

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Pedro Henrique Ribeiro Paes de Azeredo

**Avaliação da integridade de vasos de pressão com defeito
superficial
Metodologia e Análise de Segurança**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Renato Bichara Vieira

**Rio de Janeiro,
Junho de 2024**

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço à PUC-Rio e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio e colaboração nos momentos que precisei.

Agradeço ao meu orientador Renato Bichara Vieira pela troca de ideias, pelo tempo disponibilizado e parceria para a realização do trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram. Em específico ao meu pai e minha mãe pelo carinho e aprendizados ensinados ao longo da minha vida.

Aos meus amigos João Paulo Reis, Pedro Darze, André Benevenuto por todo o apoio e contribuições para este Trabalho.

Resumo

Azeredo, Pedro Henrique Ribeiro Paes de; Vieira, Renato Bichara (Orientador). **Avaliação da integridade de vasos de pressão com defeito superficial**. Rio de Janeiro, 2024. 58p. Projeto de Graduação - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo contribui para o debate sobre o uso de vasos de pressão com defeitos superficiais, utilizando a metodologia da norma API 579-1 para avaliar suas condições críticas. Os experimentos foram conduzidos no laboratório da PUC-Rio com um vaso de pressão que com um defeito usinado na superfície externa, simulando perda de espessura na parede do equipamento. Utilizou-se o método de Correlação Digital de Imagens para analisar a deformação do vaso de pressão, devido à pressão interna, na área do defeito e na área nominal (Sem o defeito). A análise dos resultados permitiu quantificar o fator de segurança apresentado na norma e avaliar a precisão dos cálculos teóricos. Foram identificadas oportunidades de melhoria para futuras pesquisas.

Palavras-chave

Experimentos laboratoriais; Correlação Digital de Imagens; Norma API 579-1; Vasos de pressão; Defeitos superficiais.

Abstract

Azeredo, Pedro Henrique Ribeiro Paes de; Vieira, Renato Bichara (Orientador). **Assessment of pressure vessel integrity with surface defects**. Rio de Janeiro, 2024. 58p. Projeto de Graduação - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study contributes to the discussion on the use of pressure vessels with surface defects, employing the methodology of API 579-1 standard to assess their critical conditions. The experiments were conducted at PUC-Rio's laboratory using a pressure vessel with a machined defect on its external surface, simulating wall thickness loss in the equipment. Digital Image Correlation method was utilized to analyze the deformation of the pressure vessel under internal pressure, both in the defect area and in the nominal area (without the defect). Analysis of the results allowed quantification of the safety factor specified in the standard and assessment of the accuracy of theoretical calculations. Opportunities for improvement in future research were identified.

Keywords

Laboratory experiments; Digital Image Correlation; API 579-1 Standard; Pressure vessels; Surface defects.

Sumário

1. Introdução.....	7
1.1. Objetivos	7
2. Revisão bibliográfica	9
2.1. Correlação Digital de Imagens (<i>Digital Image Correlation - DIC</i>)	9
2.1.1. Princípios básicos da técnica	9
2.1.2. Ferramentas para captura e análise de imagens	10
2.2. Análise de tensões e deformações em um vaso de pressão cilíndrico.....	11
2.2.1. Equações de tensões principais.....	11
2.2.2. Deformações circunferenciais e longitudinais devido às tensões...	13
2.3. Norma API 579-1.....	14
2.3.1. Introdução da norma:	14
2.3.2. Cálculo para pressão de trabalho máxima permitida reduzida em vasos de pressão cilíndricos (<i>MAWPr</i>).....	15
2.3.3. Análise de componentes com perda de material uniforme:.....	16
2.3.4. Técnicas de avaliação para perda de espessura uniforme	20
2.3.5. Técnicas de avaliação para perda de espessura localizada	24
3. Estudo de caso.....	30
3.1. Preparação dos materiais.....	30
3.1.1. Fabricação do vaso de pressão utilizado	30
3.1.2. Conexão dos equipamentos.....	33
3.2. Propriedades mecânicas do material	35
3.3. Aplicação da Norma API	40

3.3.1. Considerações iniciais.....	40
3.3.2. Análise de perda de espessura local, segundo a norma API-579-1.....	42
3.4. Metodologia dos testes.....	44
3.4.1. Processo de calibração para a correlação digital de imagem (DIC).....	45
3.4.2. Procedimentos de teste com pressão interna	47
4. Resultados.....	48
4.1. Histórico dos dados de pressão e deformações no extensômetro	48
4.2. Deformações obtidas pelo método de correlação digital	48
5. Análise dos resultados.....	52
5.1. Valores de variáveis para os cálculos apresentados nesta seção	52
5.2. Comparação entre os resultados de diferentes métodos	52
5.2.1. Deformação circunferencial teórica	52
5.2.2. Deformação longitudinal teórica	53
5.3. Análise do impacto do defeito	53
5.3.1. Relação entre deformação sofrida com a tensão atuante	54
5.3.2. Relação entre a pressão interna e a tensão atuante	54
5.4. Fator de segurança da norma	55
5.4.1. Relação entre tensão e deformação à partir da deformação plástica permanente.....	56
6. Conclusão.....	58
7. Referências.....	59

1 Introdução

Dutos, tubulações e vasos de pressão desempenham um papel de extrema relevância em uma ampla variedade de setores industriais, abrangendo desde a indústria petroquímica até a geração de energia. São componentes fundamentais para a condução segura de fluidos sob alta pressão, desempenhando um papel crucial na manutenção da integridade dos processos industriais. A integridade desses equipamentos possui, portanto, uma grande importância, uma vez que qualquer falha pode resultar em acidentes graves, ameaçando vidas humanas, o meio ambiente e ocasionando perdas econômicas substanciais.

Nesse contexto, a avaliação da integridade destes equipamentos é um tópico crucial no campo da engenharia. Conforme esses vasos são submetidos a uma diversidade de condições operacionais ao longo de sua vida útil, eles se deparam com ameaças em potencial, tais como deformações, desgaste e perda de espessura. Isso resulta em um desafio contínuo para os engenheiros encarregados de sua manutenção, que devem assegurar tanto a funcionalidade quanto a segurança desses equipamentos. Devido à complexidade desses desafios, é necessária uma abordagem que vá além da simples observação. Para atingir este objetivo existem normas padronizadas que prevêm bem o comportamento desse tipo de equipamento com presenças de defeito (API 579), estabelecendo condições limites para a utilização destes equipamentos com segurança. Contudo os fatores de segurança destas normas não são bem definidos, para a investigação destes fatores podem ser utilizadas técnicas experimentais para atingir valores comparativos entre os experimentos e as normas. Além de servir como meio de investigação da norma, estas técnicas experimentais podem ser utilizadas para tentar garantir o funcionamento adequado do equipamento em situações não normalizadas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste projeto é aplicar uma metodologia experimental para avaliar a integridade de vasos de pressão e o impacto que defeitos, em específico a perda de espessura local, exercem sobre esses equipamentos.

Para atingir o objetivo geral deste projeto existem diversos outros objetivos específicos a serem realizados, como:

A. A aplicação da norma API 579-1

Como este trabalho abordará a conformidade do vaso de pressão seguindo a norma API 579-1/ASME FFS-1, é fundamental realizar um estudo adequado para compreender a sua metodologia e aplicá-la no vaso de pressão do estudo.

B. Análise das deformações sofridas pelo componente

Este estudo visa utilizar o método experimental de correlação digital de imagens e sensores extensômetros para avaliar a deformação sofrida pelo vaso de pressão ao aplicar a pressão interna. Sendo necessário processar e analisar as imagens coletadas para quantificar a deformação sofrida pelo vaso em diferentes áreas do vaso, avaliando o impacto que os pontos de perda de espessura têm sobre a integridade do equipamento. Para assim calcular a pressão interna máxima a partir dos experimentos.

C. Correlacionar os valores obtidos a partir da norma e os valores obtidos a partir dos experimentos

Os resultados obtidos por meio dos experimentos serão comparados com os critérios da norma. Para assim verificar a confiabilidade desta, além dos fatores de segurança abordados nela.

2 Revisão bibliográfica:

2.1 Correlação Digital de Imagens (*Digital Image Correlation - DIC*)

Este método experimental se trata de uma técnica óptica de destaque para a medição de campos de deslocamento e deformações em materiais sujeitos a solicitações mecânicas. Esta abordagem, reconhecida por oferecer uma análise precisa e detalhada do comportamento de superfícies, estabelece-se como uma ferramenta essencial em experimentos e análises estruturais, sendo amplamente aplicada em setores como engenharia civil, aeroespacial e biomecânica.

A correlação digital de imagens destaca-se por suas vantagens. Sua natureza não destrutiva e não intrusiva minimiza contatos indesejados durante as análises, reduzindo interferências externas. Além disso, a flexibilidade da *DIC*, capacitando-a a lidar com superfícies complexas e irregulares, a torna adaptável a uma ampla variedade de materiais e condições experimentais. A capacidade de fornecer resultados em tempo real, especialmente em condições dinâmicas, confere-lhe uma vantagem crucial em experimentos que envolvem movimentos rápidos ou variações temporais.

Ao longo deste capítulo, será realizada uma análise detalhada dos princípios e do funcionamento da Correlação Digital de Imagens, explorando suas características distintivas.

2.1.1 Princípios básicos da técnica

A Correlação Digital de Imagens (*DIC*) fundamenta-se em um procedimento básico que envolve o registro fotográfico da superfície de um corpo antes e após a aplicação de uma carga, incorporando um padrão de pontos (*speckles*) distribuídos aleatoriamente. Esses *speckles*, tingidos na superfície por meio de spray ou técnica equivalente, são capturados pelas câmeras ópticas, sendo posteriormente transferidos para o software de tratamento e análise de imagens.

O DIC-2D e DIC-estéreo são variantes dessa técnica. Enquanto o DIC-2D utiliza duas imagens 2D para calcular deslocamentos e deformações em superfícies planas ou aproximadamente planas, o DIC-estéreo emprega duas câmeras ou imagens estéreo para capturar variações tridimensionais em superfícies não-planas.

O princípio operacional consiste na correlação das imagens inicial e final, permitindo a determinação dos campos de deslocamento u , v e w . A partir das

derivadas destes campos obtêm-se as deformações do espécime. A análise é realizada ao se buscar a melhor correlação entre as intensidades de luz de sub-regiões específicas (*subsets*) presentes nas imagens: inicial e final. Esse processo visa determinar a média dos deslocamentos dos centros das subáreas de análise entre as imagens, identificando o deslocamento quando uma sub-região da imagem não deformada é reconhecida na imagem deformada.

Dessa forma, a *DIC* utiliza algoritmos computacionais para interpretar as mudanças nos padrões marcados (*speckles*) e traduzi-las em informações quantitativas sobre deslocamentos e deformações, constituindo assim sua essência fundamental. A Figura 1 ilustra o princípio deste processo.

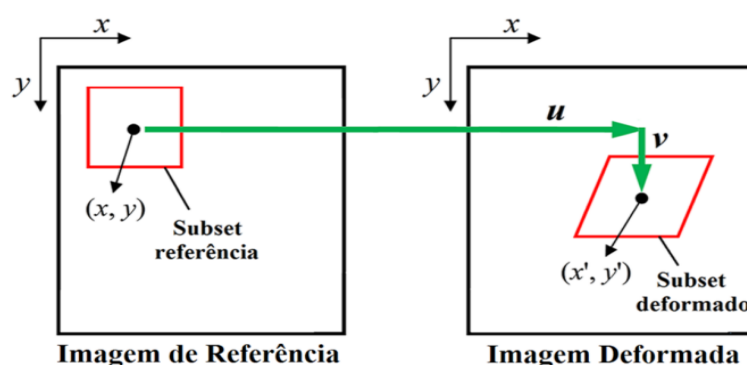


Figura 1: Ilustração do processo realizado pela correlação das imagens de referência e a imagem deformada. (Fonte: Renato Vieira)

Neste projeto, foi utilizada a técnica do DIC-estéreo devido à natureza não-planar da superfície estudada. Esta escolha foi feita para garantir uma análise precisa das deformações em três dimensões, levando em conta as variações de profundidade da superfície.

2.1.2 Ferramentas para captura e análise de imagens

Foram utilizados os softwares comerciais da Correlated Solutions, o VIC-Snap 2009® e o VIC-3D 2010®. Estas ferramentas apresentam uma integração fluida, operando de maneira conjunta. Inicialmente, no VIC-Snap 2009®, as imagens são capturadas para a calibração e/ou avaliação do espécime. Posteriormente, essas imagens são exportadas diretamente para o VIC-3D 2010®, onde ocorre tanto a calibração do sistema quanto a realização das correlações necessárias nas imagens do espécime em avaliação. Essa abordagem integrada proporciona uma transição suave entre as etapas de captura e análise de imagens.

2.2 Análise de tensões e deformações em um vaso de pressão cilíndrico.

Visando entender o comportamento teórico esperado para o vaso de pressão, que passará pelo ensaio mecânico, é necessário compreender as equações das tensões e deformações que atuam nesse corpo de prova. Portanto esta seção direciona-se exclusivamente à apresentação e análise dos cálculos fundamentais necessários para derivar as equações que descrevem as tensões e deformações atuantes em um vaso de pressão cilíndrico e de paredes finas. Essas equações são essenciais para compreender os aspectos críticos na avaliação da integridade estrutural do equipamento.

As equações descritas nesta seção são aplicáveis apenas para tubos sem defeitos, ou na parte nominal de um tubo com defeito.

2.2.1 Equações de tensões principais

As tensões atuantes no corpo cilíndrico de um vaso de pressão, quando este é submetido exclusivamente à pressão interna, são tipicamente classificadas como longitudinais e circunferenciais, como visualizado na Figura 2.

A seguir serão demonstrados os cálculos pertinentes para obter as equações que regem o comportamento do corpo ensaiado.

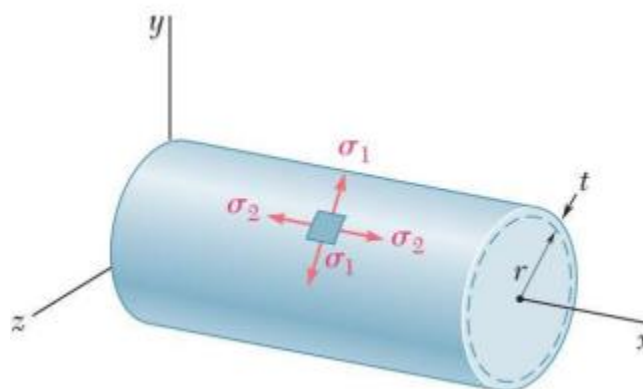


Figura 2: Representação esquemática de um vaso de pressão sujeito apenas à pressão interna. (Fonte: Fernando Porto, 2020).

2.2.1.1 Equilíbrio de forças circunferenciais

A Figura 3 representa um segmento do vaso de pressão e será utilizada para demonstrar como calcular o equilíbrio de forças circunferenciais, visando encontrar a equação para a tensão circunferencial atuante na parede do cilindro.

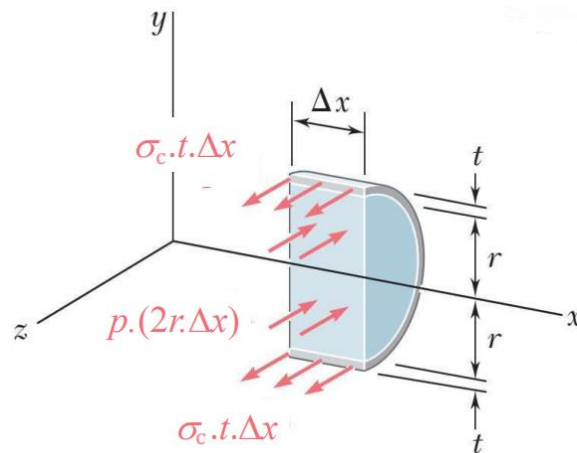


Figura 3: Segmento, do vaso de pressão cilíndrico, utilizado para o cálculo do equilíbrio de forças no eixo Z. (Fonte: Fernando Porto, 2020).

Calculando o equilíbrio de forças no eixo Z:

$$\sum F_Z = 0 \Rightarrow 2 \cdot \sigma_c \cdot (t \cdot \Delta x) - p(2r \cdot \Delta x) = 0$$

$$\sigma_c = \frac{p(2r \cdot \Delta x)}{2 \cdot (t \cdot \Delta x)} = \frac{p \cdot r}{t} \quad (1)$$

Nestas equações p é a pressão interna no tubo, r é o raio externo e t é a espessura do tubo.

2.2.1.2 Equilíbrio de forças longitudinais

A Figura 4 representa um segmento do vaso de pressão e será utilizada para demonstrar como calcular o equilíbrio de forças longitudinais, visando encontrar a equação para a tensão longitudinal atuante na parede do cilindro.

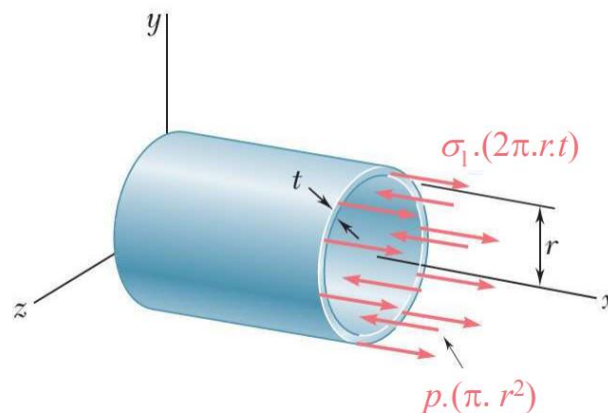


Figura 4: Segmento, do vaso de pressão cilíndrico, utilizado para o cálculo do equilíbrio de forças no eixo X. (Fonte: Fernando Porto, 2020).

Calculando o equilíbrio de forças no eixo X:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \sigma_l(2\pi \cdot r \cdot t) - p(\pi r^2) = 0$$

$$\sigma_l = \frac{p(\pi r^2)}{(2\pi \cdot r \cdot t)} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} \quad (2)$$

2.2.2 Deformações circunferenciais e longitudinais devido às tensões

Quando um componente é submetido a tensões ao longo de diferentes eixos, ocorrem deformações que podem ser analisadas separadamente. No contexto deste estudo, consideramos o eixo z livre de tensões, resultando em um caso de carregamento biaxial. As deformações associadas às tensões aplicadas podem ser expressas pelas seguintes equações:

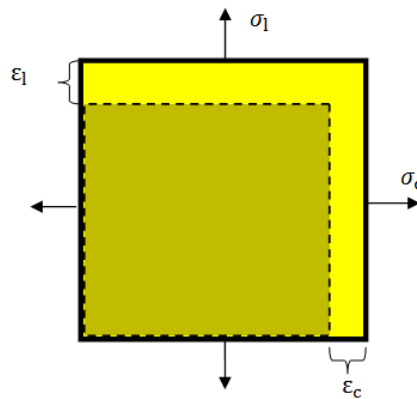


Figura 5: Representação das tensões e deformações. (Fonte: Próprio autor, 2024).

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_c - \nu \cdot \sigma_l) \quad (3)$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_l - \nu \cdot \sigma_c) \quad (4)$$

Nestas equações, ε_c e ε_l representam as deformações circunferenciais e longitudinais, respectivamente. E é o módulo de elasticidade do material, σ_c e σ_l são as tensões principais ao longo dos eixos circunferenciais e longitudinais, e ν é o coeficiente de Poisson do material.

Ao aplicar as fórmulas desenvolvidas na seção anterior, obtemos a relação entre a deformação e a pressão interna do tubo, que pode ser expressa como:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_c - \nu \cdot \sigma_l) = \frac{p \cdot D}{2 \cdot E \cdot t} \cdot (1 - \nu \cdot 0,5) \quad (5)$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_l - \nu \cdot \sigma_c) = \frac{p \cdot D}{2 \cdot E \cdot t} \cdot (0,5 - \nu) \quad (6)$$

Essas relações são fundamentais para entender como as tensões aplicadas influenciam as deformações em componentes estruturais, sendo essencial para o projeto.

2.3 Norma API 579-1

2.3.1 Introdução da norma:

Esta norma fornece orientações para realizar a avaliação de equipamentos pressurizados, possivelmente com falhas ou danos, visando garantir a integridade estrutural dos componentes. Seu propósito é auxiliar na determinação sobre a viabilidade dos equipamentos de continuar operando em segurança por um período estendido. Os procedimentos de avaliação de Integridade Estrutural e adequação ao uso (*Fitness-For-Service - FFS*), presentes nesta norma, abrangem tanto a integridade atual dos componentes, quanto a estimativa da vida útil restante da prevista.

Caso os resultados da avaliação FFS indicarem que os equipamentos não possuem condições de operação seguras, então o equipamento pode passar por uma reclassificação utilizando métodos de cálculo apresentados nesta norma. Estes cálculos podem ser utilizados para determinar uma Pressão de Trabalho Máxima Permitida Reduzida (*Reduced Maximum Allowable Working Pressure - MAWPr*) ou a temperatura correspondente para estes componentes.

Além disto, esta norma fornece outras informações como métodos de avaliação, propriedades dos materiais, orientações para o Exame Não Destrutivo (*Nondestructive Examination - NDE*) e requisitos de documentações, permitindo avaliar diversos tipos de falhas, incluindo: corrosão geral e localizada, corrosão por pitting generalizada e localizada, bolhas e danos por hidrogênio, desalinhamento de soldas e distorções de casca, falhas semelhantes a trincas, incluindo trincamento ambiental, laminações, amassados e ranhuras. Técnicas de avaliação são fornecidas para avaliar a condição do equipamento, incluindo resistência à fratura frágil, danos por fluência e danos por fogo.

Neste trabalho foi utilizada a metodologia apresentada nesta norma para avaliar a integridade de um tubo pressurizado apresentando uma falha de perda de material, simulando condições de corrosão ou erosão.

Realizando uma explicação de sua metodologia a seguir.

2.3.2 Cálculo para pressão de trabalho máxima permitida reduzida em vasos de pressão cilíndricos (MAWPr)

As equações apresentadas a seguir para a determinação dos valores de MAWP e espessura mínima para vasos de pressão cilíndricos, são baseadas nas equações fornecidas pela norma API.

Tensão circunferencial, quando $P \leq 0,385SE$ e $t_{min}^C \leq 0,5R$:

$$t_{min}^C = \frac{PR}{SE_s - 0,6P} \quad (7)$$

$$MAWPC = \frac{SE_s t}{R - 0,6t} \quad (8)$$

Onde t_{min}^C é a espessura mínima requerida com base no estresse circunferencial de membrana para um cilindro, P é a pressão interna do vaso, S é a tensão admissível, E_s é a eficiência de junta das soldas do vaso (Considerada como 0,7 caso seja desconhecida), $MAWPC$ é a pressão máxima permitida de trabalho com base no estresse circunferencial, R o raio interno do componente e t é a espessura da casca ou do tubo ajustada.

Tensão circunferencial, quando $P > 0,385SE$ e $t_{min}^C > 0,5R$:

$$t_{min}^C = R \left(\exp \left[\frac{P}{SE_s} \right] - 1 \right) \quad (9)$$

$$MAWPC = SE_s \cdot \ln \left[\frac{R+t}{R} \right] \quad (10)$$

Tensão longitudinal, quando $P \leq 0,385SE$ e $t_{min}^L \leq 0,5R$:

$$t_{min}^L = \frac{PR}{2SE_s + 0,4P} + t_{sl} \quad (11)$$

$$MAWPL = \frac{SE_s(t - t_{sl})}{R - 0,4(t - t_{sl})} \quad (12)$$

Onde t_{min}^L é a espessura mínima requerida com base no estresse longitudinal, t_{sl} é a espessura suplementar para cargas mecânicas diferentes de pressão que resultem em tensão longitudinal e $MAWPL$ é a pressão máxima permitida de trabalho com base no estresse longitudinal.

Tensão longitudinal, quando $P > 0,385SE$ e $t_{min}^L > 0,5R$:

$$t_{min}^L = R \left(\left[\frac{P}{SE_s} + 1 \right]^{1/2} - 1 \right) + t_{sl} \quad (13)$$

$$MAWP^L = SE_s \cdot \left(\left[\frac{R + (t - t_{sl})}{R} \right]^2 - 1 \right) \quad (14)$$

Valores Finais:

$$t_{min} = \min[t_{min}^C, t_{min}^L] \quad (15)$$

$$MAWP_{min} = \min[MAWP_{min}^C, MAWP_{min}^L] \quad (16)$$

Onde t_{min} é a espessura mínima requerida do equipamento e $MAWP_{min}$ é a pressão máxima permitida de trabalho para o equipamento.

Nota: Para o caso de vasos de pressão sujeitos somente à pressão interna, o $MAWP^C$ sempre é menor que $MAWP^L$. Portanto $MAWP$ é igual à $MAWP^C$.

2.3.3 Análise de componentes com perda de material uniforme:

Nesta seção serão apresentadas as orientações da norma para a análise estrutural de componentes pressurizados afetados por perda uniforme de material, decorrente de corrosão, erosão ou ambos. Os procedimentos de avaliação descritos nesta parte são capazes de avaliar a perda geral do metal que ultrapassa ou é prevista para ultrapassar o limite de segurança para corrosão antes da próxima inspeção planejada. Esta perda de material pode ocorrer tanto na superfície interna quanto na superfície externa do componente.

A norma fornece procedimentos de avaliação que se baseiam em leituras pontuais e perfis de espessura. Todos os detalhes para a compreensão completa da metodologia utilizada são descritas nas Seções 2.3.4 e 2.3.5. As análises em caso de perda uniforme de espessura são descritas na Seção 2.3.4, enquanto que as análises em caso de perda localizada de espessura são descritas na Seção 2.3.5.

2.3.3.1 Especificações:

Para a aplicação correta das diretrizes presentes nesta norma deve-se garantir que certas especificações do componente e dos experimentos estão dentro das limitações impostas pela API-5979-1. Estas limitações e especificações são resumidas abaixo:

- **Temperatura:**

Os procedimentos de avaliação se aplicam apenas a componentes que não estão operando na faixa de fluência. Para materiais de aço carbono, as temperaturas de fluência estão por volta de 343°C.

Este projeto será realizado em temperatura ambiente, portanto satisfaz a condição limite de temperatura.

- **Integridade:**

O equipamento não pode conter trincas.

- **Regime de operação do equipamento:**

O equipamento não pode operar em regime de solicitações cíclicas.

- **Tipo de componente:**

O tipo de componente é uma informação necessária para definir o nível de avaliação permitido para um componente. Para o componente analisado neste projeto, pode-se defini-lo como Tipo A.

A descrição do tipo A apresentado pela norma é: Componentes do Tipo A possuem uma equação de projeto que relaciona especificamente a pressão e cargas suplementares, quando aplicáveis, a uma espessura de parede necessária, e as cargas suplementares em combinação com a pressão não determinam a espessura de parede necessária. Portanto, a espessura necessária é baseada apenas pela pressão (interna ou externa).

2.3.3.2 Leitura da espessura da parede

As leituras de espessura da parede do componente são necessárias quando este sofreu uma perda de metal, para avaliar o quantitativamente a perda geral de material. A norma descreve duas formas de obter os dados de espessura do componente.

Leituras pontuais de espessura:

Este tipo de medição pode ser realizado para caracterizar a perda de metal em um componente somente se este não apresentar diferenças significativas nos valores de leitura de espessura obtidos nos locais de inspeção. Para garantir a aplicabilidade desta forma de medição devem-se cumprir algumas condições:

- a) Usar uma inspeção visual, como forma adicional de verificar a perda uniforme de espessura.
- b) Utilizar um mínimo de 15 leituras de espessura para as regiões avaliadas.

- c) O Coeficiente de Variação (*COV*) deve ser inferior a 10%. Caso contrário, deve-se considerar o perfil de espessura.

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left(\frac{S_Q}{N-1} \right)^{0,5} \quad (17)$$

Sendo:

$$S_Q = \sum_{i=1}^N (t_{rd,i} - t_{am})^2$$

Onde $t_{rd,i}$ é a espessura medida pela i -ésima leitura, t_{am} é a espessura média medida da parede do componente e N é o número total de leituras realizadas.

Perfis de espessura:

Este tipo de medição é utilizado para caracterizar a perda de metal em um componente que apresenta uma variação significativa nas leituras de espessura.

Se os perfis de espessura forem utilizados na avaliação, o seguinte procedimento deve ser seguido para determinar os locais de inspeção necessários e os Perfis de Espessura Crítica (CTPs).

- Passo 1: Localizar a região de interesse, área que apresenta a perda de metal, e determinar a localização, orientação e comprimento dos planos de inspeção.
- Passo 2: Considerar que os planos críticos de inspeção são: longitudinais, caso a tensão circunferencial (devido à pressão) prevalecer, e circunferenciais caso a tensão longitudinal predominar.

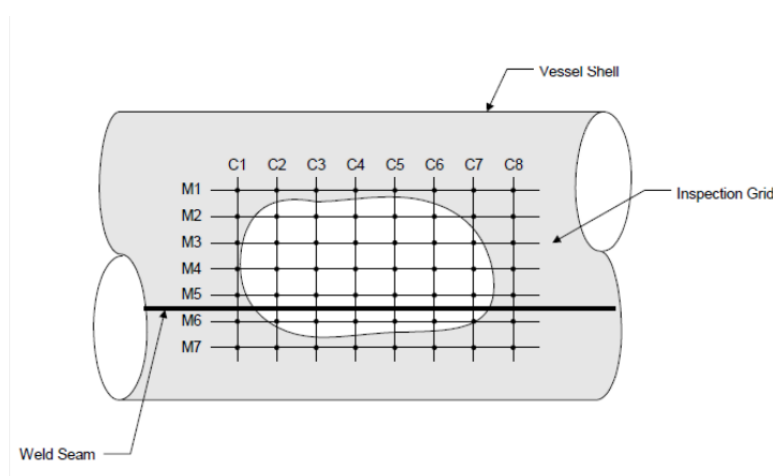


Figura 6: Plano de inspeção para cascos cilíndricos. (Fonte: API 579-1, 2016).

- Passo 3: Demarcar os planos de inspeção do componente. O comprimento do plano de inspeção deve ser o suficiente para caracterizar a perda de metal.
- Passo 4: Determinar a espessura uniforme da parede longe da perda local de material (t_{rd}).
- Passo 5: Medir as leituras de espessura da parede em intervalos ao longo de cada plano de inspeção e determinar a espessura mínima da parede (t_{mm}). A distância de espaçamento para as leituras devem ser o suficiente para permitir uma caracterização precisa do perfil de espessura.

Caso não seja possível uma determinação visual dos pontos de maior interesse, então a distância de espaçamento recomendada para as leituras de espessura ao longo de cada plano de inspeção (L_s), é definida por:

$$L_s = \min [L, 2t_{rd}] \quad (18)$$

Onde L_s é o espaçamento recomendado das leituras de espessura, L é comprimento para a média da espessura e t_{rd} é a espessura uniforme da parede longe da perda local de material.

Recomenda-se um mínimo de cinco leituras de espessura para cada plano de inspeção.

- Passo 6: Determinar o CTP nas direções longitudinal e circunferencial. O CTP é definido como a espessura mínima remanescente para cada posição ao longo de todos os planos de inspeção paralelos em um plano comum (demonstrado na Figura 7). O comprimento do perfil é estabelecido ao determinar os locais dos pontos finais onde a espessura da parede restante é maior que t_{rd} na direção longitudinal e circunferencial.
 - a) O CTP na direção longitudinal é obtido projetando a espessura mínima ao longo dos planos de inspeção M1-M5 em um plano comum. O comprimento da perda de metal na direção longitudinal (s) é determinado utilizando o CTP e t_{rd} conforme mostrado na Figura 7.
 - b) O CTP na direção circunferencial é obtido projetando a espessura mínima ao longo dos planos de inspeção C1-C7 em um plano comum. O comprimento da perda de metal na direção

circunferencial (c) é determinado utilizando o CTP e t_{rd} conforme mostrado na Figura 7.

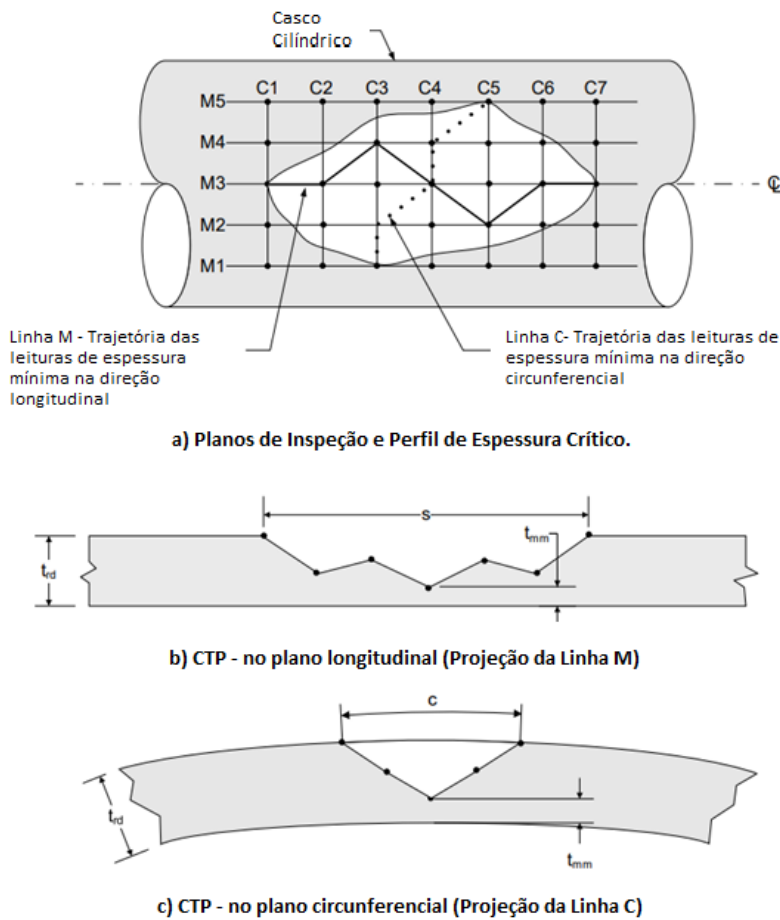


Figura 7: Método de determinar os planos de perda de metal máxima. (Fonte: API 579-1, 2016).

2.3.4 Técnicas de avaliação para perda de espessura uniforme

2.3.4.1 Nível 1

Este nível de avaliação fornece critérios mais conservadores e que podem ser utilizados com uma quantidade mínima de inspeção ou de informações sobre o equipamento. O seguinte procedimento descreve a metodologia para componentes de Tipo A (Seção 2.3.3.1) sujeitos a pressão interna ou externa.

Leituras pontuais de espessura (PTR) para caracterizar a perda de metal:

- Passo 1: Medir os dados pontuais de espessura, de acordo com a Seção 2.3.3.2. A partir destes dados, determinar a espessura mínima (t_{mm}), a espessura média (t_{am}), e o coeficiente de variação (COV)

- Passo 2: Caso o COV seja menor que 10%, então prosseguir para o Passo 3 para completar a avaliação. Se o COV for superior à 10%, então deve-se usar o perfil de espessuras para a avaliação.
- Passo 3: A aprovação para o componente seguir em operação pode ser estabelecida usando os critérios do Nível 1. A espessura média medida (Eq.19) ou o critério de aceitação MAWP (Eq.20) podem ser utilizados. Em ambos os casos, o critério de espessura mínima deve ser satisfeito (Eq.21). Para o critério de aceitação MAWP.

Critérios de Aprovação:

$$t_{am} - FCA_{ml} \geq t_{min}^C \quad (19)$$

$$MAWP_r^C \geq MAWP \quad (20)$$

$$(t_{mm} - FCA_{ml}) \geq \max [0,5t_{min}, t_{lim}] \quad (21)$$

Sendo:

$$t_{min} = \max [t_{min}^C, t_{min}^L]$$

$$t_{lim} = \max [0,2t_{nom}, 2,5mm]$$

Onde FCA_{ml} é a margem de corrosão futura aplicada à região de perda de metal, $MAWP_r^C$ é a pressão de trabalho máxima permitida reduzida com base nos esforços na direção circunferencial, t_{mm} é a espessura mínima medida, t_{lim} é a espessura limite e t_{nom} é a espessura nominal do equipamento.

Leituras utilizando o perfil de espessura para caracterizar a perda de material:

- Passo 1: Determinar os dados do perfil de espessura (Seção 2.3.3.2) e determinar a espessura mínima (t_{mm}).
- Passo 2: Determinar a espessura da parede e o diâmetro a serem utilizados na avaliação, de acordo com as equações abaixo:

$$t_{ml} = t_{nom} - FCA_{ml} \quad (22)$$

$$D_{ml} = D + 2FCA_{ml} \quad (23)$$

$$D_{ml} = D \quad (24)$$

Onde t_{ml} é a espessura nominal na região de corrosão corrigida para FCA_{ml} , D é o diâmetro interno do equipamento e D_{ml} é o diâmetro interno do equipamento corrigido para FCA_{ml} .

- Passo 3: Calcular a razão de espessura restante (R_t).

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_{ml}} \quad (25)$$

- Passo 4: Calcular o comprimento para a média de espessura (L)

$$L = Q\sqrt{D_{ml} \cdot t_{ml}} \quad (26)$$

$$Q = 1,123 \left[\left(\frac{1 - R_t}{1 - R_t/RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} \quad (\text{Se } R_t < RSF_a) \quad (27)$$

$$Q = 50,0 \quad (\text{Se } R_t \geq RSF_a) \quad (28)$$

Onde Q é um fator usado para determinar o comprimento para a média de espessura e RSF_a é o fator de resistência remanescente permitido.

- Passo 5: Estabelecer o perfil de espessura crítico utilizando as informações do perfil de espessura (Seção 2.3.3.2). Determinar a espessura média medida baseada no CTP longitudinal (t_{am}^s) e a espessura média medida baseada no CTP circunferencial (t_{am}^c).
- Passo 6: A aprovação para o componente seguir em operação pode ser estabelecida usando os critérios do Nível 1. A espessura média medida ou o critério de aceitação MAWP podem ser utilizados. Em ambos os casos, o critério de espessura mínima deve ser satisfeito. Para o critério de aceitação MAWP.

Critérios de Aprovação:

$$t_{am}^s - FCA_{ml} \geq t_{min}^c \quad (29)$$

$$t_{am}^c - FCA_{ml} \geq t_{min}^L \quad (30)$$

$$\min[MAWP_r^c, MAWP_r^L] \geq MAWP \quad (31)$$

Onde t_{am}^s é a espessura média medida baseada no CTP longitudinal, t_{am}^c é a espessura média medida baseada no CTP circunferencial, $MAWP_r^c$ é a pressão de trabalho máxima permitida reduzida com base nos esforços na direção circunferencial e $MAWP_r^L$ é a pressão de trabalho máxima permitida reduzida com base nos esforços na direção longitudinal.

2.3.4.2 Nível 2

Os procedimentos de Nível 2 fornecem uma avaliação mais detalhada, em comparação com o Nível 1, produzindo resultados mais detalhados. Em uma

avaliação de nível 2 são necessárias informações semelhantes às de nível 1, contudo, apresenta cálculos mais elaborados e detalhados para os critérios de aceitação.

Os procedimentos descritos na Seção 2.3.4.1 podem ser utilizados para avaliar componentes do tipo A, sujeitos à pressão interna, pressão externa, carga suplementar, ou cargas combinadas. Sendo necessário apenas utilizar os critérios de aceitação para o nível 2, ao invés dos critérios de nível 1.

Leituras pontuais de espessura (PTR) para caracterizar a perda de metal:

Crítérios de Aprovação:

$$t_{am} - FCA_{ml} \geq \max [t_{min}^C, t_{min}^L] \quad (32)$$

$$\frac{\min[MAWP_r^C, MAWP_r^L]}{RSF_a} \geq MAWP \quad (33)$$

Leituras utilizando o perfil de espessura para caracterizar a perda de material:

Crítérios de Aprovação:

$$t_{am}^s - FCA_{ml} \geq t_{min}^C \quad (34)$$

$$t_{am}^c - FCA_{ml} \geq t_{min}^L \quad (35)$$

$$\frac{\min[MAWP_r^C, MAWP_r^L]}{RSF_a} \geq MAWP \quad (36)$$

2.3.4.3 Nível 3

As avaliações de Nível 3 podem ser realizadas quando os procedimentos de Nível 1 e Nível 2 não se aplicam ou produzem resultados excessivamente conservadores, isto é, que não permitiriam a operação do componente nas condições atuais.

Essas avaliações não seguem um procedimento específico e incluem quaisquer análises mais detalhadas realizadas por um engenheiro qualificado. Geralmente, essas análises utilizam métodos numéricos, como o método de elementos finitos, técnicas experimentais ou outros métodos de estudo adequados. Neste estudo, o foco será a utilização de técnicas experimentais.

2.3.5 Técnicas de avaliação para perda de espessura localizada

Os procedimentos de avaliação descritos nesta parte são mais específicos que os procedimentos descritos na Seção 2.3.4, portanto é necessário analisar a necessidade sobre a aplicação deste método de acordo com cada situação.

Vale ressaltar que as diretrizes para a análise em vasos de pressão com perdas de espessura localizadas, estabelecem que se deve utilizar apenas a metodologia de perfis de espessura como forma de realizar a leitura de espessura da parede do vaso. Para a verificação da metodologia de medição à partir de perfis de espessura, verificar a Seção 2.3.3.2.

2.3.5.1 Nível 1

As avaliações de nível 1 podem ser utilizadas para determinar a aceitabilidade de um componente que apresenta um defeito de forma mais conservadora e direta. Caso existam variações significativas de espessura ao longo do comprimento do defeito ou se houver uma rede de defeitos próximos, este procedimento pode produzir resultados insatisfatórios, sendo recomendada uma Avaliação de Nível 2.

O procedimento é explicado abaixo em detalhes:

- Passo 1: Determinar o Perfil de espessura crítico (CTP), descrito na Seção 2.3.3.2.
- Passo 2: Determinar a espessura da parede que será utilizada na avaliação usando a Eq.37 ou Eq.38.

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA_{ml} \quad (37)$$

$$t_c = t_{rd} - FCA_{ml} \quad (38)$$

Onde t_c é a espessura da parede corroída, considerando a perda futura por corrosão; e $LOSS$ é a quantidade de perda uniforme de metal no momento da inspeção.

- Passo 3: Determinar a espessura mínima medida na região de perda de metal (t_{mm}) e as dimensões, s e c para a avaliação. As dimensões s e c são definidas como as dimensões longitudinais e circunferenciais, respectivamente, da extensão da perda de metal local (Exemplificado pela Figura 8).

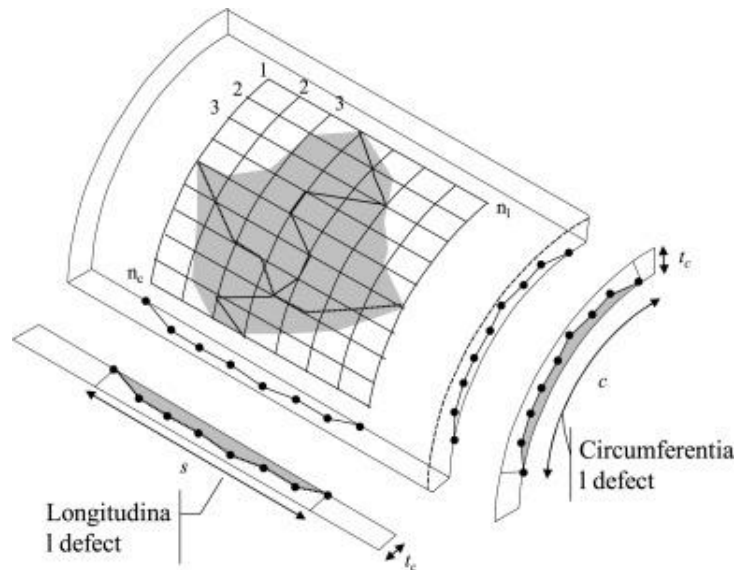


Figura 8: Demonstração visual dos conceitos de s e de c . (Fonte: Yen-Ju Lu, 2020).

- Passo 4: Determinar a razão de espessura remanescente usando a Eq.39 e o parâmetro de comprimento do defeito longitudinal usando a Eq.40.

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_c} \quad (39)$$

$$\lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{Dt_c}} \quad (40)$$

- Passo 5: Verificar se os critérios de tamanho limite do defeito são satisfeitos, os critérios são apresentados abaixo.

$$R_t \geq 0,2 \quad (41)$$

$$t_{mm} - FCA_{ml} \geq 2,5 \text{ mm} \quad (42)$$

$$L_{msd} \geq 1,8\sqrt{D \cdot t_c} \quad (43)$$

Onde L_{msd} é o espaçamento até a descontinuidade estrutural mais próxima.

- Passo 6: Determinar a Pressão Máxima Admissível de Trabalho (MAWP) para o componente (Seção 2.3.2) usando a espessura do PASSO 2.
- Passo 7: Utilizar o gráfico presente na Figura 9, utilizando os valores de λ e R_t , para verificar a validação do MAWP.

Se o ponto definido pela interseção estiver na curva ou na área acima dela, então a extensão longitudinal da falha é aceitável para operar no MAWP calculado no Passo 6.

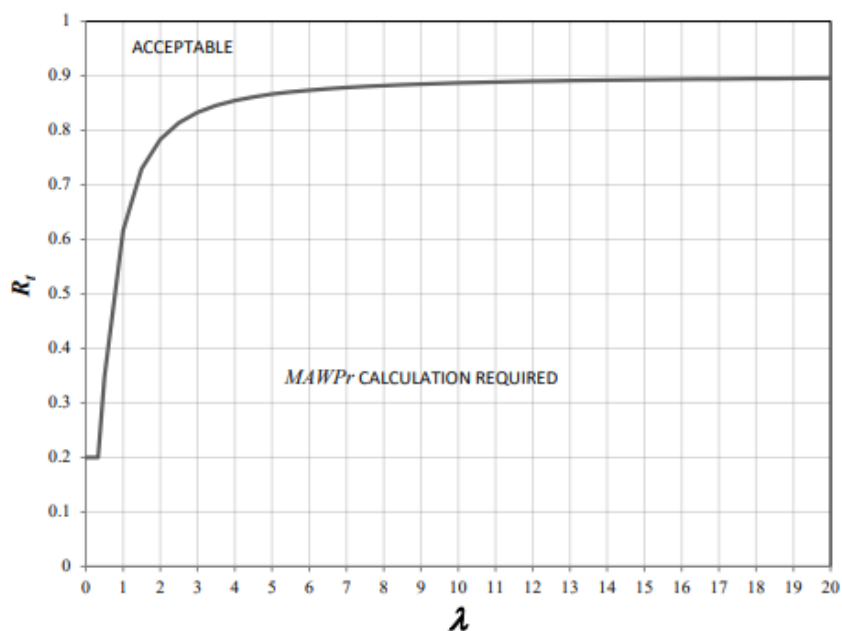


Figura 9: Gráfico para verificar a aplicabilidade do vaso de pressão. (Fonte: API 579-1, 2016).

Se o ponto estiver abaixo da curva, então deve-se definir o valor de RSF (utilizando a Eq. 44). O parâmetro M_t na equação é determinado a partir da Tabela 1.

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} \quad (44)$$

Onde RSF é o fator de resistência restante calculado com base na extensão do defeito.

Tabela 1: Fator M_t baseado no valor de Lambda.

λ	Mt
	Cylindrical or Conical Shell
0.0	1.001
0.5	1.056
1.0	1.199
1.5	1.394
2.0	1.618
2.5	1.857
3.0	2.103
3.5	2.351
4.0	2.600
4.5	2.847
5.0	3.091
5.5	3.331
6.0	3.568
6.5	3.801

Nota: A Tabela 1 é uma versão reduzida da apresentada na norma. Contudo, ela fornece os valores necessários para o restante do projeto.

Se $RSF \geq RSF_a$, então a região de perda de metal é aceitável para operar no $MAWP$ calculado.

Caso contrário, a região da perda de metal é dita como inaceitável. Desta forma, é necessário calcular o $MAWP_r$ utilizando a Eq.45.

$$MAWP_r = MAWP \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad (45)$$

Nota: A norma estabelece que o RSF_a pode ser considerado como 0.9.

- Passo 8: Por fim, resta verificar que a extensão circunferencial é aceitável e que nenhuma avaliação adicional é necessária. Para isto é utilizada a Eq. 46.

$$c \leq 2s \left(\frac{E_c}{E_L} \right) \quad (46)$$

Onde E_c é a eficiência da junta de solda circunferencial e E_L é a eficiência da junta de solda longitudinal.

Nota: A norma estabelece que E_c pode ser considerado como 0.7 e E_L pode ser considerado como 1.0.

2.3.5.2 Nível 2

Os procedimentos de avaliação de nível 2 fornecem uma estimativa mais apurada do fator de força remanescente do que a apresentada no nível 1, sendo melhor capacitada para avaliar componentes que possuem uma maior variação no perfil de espessura. Portanto a análise de nível 2 garante que o ligamento mais fraco possa ser identificado e adequadamente avaliado.

O procedimento de avaliação para perda local de espessura em vasos de pressão cilíndricos segue os mesmos passos do 1 até o 6 do nível 1. A partir do passo 7, este nível sofre pequenas alterações relatadas abaixo.

- Passo 7: Determinar o fator de força remanescente (RSF) para o CTP longitudinal usando o procedimento descrito abaixo.

- Passo 7.1: Classificar as leituras de espessura em ordem crescente com base no perfil de perda de metal.
- Passo 7.2: Definir o ponto de partida da avaliação inicial. O ponto inicial escolhido deve ser o ponto de perda máxima de metal (Ponto onde t_{mm} é localizado). Os pontos de partida subsequentes devem estar de acordo com a classificação realizada no passo anterior.
- Passo 7.3: No ponto de partida da avaliação atual, subdivide o perfil de espessura em uma série de subsecções. O número e a extensão das subsecções são escolhidos com base na precisão desejada.
- Passo 7.4: Para cada subsecção, calcular o RSF utilizando a Eq.47.

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \cdot \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)} \quad (47)$$

Onde o i se resume a i -ésima medida para os valores.

- Passo 7.5: Estabelecer o valor mínimo para o RSF , calculado no passo anterior. Este valor mínimo do fator de força é o definido para este ponto de partida.
- Passo 7.6: Repetir os passos 7.3 até 7.5 utilizando o próximo ponto de partida, definido no passo 7.2.
- Passo 7.7: O Fator de Força Remanescente a ser utilizado na avaliação, RSF , é o valor mínimo determinado para todos os pontos de avaliação.
- Passo 8: Avaliar a extensão longitudinal da falha.

Se $RSF \geq RSF_a$, então a região de perda de metal é aceitável para operar no $MAWP$ calculado.

Caso contrário, a região da perda de metal é dita como inaceitável. Desta forma, é necessário calcular o $MAWP_r$ utilizando a Eq. 45.

- Passo 9: Passo equivalente ao passo 8 da avaliação de nível 1 para perdas de metal localizadas (Seção 2.3.5.1).

2.3.5.3 Nível 3

As recomendações para uma avaliação de nível 3 da perda de metal local são as mesmas daquelas para perda de metal geral (Seção 2.3.4.3).

3 Estudo de caso

Esta seção está reservada a explicação de todo o procedimento adotado ao longo do projeto para a realização dos experimentos necessários;

3.1 Preparação dos materiais

Primeiramente serão explicados os processos realizados para fabricar o vaso de pressão utilizado nos experimentos de pressão interna, garantindo sua adequação à norma API 579-1.

3.1.1 Fabricação do vaso de pressão utilizado

No experimento conduzido neste estudo, foi essencial reproduzir o comportamento de um vaso de pressão com uma redução na espessura em uma seção de sua parede externa. Para isto, utilizou-se um tubo de aço com propriedades mecânicas não especificadas. Inicialmente, ajustou-se o comprimento do tubo conforme as especificações do projeto. Em seguida, foram soldados tampos em ambas as extremidades do tubo para garantir a estanqueidade do componente e permitir futuras conexões com a bomba hidráulica.



Figura 10: Tubo e tampo utilizados como base, antes de serem soldados. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Das partes descartadas durante o corte do tubo, foram usinados dois corpos de prova. Estes corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, conforme descrito na Seção 3.2.1.1, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do material utilizado no tubo.

O tubo base utilizado base (Figura 10) possuía as seguintes dimensões :

- Diâmetro Externo (D_E): 76,4 mm
- Espessura da parede (t_{nom}): 2,05 mm

3.1.1.1 Procedimento de usinagem do defeito de perda de espessura

O procedimento de fresamento foi realizado ao longo da direção longitudinal do tubo, criando um defeito simulado (Figura 11). O fresamento foi efetuado com uma fresa de diâmetro 12,20 mm, que percorreu um caminho retilíneo de aproximadamente 52 mm ao longo do tubo. O processo de usinagem desceu a fresa cerca de 1 mm, retirando uma camada desta espessura no eixo central do defeito.

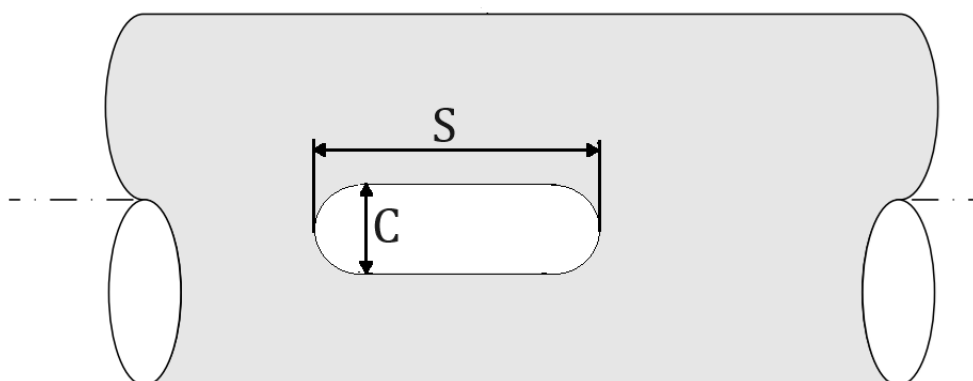


Figura 11: Representação do defeito usinado. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Para garantir que o defeito usinado atenda às limitações da norma, é necessário que as relações estabelecidas na Eq. 43 e Eq. 46 sejam satisfeitas.

$$c \leq 2s \left(\frac{E_C}{E_L} \right) \Rightarrow 12,20 \leq 104 \text{ (OK)}$$

$$L_{msd} \geq 1,8\sqrt{D \cdot t_c} \Rightarrow 250 \geq 22,50 \text{ (OK)}$$

O procedimento de usinagem realizado assegurou que o valor de s fosse consideravelmente mais elevado que o valor de c , desta forma o impacto da relação entre a eficiência da junta de solda longitudinal (E_L) e a eficiência da junta

de solda circunferencial (E_C) foi minimizado, assegurando que a relação estabelecida pela Eq. 46 fosse cumprida.

Além disto, o defeito usinado com uma distância considerável de sua extremidade para evitar que a relação estabelecida na Eq. 43 não fosse considerada.

As dimensões do defeito foram medidas e registradas a seguir.

- Comprimento Circunferencial (c): 12,20 mm
- Comprimento Longitudinal (s): 52 mm
- Espessura Mínima (t_{mm}): 1,05 mm
- Distância até a extremidade mais próxima (L_{msd}): 250,0 mm

3.1.1.2 Aplicação do padrão de pontos (Speckles)

A aplicação do padrão de pontos é essencial para a análise precisa utilizando a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC). Como o foco deste estudo é a região do defeito no tubo, o padrão foi aplicado especificamente ao redor dessa área.

Primeiramente, para garantir a aderência da tinta, a superfície do tubo foi preparada e limpa. Em seguida, foi realizada uma pintura branca na parede do tubo, proporcionando um fundo claro para aumentar o contraste com os pontos aplicados posteriormente. Após a secagem completa da tinta branca, os pontos pretos (speckles) foram aplicados utilizando um rolo padronizado, especificamente projetado para gerar um padrão de speckles de alta densidade. Este processo teve uma maior atenção na área do defeito, garantindo que essa região tivesse uma cobertura adequada para uma análise detalhada (Figura 12).

Para assegurar a uniformidade e a qualidade do padrão de speckles, foram realizadas inspeções visuais e, se necessário, correções manuais para reforçar os pontos na área do defeito. Este cuidado adicional foi fundamental para garantir a precisão da análise DIC.



Figura 12: Padrão de pontos aplicado no vaso de pressão. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

3.1.1.3 Fixação do extensômetro

A utilização do extensômetro nos experimentos serve como um dado de controle e será utilizado para fins de comparação com as informações providas da Correlação Digital de Imagens (DIC).

Para a aplicação do extensômetro, a superfície do tubo foi limpa, garantindo a aderência correta do dispositivo. Em seguida, o extensômetro foi colado na superfície do tubo, posicionado a 90° da linha de solda, na direção circunferencial, assegurando que ele não seja afetado pela região da solda do tubo. Esta posição foi escolhida para evitar interferências mecânicas que poderiam distorcer os dados do extensômetro.

Além disso, o extensômetro foi colocado aproximadamente a 180° do defeito usinado de modo a captar com precisão as deformações na região oposta ao defeito, permitindo uma análise comparativa eficaz entre os dados do extensômetro e os dados obtidos pela DIC, para uma região fora do defeito.

3.1.2 Conexão dos equipamentos

Para garantir a qualidade dos experimentos, deve-se realizar as conexões entre os equipamentos de forma correta. Esta seção descreve as conexões feitas entre o vaso de pressão, a bomba hidropneumática e os equipamentos de leitura de dados.

3.1.2.1 Bomba hidropneumática

O vaso de pressão foi preenchido com água e conectado à bomba hidropneumática (Figura 13). Durante o preenchimento do tubo, foi tomado

cuidado para eliminar ao máximo as bolhas de ar no interior, pois a presença de gás poderia se deformar sob pressão, comprometendo o desempenho do sistema e a precisão das medições.

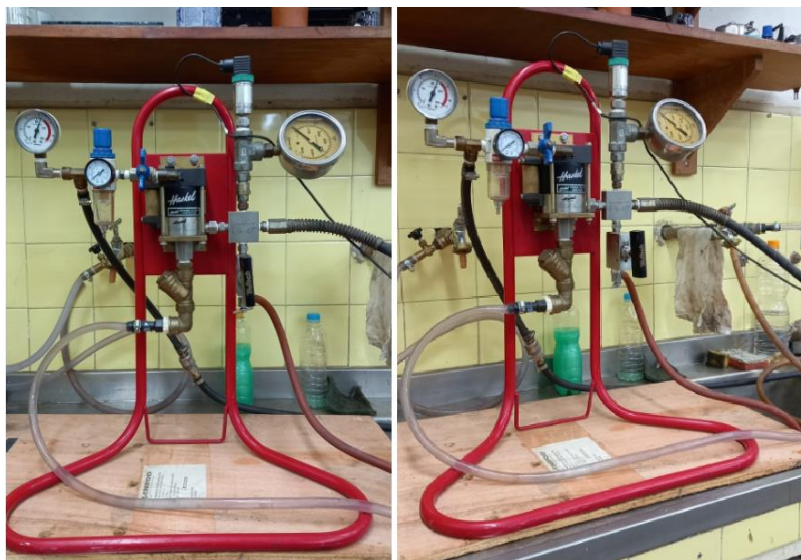


Figura 13: Bomba utilizada para os experimentos. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

A bomba hidropneumática utilizada possui acionamento pneumático, utilizando a linha de ar comprimido do laboratório, que fornece ar limpo e seco. Esta bomba funciona com base no princípio das áreas diferenciais: um pistão de ar de maior diâmetro move um êmbolo de diâmetro menor, criando uma relação de pressões que define a pressão máxima de saída. A bomba interrompe automaticamente o funcionamento quando a força da pressão de saída iguala a força do acionamento pneumático, alcançando uma condição estática.

As conexões foram realizadas da seguinte forma:

- A fonte de água foi conectada à entrada de líquido da bomba.
- A linha de ar comprimido foi conectada à entrada de ar da bomba.
- A saída de alta pressão da bomba foi conectada ao vaso de pressão.

3.1.2.2 Equipamentos de leitura

Por fim, os sensores foram conectados aos equipamentos de leitura de dados, para que assim as informações relevantes possam ser extraídas e analisadas. Os sensores de pressão e deformação realizaram a captura dos dados de deformação e pressão interna de maneira contínua. As câmeras utilizadas para o método de Correlação Digital de Imagens (DIC) foram configuradas e conectadas ao computador, suas imagens foram processadas pelo software, capturando os dados de forma pontual, quando acionadas.

O procedimento foi o seguinte:

- O extensômetro foi fixado na superfície do tubo e conectado aos leitores de dados.
- O sensor de pressão é alocado na saída da bomba e conectado aos leitores de dados.
- As câmeras DIC foram posicionadas e calibradas para capturar a área de interesse no tubo.
- As câmeras foram conectadas ao computador, onde as imagens foram processadas pelo software.

Estas conexões garantiram que todos os dados necessários fossem coletados, permitindo uma análise detalhada do comportamento do vaso de pressão durante os testes.

3.2 Propriedades mecânicas do material

3.2.1.1 Teste de resistência do material do tubo de aço

Para que possa ser realizado o método proposto pela norma para a determinação da pressão de trabalho máxima admissível (MAWP), é necessário conhecer o valor do limite de escoamento do material (S_y).

O tubo utilizado como base é de aço, contudo, as propriedades mecânicas do material não estavam estabelecidas. Portanto foram separados 2 corpos de prova (Figura 14) utilizando uma seção do tubo utilizado neste projeto, então estes corpos de prova foram submetidos a um ensaio de tração para estabelecer experimentalmente as propriedades do material.



Figura 14: Corpos de prova utilizados no ensaio de tração. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

O ensaio de tração foi realizado no laboratório da PUC-Rio, utilizando uma máquina universal de ensaio do modelo INSTRON EMIC 23-100.



Figura 15: Máquina modelo INSTRON. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Para determinar a deformação sofrida pelos corpos de prova, foi utilizado um sensor clip on gages.

O procedimento do ensaio realizado incluiu:

1. **Preparação da Amostra:** As amostras foram cortadas do tubo e usinadas para obter a forma e dimensões apropriadas.
2. **Montagem na Máquina de Tração:** As amostras foram fixadas nas garras da máquina de tração, garantindo um alinhamento adequado para evitar torções ou desalinhamentos durante o ensaio.

3. **Instalação do Clip On Gages:** O sensor clip on gages foi instalado na área de medição da amostra para registrar a deformação com precisão.
4. **Aplicação da Carga:** A carga foi aplicada de forma gradual e contínua, enquanto as deformações foram medidas com o sensor clip on gages.
5. **Registro dos Dados:** Durante o ensaio, foram registrados os dados de força aplicada e alongação, permitindo a construção da curva tensão-deformação.

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados para cada um dos corpos de prova e calcula a média dos valores medidos, estabelecendo as propriedades mecânicas do material a serem utilizadas no restante do estudo.

Ensaio corpo de prova 1:

A Figura 16 representa os valores de tensão versus deformação obtidos durante o ensaio de tração realizado no Corpo de Prova 1. A partir deste gráfico, será determinados os valores da resistência à tração (S_u) e o valor do limite de escoamento (S_y) é estabelecido utilizando o gráfico da Figura 17, utilizando a relação da deformação permanente de 0,002.

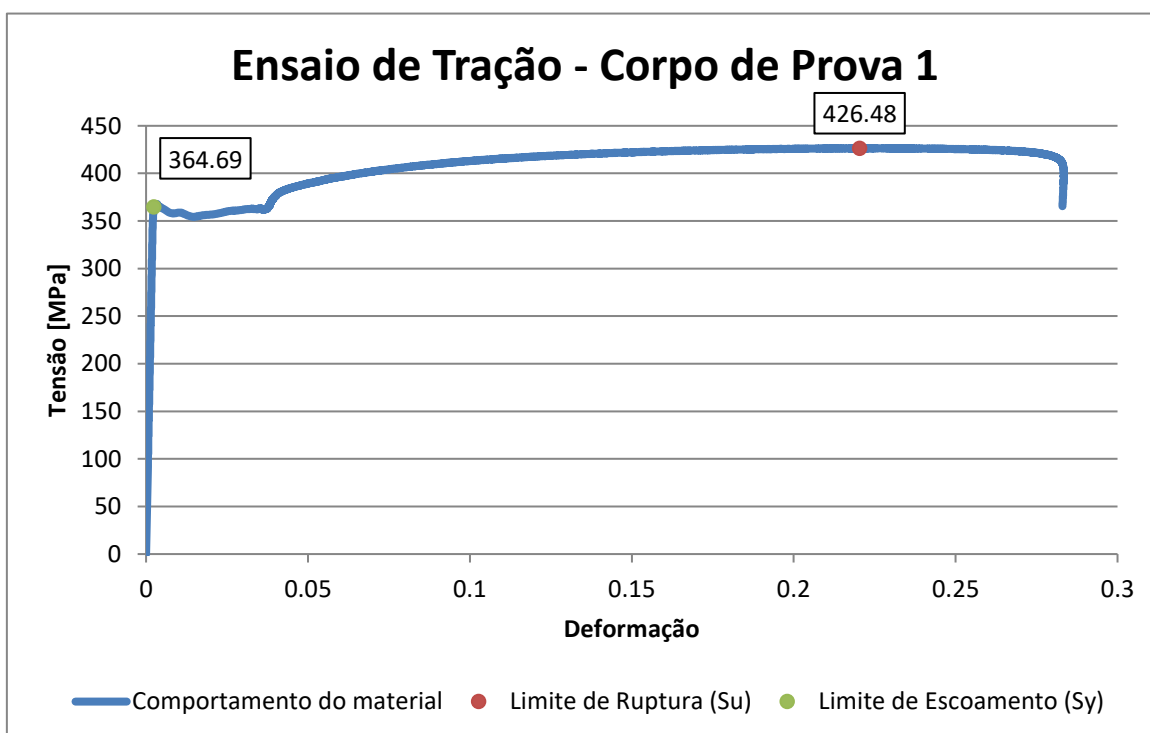


Figura 16: Ensaio de Tração, Corpo de Prova 1. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

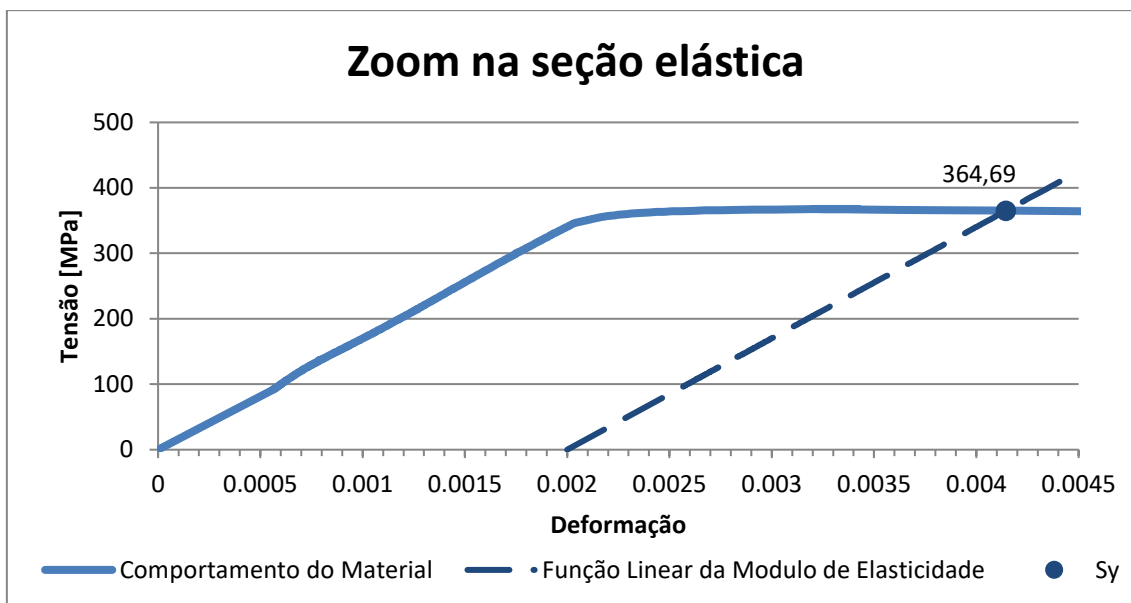


Figura 17: Seção Elástica do CP 1. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

- $S_{y1}=364,69$ MPa
- $S_{u1}=426,48$ MPa
- $E_1=170132$ MPa

Após a ruptura do material, suas dimensões foram medidas para que assim fosse possível estabelecer o valor do coeficiente de Poisson utilizando a seguinte relação:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (48)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson, ε_x a deformação na direção do eixo x, ε_y a deformação na direção do eixo y e ε_z a deformação na direção do eixo z.

Utilizando as deformações observadas em ambos os sentidos do material após sua ruptura obtém-se o seguinte coeficiente de Poisson:

- $\nu_1=0,308$

Ensaio corpo de prova 2:

A Figura 18 representa os valores de tensão versus deformação obtidos durante o ensaio de tração realizado no Corpo de Prova 2. A partir deste gráfico, será determinados os valores da resistência à tração (S_u) e o valor do limite de escoamento (S_y) é estabelecido utilizando o gráfico da Figura 19, utilizando a relação da deformação permanente de 0,002.

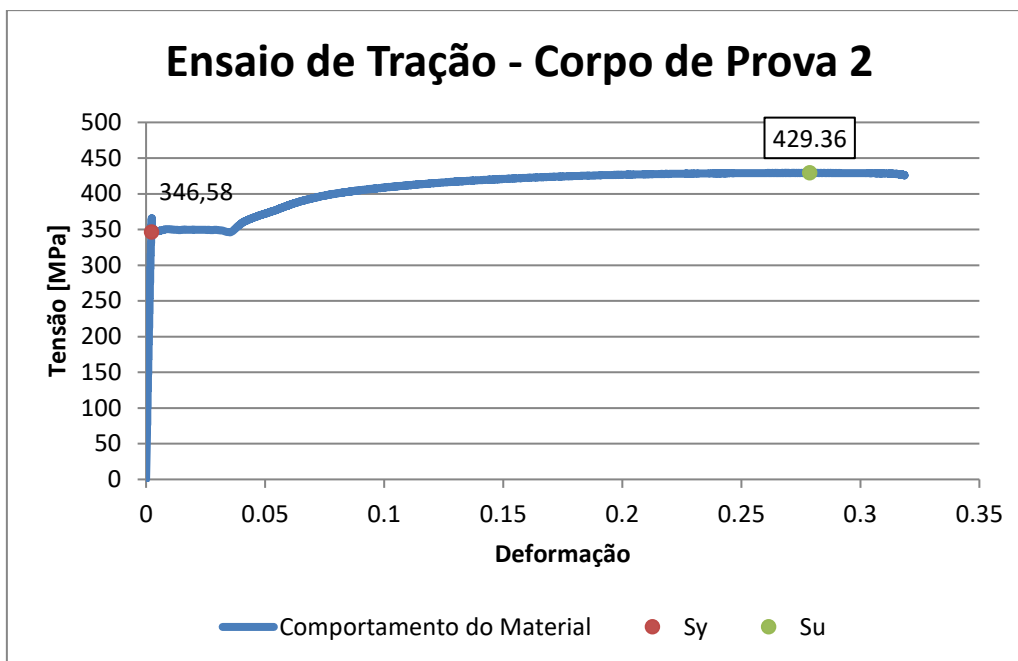


Figura 18: Ensaio de Tração, Corpo de Prova 2. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

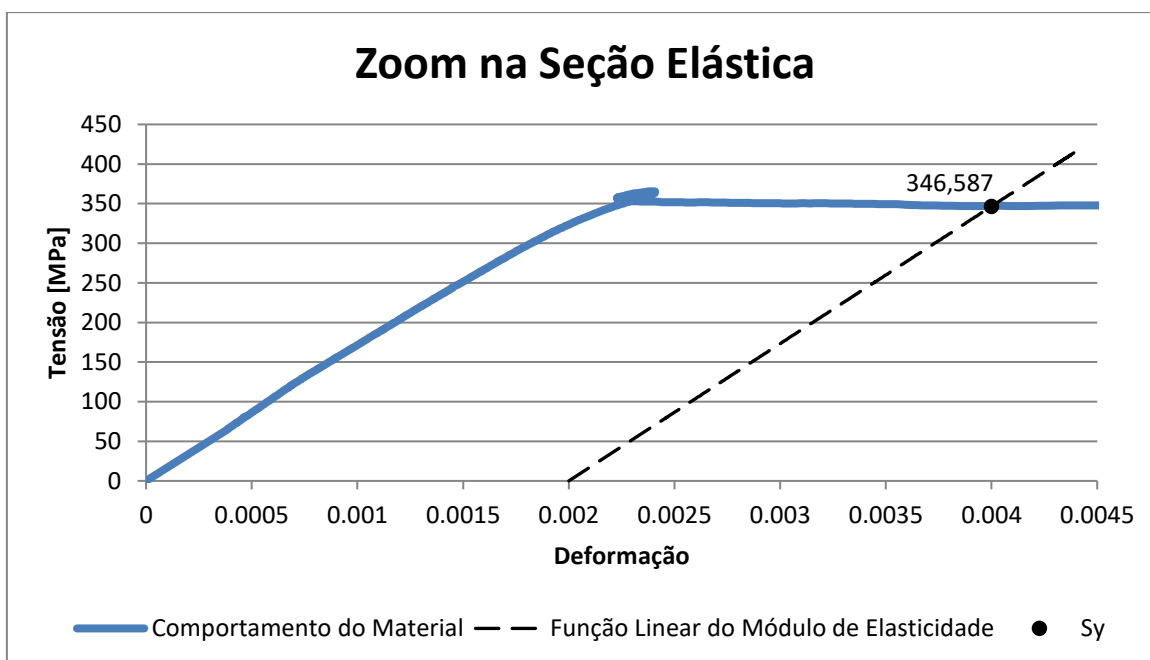


Figura 19: Seção Elástica do CP 2. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

- $S_{y2}=346,58$ MPa
- $S_{u2}=429,36$ MPa
- $E_2=173290$ MPa

Após a ruptura do material, suas dimensões foram medidas para que assim fosse possível estabelecer o valor do coeficiente de Poisson utilizando a Eq.48. Obtendo o seguinte coeficiente de Poisson:

- $\nu_2=0,299$

Propriedades mecânicas do material:

Através dos testes de tração realizados, pode-se concluir que, devido à proximidade dos resultados (variando aproximadamente apenas 5%), os testes apresentam confiabilidade satisfatória para assumirmos as propriedades mecânicas do material utilizado no vaso de pressão. Calculando a média dos resultados dos dois corpos de prova, obtém-se os valores que serão utilizados no restante do projeto para definir as resistências do material. Esses valores são especificados a seguir:

- $S_y=355,635$ MPa
- $S_u=427,92$ MPa
- $E=171711$ MPa
- $\nu=0,3035$

3.3 Aplicação da Norma API

3.3.1 Considerações iniciais

Esta seção é separada para apresentar e detalhar as considerações, aproximações e simplificações empregadas nos cálculos apresentados na Seção 2.3.5.1, bem como no estudo geral. Cada uma das considerações utilizadas será explicada de maneira individual, a fim de garantir a clareza e a precisão das suas justificativas.

3.3.1.1 Método da norma API 579-1 utilizado

Ambos os métodos de análise, descritos na Seção 2.3.4 e na Seção 2.3.5, podem ser utilizados para determinar as condições para uma operação segura em vasos de pressão em caso de perda de espessura da parede, apesar de não serem capazes de fornecer o valor dos fatores de segurança reais. No entanto, é necessário verificar qual a escolha mais adequada para o estudo de caso.

A norma API 579-1 considera o método para perdas de espessura uniformes (Seção 2.3.4) como mais conservador. Se sua análise de nível 2 não for satisfeita, a norma sugere que uma alternativa para prosseguir com a análise do caso é utilizar o método para perdas de espessura locais (Seção 2.3.5).

Portanto, visando acelerar o processo experimental, será utilizado diretamente o método para perdas de espessura locais. Isso é justificado pelo fato de que, se a análise de nível 1 deste caso falhar, as análises de nível 1 e nível 2 para perdas

uniformes também falharão. Neste estudo, o defeito usinado será propositalmente criado para que as análises da norma no caso de perdas locais falhem, tornando prático o uso exclusivo do método para perdas locais e dispensando a análise de perda uniforme.

3.3.1.2 Escala do vaso de pressão

A análise de vasos de pressão com perdas de espessura locais específica limitações nas dimensões do vaso de pressão analisado (Eq. 41). O componente utilizado neste estudo não atende a essas dimensões, entretanto, ao considerar este estudo como uma simulação em menor escala do caso real, é possível contornar essas limitações. Ou seja, o vaso de pressão do experimento não é um vaso normalizado, mas sim um modelo em escala de um vaso normalizado, utilizando uma conta não normalizada para reduzir a escala das condições limites.

$$t_{mm} - FCA_{ml} \geq 2,5 \text{ mm} \Rightarrow F_{escala}(t_{mm} - FCA_{ml}) \geq 2,5 \text{ mm}$$

O valor de F_{escala} é arbitrário, porém, ao utilizar o valor de F_{escala} como 6,6667 é possível considerar o tubo utilizado como um tubo de 20 in de diâmetro e aproximadamente 0,5 in de espessura nominal (próximo a valores de dutos reais). Assim, pode-se considerar esta condição como:

$$(t_{mm} - FCA_{ml}) \geq \frac{2,5 \text{ mm}}{6,6667} \Rightarrow (t_{mm} - FCA_{ml}) \geq 0,375 \quad (49)$$

Como a pressão máxima permissível depende apenas da relação entre as dimensões do vaso e das propriedades mecânicas do material, esse fator de escala não altera seu resultado. Assim, é permitido realizar este estudo em escala reduzida.

Portanto, os cálculos apresentados na Seção 3.3 consideram um fator de escala para se adequar à norma utilizada.

Contudo é fundamental destacar que esta redução de escala possibilita a ocorrência de alguns problemas na aplicação da norma, pois a origem desta limitação de 2,5mm esta relacionada aos defeitos de fabricação nas chapas. Estes defeitos são capazes de comprometer a integridade estrutural do vaso de pressão. Como esta análise é realizada em escala é possível considerar que estes defeitos também sofrem com este fator de escala, possibilitando a existência teórica de defeitos de fabricação que excedem os esperados. Este fator de erro foi aceito

somente devido à indisponibilidade de um vaso normalizado para utilizar no experimento.

3.3.1.3 Corrosão Futura Permitida (FCA) e Perda uniforme de espessura longe da área inspecionada (LOSS)

Neste estudo, como o defeito foi usinado utilizando uma fresadora e não ocorreu de forma natural (devido à erosão ou corrosão), o fator de corrosão futura permitida foi desconsiderado, além de que a perda de espessura ocorreu apenas no ponto usinado, portanto a perda de espessura longe do ponto inspecionado também foi desconsiderada. Portanto, em todas as análises realizadas, os fatores FCA e LOSS foram considerados nulos, desta forma:

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA_{ml} \Rightarrow t_c = t_{nom}$$

3.3.2 Análise de perda de espessura local, segundo a norma API-579-1

Como foi previamente estabelecido, na Seção 3.3.1.1, o método de análise utilizado no estudo utilizou como base a metodologia aplicada pela norma API 579-1 para vasos de pressão com perdas de espessura localizadas.

Esta seção utiliza a metodologia explicada em detalhes durante a Seção 2.3.5, a seguir a aplicação deste método é registrada para a verificação dos parâmetros da norma.

3.3.2.1 Parâmetros do vaso de pressão utilizado

Abaixo são relatadas as propriedades do componente utilizado, todas foram previamente explicadas e demonstradas. Ressaltando que os valores das dimensões são multiplicados por um fator de escala para a adequação à norma

- $S_y = 355,635$ MPa (Seção 3.2)
- $t_{nom} = t_c = 2,05$ mm (Seção 3.1.1 **Error! Reference source not found.**)
- $t_{mm} = 1,05$ mm (Seção 3.1.1.1)
- $s = 52,00$ mm (Seção 3.1.1.1)
- $c = 12,20$ mm (Seção 3.1.1.1)
- $D = 76,4$ mm (Seção 3.1.1)
- $R = \frac{D}{2} = 38,2$ mm
- $E_s = 0,7$ (Seção 2.3.5.1)

- $RSF_d=0,9$ (Seção 2.3.5.1)
- $L_{msd} = 250,00$ mm (Seção 3.1.1.1)

3.3.2.2 Procedimento de Nível 1

Seguindo o procedimento explicado em detalhes na Seção 2.3.4.1, é possível estabelecer se o defeito usinado se adéqua aos padrões estabelecidos pela norma, verificando os critérios providenciados pela norma.

Para verificar os critérios provindos do passo 5 da análise de integridade é necessário obter os valores da relação de espessura restante e o comprimento de falha longitudinal. Para isto é utilizado as Eq.39 e Eq.40.

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_c} = \frac{1,05 - 0}{2,05} = 0,512$$

$$\lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{Dt_c}} = \frac{1,285 \cdot 52,00}{\sqrt{76,4 \cdot 2,05}} = 5,339$$

A partir destes valores é possível os critérios do passo 5.

$$R_t \geq 0,2 \Rightarrow 0,512 \geq 0,2 \text{ (OK)}$$

$$t_{mm} - FCA_{ml} \geq 0,375 \text{ mm} \Rightarrow 1,05 \text{ mm} \geq 0,375 \text{ mm (OK)}$$

$$L_{msd} \geq 1,8\sqrt{D \cdot t_c} \Rightarrow 250 \geq 22,53 \text{ (OK)}$$

Com a confirmação de que os critérios para o passo 5 foram satisfeitos, é possível continuar com os próximos passos da norma. A seguir, então, é calculado o valor de pressão máxima admissível ($MAWP$) à partir da Eq. 8.

$$MAWP = MAWPC = \frac{S_y E_s t_{nom}}{R - 0,6t} = \frac{355,635 \cdot 0,7 \cdot 2,05}{38,2 - 0,6 \cdot 2,05} = 12,943 \text{ MPa}$$

Para verificar a validação do $MAWP$ calculado é utilizado o passo 7, verificando a interseção entre λ e R_t no gráfico. A Figura 20 demonstra a aplicação deste passo, comprovando que a falha usinada não é capaz de atuar no $MAWP$ calculado.

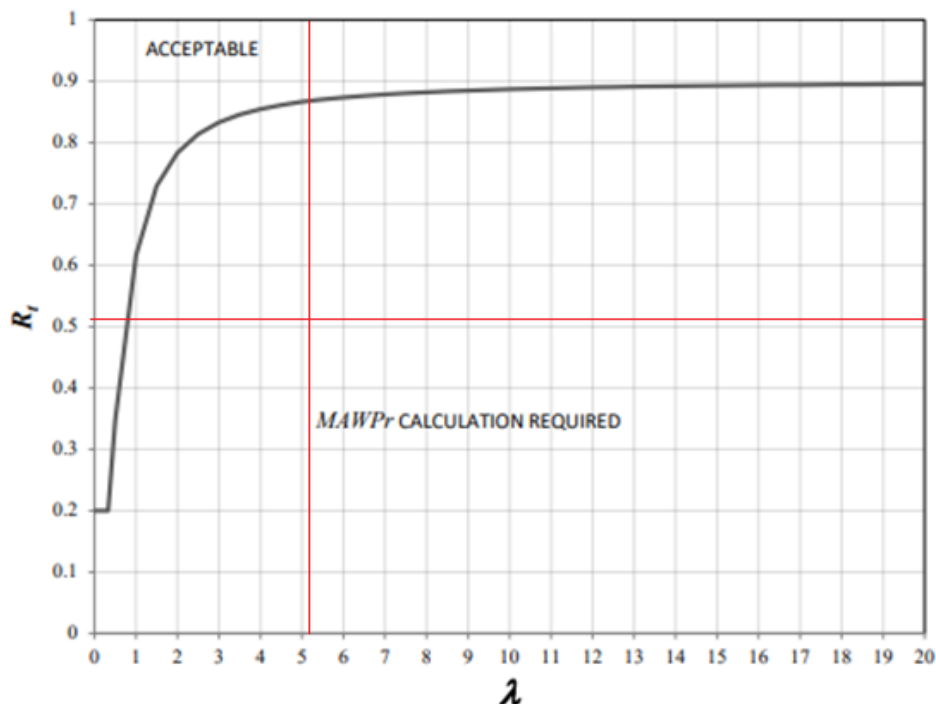


Figura 20: Gráfico de verificação do MAWP. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Como é estabelecido pelo gráfico o ponto ficou abaixo da curva, portanto deve-se verificar a relação entre RSF e RSF_a . O RSF é calculado utilizando a Eq.44 e RSF_a pode ser considerado como 0,9. Enquanto que M_t é definido pela Tabela 1, presente na Seção 2.3.5.1, e neste caso é equivalente à 3,255.

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} = \frac{0,512}{1 - \frac{1}{3,255}(1 - 0,512)} = 0,603$$

Como $RSF < RSF_a$, então a região de perda de metal é inaceitável para operar no $MAWP$ calculado. Desta forma, é necessário calcular o $MAWP_r$ utilizando a Eq.45

$$MAWP_r = MAWP \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) = 12,943 \left(\frac{0,603}{0,9} \right) = 8,665 \text{ MPa}$$

Com o valor da pressão máxima admissível pela norma, seguiu-se para a realização do procedimento experimental.

3.4 Metodologia dos testes

Esta seção descreve os métodos e procedimentos adotados para a realização dos experimentos propostos pelo projeto.

3.4.1 Processo de calibração para a correlação digital de imagem (DIC)

Após todo o arranjo experimental ser elaborado, foram realizados os testes de calibração do método *DIC*. A calibração adequada assegura que os resultados derivados das imagens capturadas sejam precisos. O procedimento de calibração foi realizado conforme os seguintes passos:

3.4.1.1 Preparação do equipamento:

O primeiro passo foi realizar a configuração e arranjo dos equipamentos,

Foram utilizadas duas câmeras monocromáticas, cada uma equipada com sensores de $\frac{1}{2}$ " e resolução de 5 Megapixels, proporcionando a observação tridimensional do comportamento da superfície. Para manter a estabilidade e alinhamento das câmeras ao longo dos experimentos, um tripé foi inserido. Por fim, todo o processamento de dados e cálculos necessários foi realizado em um aparato computacional específico, equipado com o software dedicado para análise *DIC*. Essa configuração de equipamentos visa assegurar resultados precisos e confiáveis durante a execução dos experimentos.



Figura 21: Arranjo para a captura de fotos. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Após a organização dos componentes, o foco e posição das câmeras foram ajustados, garantindo a nitidez da área de interesse e uma iluminação satisfatória. Esses fatores foram analisados com o auxílio do software no computador.

3.4.1.2 Calibração do sistema convencional:

Para a calibração convencional do sistema de correlação de imagem é utilizada uma placa que possui uma distribuição de pontos padronizada, com dimensões semelhantes às das áreas de interesse. Portanto, uma placa de

calibração (Figura 22) foi posicionada em frente às câmeras e foram obtidas 21 imagens de referência, alterando minimamente a posição da placa (rotacionando ou transladando aleatoriamente). Após a captura das fotos, o programa executou seu algoritmo para calibrar o software para os experimentos subsequentes.

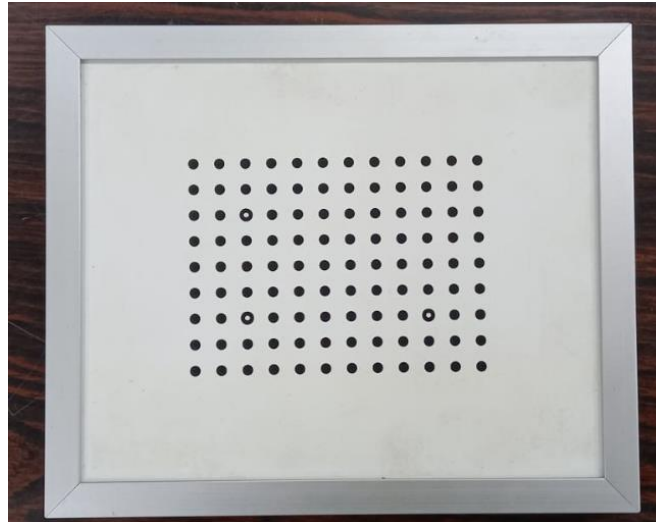


Figura 22: Placa padrão para a calibração. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

3.4.1.3 Definição dos parâmetros no programa

Após a calibração da placa, o software foi configurado para as especificações do experimento. Isso incluiu a definição dos parâmetros de calibração, como a área de interesse, o tamanho do subset e do step. As configurações do software foram ajustadas para otimizar a resolução e a precisão da correlação de imagens, optando por um subset de 40x40 pixels e um step de 10 pixels, selecionados com base em considerações técnicas.

O subset foi dimensionado para capturar 3-5 pontos em cada janela, uma definição precisa da resolução espacial da área de medição. Quanto maior o subset maior a quantidade de pontos capturados dentro dele e com isso melhor sua resolução espacial, contudo grandes subsets sacrificam a gradiente de deformação final. Quanto ao step, foi escolhido um valor aproximadamente 1/4 a 1/5 do subset para permitir uma sobreposição adequada entre as áreas analisadas.

3.4.1.4 Verificação da calibração:

Para garantir que a calibração foi bem-sucedida, realizou-se uma verificação do programa, assegurando que os parâmetros e configurações utilizadas eram satisfatórias. Para isto, foi verificada a qualidade dos dados obtidos, assegurando o menor número de vazios possível.

3.4.2 Procedimentos de teste com pressão interna

Após a validação da calibração para o método de Correlação Digital de Imagens (DIC), foi iniciado o procedimento para aplicar pressão interna no vaso de pressão. Este teste visa investigar os efeitos da pressão interna sobre o vaso de pressão, utilizando os dados de deformação do tubo para análise futura. O procedimento foi realizado conforme as etapas descritas a seguir:

- Passo 1: Sem aplicar pressão no vaso, foram capturadas dois pares de imagens de referência para utilizar o método DIC. Essas imagens servirão como base para comparar com as obtidas após a aplicação de pressão, para assim obter os valores de deformação no defeito.
- Passo 2: O teste de pressão começou com a aplicação da pressão disponível na linha hidráulica, aproximadamente 4 bar. Após a estabilização dessa pressão, um par de fotos foi capturado para análise.
- Passo 3: Ajustou-se a válvula da bomba para aplicar uma pressão específica no vaso, equivalente a 43,4 bar. Com a pressão estabilizada, foram capturadas novas imagens para análise DIC. Este ponto de obtenção de dados foi referenciado como: Estado 1.
- Passo 4: A válvula da bomba foi ajustada para alcançar uma pressão de 89,0 bar. Esta pressão é equivalente à 2,48% acima da pressão de operação máxima admissível (MAWP). Após a estabilização da pressão, novas imagens foram capturadas para análise pelo DIC. Este ponto de obtenção de dados foi referenciado como: Estado 2.
- Passo 5: Para retornar às condições iniciais, toda a pressão foi removida da linha, e um par final de fotos foi capturado para análise DIC. Este ponto de obtenção de dados foi referenciado como: Estado 3.

Nota: Durante todo o procedimento, os dados de pressão de saída da bomba e de deformação do extensômetro foram registrados para análise posterior.

4 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita anteriormente.

4.1 Histórico dos dados de pressão e deformações no extensômetro

Nesta primeira parte será disponibilizado o gráfico dos dados contínuos obtidos a partir do sensor de pressão e pelo extensômetro, Figura 23.

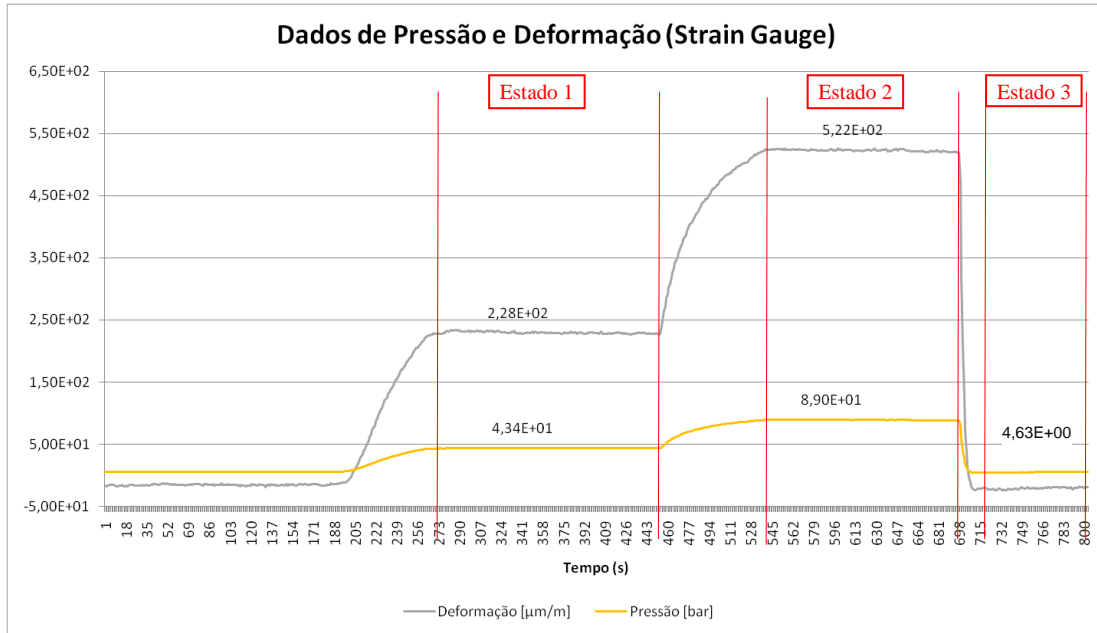


Figura 23: Dados de pressão e deformação (Strain Gauge). (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Pode se observar pelo gráfico o comportamento esperado, quando a pressão sobre a deformação circunferencial sobe proporcionalmente. Observa-se também a pressão atuante em cada um dos estados, definidos na Seção 3.4.2.

- Pressão no Estado 1: $P_1 = 43,4$ bar.
- Pressão no Estado 2: $P_2 = 89,0$ bar.
- Pressão no Estado 3: $P_3 = 4,63$ bar.

4.2 Deformações obtidas pelo método de correlação digital

A partir do método de correlação digital de imagens, foram estabelecidos os perfis de deformação ao longo da área de interesse. Os resultados das deformações circunferenciais podem ser observados pela Figura 24.

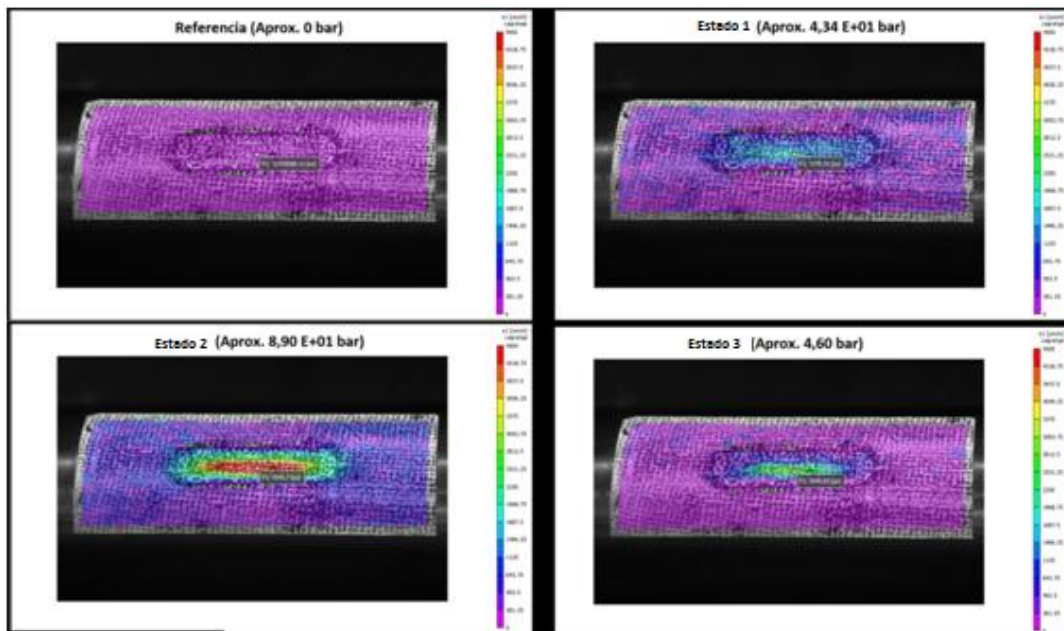


Figura 24: Resultado do método DIC. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

A Figura 24 comprova que a área do defeito é um ponto de concentração de tensões, onde sua deformação é mais significativa que no restante do componente. Observa-se também que quando ultrapassado a pressão máxima estabelecida pela norma, o defeito do tubo sofre deformação plástica, portanto de fato comprova a significância de aplicar a norma.

Para uma maior compreensão do comportamento do vaso de pressão, foi separado dois pontos para uma melhor análise. O primeiro ponto sendo no centro do defeito (ponto de maior deformação) e o segundo foi longe do defeito, em sua parte nominal. É possível observar a partir do perfil de espessura, levantado com o DIC (Figura 25), a posição dos primeiro e segundo ponto.

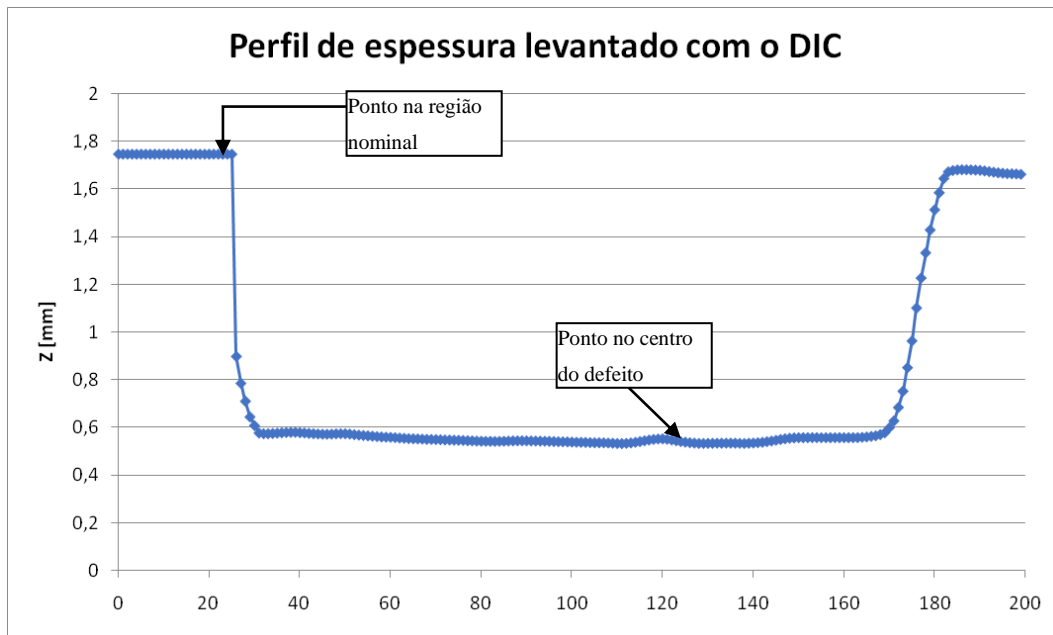


Figura 25: Perfil de espessura na área de interesse, utilizando o DIC. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

As informações sobre as deformações longitudinais e circunferenciais de ambos os pontos podem ser observadas na Figura 26 e Figura 27.

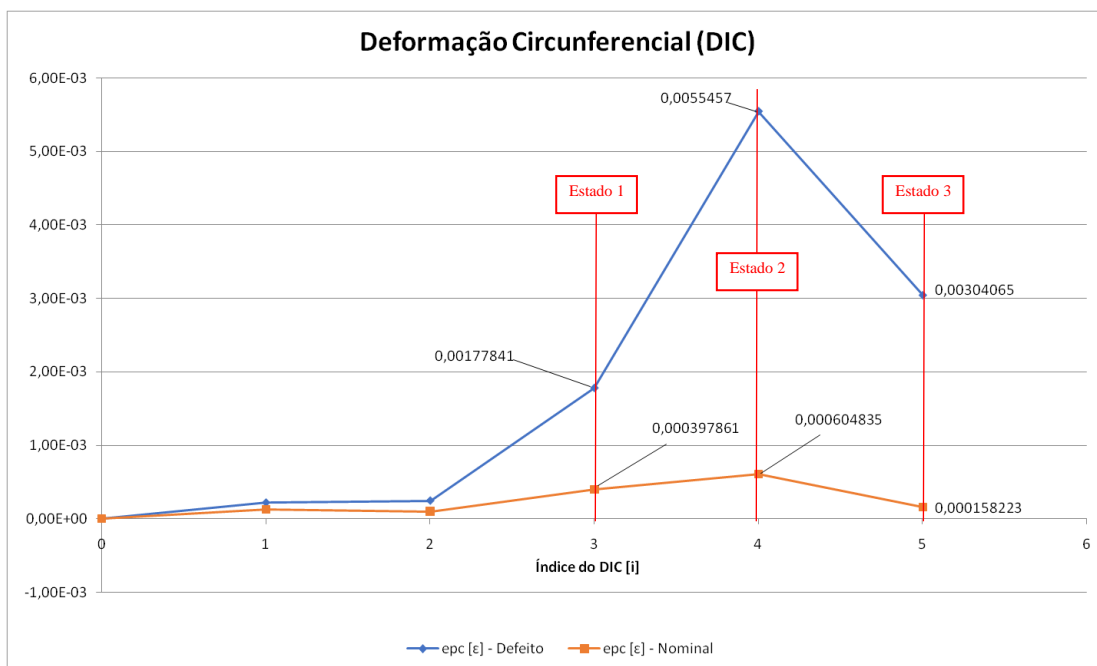


Figura 26: Deformação Circunferencial no defeito e nominal. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Medindo assim a deformação circunferencial em cada um dos estados.

- Deformação circunferencial no Estado 1, nominal: $\varepsilon_{c,n,1} = 397,86 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 1, centro do defeito: $\varepsilon_{c,d,1} = 1778,41 \mu\varepsilon$.

- Deformação circunferencial no Estado 2, nominal: $\varepsilon_{c,n,2} = 604,83 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 2, centro do defeito: $\varepsilon_{c,d,2} = 5545,7 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 3, nominal: $\varepsilon_{c,n,3} = 158,22 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 3, centro do defeito: $\varepsilon_{c,d,3} = 3040,65 \mu\varepsilon$.

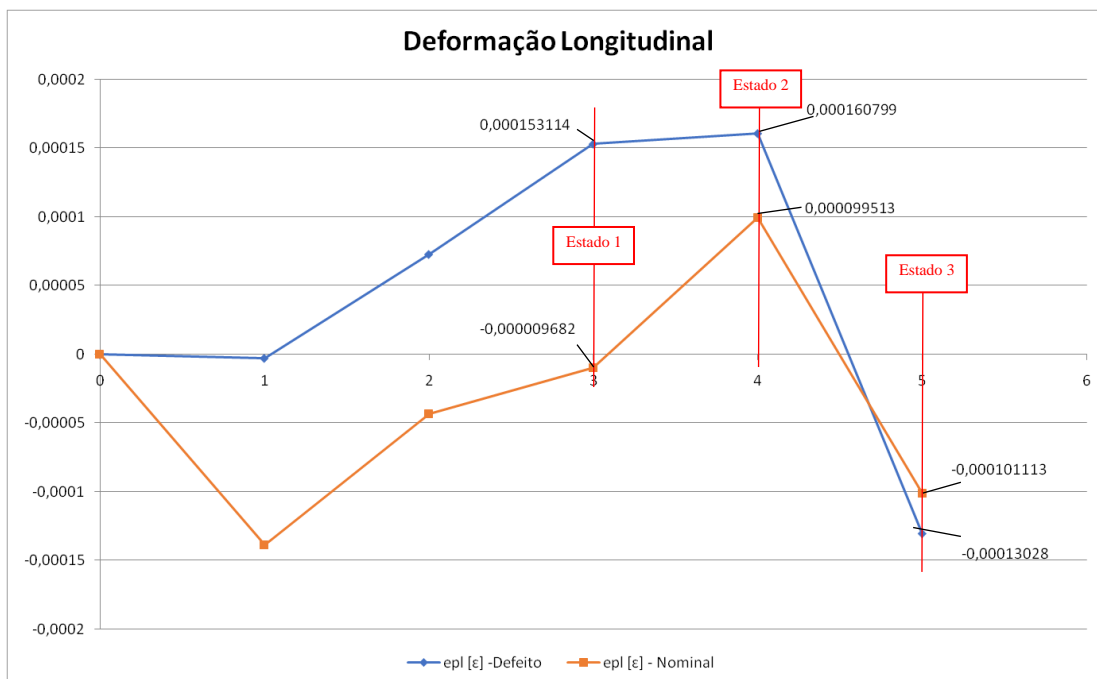


Figura 27: Deformação Longitudinal no defeito e na parte nominal. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

Medindo assim a deformação circunferencial em cada um dos estados.

- Deformação circunferencial no Estado 1, nominal: $\varepsilon_{l,n,1} = -96,86 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 1, centro do defeito: $\varepsilon_{l,d,1} = 153,11 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 2, nominal: $\varepsilon_{l,n,2} = 99,51 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 2, centro do defeito: $\varepsilon_{l,d,2} = 160,80 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 3, nominal: $\varepsilon_{l,n,3} = -101,11 \mu\varepsilon$.
- Deformação circunferencial no Estado 3, centro do defeito: $\varepsilon_{l,d,3} = -130,28 \mu\varepsilon$.

5 Análise dos resultados

5.1 Valores de variáveis para os cálculos apresentados nesta seção

Para realizar os cálculos presentes nesta seção será necessário utilizar alguns dados especificados ao longo do trabalho. Abaixo é evidenciado os valores das variáveis necessárias para a realização dos cálculos.

- $\varepsilon_{c,d,1} = 1778,41\mu\varepsilon$ (Seção 4.2)
- $\nu = 0,3035$ (Seção 3.2)
- $D = 76,4$ mm (Seção 3.1.1)
- $E = 171711$ MPa (Seção 3.2)
- $MAWP_r = 12,378$ MPa (Seção 3.3.2.2)
- $P_1 = 4,34$ MPa (Seção 4.1)
- $P_2 = 8,90$ MPa (Seção 4.1)
- $t = 2,05$ mm (Seção 3.1.1)

5.2 Comparação entre os resultados de diferentes métodos

Nesta seção, a análise se concentrará na comparação dos diferentes métodos utilizados para verificar o comportamento de um tubo de paredes finas sob pressão interna. Esta investigação utilizará os dados obtidos através da Correlação Digital de Imagens (DIC), comparando-os com o comportamento previsto pelos cálculos teóricos baseados no equilíbrio de forças, descritos na Seção 2.2.

As relações entre tensão e pressão interna (Eq.5 e Eq.6) são aplicáveis apenas à área nominal do tubo, o que significa que a comparação entre os métodos utilizará um ponto nominal obtido pelo método DIC.

5.2.1 Deformação circunferencial teórica

Utilizando a relação entre a deformação circunferencial e pressão interna (Eq.5), alcançada na Seção 2.2.2, pode-se realizar uma comparação entre a deformação teórica e a lida pelos dois métodos.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{pc} &= \frac{P_1 \cdot D \cdot (1 - 0,5\nu)}{2 \cdot E \cdot t} = \frac{4,34 \cdot 76,4 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,3035)}{2 \cdot 171711 \cdot 2,05} \\ &= 399,51 \mu\varepsilon\end{aligned}$$

Pela pressão lida através do sensor no Estado 1, a deformação teórica equivale à $399,51\mu\varepsilon$. O DIC informou que a deformação circunferencial equivalia

à 397,86 $\mu\epsilon$, desta forma o erro teórico para a deformação longitudinal foi de 0,41%.

O método DIC apresentou resultados muito satisfatórios, com erros percentuais pequenos quando comparado com o valor teórico. Comprovando a veracidade das aproximações teóricas utilizadas para a deformação circunferencial em tubos de paredes finas.

5.2.2 Deformação longitudinal teórica

Utilizando a relação entre a deformação longitudinal e pressão interna (Eq.6), alcançada na Seção 2.2.2, pode-se realizar uma comparação entre a deformação teórica e a obtida pelo DIC.

$$\epsilon_{pl} = \frac{P_1 \cdot D \cdot (0,5 - \nu)}{2 \cdot E \cdot t} = \frac{4,34.76,4 \cdot (0,5 - 0,3035)}{2 \cdot 171711 \cdot 2,05} = 92,55 \mu\epsilon$$

Pela pressão lida através do sensor no Estado 1, a deformação teórica equivale à 92,55 $\mu\epsilon$. O DIC informou que a deformação longitudinal equivalia à -9,682 $\mu\epsilon$, desta forma o erro teórico para a deformação longitudinal foi de 110,49%. Comprovando a inviabilidade das informações sobre as deformações longitudinais provindas do método DIC.

Portanto nas análises futuras será utilizado o dado da deformação circunferencial provindas do DIC, para estimar o valor da deformação longitudinal. Para isso será utilizado as relações provindas das Eq.5 e Eq.6.

$$\frac{\epsilon_{pc}}{\epsilon_{pl}} = \frac{\frac{p \cdot D \cdot (1 - 0,5\nu)}{2 \cdot E \cdot t}}{\frac{p \cdot D \cdot (0,5 - \nu)}{2 \cdot E \cdot t}} = \frac{(1 - 0,5\nu)}{(0,5 - \nu)} = \frac{(1 - 0,5 \cdot 0,3035)}{(0,5 - 0,3035)} = 4,3168 \quad (50)$$

$$\Rightarrow \epsilon_{pl} = \frac{\epsilon_{pc}}{4,3168}$$

5.3 Análise do impacto do defeito

Para verificar o impacto que a pressão interna causa no defeito, é necessário estabelecer uma relação entre a deformação do corpo, a pressão interna e a tensão atuante.

5.3.1 Relação entre deformação sofrida com a tensão atuante

A primeira relação relevante é a entre a deformação sofrida e tensão atuante. Como o corpo sofre uma deformação elástica até o Estado 1, será utilizado as informações neste ponto para calcular a tensão resultante do ponto.

Pelo fato da deformação longitudinal ter apresentado uma grande variação e erro percentual, enquanto que a deformação circunferencial apresentou bons resultados, a deformação longitudinal será estimada a partir da Eq.50. Visto que como os valores teóricos são superiores aos medidos, a utilização destes garante uma maior segurança.

Utilizando a relação entre deformação e tensão apresentada na Seção 2.2.2 (Eq.4 e Eq.5) e evidenciando as tensões, chega-se à seguinte relação

$$\begin{cases} \varepsilon_c = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_c - \nu \cdot \sigma_l) \\ \varepsilon_l = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_l - \nu \cdot \sigma_c) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_c = \frac{(\varepsilon_c + \nu \cdot \varepsilon_l)E}{1 - \nu^2} \\ \sigma_l = \frac{(\varepsilon_l + \nu \cdot \varepsilon_c)E}{1 - \nu^2} \end{cases} \quad (51)$$

A partir desta relação os valores para as tensões atuantes na área do defeito, os resultados são apresentados abaixo:

$$\sigma_c = \frac{\left(\varepsilon_{c,d,1} + \nu \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,d,1}}{4,3168}\right)\right)E}{1 - \nu^2} = \frac{\left(1778,41 + 0,3035 \cdot \left(\frac{1778,41}{4,3168}\right)\right)171711}{1 - 0,3035^2} = 360,00 \text{ MPa} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{\left(\left(\frac{\varepsilon_{c,d,1}}{4,3168}\right) + \nu \varepsilon_{c,d,1}\right)E}{1 - \nu^2} = \frac{\left(\left(\frac{1778,41}{4,3168}\right) + 0,3035 \cdot 1778,41\right)171711}{1 - 0,3035^2} \quad (53) \\ &= 180,00 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Para obter a tensão equivalente aplicada sobre o defeito, utiliza-se o critério de Von Mises (Eq.54).

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_l^2 - \sigma_c \cdot \sigma_l} = 311,77 \text{ MPa} \quad (54)$$

Desta forma é obtido a tensão resultante no Estado 1.

5.3.2 Relação entre a pressão interna e a tensão atuante

A relação entre a pressão interna e a tensão atuante é linear no regime elástico, pois neste experimento a única força aplicada no componente é derivada de sua pressão interna. Portanto a relação entre pode ser simplificada para a seguinte fórmula.

$$\sigma_{\text{Mises}} = \alpha_1 \cdot P \quad (55)$$

Sendo α_1 um valor constante.

A partir da tensão resultante calculada na seção anterior e a pressão atuante no ponto 1 é possível encontrar o valor de α neste experimento.

$$\sigma_{\text{Mises},1} = \alpha_1 \cdot P_1 \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\sigma_{\text{Mises}}}{P_1} = \frac{311,77}{4,34} = 71,84 \quad (56)$$

5.4 Fator de segurança da norma

Com a relação estabelecida pela Eq.56, é possível encontrar o ponto no qual a pressão interna resultaria numa tensão atuante igual ao limite de escoamento (S_y). A Figura 28 serve para demonstrar visualmente o processo para a determinação da pressão máxima experimental.

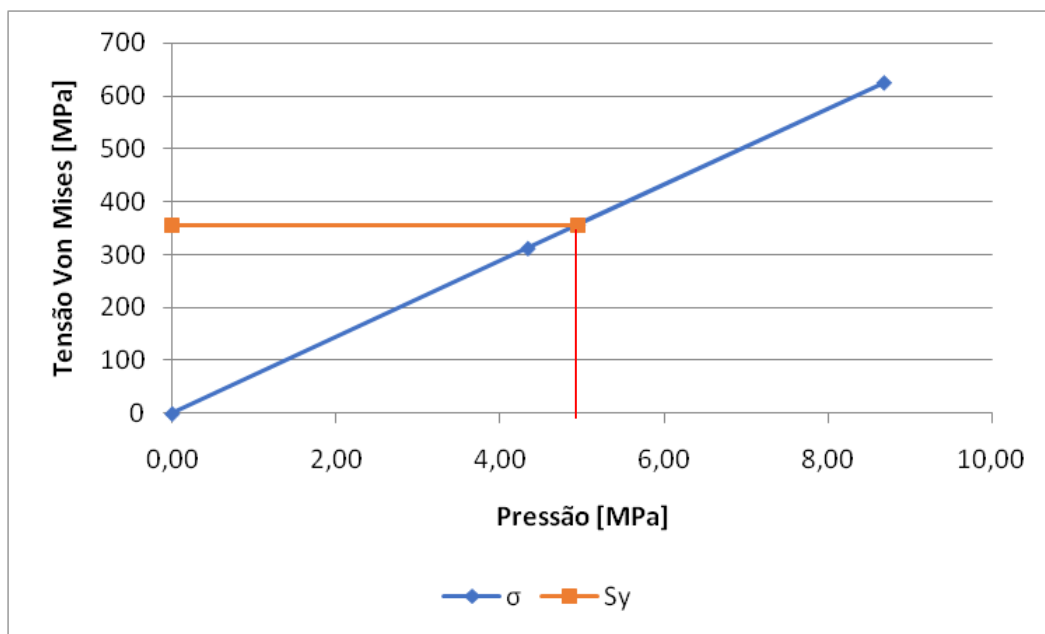


Figura 28: Relação pressão x tensão. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

A partir da análise do gráfico pode-se estabelecer a pressão máxima experimental.

- $P_{\text{max.exp.1}} = 4,95 \text{ MPa}$

Comparando este valor com o valor calculado pela norma, obtém-se o valor do fator de segurança previsto pela norma.

$$FS_1 = \frac{P_{\text{max.exp.1}}}{MAWP_r} = \frac{4,95}{8,665} = 0,57 \quad (57)$$

A partir deste valor de fator de segurança é possível extrapolar que a análise realizada durante o processo não foi satisfatória, pois caso esta fosse a relação atuante no experimento o vaso de pressão haveria rompido durante os testes e esta

falha não foi observada, portanto foi proposto um outro método para averiguar a relação entre pressão interna e tensão atuante, descrita na seção a seguir.

5.4.1 Relação entre tensão e deformação à partir da deformação plástica permanente

A outra metodologia aplicada para estabelecer uma relação entre a pressão interna e a tensão aplicada, foi realizada utilizando a deformação informada após a retirada da pressão interna (Estado 3 do experimento). A partir desta deformação foi utilizada a linha de deformação elástica para calcular a tensão atuante que resultaria nesta deformação, esta tensão então foi relacionada à pressão no Estado 2 do experimento ($P_2=8,9$ Mpa), demonstrado pela Figura 29.

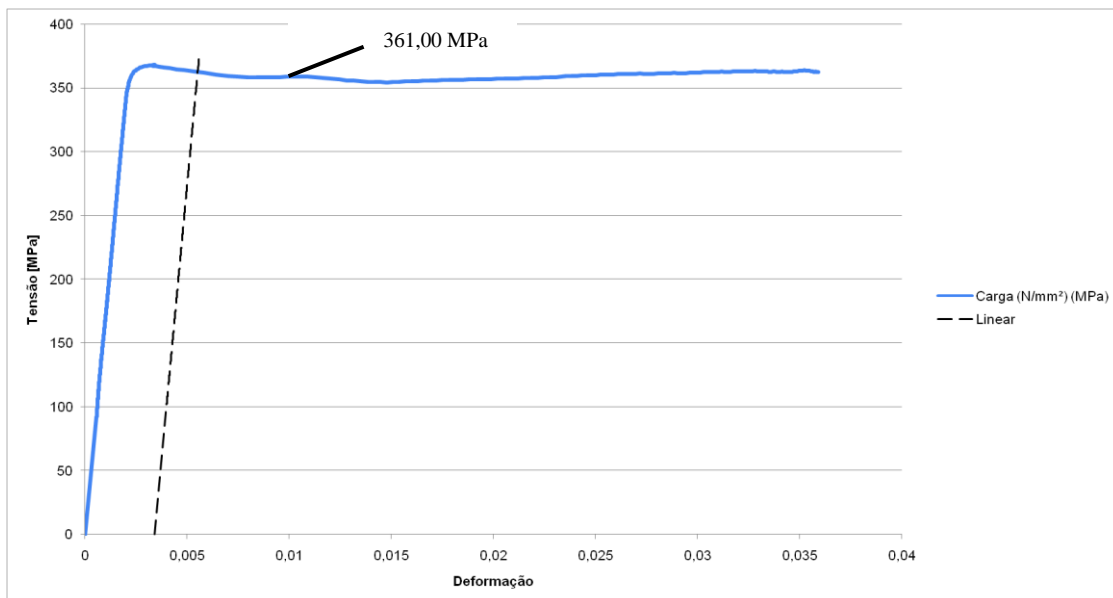


Figura 29: Tensão resultante da pressão máxima. (Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

A análise do gráfico estabelece, a partir do ponto de interseção entre as curvas, que a tensão atuante no Estado 2 é.

- $\sigma_{Mises,2} = 361,00$ MPa

Utilizando a relação da Eq.55:

$$\sigma_{Mises,2} = \alpha_2 \cdot P_2 \Rightarrow \alpha_2 = \frac{\sigma_{Mises,2}}{P_2} = \frac{361,00}{8,9} = 40,56$$

Este fator, α_2 , resultaria na seguinte relação, presente na Figura 30.

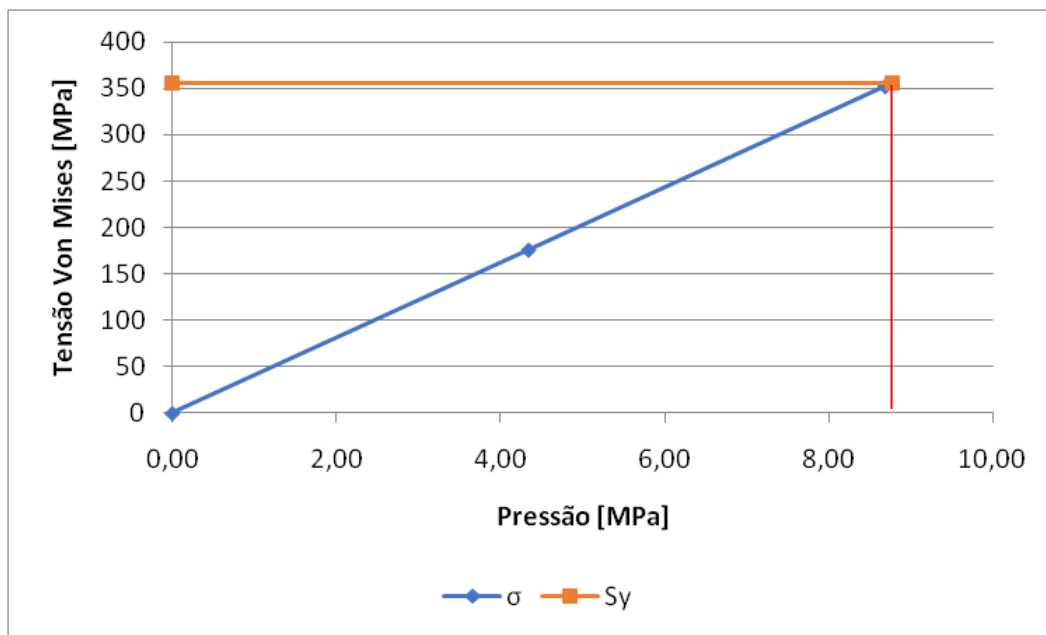


Figura 30: Relação entre pressão e tensão atuante a partir do segundo método. ((Fonte: Elaborada pelo autor, 2024).

A partir da análise do gráfico pode-se estabelecer a pressão máxima experimental.

- $P_{\text{max.exp.2}} = 8,77 \text{ MPa}$

Com estes novos valores, o fator de segurança da norma seria de:

$$FS_2 = \frac{P_{\text{max.exp.2}}}{MAWP_r} = \frac{8,77}{8,665} = 1,01$$

Este fator de segurança, embora possível, não condiz com a expectativa sobre a norma. Portanto é possível aferir que ocorreu algum erro durante o processo experimental ou nas considerações adotadas.

Após uma investigação sobre possíveis fontes de erro, estabeleceu-se que os erros podem ser resultados de falhas durante a determinação das propriedades mecânicas do material. Devido o procedimento adotado para a confecção do tubo, este teve de passar por deformações circunferenciais acentuadas para transformar a chapa metálica em um tubo, sofrendo encruamento nesta direção, enquanto que nos testes de tração utilizados a direção dos testes realizados teve foco nas deformações longitudinais. É provável que as propriedades mecânicas atreladas ao material devido ao teste de tração não representassem corretamente a realidade do tubo, resultando nos erros ao longo do projeto.

6 Conclusão

Este projeto de conclusão final de curso teve como resultado um aprendizado teórico satisfatório, onde foi concretizado conhecimentos importantes de engenharia. Além disso, foi possível concluir diversos objetivos propostos ao projeto.

A norma API 579-1 foi devidamente estudada e aplicada, relatando todo o procedimento e resultado ao longo deste trabalho. Os experimentos no laboratório possibilitaram a aplicação de métodos aprendidos ao longo do curso e confirmaram a relação teórica estabelecida entre pressão interna, deformação e tensão atuante em vasos de pressão de paredes finas (descrito na Seção 2.2). Os testes também confirmaram e avaliaram o impacto que um defeito na superfície do tubo pode resultar na segurança e desempenho dele, comprovando a importância deste estudo.

Contudo a correlação entre a norma e o comportamento experimental não apresentou os resultados esperados, suas possíveis causas foram analisadas ao longo da Seção 5.4. Desta forma, é possível estabelecer que uma futura fonte de melhoria para a continuação do estudo é utilizar um tubo base com propriedades mecânicas conhecidas, estabelecidas pelo fornecedor.

7 Referências

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 579-1: Fitness for service**. Washington: API,2021.

LU, Yen Ju; WANG, Chen-Hua. **Effects of geometry of a local thin area defect on remaining strength and fitness of pressure equipment**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 65, 2020.

PORTO, Fernando. **Tensões em Vasos de Pressão de Paredes Finas Coeficiente de Dilatação Térmica** . Apresentação Acadêmica para graduação em engenharia. Acesso em: 20 out. 2023.

RODRIGUES, Leonardo Dantas. **Aplicação da técnica DIC a espécimes com diferentes formas, materiais e gradiente de deformação**. 2014. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SÁ, Felipe Zacharias de. **Análise Estrutural do Vaso de Pressão VP-CTVP-E-01**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

VIEIRA, Renato. **Correlação de Imagem Digital Princípios e Aplicações**. Apresentação Acadêmica para mestrado em engenharia. Acesso em: 20 out. 2023.

WYSZOMIRSKA, Lygia Fernandes De Biase. **CARGAS DE COLAPSO EM DUTOS SUBMETIDOS A MOMENTO FLETOR E PRESSÃO INTERNA**. 2014. 51 f. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.