,37	0,05	0,68	0,26	1,83
3	Tampo esquerdo - esquerda	73,5	73,4	73,3	73,2	73,1	72,9	0,216	1,23	0,77	0,31	0,15	0,62	1,54
4	Tampo esquerdo - inferior	73,4	73,3	73,2	73,0	73,1	72,7	0,248	1,14	0,74	0,34	0,47	0,07	1,68
5	Casco - geratriz lateral direita	76,7	76,5	76,4	75,8	76,2	75,8	0,372	1,25	0,72	0,45	1,16	0,09	1,16
6	Casco - geratriz lateral direita	75,7	75,5	75,3	76,5	75,1	75,0	0,547	0,29	0,10	0,48	1,82	0,86	1,06
7	Casco - geratriz lateral esquerda	76,1	75,9	75,8	76,8	75,6	75,2	0,537	0,37	0,00	0,19	1,68	0,56	1,30
8	Casco - geratriz lateral esquerda	76,7	76,5	76,5	75,4	76,4	76,2	0,462	0,90	0,47	0,47	1,91	0,25	0,18
9	Casco - geratriz superior	76,7	75,6	75,5	75,4	75,3	75,0	0,585	1,91	0,03	0,14	0,31	0,48	1,00
10	Casco - geratriz superior	76,1	75,9	75,8	75,7	75,7	75,3	0,266	1,31	0,56	0,19	0,19	0,19	1,69
11	Tampo esquerdo - superior	73,8	73,6	73,7	73,4	73,3	75,7	0,893	0,13	0,35	0,24	0,58	0,69	2,00
12	Tampo esquerdo - esquerda	73,7	73,5	73,5	73,4	73,3	73,0	0,237	1,27	0,42	0,42	0,00	0,42	1,69
13	Tampo esquerdo - direita	74,7	74,5	74,3	74,2	73,9	74,0	0,301	1,44	0,77	0,11	0,22	1,22	0,89
14	Tampo esquerdo - inferior	73,6	73,4	73,4	73,2	73	72,9	0,266	1,31	0,56	0,56	0,19	0,94	1,31

Fonte: Autores (2017)

Após o expurgo dos dados destacados, apresenta-se os novos valores do coeficiente de correlação r . A Tabela 12, abaixo, indica os valores de r para cada ponto em comparação ao valor obtido sem o expurgo de dados espúrios.

Tabela 12 - Coeficiente de correlação após dados expurgados

Ponto de Medição	Localização	Coeficiente correlação r sem expurgo	Coeficiente correlação r após expurgo
1	Tampo esquerdo - superior	-0,95	-0,95
2	Tampo esquerdo - direita	-0,77	-0,73
3	Tampo esquerdo - esquerda	-0,98	-0,98
4	Tampo esquerdo - inferior	-0,92	-0,92
5	Casco - geratriz lateral direita	-0,70	-0,70
6	Casco - geratriz lateral direita	-0,27	-0,90
7	Casco - geratriz lateral esquerda	-0,42	-0,42
8	Casco - geratriz lateral esquerda	-0,46	-0,93
9	Casco - geratriz superior	-0,85	-0,95
10	Casco - geratriz superior	-0,71	-0,71
11	Tampo esquerdo - superior	-0,48	-0,96
12	Tampo esquerdo - esquerda	-0,95	-0,95
13	Tampo esquerdo - direita	-0,95	-0,95
14	Tampo esquerdo - inferior	-0,91	-0,91

Fonte: Autores (2017)

A partir do mesmo critério adotado anteriormente para definição dos pontos representativos no processo de regressão linear, ou seja, valor do coeficiente de correlação superior a 0,81, fica evidente que o processo de expurgo resulta no aumento de número de pontos de medição representativos. Anteriormente à eliminação dos dados espúrios são estabelecidos sete (07) pontos representativos: 1, 3, 4, 9, 12, 13 e 14, após o procedimento de expurgo o total de pontos aumenta para dez (10), com o incremento dos locais de medição 6, 8 e 11. Outro fator observado é um sensível incremento no valor do coeficiente de correlação do ponto 9 que já é representativo.

A etapa posterior é o recálculo dos parâmetros de regressão e, portanto, de novas taxas de perda de espessura, apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Novos parâmetros de regressão linear

Ponto de Medição	Localização	taxa perda de espessura - b_1 (mm/ano)
1	Tampo esquerdo - superior	0,093
3	Tampo esquerdo - esquerda	0,075
4	Tampo esquerdo - inferior	0,080
6	Casco - geratriz lateral direita	0,080
8	Casco - geratriz lateral esquerda	0,054
9	Casco - geratriz superior	0,088
11	Tampo esquerdo - superior	0,082
12	Tampo esquerdo - esquerda	0,079
13	Tampo esquerdo - direita	0,101
14	Tampo esquerdo - inferior	0,093

Fonte: Autores (2017)

Analisando a Tabela 13, identifica-se que os resultados mais relevantes e que devem ser utilizadas no cálculo da vida residual VR são as taxas referentes aos pontos 1 (tampo esquerdo), 9 (casco) e 13 (tampo direito). No entanto, antes da apresentação das vidas residuais calculadas determina-se os limites de confiança máximo e mínimo, conforme Equações (21) e (22), sendo estes representados nas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16; e demonstradas graficamente nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20, respectivamente. No desenvolvimento dos cálculos, utiliza-se os valores da distribuição de t-Student ($T_{n-2, \alpha/2}$) de 2,776 e 3,182 para os conjuntos de dados com 5 e 6 medições, respectivamente.

Nas imagens que apresentam as retas de regressão, o limite de confiança de 95% é estabelecido por duas curvas destacadas em vermelho, uma representando o limite superior (X_{95sup}) e outra o limite inferior (X_{95inf}).

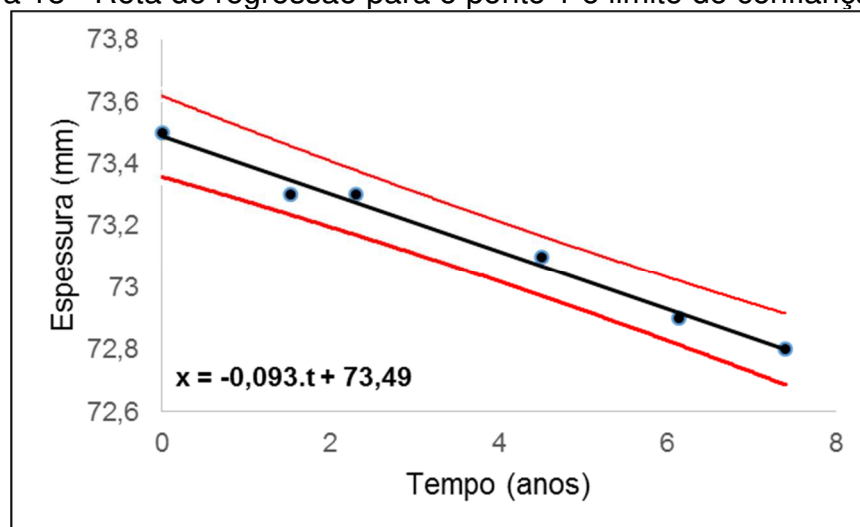
Sendo assim, para o ponto 1, localizado no tampo esquerdo, sem expurgo de nenhuma medição:

Tabela 14 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 1

Ponto de medição	Medição	tempo t_i (anos)	espessura x_i (mm)	S_R	b_0	b_1	$b_0+b_1.t$	X_{95sup}	X_{95inf}
1 tampo esquerdo superior	1	0	73,5	0,03	73,49	-0,093	73,489	73,62	73,36
	2	1,53	73,3				73,347	73,45	73,24
	3	2,31	73,3				73,274	73,38	73,17
	4	4,51	73,1				73,070	73,17	72,97
	5	6,13	72,9				72,919	73,03	72,81
	6	7,40	72,8				72,801	72,91	72,69

Fonte: Autores (2017)

Figura 18 - Reta de regressão para o ponto 1 e limite de confiança 95%.



Fonte: Autores (2017)

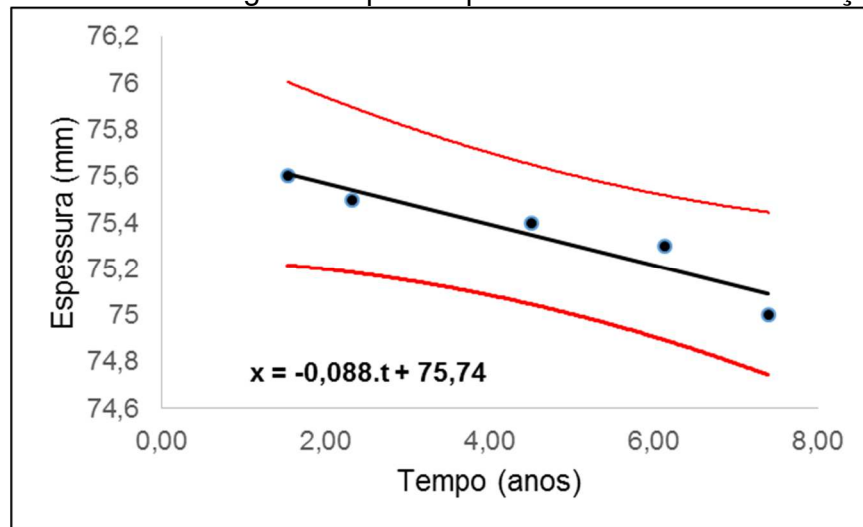
Para o ponto 9, localizado no casco e com o expurgo da 1ª espessura proposta no conjunto de dados:

Tabela 15 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 9

Ponto de medição	Medição	tempo t_i (anos)	espessura x_i (mm)	S_R	b_0	b_1	$b_0+b_1.t$	X_{95sup}	X_{95inf}
9 Casco Geratriz lateral esquerda	2	1,53	75,6	0,09	75,74	-0,088	75,610	76,02	75,20
	3	2,31	75,5				75,541	75,88	75,20
	4	4,51	75,4				75,348	75,65	75,05
	5	6,13	75,3				75,206	75,53	74,88
	6	7,40	75,0				75,094	75,44	74,75

Fonte: Autores (2017)

Figura 19 - Retas de regressão para o ponto 9 e limite de confiança 95%.



Fonte: Autores (2017)

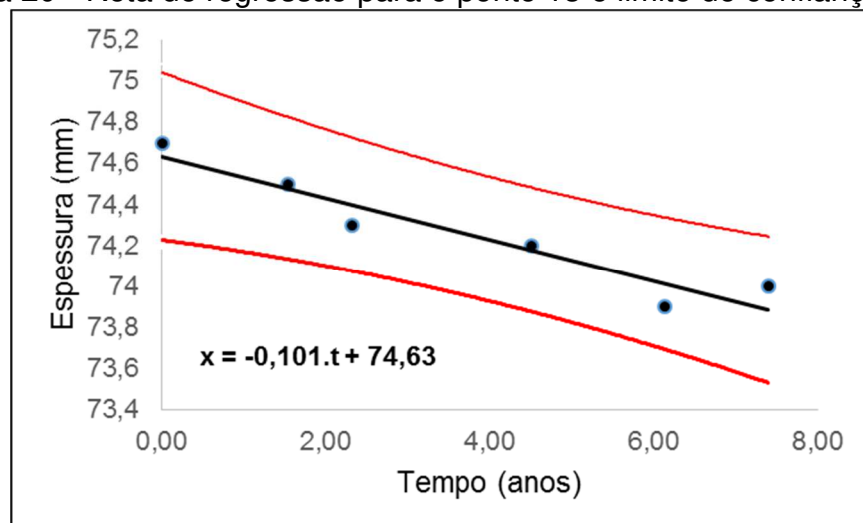
E a seguir, para o ponto 13, localizado no tampo direito, também sem o expurgo de nenhuma medição:

Tabela 16 - Cálculo dos parâmetros de regressão do ponto 13

Ponto de medição	Medição	tempo t_i (anos)	espessura x_i (mm)	S_R	b_0	b_1	$b_0 + b_1 \cdot t$	X_{95sup}	X_{95inf}
13 tampo direito direita	1	0	74,7	0,10	74,63	-0,101	73,589	73,72	73,46
	2	1,53	74,5				73,447	73,55	73,34
	3	2,31	74,3				73,374	73,48	73,27
	4	4,51	74,2				73,170	73,27	73,07
	5	6,13	73,9				73,019	73,13	72,91
	6	7,40	74,0				72,901	73,01	72,79

Fonte: Autores (2017)

Figura 20 - Retas de regressão para o ponto 13 e limite de confiança 95%.



Fonte: Autores (2017)

Portanto, após o tratamento dos dados espúrios manteve-se a taxa de perda de espessura de 0,093 mm/ano no ponto 1, e obteve-se a nova taxa de redução de espessura de 0,088 mm/ano no ponto 9 e 0,101 mm/ano no ponto 13. A vida residual VR, avaliada pela Equação 3, para cada componente, é apresentada a seguir:

$$VR_{\text{tampo esquerdo}} = \frac{72,8 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,093 \text{ mm/ano}} = 172,0 \text{ anos} \quad (32)$$

$$VR_{\text{casco}} = \frac{75,0 \text{ mm} - 58,6 \text{ mm}}{0,088 \text{ mm/ano}} = 186,4 \text{ anos} \quad (33)$$

$$VR_{\text{tampo direito}} = \frac{74,0 \text{ mm} - 56,8 \text{ mm}}{0,101 \text{ mm/ano}} = 170,3 \text{ anos} \quad (34)$$

Nestas condições, a vida residual do equipamento é calculada em 170,3 anos.

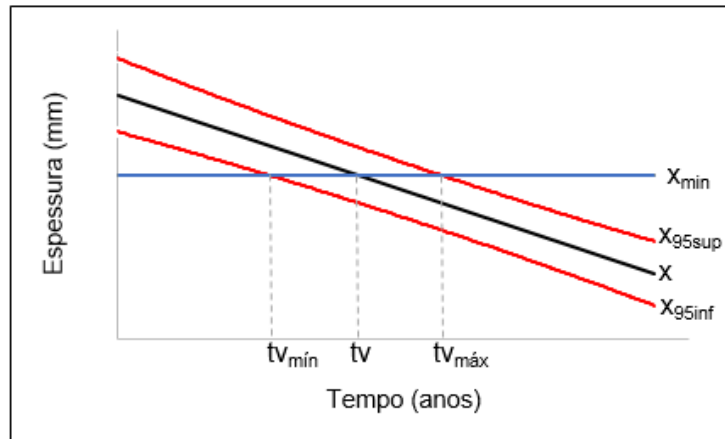
Finalmente, o trabalho avalia a determinação da vida residual explorando as curvas de limite de confiança. Sendo estas curvas que delimitam a região em que se enquadram, com 95% de certeza, as possíveis retas de regressão, inclusive o melhor ajuste possível, representada pela reta obtida pelo método de mínimos quadrados.

Conforme Toledo (1985), as equações das curvas (superior e inferior) são ajustadas para duas parábolas de coeficientes a, b e c, obtidos pela solução do sistema:

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum t + c \cdot \sum t^2 = \sum x \\ a \cdot \sum t + b \cdot \sum t^2 + c \cdot \sum t^3 = \sum x \cdot t \\ a \cdot \sum t^2 + b \cdot \sum t^3 + c \cdot \sum t^4 = \sum x \cdot t^2 \end{cases} \quad (35)$$

Conforme ilustrado pela Figura 21 abaixo, os interceptos das curvas do limite de confiança superior e inferior com a reta que indica a espessura mínima projetam sobre o eixo x (tempo) um tempo de vida máximo, $tv_{\text{máx}}$, para o caso em que a reta real que representa o processo de decréscimo de espessura representado pelas espessuras propostas para estudo esteja sobre o limite de confiança superior; e um tempo de vida mínimo, $tv_{\text{mín}}$, quando a referida reta estiver sobre o limite de confiança inferior. Nesta condição, a vida residual é a diferença entre o $tv_{\text{mín}}$ e o tempo representado pela última medição existente.

Figura 21 - Limite de Confiança e Vida Residual



Fonte: Autores (2017)

A partir da resolução do sistema de Equações (35), utilizando a regra de Craner, obtém-se as equações da curva do limite inferior de confiança para as retas de regressão dos pontos de medição 1, 9 e 13, como segue:

$$\text{PONTO 1: } x_{95\text{inf}} = -0,0018t^2 - 0,0077t + 73,359 \quad (36)$$

$$\text{PONTO 9: } x_{95\text{inf}} = -0,0083t^2 + 0,0065t + 75,244 \quad (37)$$

$$\text{PONTO 13: } x_{95\text{inf}} = -0,0056t^2 + 0,0523t + 74,228 \quad (38)$$

Conforme proposto, igualando as Equações (36) e (38) com o valor de 56,8 mm calculado para a espessura mínima dos tampos, e a Equação (37) com o valor de 58,6 mm calculado para a espessura do casco, determina-se o tempo de vida mínimo $tv_{\text{mín}}$ para cada componente. Desta forma, ao utilizar, de forma mais conservativa, a curva mínima de confiança para obtenção da vida residual VR, o resultado é apresentado a seguir:

$$tv_{\text{mín_tampo esquerdo}} = 76,8 \text{ anos} \quad (39)$$

$$tv_{\text{mín_casco}} = 44,4 \text{ anos} \quad (40)$$

$$tv_{\text{mín_tampo direito}} = 51,5 \text{ anos} \quad (41)$$

$$VR_{\text{tampo esquerdo}} = 76,8 - 7,4 \text{ anos} = 69,4 \text{ anos} \quad (42)$$

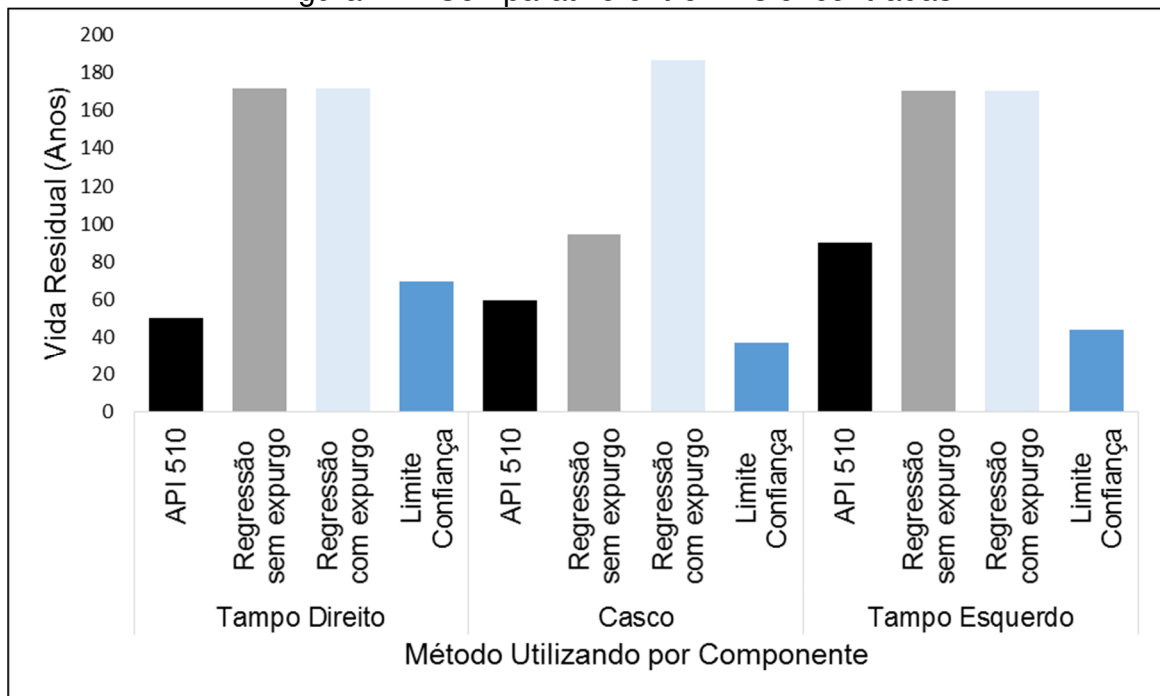
$$VR_{\text{casco}} = 44,4 - 7,4 \text{ anos} = 37,0 \text{ anos} \quad (43)$$

$$VR_{\text{tampo direito}} = 51,5 - 7,4 \text{ anos} = 44,1 \text{ anos} \quad (44)$$

5.5 – DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados encontrados para a vida residual das partes constituintes do vaso de pressão, a partir das espessuras propostas para estudo, estão dispostos em um gráfico comparativo, apresentado na Figura 22, conforme o método utilizado no cálculo. Sendo assim:

Figura 22 - Comparativo entre VRs encontradas



Fonte: Autores (2017)

A partir da análise da Figura 22, observa-se que as vidas residuais obtidas pelo método proposto pelo código API 510 e pelo método que explora o conceito de limite de confiança apresentam os resultados mais restritivos.

Iniciando a avaliação dos resultados a partir dos dados resultantes da aplicação da API 510, o primeiro fator de destaque é o desprezo que o método impõe ao conjunto de dados, visto que de um conjunto de 6 medições, considera apenas o primeiro e o último ou este e o imediatamente anterior. Tal fato possibilita que o processo, representado pelos registros de espessuras indicados, esteja criticamente sujeito a eventuais erros de medição, pois além de não estabelecer métodos de identificação e

tratamento de erros mais grosseiros, permite que os mesmos influenciem fortemente o resultado.

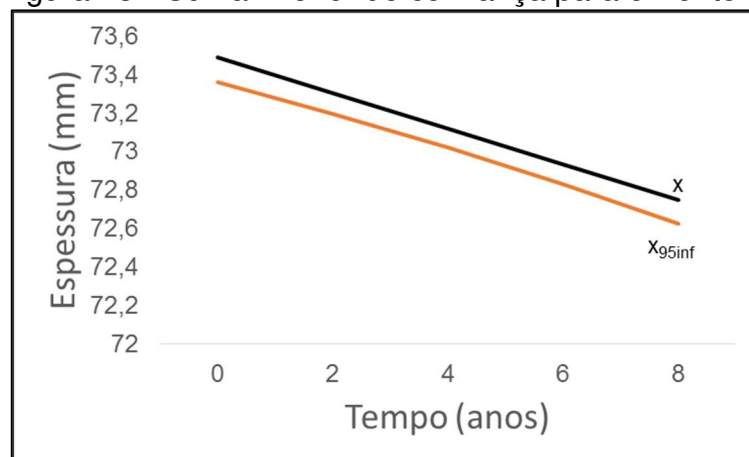
Conforme indicado por Junior (2002), a exclusão de valores com suspeição, nestas condições, dependeria de um processo manual e pautado em “experiência profissional” que, de fato, sugere uma subjetividade não desejada quando o objetivo é determinar a vida útil de um equipamento, com possíveis impactos em custos de substituição, investimento em manutenção e dispêndio de recursos de inspeção.

De forma prática, ao considerar, por exemplo, os dados de espessura propostos para o ponto 11 nos anos de 2015 e 2016, verifica-se um “aumento” de espessura fisicamente impossível. Estes resultados indicam que este método pode motivar, sem a devida análise, decisões inadequadas e reforçam a necessidade de identificar procedimentos mais eficientes e passíveis de melhorias.

Em segundo momento, aplicando a teoria estatística, é realizado um exercício de obtenção da vida residual utilizando o conceito de limite de confiança, mais especificamente a curva que descreve, com 95% de confiança, o comportamento mais crítico de evolução do processo de deterioração. A estimativa para este cenário se aproxima bastante da API 510, já descrito como o método mais sujeito à influência de erros.

Conforme a Figura 23 demonstra, com referência nas espessuras propostas para o ponto 1, a curva de confiança inferior proposta se ajusta de forma adequada ao conjunto de dados estabelecidos pelos seis (06) pontos obtidos no histórico de espessuras do referido ponto.

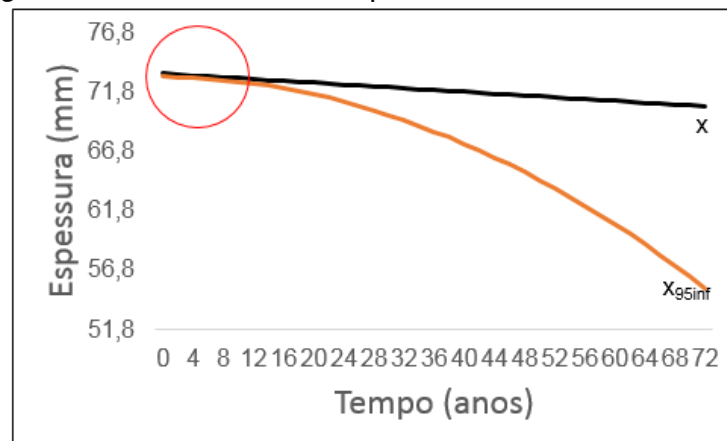
Figura 23 - Curva inferior de confiança para o Ponto 1.



Fonte: Autores (2017)

No entanto, ao se extrapolar a curva obtida, com objetivo de obter o tempo de vida mínimo $tv_{\min}$, devido ao seu comportamento parabólico, pode-se constatar que há um importante descolamento entre o valor predito pela curva de regressão (obtida com 6 pontos) e o limite mínimo de confiança. Este comportamento é demonstrado na Figura 24 na qual destaca-se que o $tv_{\min}$ de 69,4 anos encontrado corresponde, na reta de regressão, a uma espessura de 66,8 mm, portanto, ainda superior à espessura mínima de 56,8 mm. Destaca-se ainda que o comportamento indicado na Figura 23, para o qual a relação entre as duas curvas é a esperada, corresponde apenas a parte destacada em vermelho quando se observa o processo em um horizonte de tempo maior.

Figura 24 - Vida Residual a partir do Limite de Confiança



Fonte: Autores (2017)

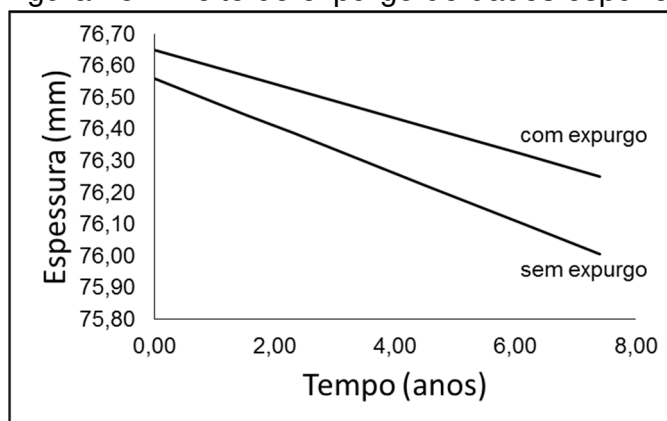
A partir da constatação anterior, são classificados como fortemente conservadores os resultados de vida residual obtidos conforme a API 510 e a partir da curva do limite mínimo de confiança, ponderando que a decisão é particularmente para o pequeno conjunto de dados objeto deste estudo, ou seja, em um tamanho maior de amostra é esperado e ponderado por Toledo (1985) e Costa Neto (1987) que estas curvas apresentam melhor ajuste e a estimativa, por esta forma, pode ganhar maior representatividade.

A obtenção dos parâmetros da reta de regressão linear através do método dos mínimos quadrados permite, por sua vez, calcular a vida residual de cada componente a partir de taxas de perda de espessura bem menores, em comparação aos dois métodos apresentados até aqui, em processo similar, senão idêntico, ao apresentado por Junior (2002). Um fator de relevância na análise é a utilização de todo o histórico de espessuras para construção de um melhor ajuste de reta. A aplicação de testes de

significância e cálculo de coeficiente de correlação validam e disponibilizam métodos de avaliação qualitativos tanto para a existência de correlação linear quanto para a relevância da mesma. Porém, para a primeira regressão realizada julga-se necessário, também, questionar a existência e o impacto de eventuais valores espúrios existentes.

Sendo assim, adotando-se critérios estabelecidos na teoria estatística para identificação dos valores espúrios é possível melhorar o conjunto de dados, com efeito no aumento de coeficiente de correlação da regressão, e traçar novas retas de regressão, eliminando interferências de erros indesejados, mas de forma sistematizada, ignorando subjetividades. Os resultados finais também são taxas de perda de espessura bem inferiores ao método da API-510 e da curva inferior do limite de confiança. A Figura 25 demonstra, para o ponto de medição 8, o efeito da eliminação de dados espúrios, com perceptível redução da inclinação da curva (taxa de perda de espessura).

Figura 25 - Efeito do expurgo de dados espúrios



Fonte: Autores (2017)

Finalmente, cabe frisar que o método estatístico apresentado dispõe de muitas ferramentas para avaliar o processo de redução de espessuras proposto pelas espessuras indicadas para execução do estudo, exigindo melhor tratamento dos dados, mas resultando em informações mais completas, sobretudo estabelecendo com confiança meios de previsão dos resultados futuros. De fato, as taxas de perda de espessura obtidas pelos procedimentos descritos indicam que o vaso de pressão objeto deste trabalho, se submetidos aos resultados de espessuras propostos, ainda possui uma elevada vida residual, o que não implica a redução ou eliminação de atividades de avaliação da integridade do mesmo, mas permitem afirmar com certeza que o equipamento está íntegro até a próxima campanha de inspeção.

6 – CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou, a partir da proposição de espessuras que representem um hipotético processo de deterioração, diferentes métodos de obtenção de taxas de perda de espessura. Um proposto pela Norma API 510 e os demais a partir da regressão linear dos pares espessura x tempo, com objetivo de comparar e indicar a técnica mais adequada para o estudo de caso proposto.

A proposição de dados de espessuras foi necessária para modelar um determinado processo corrosivo para efeito de estudo, visto que os dados reais apresentavam comportamento influenciado pela existência de medidas de redução do processo corrosivo real, como a injeção de inibidor de corrosão a montante do vaso de pressão estudado. Considerando que o objetivo do estudo de caso é a avaliação dos resultados da aplicação de diferentes metodologias para obtenção de taxa de perda de espessura e vida residual e não a caracterização do real processo corrosivo vigente julgou-se adequado este procedimento. Contudo, deve-se pontuar, que devido a isto, para iniciar a discussão sobre a aplicação de diferentes metodologias na avaliação de vasos e suas medições de espessuras reais, a mesma deve ser precedida da aplicação dos métodos demonstrados em equipamentos cujo histórico de medições caracterize um processo de corrosivo uniforme evidente e sem a influência de agentes externos que mitiguem o processo.

Para o estudo de caso em questão, embora a decisão de qual método utilizar seja influenciada pela quantidade de dados disponíveis, recursos existentes para as atividades de inspeção e qualificação do corpo técnico responsável pela análise, conclui-se que o método descrito na API 510 é de fácil aplicação, porém apresentou resultados mais conservadores e suscetíveis a desvios.

Conforme as espessuras propostas para o equipamento avaliado, a aplicação de regressão linear, além de resultar em taxas de deterioração menos severas e vida residual maior, demonstra a utilização de consistente base teórica e abordagem de importantes questões como a validação da existência da regressão linear proposta e o tratamento de dados espúrios.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Aplicação das metodologias propostas neste estudo de caso em dados reais de medição, originados de processo corrosivo claramente identificado através da análise de parâmetros de processo, da existência ou não de métodos mitigadores do processo corrosivo e com valores de espessuras fisicamente compatíveis com a taxa de corrosão esperada;
- Aplicação e avaliação do método para maiores conjuntos de dados, explorando os efeitos da curva do limite inferior de confiança na obtenção da vida residual;
- Avaliação de diferentes métodos de identificação de valores de espessuras espúrios, por exemplo, o de Dixon e o de Grubbs mensurando as influências nos resultados;
- Implementação dos conceitos e procedimentos demonstrados em rotina computacional para automatização da análise de vida residual de vasos de pressão, a partir de banco de dados de espessuras reais registradas.

7 – BIBLIOGRAFIA

ARAUJO, A. A. **Gerenciamento de Falhas por Corrosão em Dutos**. Abril de 2012. 170 p. Dissertação – PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2012.

BOATENG, A. et al. Determination of Corrosion Rate and Remaining Life of Pressure Vessel using Ultrasonic Thickness Testing Technique. **Global Journal of Engineering, Design & Tecgnology**, Legon-Accra, v.03, n.02, p. 43-50, abr. 2014.

CORREA, S.M.B.B. **Probabilidade e Estatística**. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2009. 116 p.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Blücher Ltda, 1987. 264 p.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

JAMBO, H.C.M. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 342 p.

JUNIOR, R. R.et al. **Sistema de Programação e Planejamento de Inspeção de Tubulação**: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, 2002, 9 p.

LEVIN, J. et al. **Estatística para Ciências Humanas**. São Paulo. Ed. Pearson. 2004.

MAINIER, F.B. et al. Monitoramento da Corrosão Interna em Plataformas Offshore. 8 p. **Revista TECNO-LÓGICA**, Niterói – RJ, v. 12, n. 1, p. 14-21, jan/jun. 2008.

MIRANDA, M. L. **Correlação e Regressão em Curso de Engenharia**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Matemática), PUC, Minas Gerais, 2008.

NAGAYASSU, V.Y. **Análise Crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da agressividade de derivados de petróleo**. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), USP, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, J. L. **Enquadramento de Vasos de Pressão à Norma NR-13**. Rio Pipeline. Rio de Janeiro, 2005, 8 p.

ROBERGE, P.R. **Corrosion Engineering Principles and Practice**, McGraw-Hill, 2008. P. Handbook Corrosion, Hilti Corporation, 2015. 7 p.

- RODRIGUES, S. C. A. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. 94 p. Relatório (Mestrado em Matemática), UBI. Portugal, 2012.
- SANTIN, J. L. **Ultra-som: Técnica e Aplicação**. Curitiba: OPTAGRAF, 2003. 276 p.
- TELLES, P.C.S. **Materiais para Equipamentos de Processo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 51 p.
- TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 302 p.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section VIII: Asme Boiller and Pressure Vessel Code – Rules for Constructoin of Pressure Vessel**. New York: ASME, 2015, 816 p.
- TOLEDO, G. L.; MARTINS G. A.; FONSECA J. S. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Atlas, 1985. 267 p.
- SILVA, B.C.A. **Estudo das Incertezas na Medição de Espessura por Ultrassom em Peças Aeronáuticas**. Rio de Janeiro: CEFET-RJ, 2012. 100 p.
- VIVANCO, M. J. F. **Análise de valores extremos no tratamento estatístico da corrosão em equipamentos**. Tese (Mestrado em Estatística) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação, UNICAMP, São Paulo, 1994. 116 p.
- VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. São Paulo: Ed. Blucher, 1996.