



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Otávio Molter de Oliveira Teixeira

**Avaliação do efeito da ovalização em tubos com parede fina:
Uma revisão experimental e normativa**

Projeto de Graduação

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica
da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Renato Bichara Vieira

Rio de Janeiro,
Dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Prof. Renato Bichara Vieira, pela orientação atenciosa, pela confiança ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho e pelas contribuições que foram essenciais para a conclusão deste estudo. Sua dedicação e disponibilidade foram fundamentais para que eu pudesse avançar com segurança em cada etapa.

Aos meus pais, Valéria e Carlos Alberto, expresso minha profunda gratidão pela enorme oportunidade que me proporcionaram e pelo apoio em todos os momentos da minha formação. Este trabalho só foi possível graças ao esforço, incentivo e suporte incondicional que sempre recebi de vocês.

Agradeço também à minha namorada, Stephanie, pelo grande apoio, paciência e ajuda durante todo esse processo. Sua presença constante, compreensão e incentivo tiveram papel essencial não apenas na realização deste trabalho, mas em toda a minha trajetória acadêmica.

RESUMO

Avaliação do efeito da ovalização em tubos com parede fina: Uma revisão experimental e normativa

Este trabalho investiga o comportamento mecânico de tubos de paredes finas que foram previamente ovalizados e posteriormente submetidos à pressurização interna. A análise retoma o estudo experimental de Soares (2016) e incorpora resultados adicionais do artigo *Experimental study of ovalized thin-walled pipes* (2025), que ampliou a compreensão do fenômeno por meio de simulações numéricas.

A ovalização, imperfeição que altera a circularidade da seção transversal, é comum em dutos industriais e pode modificar de forma significativa o estado de tensões e deformações sob pressão interna. Para caracterizar esse comportamento, foram utilizadas duas técnicas experimentais: a Correlação Digital de Imagens (DIC), capaz de fornecer campos completos de deformação, e a extensometria elétrica, que permite medições pontuais de alta precisão. Os dados obtidos foram comparados com previsões analíticas baseadas na norma BS 7910/API 579 e na formulação clássica da resistência dos materiais.

Os resultados experimentais apresentaram boa consistência e indicaram uma redução progressiva da excentricidade com o aumento da pressão, tendência captada pelas abordagens analítica e numérica. As discrepâncias observadas, especialmente nas deformações longitudinais, refletem simplificações presentes nos modelos analíticos e o caráter conservador dos modelos normativos. As simulações por elementos finitos mostraram ainda que pequenas variações geométricas na ovalização influenciam de maneira relevante a resposta estrutural.

Os achados reforçam a importância de integrar medições experimentais, análises analíticas e modelos numéricos para uma avaliação mais realista da integridade estrutural de tubos ovalizados, especialmente em situações envolvendo imperfeições complexas e não elípticas.

Palavras-chave: tubos; ovalização; correlação digital de imagens (DIC); extensometria elétrica; BS 7910; API 579

ABSTRACT

Evaluation of the Effect of Ovalization in Thin-Walled Pipes: An Experimental and Standards-Based Review

This work investigates the mechanical behavior of thin-walled tubes that were previously ovalized and subsequently subjected to internal pressurization. The analysis revisits the experimental study conducted by Soares (2016) and incorporates additional results from the article *Experimental study of ovalized thin-walled pipes* (2025), which expanded the understanding of the phenomenon through numerical simulations.

Ovalization, a geometric imperfection that alters the circularity of the cross-section, is common in industrial pipelines and can significantly modify the stress and strain state under internal pressure. To characterize this behavior, two experimental techniques were employed: Digital Image Correlation (DIC), which provides full-field strain measurements, and electrical strain gaging, which enables high-precision local measurements. The experimental data were compared with analytical predictions based on the BS 7910/API 579 standard and the classical formulation of strength of materials.

The experimental results showed good consistency and indicated a progressive reduction in eccentricity with increasing internal pressure, a trend also captured by the analytical and numerical approaches. The discrepancies observed—especially in the longitudinal strains—reflect simplifying assumptions present in analytical models and the conservative nature of normative methodologies. Finite element simulations further demonstrated that small geometric variations in the ovalization significantly influence the structural response.

The findings highlight the importance of integrating experimental measurements, analytical formulations, and numerical models to achieve a more realistic assessment of the structural integrity of ovalized tubes, particularly in scenarios involving complex or non-elliptical imperfections.

Key words: tubes; ovalization; digital image correlation (DIC); electrical strain gaging; BS 7910; API 579.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Contextualização do problema	10
1.2. Motivação	11
1.3. Objetivo geral	11
1.4. Objetivo específico	12
1.5. Organização	12
2. Metodologia.....	13
2.1. Definição técnica	13
2.2. Tensões em tubos de paredes finas.....	14
2.3. Metodologia fundamentada nas normas BS 7910	16
2.4. Metodologia fundamentada na teoria de Resistência dos materiais	19
2.5. Determinação analítica das deformações	21
2.6. Metodologias experimentais.....	22
2.6.1. Correlação Digital de Imagem.....	22
2.6.2. Extensometria	28
3. Ensaios Mecânicos Realizados	32
3.1. Procedimentos experimentais da técnica DIC	33
3.2. Procedimentos experimentais da técnica de extensometria.....	35
4. Resultados Experimentais	37
4.1. Resultados obtidos pela técnica DIC	37
4.2. Resultados obtidos pela técnica extensometria	39
4.3. Comparação dos Resultados experimentais e analíticos	40
4.3.1. Comparação entre as deformações	40
4.4. Variação da excentricidade.....	45
5. Considerações finais	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre a seção transversal de um tubo ovalizado com um tubo regular.....	13
Figura 2 - Gráfico Fator <i>KBS</i> em função da pressão interna do tubo – posição 0°.....	17
Figura 3 - Gráfico Fator <i>KBS</i> em função da pressão interna do tubo – posição 90°.....	18
Figura 4 - Gráfico Excentricidade do tubo em função da pressão.....	19
Figura 5- Exemplo de Speckle pattern criado na área de interesse de um vaso de pressão	23
Figura 6 - Comparação entre <i>speckle patterns</i> com densidade de pontos a) baixa, b) ideal, e c) muito alta	24
Figura 7 - Mapeamento DIC a partir de múltiplas janelas de correlação.	24
Figura 8 - Mapeamento bidimensional dos deslocamentos de uma janela de correlação	26
Figura 9 - Relação entre tamanhos de subset e step.	27
Figura 10 - Principais variações da técnica DIC: a) 2D, b) 3D e c) volumétrica (DVC).	28
Figura 11 - Extensômetro de fio (esquerda) e de lâmina (direita).....	29
Figura 12 - Circuito em uma ponte de Wheatstone	29
Figura 13 - Bomba hidropneumática para aplicação da pressão interna.	32
Figura 14 - Método de criação da ovalização simples por compressão	33
Figura 15 - Preparação do espécime para a técnica DIC	34
Figura 16 - Montagem do sistema de câmeras para aplicação da técnica 3D-DIC	34
Figura 17 - Calibração do software DIC	34
Figura 18 - Campo de deformações obtido a partir do processamento das imagens pelo método DIC	35
Figura 19 - Disposição dos <i>strain gages</i> nas posições 0° e 90° e posicionamento das câmeras utilizadas no sistema 3D-DIC.....	35
Figura 20 - Arranjo experimental com <i>strain gages</i> fixados nas posições 0° e 90°.....	36
Figura 21 - Gráfico pressão interna versus deformação circumferencial ($\mu\epsilon$) na posição 0°.....	41
Figura 22 - Gráfico pressão interna versus deformação circumferencial ($\mu\epsilon$) na posição 90°.....	42
Figura 23 - Gráfico pressão interna versus deformação longitudinal ($\mu\epsilon$) na posição 0°	43

Figura 24 - Gráfico pressão interna versus deformação longitudinal ($\mu\varepsilon$) na posição 90°	44
Figura 25 - Variação da excentricidade experimental e BS 7910 em função da pressão aplicada	47
Figura 26 - Seções transversais utilizadas nas simulações por elementos finitos, considerando simetrias nos eixos horizontal e vertical: (a) seção perfeitamente elíptica; (b) seção com desvio em relação à elipse	48
Figura 27 - Comparativo da evolução da excentricidade obtida experimentalmente, pela formulação da BS 7910 e pela simulação numérica	48
Figura 28 - Evolução da deformação circumferencial (ε_c) com o aumento da pressão interna, nas posições 0° e 90°, considerando as medições por DIC e as previsões do modelo BS7910 com $CC = 0,25$	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões médias do tubo após o procedimento de ovalização induzida....	33
Tabela 2 - Dados de saída do algoritmo DIC para deformações circunferenciais na posição 0°.....	37
Tabela 3 - Dados de saída do algoritmo DIC para deformações longitudinais na posição 90°.....	38
Tabela 4 - Dados de Saída do Algoritmo DIC para o 7º ensaio	38
Tabela 5 - Dados de Saída do Algoritmo DIC para o 9º ensaio	39
Tabela 6 - Deformações longitudinais medidas pelos extensômetros na posição 90º ...	39
Tabela 7 - Deformações circunferenciais medidas pelos extensômetros na posição 0º. .	40
Tabela 8 - Deformações circunferenciais em $\mu\epsilon$ na posição angular 0º	41
Tabela 9 - Deformações circunferenciais em $\mu\epsilon$ na posição angular 90º	42
Tabela 10 - Deformações longitudinais em $\mu\epsilon$ na posição angular 0º.....	43
Tabela 11 - Deformações longitudinais em $\mu\epsilon$ na posição angular 90º.....	44
Tabela 12 - Evolução da excentricidade ao longo dos incrementos de pressão interna .	46
Tabela 13 - Parâmetros para a função de extração	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do problema

A integridade estrutural de dutos industriais é um tema central na engenharia devido às consequências econômicas, ambientais e de segurança associadas à sua falha. Entre os diversos tipos de imperfeições geométricas que podem comprometer o desempenho desses sistemas, a ovalização é particularmente relevante (PASQUALINO; PINHEIRO; CUNHA, 2019). A ovalização em tubulações refere-se à perda da circularidade original da seção transversal de um tubo, que passa a assumir uma forma elíptica (oval) em vez de perfeitamente redonda.

Esse tipo de deformação pode ter diversas causas ao longo da vida útil de um tubo ou duto. Ainda na fase de fabricação, pequenos desvios de forma podem surgir durante processos como conformação ou tratamento térmico (ANDRADE, G.; TOLEDO, E.; LIMA, J. P., 2014). As normas de fabricação, como a API 5L para tubos de linha, geralmente estabelecem tolerâncias de ovalização nos tubos novos, tipicamente entre 1,5% e 2% no corpo do tubo, com limites mais restritivos nas extremidades para garantir o adequado encaixe nas juntas (API, 2018). Já nas etapas de construção e instalação, a ovalização pode ocorrer em função de cargas externas, manuseio inadequado ou apoios mal posicionados, que induzem deformações na seção transversal (KARAMANOS, S., 2016).

A análise de tubos ovalizados exige o entendimento dos efeitos de intensificação das tensões resultantes devido a indução de tensões de flexão locais superpostas às tensões de membrana (SILVA et al, 2025). O trabalho experimental realizado por Soares (2016) consistiu em induzir uma ovalização em um tubo de parede fina por compressão transversal, com posterior aplicação de pressão interna. As deformações foram medidas por Extensometria Elétrica (ERE) e Correlação Digital de Imagens (DIC), sendo os resultados confrontados com cálculos teóricos que seguiram duas abordagens distintas, uma aplicando conceitos de resistência dos materiais ao problema e outra fundamentada na abordagem oferecida pela norma BS7910/API 579 para determinar as tensões e deformações resultantes.

Dando continuidade ao estudo experimental proposto por Soares (2016), o artigo *"Experimental study of ovalized thin-walled pipes"* apresenta uma releitura do

experimento original com recursos complementares de análise. O ensaio foi repetido utilizando a mesma técnica de ovalização por compressão transversal, aplicada a um tubo com as mesmas dimensões (76 mm de diâmetro e 2 mm de espessura), seguido por pressurização interna em incrementos de 1 MPa até 6 MPa. A medição das deformações foi realizada exclusivamente por meio de correlação digital de imagens (DIC), o que permitiu a obtenção de campos completos de deformação. O estudo complementou a análise do problema incorporando simulações numéricas por elementos finitos, considerando diferentes geometrias de ovalização para avaliar sua influência no comportamento mecânico do tubo.

1.2. Motivação

O estudo da ovalização em tubulações é motivado tanto pela frequência com que esse defeito pode ocorrer quanto pelos impactos significativos que pode causar na segurança e na confiabilidade de sistemas pressurizados. Sob a perspectiva operacional, deformações excessivas da seção transversal podem comprometer a integridade estrutural e reduzir a vida útil de dutos e equipamentos, seja pela diminuição da resistência à fadiga, seja pela possível perda de resistência estática associada à amplificação das tensões na parede do tubo (NEIMAR, 2016).

Nesse contexto, revisitar o trabalho de Soares (2016) à luz das conclusões mais recentes do artigo *Experimental study of ovalized thin-walled pipes* torna-se particularmente relevante. A monografia original forneceu a primeira caracterização experimental da ovalização, mas permaneceu restrita a uma única geometria de defeito, oferecendo um retrato parcial do fenômeno. O artigo de 2025 demonstrou, por meio da análise complementar por elementos finitos, que pequenas variações na forma da ovalização, e não apenas na sua severidade, podem alterar substancialmente os resultados previstos pela norma BS 7910. Assim, um estudo que complemente Soares (2016) incorporando esses novos resultados permitirá validar e calibrar os modelos normativos em um espectro mais amplo de cenários operacionais.

1.3. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é aprofundar a compreensão dos efeitos da ovalização em tubos de paredes finas submetidos à pressão interna, por meio da releitura e complementação do estudo experimental desenvolvido por Soares (2016). Para isso, serão utilizados os dados, análises e conclusões do artigo publicado por SILVA et al.

(2025), que ampliou o método da avaliação original e promoveu uma abordagem mais abrangente, combinando fundamentos teóricos, validação experimental, modelagem numérica por elementos finitos e uma análise fundamentada nas metodologias oferecidas pela norma BS 7910.

1.4. Objetivo específico

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre a monografia original e a sua releitura, com foco em três pilares:

- Analisar experimentalmente o comportamento de um tubo de parede fina submetido à pressurização interna após ovalização controlada, avaliando a evolução das tensões e deformações ao longo do ensaio.
- Aplicar métodos analíticos baseados em normas amplamente utilizadas na indústria (como a BS 7910 e a API 579-1) e em formulações da teoria clássica da resistência dos materiais, a fim de estimar as tensões e deformações em tubos ovalizados sob diferentes níveis de pressão.
- Comparar os resultados experimentais obtidos com aqueles provenientes das abordagens analíticas, verificando a correlação entre os métodos e identificando eventuais limitações ou divergências nas previsões normativas.

1.5. Organização

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre o fenômeno da ovalização em tubos de paredes finas e descreve as metodologias empregadas para estimar a intensificação das tensões decorrente dessa deformação. Nesse capítulo também são discutidos os princípios teóricos que embasam os métodos experimentais utilizados para a obtenção dos resultados. O Capítulo 3 descreve em detalhe o procedimento experimental realizado para o ensaio do tubo ovalizado em escala. O Capítulo 4 reúne e analisa os resultados experimentais, comparando-os com aqueles obtidos por meio das formulações analíticas previstas em normas técnicas e pela teoria clássica da resistência dos materiais, além de incluir uma análise comparativa com uma abordagem numérica. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2. Metodologia

2.1. Definição técnica

A ovalização em tubos é tecnicamente definida como uma imperfeição geométrica caracterizada pela variação do diâmetro da seção transversal ao longo do perímetro do tubo, mantendo-se aproximadamente constante ao longo do comprimento (XINHU & GUANG, 2020). Significando que o tubo não é mais perfeitamente cilíndrico em determinada região, mas sim ligeiramente achatado em uma direção e alongado perpendicularmente a ela, conforme exibido na figura 1 abaixo.

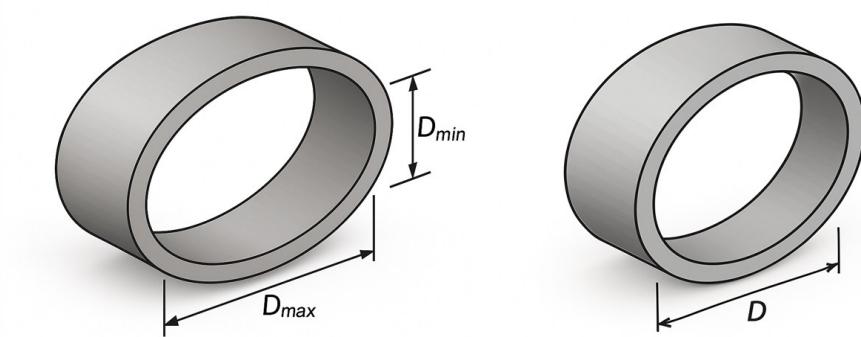


Figura 1 - Comparação entre a seção transversal de um tubo ovalizado com um tubo regular

Fonte: criado pelo autor

Essa definição implica que a ovalização é considerada aqui como uma deformação global da seção, diferindo de amassamentos localizados ou outros defeitos pontuais.

Este fenômeno embora tratado como uma imperfeição geométrica, envolve comportamentos mais complexos. Ele resulta da variação do diâmetro ao longo do perímetro da seção transversal, porém, sua intensidade depende não só da geometria do tubo, mas também das propriedades do material e do modo como foi conformado. Por exemplo, estudos mostram que materiais com diferentes características de dureza, módulo e comportamento plástico apresentam níveis distintos de ovalização quando submetidos ao mesmo tipo de dobra (HASSAN et al, 2020). Também se observa que, após carregamento intenso, parte da ovalização pode permanecer, indicando uma deformação residual (ZHANG, 2019). Em situações práticas, isso aparece em tubos curvados por dobramento e em dutos enterrados sujeitos a flexão ou movimentações do terreno, onde as restrições e apoio influenciam o grau de ovalização (WANG; SADOWSKI; ROTTER, 2018). Além disso, esse fenômeno em estágio inicial atua

como uma imperfeição estrutural, reduzindo a carga de colapso efetiva do tubo (WANG; SADOWSKI; ROTTER, 2018).

A medida da ovalização é geralmente expressa por uma razão adimensional ou em forma percentual, obtida a partir da diferença entre os diâmetros máximo e mínimo da seção transversal do tubo, conforme a equação abaixo:

$$\% \text{ Ovalização} = \frac{D_{\text{máximo}} - D_{\text{mínimo}}}{D_{\text{nominal}}} \times 100\% \quad (1)$$

Onde $D_{\text{máximo}}$ e $D_{\text{mínimo}}$ representam, respectivamente, os maiores e menores diâmetros medidos na seção ovalizada e D_{nominal} é o diâmetro nominal ou médio do tubo. Essa relação fornece uma medida quantitativa do desvio da circularidade perfeita, permitindo avaliar o grau de deformação sofrido pela seção transversal. Quanto maior o percentual de ovalização maior é o desvio da circularidade perfeita.

Outra forma de quantificar o quanto a seção transversal do tubo se desvia da sua forma circular original é a excentricidade (SCHALK; OFNER; O'LEARY, 2007). No contexto de tubos, especialmente os de paredes finas, a excentricidade é normalmente definida pela expressão:

$$e = \frac{D_{\text{máximo}} - D_{\text{mínimo}}}{4} \quad (2)$$

em que e representa a excentricidade, e $D_{\text{máximo}}$ e $D_{\text{mínimo}}$ são, respectivamente, os diâmetros máximo e mínimo medidos na seção transversal deformada. Esse parâmetro fornece uma medida direta do “achatamento” da seção transversal do tubo.

2.2. Tensões em tubos de paredes finas

O cálculo das tensões em tubos circulares de paredes finas submetidos à pressão interna fundamenta-se nos princípios clássicos da teoria dos vasos de pressão, amplamente empregada em análises de dutos, tubulações e reservatórios. Essa formulação parte da hipótese de que o tubo possui geometria perfeitamente cilíndrica, espessura uniforme e comportamento linear-elástico, de modo que a distribuição de tensões na parede possa ser considerada aproximadamente constante ao longo da espessura.

Nessas condições, e assumindo que a razão entre o diâmetro externo e a espessura da parede é elevada ($D/t > 20$), o tubo pode ser tratado como um vaso de parede fina, simplificando significativamente a análise. Sob a ação de uma pressão interna P , desenvolvem-se dois estados principais de tensão: a tensão circumferencial σ_c , responsável por resistir à tendência de expansão radial do tubo, e a tensão longitudinal σ_l , associada à contenção axial da pressão. Essas tensões podem ser obtidas a partir das expressões clássicas a seguir:

$$\sigma_c = \frac{PD}{2t} \quad (3)$$

$$\sigma_l = \frac{PD}{4t} \quad (4)$$

Quando a geometria do tubo se afasta da forma circular ideal, como no caso da ovalização, as formulações clássicas para o cálculo de tensões deixam de representar com precisão o estado real de esforços atuantes. Isso ocorre porque o desvio geométrico rompe a hipótese fundamental de simetria axial assumida na teoria dos vasos de pressão, fazendo com que a carga interna não seja mais distribuída uniformemente ao longo do perímetro. Como consequência, surgem tensões adicionais de flexão na parede do tubo, resultantes da perda de circularidade e da variação local de curvatura, que se somam às tensões de membrana geradas pela pressão interna (SILVA et al, 2025).

Diante disso, torna-se necessário empregar métodos analíticos mais elaborados, capazes de considerar os efeitos da deformação geométrica sobre a distribuição de tensões na parede do tubo. Esses métodos permitem descrever de forma mais fiel a interação entre a pressão interna e a geometria deformada do tubo, levando em conta variações locais de curvatura e a perda de simetria da seção transversal. A análise passa, portanto, a envolver termos adicionais de flexão e ovalização na formulação das tensões, o que resulta em um comportamento estrutural não linear, distinto daquele previsto pelas equações clássicas de vasos de pressão. Em muitos casos, tais abordagens são complementadas por modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, amplamente utilizados para reproduzir o estado real de tensões e deformações em geometrias imperfeitas e avaliar seus efeitos na integridade do componente.

2.3. Metodologia fundamentada nas normas BS 7910

Um método que pode ser aplicado a esse caso é o oferecido pela norma BS 7910 (BSI, 2019) que apresenta uma abordagem consolidada para avaliação de imperfeições geométricas. Nessa norma, a ovalização pode ser tratada de forma equivalente à presença de desalinhamentos axiais e angulares na estrutura, uma vez que ambos os fenômenos geram tensões adicionais de flexão sobrepostas às tensões de membrana existentes. Essa representação permite avaliar o efeito combinado da pressão interna e da deformação geométrica sobre o campo de tensões na parede do tubo. Dependendo da magnitude e da direção desses desalinhamentos, a ovalização pode provocar aumento ou redução das tensões locais, modificando o comportamento estrutural da região afetada (BSI, 2019).

A abordagem proposta pela norma BS 7910 introduz um fator de correção destinado a considerar a intensificação das tensões provocadas pelos efeitos de flexão local decorrentes da ovalização. Esse procedimento busca ajustar o cálculo das tensões nominais para representar de forma mais realista o comportamento estrutural de uma seção deformada. A amplificação das tensões é quantificada por meio do fator de intensificação de tensões (K_{BS}), que depende diretamente da severidade da ovalização e da posição angular (θ) ao longo da circunferência do tubo. Dessa forma, a norma permite incorporar, de modo simplificado, os efeitos de imperfeições geométricas no cálculo das tensões atuantes, possibilitando uma avaliação mais precisa da integridade estrutural e da aceitabilidade de defeitos em dutos submetidos à pressão interna (SILVA et al, 2025).

De acordo com a norma BS7910, a relação entre a tensão de flexão (σ_f) e a tensão de membrana (σ_m), que introduz o fator de intensificação da tensão devida à flexão (K_{BS}), pode ser expressa como:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = K_{BS} = \frac{1,5(D_{max} - D_{min})\cos2\theta}{t \left[1 + CC \left(\frac{P(1 - \nu^2)}{E} \right) \left(\frac{D_m}{t} \right)^3 \right]} \quad (5)$$

onde D_{max} e D_{min} são, respectivamente, os diâmetros externos máximo e mínimo; D_m é o diâmetro médio; t é a espessura da parede do tubo; ν é o coeficiente de Poisson; E é o módulo de elasticidade do material; P é a pressão interna atuante no instante analisado;

e CC é um fator fornecido pela norma API 579-1/ASME FFS-1 (ASME, 2022). Esse fator corresponde ao coeficiente de severidade da ovalização, devendo ser adotado como 0,5 para ovalizações de forma aproximadamente elíptica e como 0,1 para casos de desvios mais pronunciados da circularidade.

Considerando-se o fator K_{BS} , a seguinte equação pode ser utilizada para se obter uma relação entre a tensão máxima numa dada seção e posição angular e tensão circumferencial σ_c nessa mesma seção.

$$\frac{\sigma_{Max}}{\sigma_c} = (1 + K_{BS}) \quad (6)$$

Por meio da equação (5), que define o fator K_{BS} , observa-se que esse parâmetro varia conforme a magnitude da pressão interna aplicada ao tubo. Conforme apresentado na Figura 2, à medida que a pressão aumenta, o tubo tende a recuperar parcialmente sua forma circular, reduzindo a influência da ovalização sobre o estado de tensões. Consequentemente, o valor de K_{BS} diminui, indicando uma menor contribuição das tensões de flexão locais no conjunto de esforços atuantes na parede. Em contrapartida, sob pressões mais baixas, a ovalização tem efeito mais pronunciado, resultando em valores mais elevados de K_{BS} e, portanto, em uma maior intensificação das tensões na região deformada.

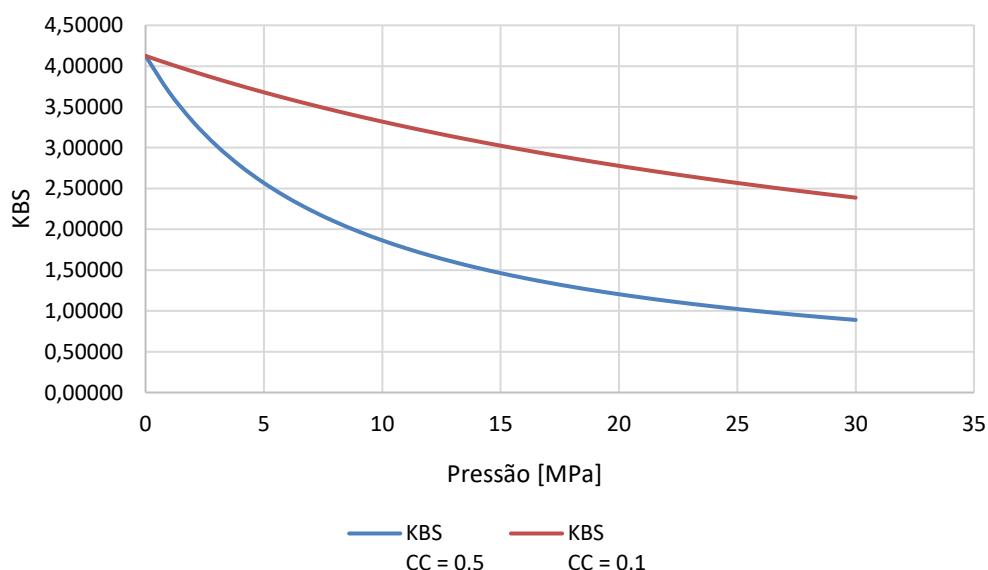


Figura 2 - Gráfico Fator K_{BS} em função da pressão interna do tubo – posição 0°

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

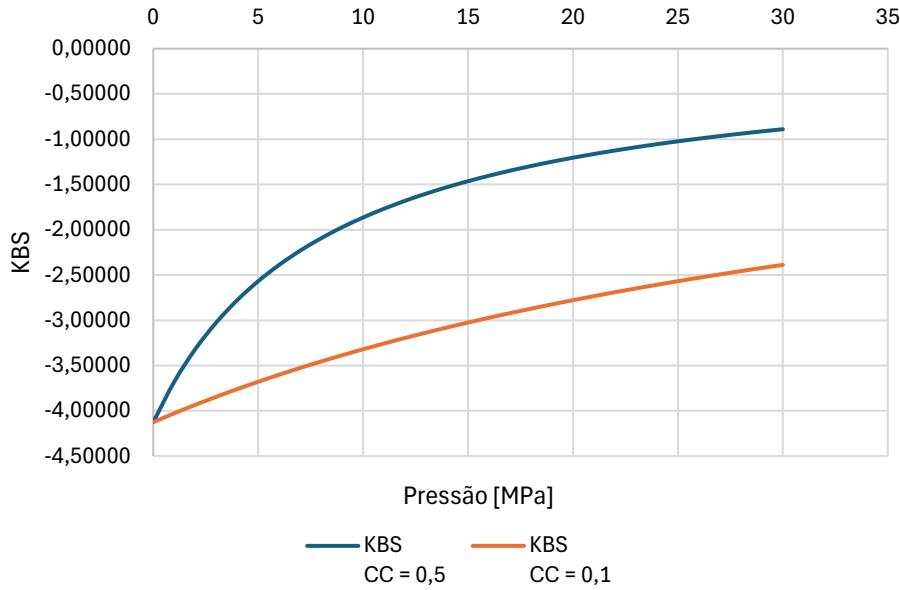


Figura 3 - Gráfico Fator K_{BS} em função da pressão interna do tubo – posição 90°

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

Por meio da formulação apresentada na BS 7910, torna-se possível quantificar a recuperação gradual da forma circular do tubo à medida que a pressão interna é aumentada, utilizando-se a excentricidade como parâmetro de referência. Esse procedimento permite relacionar a intensidade da ovalização com o nível de carregamento, mostrando que, sob pressões mais elevadas, o tubo tende a reassumir parcialmente sua geometria original.

Sabendo que:

$$K_{BS} = \frac{1,5(D_{max} - D_{min})\cos 2\theta}{t \left[1 + CC \left(\frac{P(1 - \nu^2)}{E} \right) \left(\frac{D_m}{t} \right)^3 \right]} = \frac{6(D_{max} - D_{min})\cos 2\theta}{4t \left[1 + CC \left(\frac{P(1 - \nu^2)}{E} \right) \left(\frac{D_m}{t} \right)^3 \right]} \quad (7)$$

Pode-se reescrever a expressão (7), explicitando a relação entre o fator K_{BS} e a excentricidade, como:

$$K_{BS} = \frac{6(e)\cos 2\theta}{t \left[1 + CC \left(\frac{P(1 - \nu^2)}{E} \right) \left(\frac{D_m}{t} \right)^3 \right]} \quad (8)$$

$$e = \frac{K_{BS}t \left[1 + CC \left(\frac{P(1 - \nu^2)}{E} \right) \left(\frac{D_m}{t} \right)^3 \right]}{6\cos 2\theta} \quad (9)$$

Analisando o tubo não pressurizado e na posição 0° , obtemos a seguinte relação entre o fator K_{BS} e excentricidade do tubo:

$$e = \frac{K_{BS}t}{6} \quad (10)$$

Por meio da equação (10), é possível estimar a excentricidade do tubo em função do fator K_{BS} , estabelecendo uma relação direta entre a deformação geométrica e a intensidade das tensões atuantes. Como o fator K_{BS} é definido em função da pressão interna aplicada ao tubo, pode-se observar que a excentricidade tende a diminuir à medida que a pressão aumenta, indicando uma recuperação gradual da forma circular.

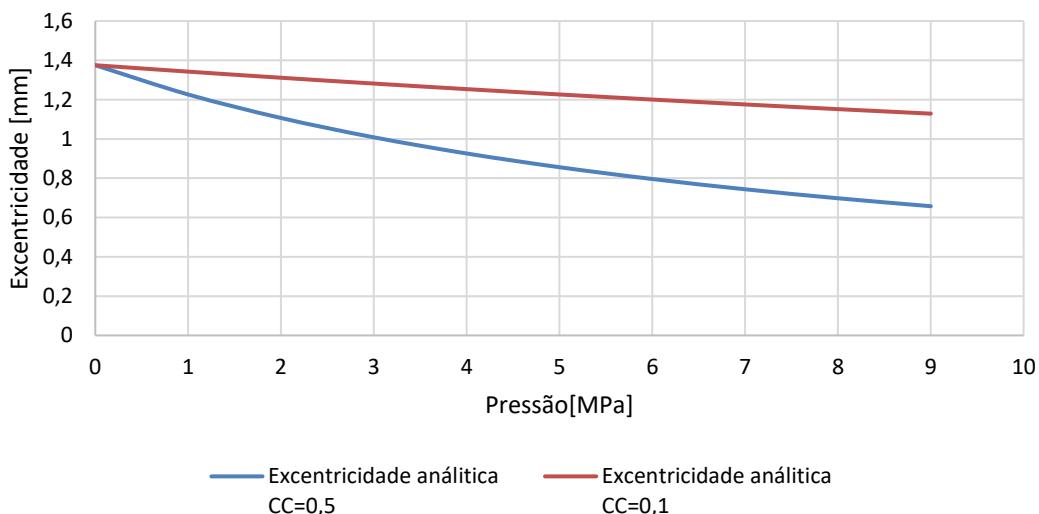


Figura 4 - Gráfico Excentricidade do tubo em função da pressão

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

2.4. Metodologia fundamentada na teoria de Resistência dos materiais

Outra abordagem possível para estimar a variação do perfil de tensões na parede do tubo causada pela ovalização consiste na aplicação das fórmulas clássicas da resistência dos materiais, permitindo avaliar o efeito da flexão adicional gerada pela deformação geométrica. A partir desse procedimento, pode-se determinar um fator teórico de intensificação de tensões (K_t), que representa o aumento relativo das tensões em relação ao valor nominal obtido para um tubo perfeitamente circular.

A tensão de flexão atuante na parede do tubo pode ser obtida a partir das relações clássicas de resistência dos materiais, conforme a expressão:

$$\sigma_{flexão} = \frac{Mc}{I} = \frac{\sigma_c t L e \frac{t}{2}}{\frac{L t^3}{12}} = \sigma_c \left(6 \frac{e}{t} \right) \quad (11)$$

Onde M é o momento fletor gerado pela deformação da seção e I é o momento de inércia da parede do tubo. A equação mostra que a tensão de flexão é proporcional à excentricidade e e inversamente proporcional à espessura da parede t .

Como o fator K_t é definido como a razão entre a tensão de flexão σ_f e a tensão circunferencial σ_c , ele pode ser determinado pela equação (11):

$$K_t = \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{\sigma_c \left(6 \frac{e}{t} \right)}{\sigma_c} = 6 \frac{e}{t} \quad (12)$$

É notável que a abordagem baseada nas formulações teóricas da resistência dos materiais, diferentemente da metodologia proposta pela BS 7910, não considera, em sua expressão, a variação da excentricidade do tubo em função do aumento ou da redução da pressão interna atuante. Essa característica torna o método mais conservador, uma vez que se sabe que a diminuição da excentricidade com o incremento da pressão resulta também na redução das tensões de flexão atuantes na parede do tubo.

O fator K_t pode ser interpretado como um coeficiente de modificação da tensão circunferencial em função da tensão de flexão. Nas duas posições mais críticas de um tubo ovalizado, essas tensões de flexão podem intensificar ou atenuar a tensão circunferencial atuante. Na posição 0° , a flexão provoca um efeito de tração na superfície da parede, o que resulta em uma intensificação da tensão circunferencial σ_c . Já na posição 90° , a flexão gera um efeito de compressão, que reduz a magnitude da tensão circunferencial σ_c naquela região.

Logo, utiliza-se a expressão a seguir para determinar a tensão máxima atuante na parede do tubo:

$$\frac{\sigma_{Máxima}}{\sigma_c} = \left(1 \pm 6 \frac{e}{t} \right) = (1 \pm K_t) \quad (13)$$

Para a posição em que ocorre a intensificação da tensão circunferencial devido ao efeito de tração, aplica-se o sinal positivo

$$\sigma_{Máxima\ tração} = \sigma_c \left(1 + 6 \frac{e}{t}\right) = (1 + K_t) \quad (14)$$

Já para a posição em que há atenuação da tensão circunferencial em razão do efeito de compressão, utiliza-se o sinal negativo

$$\sigma_{Máxima\ compressão} = \sigma_c \left(1 - 6 \frac{e}{t}\right) = (1 - K_t) \quad (15)$$

2.5. Determinação analítica das deformações

Partindo da premissa de que o tubo pode ser modelado como um vaso de pressão cilíndrico de paredes finas e de que a ovalização se mantém aproximadamente constante ao longo do seu comprimento, é possível determinar as deformações circunferenciais e longitudinais a partir dos fatores modificadores de tensão K_t e K_{BS} .

Quando se utiliza o fator K_{BS} , proposto pela norma BS 7910, as deformações são obtidas por meio das seguintes expressões:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} \left[\sigma_c (1 + K_{BS}) - v \left(\frac{\sigma_c}{2} \right) \right] \quad (16)$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} \left[\left(\frac{\sigma_c}{2} \right) - v \sigma_c (1 + K_{BS}) \right] \quad (17)$$

Por outro lado, ao se adotar o fator teórico de intensificação K_t , derivado da formulação clássica da resistência dos materiais, as deformações nas posições mais críticas do tubo ovalizado 0° e 90° são dadas por:

$$\varepsilon_{c\ 0^\circ} = \frac{1}{E} \left[\sigma_c (1 + K_t) - v \left(\frac{\sigma_c}{2} \right) \right] \quad (18)$$

$$\varepsilon_{c\ 90^\circ} = \frac{1}{E} \left[\sigma_c (1 - K_t) - v \left(\frac{\sigma_c}{2} \right) \right] \quad (19)$$

$$\varepsilon_{l\ 0^\circ} = \frac{1}{E} \left[\left(\frac{\sigma_c}{2} \right) - v \sigma_c (1 + K_t) \right] \quad (20)$$

$$\varepsilon_{l,90^\circ} = \frac{1}{E} \left[\left(\frac{\sigma_c}{2} \right) - v \sigma_c (1 - K_t) \right] \quad (21)$$

As deformações determinadas pelas duas abordagens analíticas serão, em seguida, comparadas aos resultados obtidos experimentalmente.

2.6. Metodologias experimentais

A análise do comportamento mecânico de tubos ovalizados submetidos à pressão interna requer métodos experimentais capazes de medir, com precisão, as deformações e deslocamentos resultantes do carregamento. Para tanto, diferentes técnicas podem ser empregadas, variando em princípio de funcionamento, resolução e abrangência espacial. Neste trabalho, foram utilizadas duas metodologias complementares: a Correlação Digital de Imagens (DIC), que permite a obtenção de campos completos de deformação de forma não intrusiva, e a Extensometria Elétrica, que fornece medições pontuais de deformação com alta precisão e resposta imediata. A combinação dessas técnicas possibilita uma avaliação abrangente do comportamento do tubo, permitindo correlacionar os resultados experimentais às previsões teóricas e normativas apresentadas nos capítulos anteriores.

2.6.1. Correlação Digital de Imagem

A técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) é um método óptico e computacional que registra e compara imagens da superfície de um corpo de prova em duas condições distintas, a de referência e a deformada. A partir dessa comparação, é possível determinar os deslocamentos ocorridos durante a aplicação do carregamento e, por diferenciação, obter o campo de deformações na superfície do material, permitindo uma análise detalhada de seu comportamento quando submetido a solicitações mecânicas (ALVES, 2025).

Para que a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) consiga rastrear o movimento da superfície durante a aplicação de carga, é necessário que o software identifique padrões únicos em cada região da imagem, conforme ilustrado na Figura 5. Como a maioria dos materiais apresenta superfícies homogêneas e com baixo contraste, torna-se indispensável criar artificialmente um padrão de pontos aleatórios (*speckle pattern*), que sirva como referência visual para o algoritmo de correlação. Esse padrão

deve ser aplicado diretamente sobre a superfície do corpo de prova, garantindo boa aderência e contraste entre os pontos, de modo a permitir a detecção precisa dos deslocamentos e deformações.

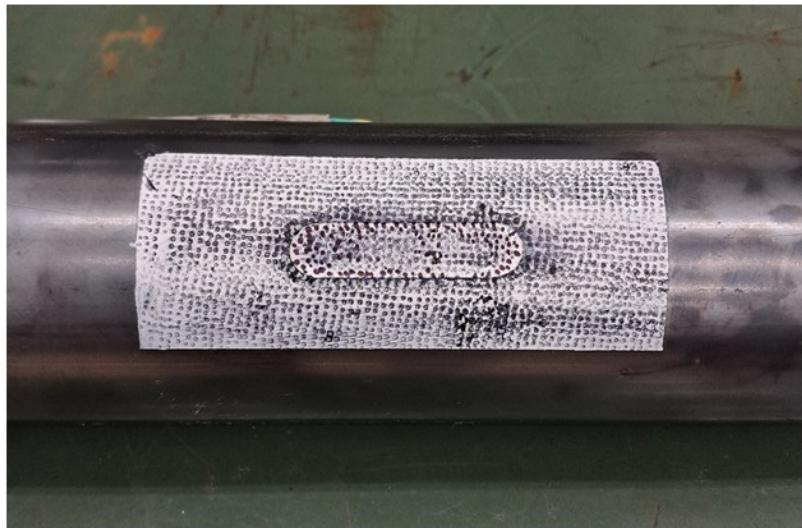


Figura 5- Exemplo de Speckle pattern criado na área de interesse de um vaso de pressão

Fonte: (ALVES, 2025)

Para que o método apresente resultados confiáveis, o *speckle pattern* deve possuir uma densidade de pontos próxima de 50%. Densidades muito baixas ou excessivamente altas dificultam o trabalho do algoritmo de correlação, que identifica a correspondência entre regiões da imagem a partir das variações de intensidade luminosa em tons de cinza, ou seja, das diferenças entre as áreas claras e escuras do padrão aplicado. (ALVES, 2025)

O tamanho e a densidade dos pontos contidos em cada *subset* exercem influência direta na qualidade do *speckle pattern* e, consequentemente, na precisão das medições obtidas pela DIC (CRAMMOND; BOYD; DULIEU-BARTON, 2013). Esse padrão pode ser produzido por diferentes métodos, sendo os mais comuns: a aplicação de tinta preta em spray sobre uma base branca, o uso de rolos texturizados com padrões de pontos sobre superfícies previamente pintadas de branco, ou ainda a utilização de adesivos impressos gerados por softwares específicos para criação de *speckle patterns* artificiais. A Figura 6 ilustra exemplos desses padrões produzidos com o software da Correlated Solutions, Inc. (CORRELATED SOLUTIONS, 2017).

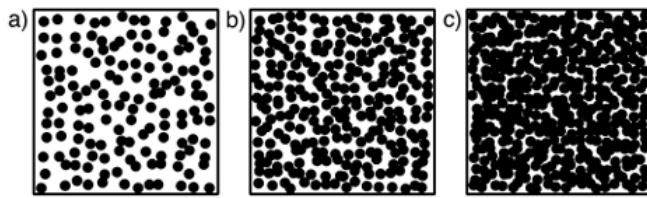


Figura 6 - Comparação entre *speckle patterns* com densidade de pontos a) baixa, b) ideal, e c) muito alta
Fonte: (CORRELATED SOLUTIONS, 2017).

O princípio fundamental da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) consiste em estabelecer uma correspondência entre a configuração de referência e a configuração deformada da superfície analisada, por meio da comparação de múltiplas janelas de correlação, conhecidas como *subsets*.

As janelas de correlação, ou *subsets*, são pequenas regiões da imagem utilizadas pelo software de DIC para rastrear o movimento da superfície durante o ensaio. Cada *subset* contém um conjunto único de variações de intensidade, originadas pelo padrão de pontos do *speckle pattern*, que funciona como uma identificação única daquela área. Durante a análise, o algoritmo procura esse mesmo padrão na imagem capturada após a deformação, determinando o quanto e em que direção o *subset* se deslocou. A partir desses deslocamentos locais, o programa reconstrói o campo completo de deformações na superfície do corpo de prova.

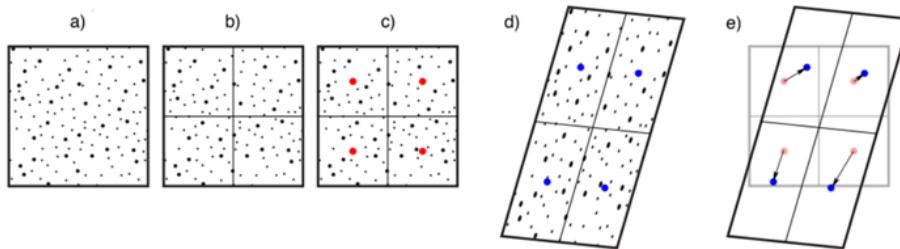


Figura 7 - Mapeamento DIC a partir de múltiplas janelas de correlação.
Fonte: (LEPAGE, 2017)

Na Figura 7 é possível compreender, de forma simplificada, as etapas envolvidas na aplicação da técnica de DIC. Inicialmente, o usuário deve selecionar no software a região de interesse sobre a qual será feita a análise do *speckle pattern*. Em seguida, essa região é dividida em pequenas áreas quadradas, chamadas *subsets*, definindo-se também o passo (*step*), que corresponde à distância entre os centros de cada janela de correlação. Após essa preparação, o sistema de câmeras captura uma imagem inicial, que representa a configuração de referência da superfície. Na sequência, o corpo de prova é submetido ao carregamento mecânico, sofrendo deformações, e uma nova imagem é adquirida,

agora correspondente à configuração deformada. Por fim, o algoritmo de correlação compara as duas imagens e determina o deslocamento de cada *subset*, permitindo ao software reconstruir o campo completo de deslocamentos da superfície analisada.

O processo de correlação na técnica DIC consiste em encontrar a posição correspondente de cada janela de correlação (*subset*) entre as imagens de referência e deformada. Para isso, o software utiliza uma função matemática de comparação, como a mostrada na equação 22, que mede o quanto uma região da imagem deformada se parece com a região original.

$$C(x, y, x', y') = \sum \frac{[g(x, y) - h(x', y')]^2}{[g(x, y)]^2} \quad (22)$$

Nessa função, $g(x, y)$ representa a intensidade de luz dos pixels na imagem de referência, enquanto $h(x', y')$ representa a intensidade dos mesmos pontos na imagem deformada. O algoritmo então varia a posição da janela na imagem deformada até encontrar a correspondência que produz o menor valor da função $C(x, y, x', y')$, ou seja, o ponto em que as duas regiões são mais semelhantes.

A partir desse processo, o software determina os deslocamentos horizontais e verticais de cada *subset*, definidos por:

$$x' = x + u(x, y) \quad (23)$$

$$y' = y + v(x, y). \quad (24)$$

As equações (23) e (24) que representam os deslocamentos horizontais e verticais de cada subset podem ser expandidas em série de *Taylor*:

$$x' = x_0 + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y = x_0 + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (25)$$

$$y' = y_0 + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y = y_0 + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad (26)$$

Nesse contexto, u e v representam os deslocamentos do corpo rígido nas direções x e y , respectivamente. As derivadas parciais $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$ e $\frac{\partial v}{\partial y}$ correspondem aos gradientes de deslocamento de primeira ordem, que indicam como os deslocamentos variam em cada direção.

Já os termos $\Delta x = x - x_0$ e $\Delta y = y - y_0$ expressam a diferença de posição entre um ponto de referência e a sua nova posição após a deformação.

A figura 8 apresenta de forma esquemática o mapeamento bidimensional realizado entre as configurações de referência e deformada, evidenciando como cada *subset* da imagem inicial é associado à sua nova posição após a deformação.

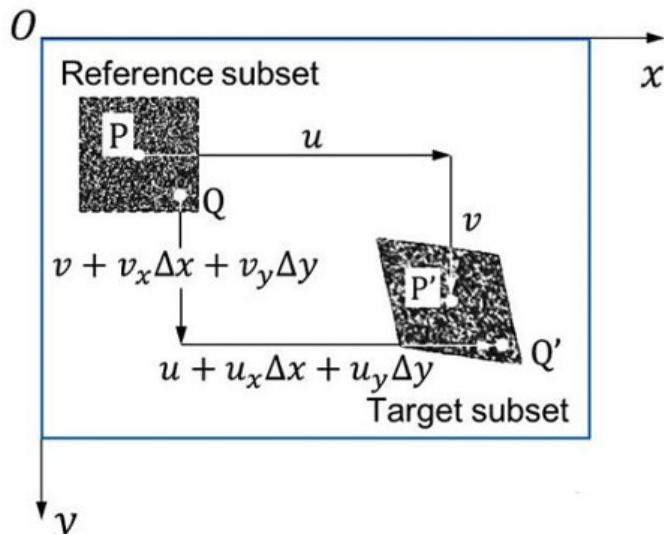


Figura 8 - Mapeamento bidimensional dos deslocamentos de uma janela de correlação

Fonte: (VIEIRA, 2024)

Ao aplicar a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC), é importante considerar alguns parâmetros que influenciam diretamente a qualidade da medição. Um dos principais é o tamanho do *subset*, que deve ser escolhido de modo a equilibrar o mapeamento eficiente da superfície e a resolução espacial desejada. *Subsets* maiores facilitam o rastreamento dos padrões da superfície, mas reduzem a capacidade de detectar variações locais de deformação; já *subsets* muito pequenos aumentam a resolução, porém podem dificultar a identificação precisa das regiões correspondentes entre as imagens. Outro fator importante é o valor do *step*, que define a distância entre os centros das janelas de correlação. Um *step* muito grande pode deixar áreas da superfície sem análise, enquanto um *step* excessivamente pequeno gera sobreposição

entre *subsets*, elevando o tempo de processamento e o custo computacional sem ganhos significativos na precisão dos resultados. (ALVES, 2025)

Tanto o *subset* quanto o *step* são expressos em pixels, e, conforme recomendado por Sutton, Orteu e Schreier (2009), cada subset deve conter pelo menos três pontos distinguíveis do speckle pattern. A Figura 9 ilustra a relação entre o tamanho dos subsets e o refinamento do *step* na definição da malha de correlação.

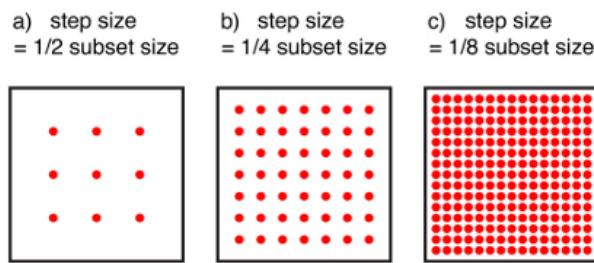


Figura 9 - Relação entre tamanhos de subset e step.

Fonte: (LEPAGE, 2017)

Existem três variações principais da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) ilustradas na Figura 10: a bidimensional (2D-DIC), a tridimensional (3D-DIC) e a Correlação Digital de Volume (DVC). A 2D-DIC utiliza apenas uma câmera e é indicada para situações em que os deslocamentos ocorrem predominantemente no plano da superfície observada, sendo a câmera posicionada de forma perpendicular ou paralela a esse plano, dependendo do tipo de ensaio. Já a 3D-DIC, também conhecida como DIC estéreo, faz uso de duas câmeras dispostas em ângulo uma em relação à outra, formando um sistema de visão estéreo capaz de capturar, além dos deslocamentos no plano, também as variações fora do plano (out-of-plane). Essa configuração permite medir deformações com maior precisão, embora restritas à superfície do corpo de prova. Por fim, a DVC (Digital Volume Correlation) amplia o princípio da DIC para o interior de materiais sólidos, possibilitando a análise de deslocamentos e deformações em três dimensões no volume do corpo, desde que sejam utilizados equipamentos capazes de obter imagens internas, como sistemas de tomografia computadorizada por raios X, e algoritmos específicos para a correlação volumétrica (ALVES, 2025).

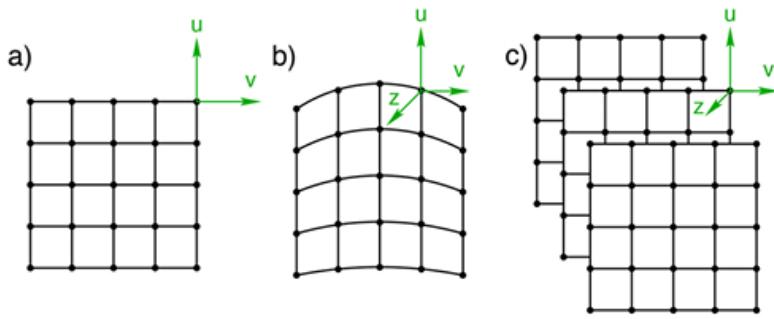


Figura 10 - Principais variações da técnica DIC: a) 2D, b) 3D e c) volumétrica (DVC).

Fonte: (LEPAGE, 2017)

2.6.2. Extensometria

A extensometria elétrica é uma técnica consolidada para a medição de deformações locais em materiais submetidos a carregamentos mecânicos, sendo amplamente utilizada desde a década de 1930 em estudos de análise de tensões, validação experimental e monitoramento estrutural. O método continua sendo amplamente adotado devido à sua alta precisão, versatilidade e à capacidade de registrar deformações da ordem de micrômetros em diferentes tipos de materiais e geometrias (DALLY & RILEY, 1991). Em ensaios com tubos de parede fina submetidos à pressão interna, como no caso da ovalização, a extensometria tem papel essencial ao fornecer medições pontuais em regiões específicas, permitindo comparações diretas entre os resultados experimentais, analíticos e numéricos.

O extensômetro elétrico de resistência (*strain gage*) baseia-se no princípio de que a resistência elétrica de um condutor varia quando o material ao qual ele está aderido sofre deformação. Essa relação é expressa por:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (27)$$

em que ΔR é a variação da resistência elétrica, R é a resistência inicial, ε representa a deformação mecânica e K é o fator *gage*, cujo valor depende do material e da geometria da grade metálica. Para extensômetros metálicos convencionais, o valor de K situa-se tipicamente entre 2,0 e 2,2 (DALLY & RILEY, 1991).

O sensor é composto por uma grade metálica extremamente fina, geralmente fabricada em Constantan, montada sobre um suporte isolante. Quando o material ao qual está fixado se deforma, essa grade sofre alongamento ou contração, o que provoca

uma variação proporcional na resistência elétrica. Como essa variação é muito pequena, geralmente da ordem de milésimos de ohm, utiliza-se um circuito elétrico de alta sensibilidade para sua detecção, normalmente baseado na ponte de Wheatstone (DALLY & RILEY, 1991, VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

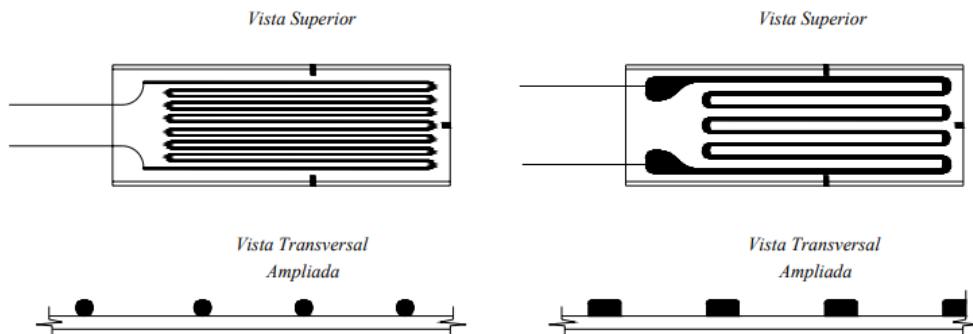


Figura 11 - Extensômetro de fio (esquerda) e de lâmina (direita)

Fonte: (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004)

A ponte de Wheatstone é utilizada para converter pequenas variações de resistência em sinais elétricos mensuráveis. Ela consiste em quatro resistores dispostos em ponte, dos quais um ou mais podem ser extensômetros ativos. A saída da ponte fornece uma diferença de potencial proporcional à deformação registrada pelo sensor.

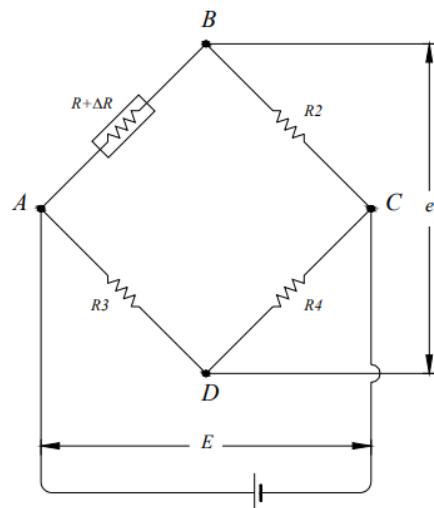


Figura 12 - Circuito em uma ponte de Wheatstone

Fonte: (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004)

As configurações mais comuns da ponte de Wheatstone são:

a) Um quarto de ponte

Utiliza um único extensômetro ativo. É a configuração mais simples, porém a mais sensível a variações térmicas e a ruídos. Requer uso de extensômetros com compensação térmica ou resistência dummy para estabilizar o sinal (OMEGA ENGINEERING, 2008, VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

b) Meia ponte

Emprega dois extensômetros ativos, colocados em posições opostas ou complementares. Essa configuração reduz significativamente os efeitos da temperatura, pois variações térmicas tendem a afetar ambos os sensores da mesma forma (OMEGA ENGINEERING, 2008).

c) Ponte completa

Utiliza quatro extensômetros ativos, proporcionando a maior sensibilidade e estabilidade do sinal. É recomendada para medições de alta precisão e para componentes sujeitos a estados de deformação mais complexos, como tubos em pressurização interna (DALLY & RILEY, 1991, VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

A instalação do extensômetro é uma etapa crítica, pois influencia diretamente a qualidade e a confiabilidade das medições. De acordo com os manuais da Vishay Micro-Measurements (VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018), a preparação adequada da superfície deve seguir uma sequência que inclui:

1. lixamento fino, para uniformizar a área de aplicação;
2. limpeza química com solventes, removendo impurezas e resíduos;
3. eliminação de óleos, poeira e oxidação;
4. marcação precisa da orientação de medição.

A orientação correta do extensômetro é fundamental, uma vez que ele mede a deformação apenas ao longo de seu eixo sensível. Pequenos desvios de alinhamento podem introduzir componentes indevidos de deformação, comprometendo a exatidão e a reproduzibilidade dos resultados (OMEGA ENGINEERING, 2008).

Após o posicionamento do sensor, aplica-se um adesivo específico, geralmente cianoacrilato ou epóxi, para assegurar a transferência adequada da deformação entre o

material e a grade metálica. Esse processo deve ser realizado sob pressão uniforme e respeitando o tempo de cura recomendado, conforme os procedimentos descritos nos manuais de aplicação (VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

A extensometria elétrica apresenta diversas vantagens que justificam seu amplo uso em medições experimentais. Entre seus principais benefícios, destacam-se a alta precisão e sensibilidade na detecção de pequenas deformações, a rápida resposta dinâmica e o baixo custo relativo dos sensores. Além disso, o método pode ser aplicado em ambientes agressivos, desde que o sensor receba a devida proteção, e possui boa compatibilidade com sistemas de aquisição digitais, o que facilita sua integração a procedimentos de monitoramento e análise automatizados (OMEGA ENGINEERING, 2008, VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

Apesar dessas qualidades, a técnica também apresenta algumas limitações. O extensômetro mede apenas deformações locais, não fornecendo informações sobre o campo completo de deformações. Além disso, o sensor é sensível a variações térmicas, exigindo compensações adequadas para evitar erros de leitura. A instalação também pode ser considerada um desafio, especialmente em superfícies curvas, como tubos, e há ainda a possibilidade de falha em ensaios prolongados, decorrente da fadiga do adesivo ou da grade metálica do sensor (DALLY & RILEY, 1991, VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, 2018).

3. Ensaios Mecânicos Realizados

No experimento realizado por Neimar (2016), um tubo com 76 mm de diâmetro nominal e 2 mm de espessura, previamente ovalizado, foi submetido a duas etapas de ensaios utilizando metodologias distintas. No primeiro dia, o tubo foi pressurizado em intervalos de 1 MPa até 6 MPa , e seu comportamento mecânico foi avaliado por meio da técnica de correlação digital de imagens (DIC). Já no segundo dia de ensaios, empregou-se a extensometria elétrica para analisar a resposta mecânica do tubo quando submetido a pressões variando de 1 MPa a 9 MPa .

Para a aplicação da pressão interna, utilizou-se uma bomba hidropneumática, acionada por meio de uma linha de ar comprimido.



Figura 13 - Bomba hidropneumática para aplicação da pressão interna.

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Para gerar o defeito geométrico no tubo, utilizou-se um calço de madeira de seção quadrada, com aproximadamente 10 cm de largura, posicionado de modo a induzir a deformação desejada. A definição da carga necessária para produzir a ovalização foi baseada em modelos matemáticos que relacionam o esforço aplicado por meio de punções com a reação desenvolvida na parede do tubo, complementados por resultados prévios de ensaios envolvendo amassamentos controlados. (NEIMAR, 2016)

A figura a seguir apresenta um croqui ilustrando o procedimento adotado para a indução da ovalização no tubo ensaiado.

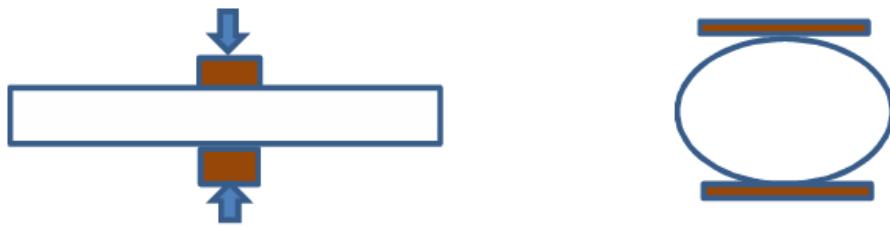


Figura 14 - Método de criação da ovalização simples por compressão

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Apesar do trabalho necessário para estimar a carga capaz de gerar a ovalização desejada, o processo de aplicação do carregamento não foi rigidamente controlado, o objetivo principal era atingir uma ovalização máxima próxima de 5%. Após a aplicação da carga, foram medidos os diâmetros máximos e mínimos ao longo do comprimento do tubo, resultando nas médias apresentadas a seguir para ambas as grandezas:

Diâmetro máximo médio [mm]	Diâmetro mínimo médio [mm]
79,25	73,75

Tabela 1 - Dimensões médias do tubo após o procedimento de ovalização induzida

Fonte: (NEIMAR, 2016)

As dimensões medidas resultaram, pela aplicação da equação (1), em uma ovalização global e distribuída de 7,2%. Já pela equação 2, obteve-se uma excentricidade de 1,375 mm.

3.1. Procedimentos experimentais da técnica DIC

Conforme apresentado na Seção 2.5.1, a aplicação da técnica de correlação digital de imagens (DIC) exige uma preparação prévia do espécime. Para que o algoritmo de correlação possa identificar e acompanhar os deslocamentos na superfície, é necessário criar um padrão visual aleatório (speckle pattern) que sirva como referência. Neste trabalho, optou-se por utilizar uma base de tinta branca fosca, sobre a qual foi aplicado um spray de tinta preta fosca, gerando o padrão de pontos adequado para o processamento das imagens, conforme ilustrado na Figura 15.



Figura 15 - Preparação do espécime para a técnica DIC

Fonte: (NEIMAR, 2016)

A técnica de correlação digital de imagens adotada no experimento foi a DIC estéreo (3D-DIC). Dessa forma, utilizaram-se duas câmeras posicionadas em ângulos distintos, permitindo a observação e a medição das deformações ao longo da superfície do tubo, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16 - Montagem do sistema de câmeras para aplicação da técnica 3D-DIC

Fonte: (NEIMAR, 2016)

A calibração da posição das câmeras em relação a um alvo de referência foi realizada por meio de uma placa plana contendo marcações em espaçamentos previamente conhecidos.

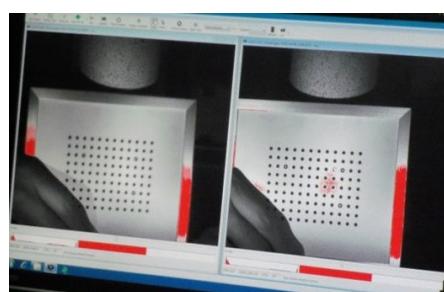


Figura 17 - Calibração do software DIC

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Nos ensaios realizados, a pressurização interna do tubo foi conduzida de forma gradual, iniciando-se em 0 MPa e avançando até 6 MPa, sempre com acréscimos de 1 MPa entre cada etapa. Em cada novo nível de pressão, as duas câmeras sincronizadas capturavam sequências de imagens de alta definição da superfície do tubo. Essas imagens foram então tratadas no software VIC-3D (Correlated Solutions), que permitiu reconstruir os campos de deslocamentos e deformações ao longo do tubo ovalizado.

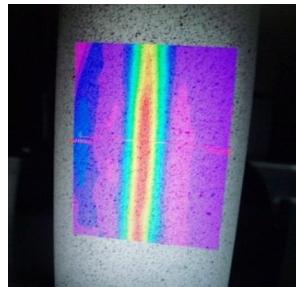


Figura 18 - Campo de deformações obtido a partir do processamento das imagens pelo método DIC

Fonte: (NEIMAR, 2016)

3.2. Procedimentos experimentais da técnica de extensometria

Para a medição das deformações por meio da extensometria, foram instalados dois strain gages, um orientado na direção longitudinal e na posição 90° e outro posicionado na direção circunferencial e na posição 0°. A Figura 13 apresenta a disposição desses sensores assim como a posição das câmeras utilizadas na aquisição dos dados pelo método de correlação digital de imagens.

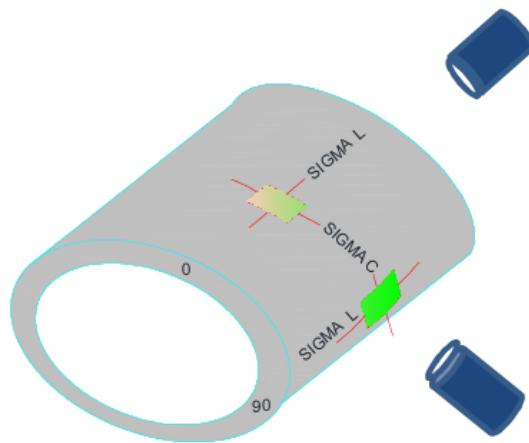


Figura 19 - Disposição dos *strain gages* nas posições 0° e 90° e posicionamento das câmeras utilizadas no sistema 3D-DIC

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Conforme apresentado na Seção 2.5.2, a instalação dos strain gages na superfície do espécime é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das medições. Para isso, foram adotados os seguintes procedimentos durante a fixação dos extensômetros:

1. Lixar a superfície do tubo utilizando lixa grão 220, preparando a área para adesão.
2. Limpar a região lixada com acetona pura, aplicando o solvente com algodão para remover resíduos e impurezas.
3. Utilizar uma fita adesiva para posicionar o *strain gage*, mantendo a resistência metálica voltada para cima.
4. Alinhar o *strain gage* sobre a área preparada, garantindo o correto posicionamento.
5. Elevar parcialmente o *strain gage* puxando suavemente a fita adesiva.
6. Aplicar uma pequena gota de adesivo Loctite 401 no local onde o sensor será fixado.
7. Reposicionar o *strain gage* sobre a gota de adesivo, utilizando a fita para guiá-lo até a posição correta.
8. Utilizar uma película plástica para pressionar o sensor, espalhando o adesivo uniformemente entre o *strain gage* e a superfície do tubo.
9. Manter pressão leve e constante por aproximadamente cinco minutos, permitindo a cura inicial do adesivo.
10. Raspar cuidadosamente os terminais metálicos do *strain gage* para preparar a área de soldagem.
11. Soldar os fios condutores blindados da seguinte forma:
 - fio vermelho no terminal independente;
 - fios amarelo e verde no terminal em “Y”.

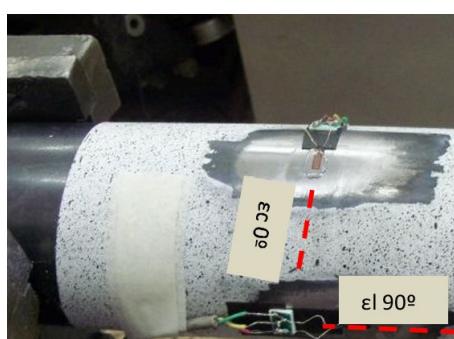


Figura 20 - Arranjo experimental com *strain gages* fixados nas posições 0° e 90°

Fonte: (NEIMAR, 2016)

4. Resultados Experimentais

Os resultados obtidos ao longo dos ensaios descritos no capítulo 3 são apresentados neste capítulo, reunindo as medições experimentais realizadas no tubo ovalizado e submetido à pressurização interna. A forma como o tubo respondeu ao carregamento, é analisada por meio das metodologias descritas no capítulo 2, permitindo a comparação direta entre os dados experimentais, as formulações analíticas e a abordagem numérica desenvolvida.

4.1. Resultados obtidos pela técnica DIC

Para as medições realizadas por meio da técnica de correlação digital de imagens (DIC), foram conduzidos nove ensaios. Em cada um deles, o tubo era pressurizado até o primeiro patamar de carregamento e, em seguida, completamente descarregado antes do início do próximo ciclo. Os carregamentos foram aplicados em patamares de 1 MPa a 6 MPa, com incrementos de 1 MPa entre cada etapa.

As Tabelas 2 e 3 reúnem os dados processados pelo algoritmo DIC para os ensaios realizados nas duas regiões de interesse do tubo. A posição 0° corresponde aos resultados obtidos nos 5º, 6º, 7º e 8º ensaios, enquanto a posição 90° refere-se aos 3º, 4º e 9º ensaios.

PRESSAO MPa	DIC		FOTO		DIC		FOTO		DIC		FOTO		DIC		FOTO		
		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)		ϵ_c ($\mu\epsilon$)	
quinto ensaio																	
0	0	67, 68			0	26, 27			0	40, 41			0	54, 55, 57			
1	68	69			88	28			108	42			197	69			
0		70				29			-134	43				70			
2	341	71			315	30			368	44			329	58			
0	0	72				31			-43	45				59			
3	550	73			584	32			488	46			561	60			
0		74				33			-51	47				61			
4	750	75			816	34			711	48			760	62			
0		76				35			-61	49				63			
5					1499	36			961	50			918	64			
0						37			-29	51				65			
6					2154	38			1223	52			1245	66			
0					0	39			4	53							

Tabela 2 - Dados de saída do algoritmo DIC para deformações circunferenciais na posição 0°

Fonte: (NEIMAR, 2016)

PRESSAO MPa	DIC		FOTO		DIC		FOTO		DIC		FOTO	
	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	terceiro ensaio	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	quarto ensaio	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	nono ensaio	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	terceiro ensaio	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	nono ensaio	$\varepsilon_l(\mu\epsilon)$	nono ensaio
0	0	47, 48	0	57, 58	0	77, 78	0	77, 78	0	79	95	79
1	-34	49	-8	59	30	80	95	79	30	80	95	79
0	50	50	60	60	18	82	30	80	18	82	30	80
2	51	51	61	61	71	81	71	81	71	81	71	81
0	-163	51	-103	61	0	66	-21	85	-21	85	0	83
3	-41	52	62	62	18	82	18	82	18	82	18	82
0	-137	53	-143	63	41	84	41	84	41	84	41	84
0	24	54	64	64	-21	85	-21	85	-21	85	-21	85
4	-225	55	-155	65	-36	86	-36	86	-36	86	-36	86
0	-23	56	0	66	25	88	25	88	25	88	25	88
5					-57	87	-57	87	-57	87	-57	87
0					25	88	25	88	25	88	25	88
6					-90	89	-90	89	-90	89	-90	89
0					56	90	56	90	56	90	56	90

Tabela 3 - Dados de saída do algoritmo DIC para deformações longitudinais na posição 90°

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Para os cálculos adotados neste trabalho, bem como no estudo apresentado por Neimar (NEIMAR, 2016), foram utilizados os dados provenientes do sétimo e do nono ensaio. Esses resultados estão organizados nas Tabelas 4 e 5, apresentadas a seguir, onde ε_c são as deformações circunferenciais, ε_l são as deformações longitudinais e ε_{xy} são as deformações de cisalhamento no plano xy .

Pressão (MPa)	Foto	ε_c ($\mu\epsilon$)	ε_l ($\mu\epsilon$)	ε_{xy} ($\mu\epsilon$)
0	40-41	0	0	0
1	42	108	11	24
0	43	-134	-32	-11
2	44	368	14	33
0	45	-43	-70	7
3	46	488	31	-3
0	47	-51	-88	31
4	48	711	177	38
0	49	-61	-41	16
5	50	961	251	86
0	51	-29	-75	3
6	52	1223	252	13
0	53	4	-42	10

Tabela 4 - Dados de Saída do Algoritmo DIC para o 7º ensaio

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Pressão (MPa)	Foto	ε_c ($\mu\epsilon$)	ε_l ($\mu\epsilon$)	ε_{xy} ($\mu\epsilon$)
0	77-78	0	0	0
1	79	-120	95	-33
0	80	-29	30	20
2	81	-152	71	-10
0	82	-51	18	-8
3	83	-263	0	13
0	84	-59	41	19
4	85	-284	-21	31
0	86	-29	-36	29
5	87	-277	-57	17
0	88	-66	25	16
6	89	-293	-90	-5
0	90	-205	56	-10

Tabela 5 - Dados de Saída do Algoritmo DIC para o 9º ensaio

Fonte: (NEIMAR, 2016)

4.2. Resultados obtidos pela técnica extensometria

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados obtidos nos ensaios realizados por meio da técnica de extensometria elétrica. De modo semelhante ao procedimento adotado para os ensaios com DIC, o tubo foi pressurizado até o primeiro patamar de carregamento e, em seguida, totalmente descarregado antes do início de cada novo ciclo. A diferença é que, nesta etapa, o carregamento seguiu até um patamar máximo de 9 MPa, permitindo avaliar o comportamento do tubo sob níveis de pressão mais elevados.

Pressão (MPa)	ε_l ($\mu\epsilon$)
0	0
1	-11
0	5
2	-36
0	6
3	-56
0	4
4	-75
0	5
5	-85
0	4
6	-95
0	2
7	-111
0	-18
8	-143
0	-46
9	-130
0	-60

Tabela 6 - Deformações longitudinais medidas pelos extensômetros na posição 90º

Fonte: (NEIMAR, 2016)

Pressão (MPa)	ε_c ($\mu\epsilon$)
0	0
1	95
0	-45
2	350
0	-51
3	586
0	-35
4	849
0	-38
5	1054
0	-22
6	1327
0	108
7	1922
0	529
8	2546
0	938
9	3241
0	1725

Tabela 7 - Deformações circunferenciais medidas pelos extensômetros na posição 0°

Fonte: (NEIMAR, 2016)

4.3. Comparação dos Resultados experimentais e analíticos

Com os valores de deformação obtidos experimentalmente, torna-se possível compará-los diretamente com aqueles calculados de forma analítica a partir dos métodos apresentados nas Seções 2.3, 2.4 e 2.5. Essa comparação permite avaliar em que medida as abordagens analíticas conseguem representar o comportamento físico real do tubo ovalizado sob pressão interna.

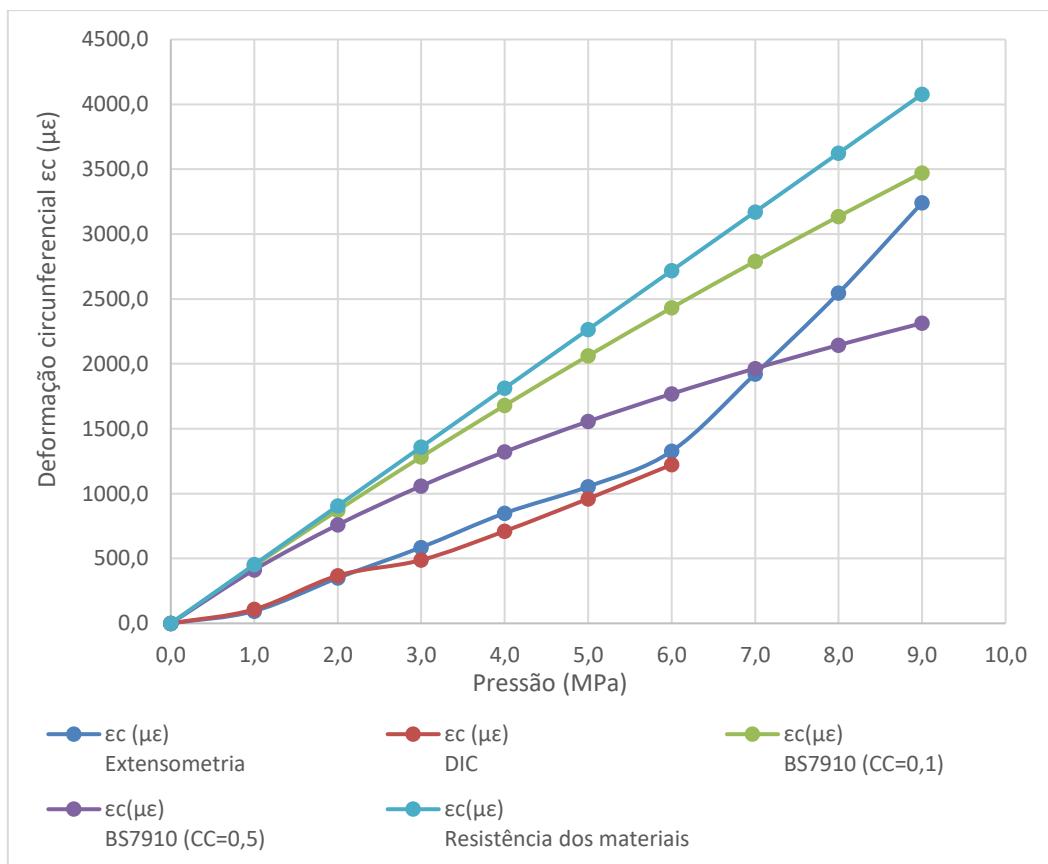
4.3.1. Comparação entre as deformações

Na Tabela 8 são apresentados os valores das deformações circunferenciais na posição 0°, obtidos a partir de três abordagens: o cálculo analítico baseado na formulação da norma BS 7910 (BSI, 2019), o método derivado das equações clássicas da resistência dos materiais e, por fim, as deformações medidas experimentalmente pelas técnicas de correlação digital de imagens (DIC) e extensometria elétrica.

Pressão (MPa)	ε_c ($\mu\epsilon$) Extensometria	ε_c ($\mu\epsilon$) DIC	ε_c ($\mu\epsilon$) BS7910 (CC=0,1)	ε_c ($\mu\epsilon$) BS7910 (CC=0,5)	ε_c ($\mu\epsilon$) Resistência dos materiais
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	95,0	108,0	444,2	412,5	453,1
2,0	350,0	368,0	871,4	759,5	906,2
3,0	586,0	488,0	1282,8	1058,6	1359,2
4,0	849,0	711,0	1679,4	1321,5	1812,3
5,0	1054,0	961,0	2062,3	1556,4	2265,4
6,0	1327,0	1223,0	2432,2	1769,2	2718,5
7,0	1922,0	-	2789,9	1964,3	3171,6
8,0	2546,0	-	3136,3	2144,8	3624,6
9,0	3241,0	-	3472,0	2313,4	4077,7

Tabela 8 - Deformações circunferenciais em $\mu\epsilon$ na posição angular 0°

A figura 21 a seguir sintetiza os resultados mostrados na tabela, permitindo avaliar de maneira comparativa o comportamento das deformações conforme cada abordagem considerada

Figura 21 - Gráfico pressão interna versus deformação circunferencial ($\mu\epsilon$) na posição 0°

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

Observa-se uma boa concordância entre os valores de deformação obtidos pela técnica de DIC e aqueles medidos pelo extensômetro elétrico, o que reforça a consistência dos dados experimentais. As diferenças mais expressivas aparecem quando esses resultados são comparados com as previsões analíticas, o que pode ser atribuído às

simplificações adotadas nos modelos teóricos, especialmente à suposição de que as tensões longitudinais não sofrem influência significativa da ovalização do tubo. (NEIMAR, 2016)

Na Tabela 9 são apresentados os valores das deformações circunferenciais na posição 90°, obtidos pelas três abordagens consideradas ao longo deste trabalho. Para essa região, entretanto, as deformações experimentais foram registradas apenas por meio da técnica de correlação digital de imagens (DIC), uma vez que não houve instrumentação extensométrica instalada nesse ponto. (NEIMAR, 2016)

Pressão (MPa)	$\varepsilon_c (\mu\epsilon)$ DIC	$\varepsilon_c (\mu\epsilon)$ BS7910 (CC=0,1)	$\varepsilon_c (\mu\epsilon)$ BS7910 (CC=0,5)	$\varepsilon_c (\mu\epsilon)$ Resistência dos materiais
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	-120,0	-289,4	-257,6	-298,3
2,0	-152,0	-561,8	-449,9	-596,5
3,0	-263,0	-818,3	-594,2	-894,8
4,0	-284,0	-1060,2	-702,3	-1193,0
5,0	-277,0	-1288,2	-782,3	-1491,3
6,0	-293,0	-1503,2	-840,3	-1789,6

Tabela 9 - Deformações circunferenciais em $\mu\epsilon$ na posição angular 90°

O gráfico a seguir sintetiza os resultados mostrados na tabela 9.

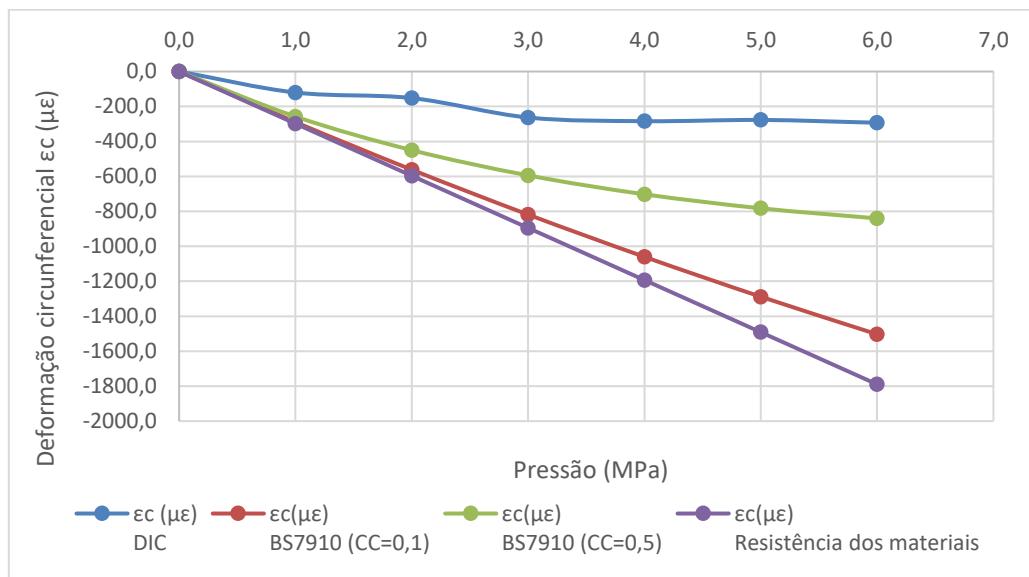


Figura 22 - Gráfico pressão interna versus deformação circunferencial ($\mu\epsilon$) na posição 90°

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

Observa-se que, embora existam diferenças entre os valores experimentais obtidos pela técnica de DIC e aqueles previstos pelas abordagens analíticas, os resultados da correlação digital de imagens reforçam a expectativa teórica de que, em

um tubo ovalizado submetido à pressurização interna, a região correspondente à posição 90° tende a apresentar predominantemente tensões de compressão.

A Tabela 10 a seguir reúne os valores das deformações longitudinais na posição 0°, calculados pelas três metodologias analisadas neste estudo. Nesta região específica, os dados experimentais disponíveis são exclusivamente aqueles obtidos pela técnica de correlação digital de imagens (DIC), já que não houve instalação de extensômetros nesse ponto do tubo.

Pressão (MPa)	$\varepsilon_l (\mu\epsilon)$ DIC	$\varepsilon_l (\mu\epsilon)$ BS7910 (CC=0,1)	$\varepsilon_l (\mu\epsilon)$ BS7910 (CC=0,5)	$\varepsilon_l (\mu\epsilon)$ Resistência dos materiais
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	11,0	-91,8	-82,3	-94,5
2,0	14,0	-178,5	-145,0	-189,0
3,0	31,0	-260,5	-193,3	-283,5
4,0	177,0	-338,1	-230,7	-377,9
5,0	251,0	-411,5	-259,7	-472,4
6,0	252,0	-481,0	-282,1	-566,9

Tabela 10 - Deformações longitudinais em $\mu\epsilon$ na posição angular 0°

A figura 23 apresenta os resultados correspondentes aos valores listados na Tabela 10.

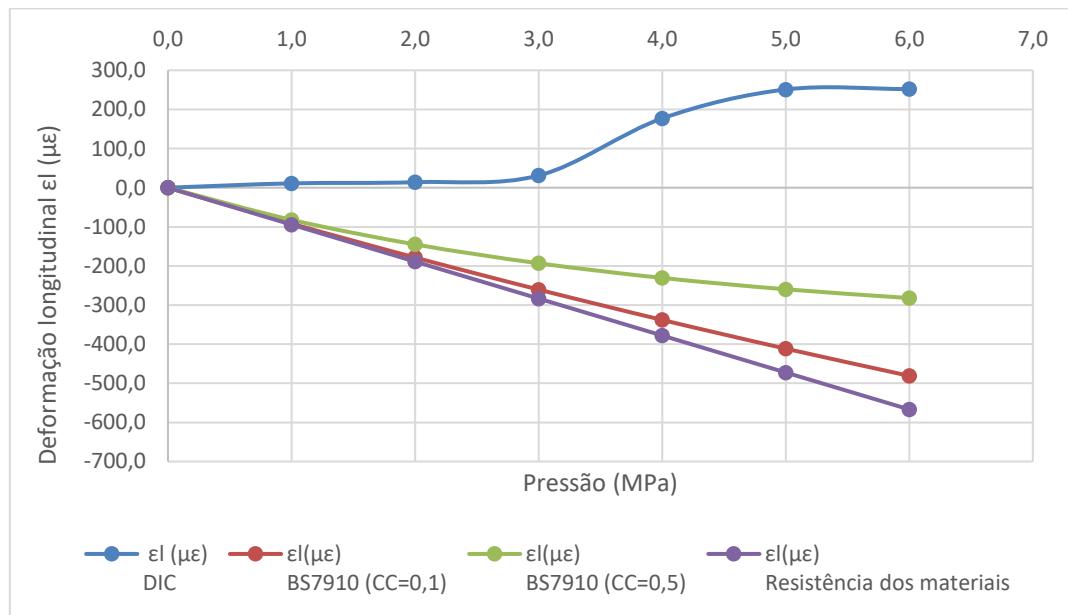


Figura 23 - Gráfico pressão interna versus deformação longitudinal ($\mu\epsilon$) na posição 0°

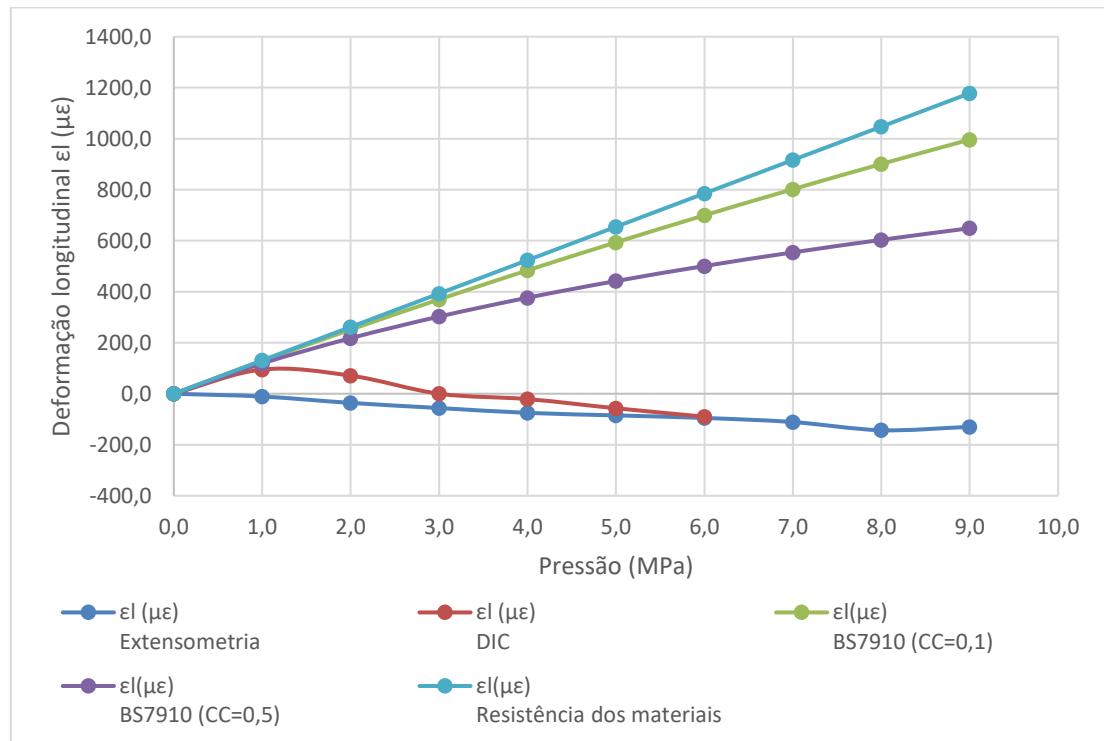
Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

A Tabela 11 apresenta os valores das deformações longitudinais na posição 90°, obtidos por meio das três abordagens consideradas nesse trabalho.

Pressão (MPa)	ε_l ($\mu\epsilon$) Extensometria	ε_l ($\mu\epsilon$) DIC	ε_l ($\mu\epsilon$) BS7910 (CC=0,1)	ε_l ($\mu\epsilon$) BS7910 (CC=0,5)	ε_l ($\mu\epsilon$) Resistência dos materiais
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	-11,0	95,0	128,2	118,7	130,9
2,0	-36,0	71,0	251,4	217,8	261,8
3,0	-56,0	0,0	369,8	302,6	392,7
4,0	-75,0	-21,0	483,8	376,4	523,7
5,0	-85,0	-57,0	593,6	441,9	654,6
6,0	-95,0	-90,0	699,6	500,7	785,5
7,0	-111,0	-	801,9	554,2	916,4
8,0	-143,0	-	900,8	603,4	1047,3
9,0	-130,0	-	996,5	649,0	1178,2

Tabela 11 - Deformações longitudinais em $\mu\epsilon$ na posição angular 90°

O gráfico a seguir apresenta os resultados associados aos valores mostrados na Tabela 11.

Figura 24 - Gráfico pressão interna versus deformação longitudinal ($\mu\epsilon$) na posição 90°

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

Do ponto de vista teórico, espera-se que, na posição 0°, as deformações longitudinais apresentem sinal negativo, uma vez que as deformações circunferenciais nessa região são positivas e de magnitude significativamente superior. Assim, a partir de um critério baseado no efeito de Poisson, as deformações longitudinais tenderiam a ocorrer em sentido oposto e com menor intensidade. Um raciocínio análogo pode ser aplicado à

posição 90°: como nessa região as deformações circunferenciais são negativas, seria esperado que as deformações longitudinais assumissem valores positivos.

Entretanto, os resultados obtidos experimentalmente por meio da extensometria elétrica e da técnica de correlação digital de imagens indicam um comportamento distinto do previsto teoricamente. Observa-se que as deformações longitudinais são positivas na posição 0° e negativas na posição 90°. Parte dessa discrepância pode estar associada a incertezas experimentais, uma vez que as deformações longitudinais apresentam magnitudes menores e, portanto, são mais sensíveis a erros de medição. Contudo, a principal explicação para esse comportamento reside nas hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos analíticos.

Nas formulações teóricas empregadas, assume-se que as tensões longitudinais não sofrem influência significativa da ovalização. No entanto, para a geometria observada experimentalmente, caracterizada por um desvio em relação à elipticidade perfeita, surgem componentes adicionais de flexão na direção longitudinal, que passam a contribuir de forma relevante para o estado de tensões nessa direção. Como consequência, os critérios clássicos deixam de ser plenamente válidos.

Assim, as diferenças observadas entre os resultados analíticos e aqueles obtidos experimentalmente para as deformações longitudinais, tanto na posição 0° quanto na posição 90°, estão diretamente relacionadas às limitações das hipóteses adotadas. No comportamento real de um tubo ovalizado sob pressurização interna, a deformação geométrica altera a distribuição dos esforços ao longo da circunferência, fazendo com que as tensões longitudinais não sejam adequadamente descritas por expressões simplificadas, como a equação (4), o que explica as discrepâncias verificadas. (NEIMAR, 2016)

4.4. Variação da excentricidade

Conforme discutido na Seção 2.3, a formulação apresentada pela norma BS 7910 permite estimar a recuperação gradual da circularidade de um tubo ovalizado à medida que ele é submetido ao aumento da pressão interna. Com a técnica de DIC, é possível determinar as dimensões do tubo em cada estágio da pressurização e, consequentemente, calcular a excentricidade correspondente a cada patamar de carga. Dessa forma, torna-se viável comparar as excentricidades previstas pela BS 7910, tanto

para $CC = 0,5$ quanto para $CC = 0,1$, com os valores obtidos experimentalmente por meio da correlação digital de imagens.

A Tabela 12 a seguir apresenta as excentricidades obtidas a partir dos dados experimentais, bem como aquelas calculadas por meio da formulação proposta pela BS 7910.

Pressão [Mpa]	Excentricidade experimental (DIC)	Excentricidade analítica CC=0,1	Excentricidade analítica CC=0,5
0,000	1,375	1,375	1,375
1,000	1,343	1,342	1,226
2,000	1,258	1,311	1,107
3,000	1,166	1,282	1,008
4,000	1,172	1,253	0,926
5,000	1,120	1,226	0,856
6,000	1,063	1,200	0,796
7,000	1,042	1,175	0,744
8,000	1,017	1,152	0,698
9,000	0,998	1,129	0,657

Tabela 12 - Evolução da excentricidade ao longo dos incrementos de pressão interna

No experimento conduzido por Neimar (2016), a aplicação da técnica de DIC foi limitada ao patamar de 6 MPa. Dessa forma, os valores correspondentes às pressões de 7, 8 e 9 MPa foram obtidos por um modelo polinomial de extrapolação, utilizando os parâmetros disponíveis na tabela 13 e a curva de tendência ajustada pelo Software Excel.

x ₂	x ₁	Constante
3,00E-15	-7,00E-08	1,3859

Tabela 13 - Parâmetros para a função de extrapolação

Fonte: (NEIMAR, 2016)

A figura 25 a seguir apresenta a comparação entre as excentricidades obtidas pelas diferentes metodologias consideradas.

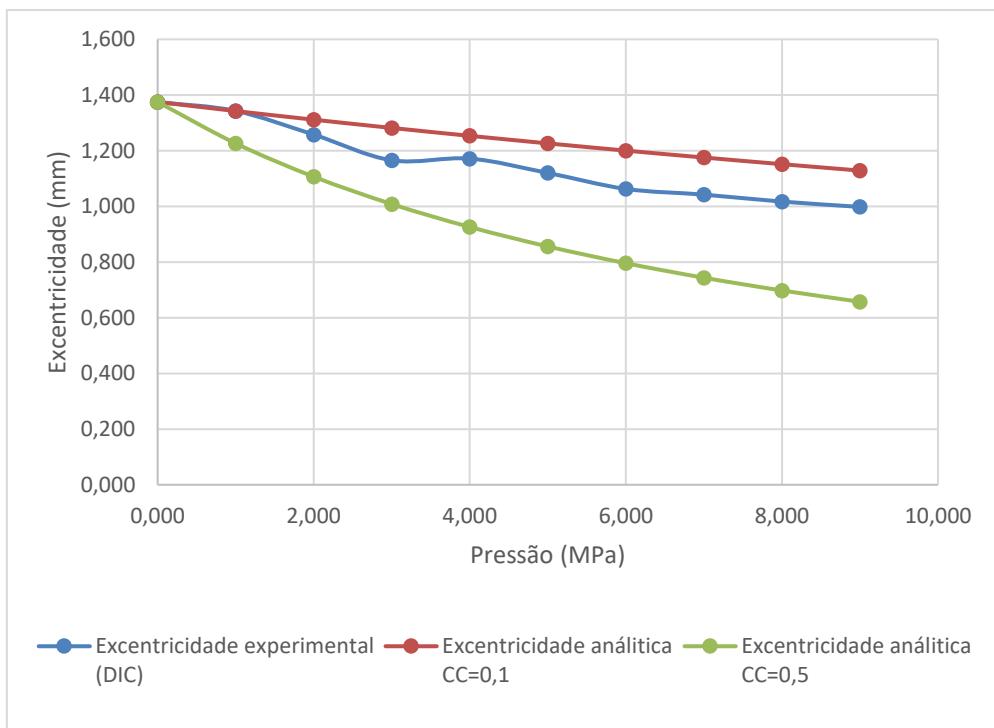


Figura 25 - Variação da excentricidade experimental e BS 7910 em função da pressão aplicada

Fonte: Elaborada pelo autor por meio do software Excel (2025)

Observa-se uma boa concordância entre as excentricidades estimadas com $CC = 0,1$ e os valores obtidos experimentalmente pela técnica de DIC. Esse resultado indica que o processo de ovalização imposto ao tubo gerou uma alteração geométrica significativa, compatível com um nível elevado de severidade do defeito.

No estudo apresentado por SILVA et al (2025), os autores desenvolvem uma simulação numérica por elementos finitos para analisar o comportamento de um tubo ovalizado sob pressurização interna. O modelo considera duas possíveis geometrias para a seção transversal: a primeira, assumida como perfeitamente elíptica; e a segunda, representando de maneira mais realista a forma adquirida após o processo de indução da ovalização. Observou-se experimentalmente que, após o processo de aplicação de carga por meio de um calço de madeira de seção quadrada posicionado na região superior do tubo (posição 0°), utilizado para induzir a ovalização, as superfícies superior e inferior da seção transversal passaram a apresentar uma leve tendência à planificação.

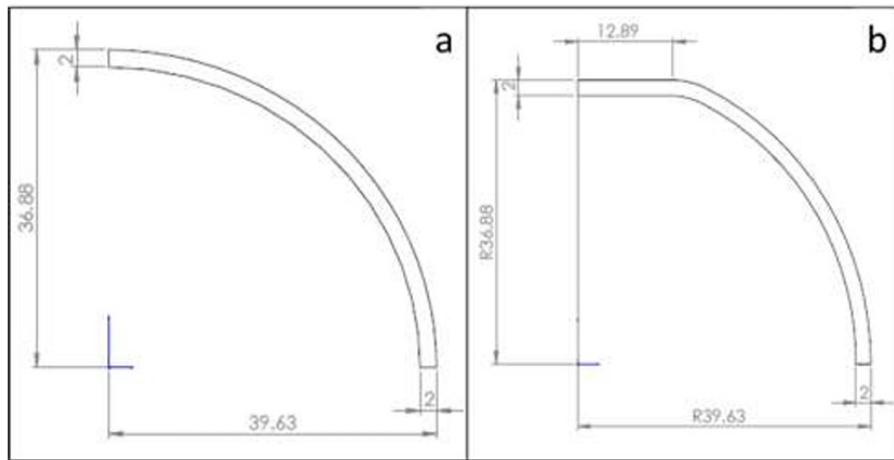


Figura 26 - Seções transversais utilizadas nas simulações por elementos finitos, considerando simetrias nos eixos horizontal e vertical: (a) seção perfeitamente elíptica; (b) seção com desvio em relação à elipse

Fonte: (SILVA et al, 2025)

A simulação por elementos finitos permitiu comparar a evolução da excentricidade do tubo pressurizado sob três perspectivas: os valores medidos experimentalmente, aqueles calculados pela formulação da BS 7910 e os resultados obtidos pelo próprio modelo numérico. O gráfico a seguir apresenta esse comparativo.

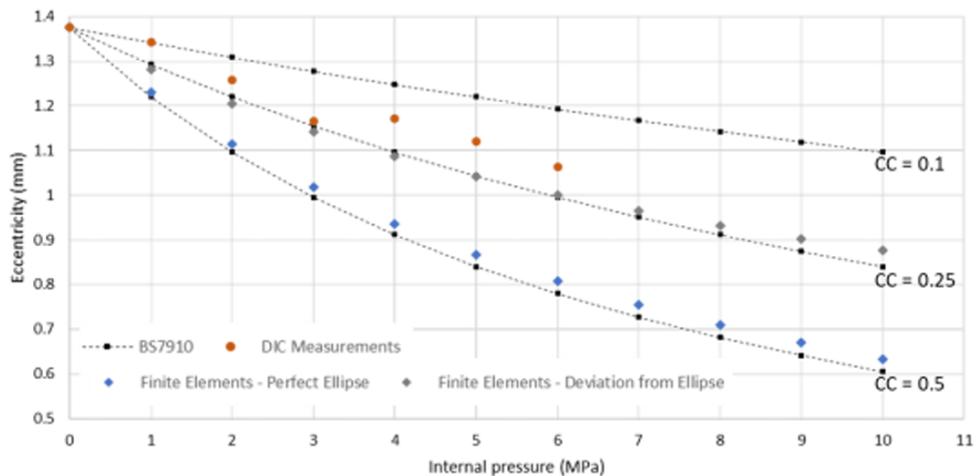


Figura 27 - Comparativo da evolução da excentricidade obtida experimentalmente, pela formulação da BS 7910 e pela simulação numérica

Fonte: (SILVA et al, 2025)

A comparação entre as medições experimentais, as previsões dos modelos analíticos e os resultados das simulações numéricas confirma que todas as abordagens representam adequadamente a tendência de redução da excentricidade. Observa-se, que o modelo baseado na BS7910/API 579, com valores de CC situados entre 0,1 e 0,25, apresentou os resultados mais próximos das deformações medidas pela técnica de DIC. As simulações por elementos finitos, por sua vez, permitiram esclarecer a influência da

geometria real da seção transversal sobre o valor do fator CC , associado à severidade da ovalização (SILVA et al, 2025).

No estudo apresentado por SILVA et al (2025), os autores também realizam uma comparação entre as deformações circunferenciais obtidas experimentalmente e aquelas calculadas a partir da formulação proposta pela BS 7910. Além dessa análise direta, o artigo apresenta uma terceira abordagem, na qual os valores previstos pela BS 7910 são corrigidos utilizando as medições experimentais de excentricidade e diâmetro médio do tubo. Esse método adicional, que ajusta os resultados analíticos com base na geometria real do espécime, aparece na Figura 28 identificado pela curva “Corrected”

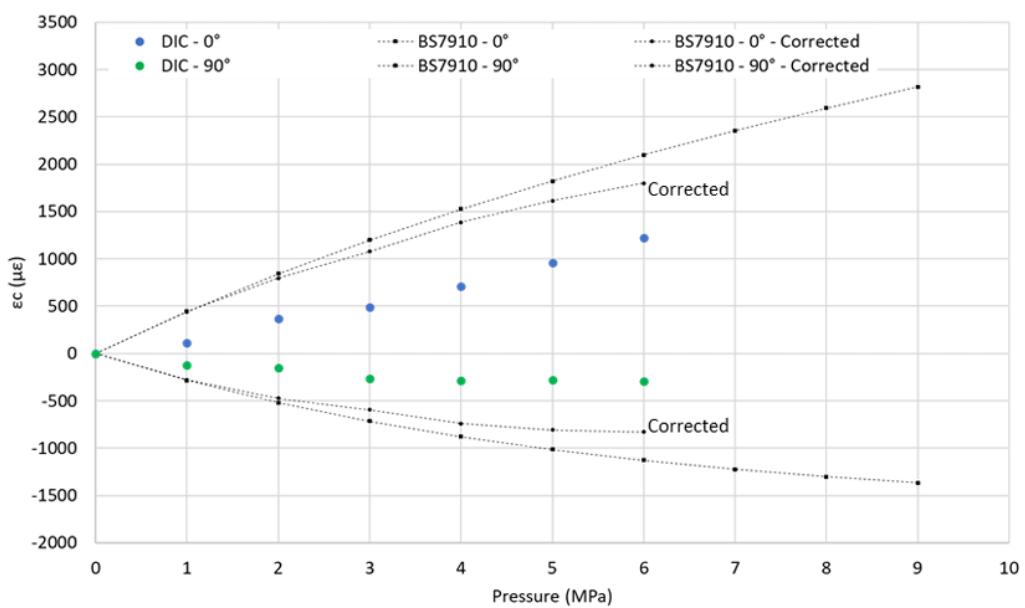


Figura 28 - Evolução da deformação circunferencial (ϵ_c) com o aumento da pressão interna, nas posições 0° e 90° , considerando as medições por DIC e as previsões do modelo BS7910 com $CC = 0,25$

Fonte: (SILVA et al, 2025)

As deformações previstas pelo modelo BS 7910/API 579, mesmo quando corrigidas com base nos valores experimentais, mostraram-se bastante superiores às observadas nos ensaios, evidenciando um comportamento claramente conservador. Isso é esperado, já que normas desse tipo, voltadas à avaliação de integridade, normalmente adotam premissas que tendem a superestimar as tensões para garantir margem de segurança. Além disso, a própria metodologia analítica utilizada incorpora a hipótese de que a ovalização não altera significativamente o estado de tensões longitudinais. Diante dos resultados experimentais essa hipótese parece contribuir de forma direta para a diferença acentuada entre o modelo teórico e o comportamento real do tubo ensaiado.

5. Considerações finais

Este estudo analisou o comportamento mecânico de um tubo ovalizado submetido à pressurização interna, utilizando três abordagens complementares: medições experimentais por meio da técnica de correlação digital de imagens (DIC), modelagem analítica baseada na BS 7910/API 579 e simulações numéricas por elementos finitos. De modo geral, observou-se uma boa consistência entre os resultados experimentais, as previsões analíticas e o modelo numérico no que se refere à evolução da excentricidade e das deformações. A tendência de redução da excentricidade com o aumento da pressão, bem como o comportamento global da deformação circumferencial, foi captada de forma coerente pelas diferentes metodologias. As discrepâncias identificadas entre os valores medidos e os calculados podem ser associadas tanto às simplificações presentes na formulação analítica quanto ao caráter conservador das normas, que naturalmente tendem a superestimar as deformações quando comparadas aos resultados experimentais.

As simulações por elementos finitos evidenciaram que pequenas diferenças em relação a uma ovalização perfeitamente elíptica têm impacto direto na forma como a excentricidade evolui com o aumento da pressão interna. Os resultados indicam, por exemplo, que a geometria produzida no processo experimental de ovalização, por não ser estritamente elíptica, se ajusta melhor a um valor intermediário de CC , distinto daqueles usualmente sugeridos pela norma. Esse comportamento reforça uma limitação importante das normas BS 7910 e API 579, que não fornecem critérios claros para selecionar o coeficiente CC de acordo com a geometria real do defeito observado, abrindo espaço para questionamentos quanto à aplicabilidade direta dessas formulações em situações não idealizadas.

Os resultados obtidos também têm impacto relevante nas avaliações de vida em fadiga. Em dutos sujeitos a ciclos de pressurização, a excentricidade de regiões ovalizadas ou amassadas não permanece fixa; ela se altera a cada ciclo de carga. Como o fator de intensificação de tensões e, portanto, o estado local de tensões, é sensível a essas variações geométricas, alterações cíclicas na excentricidade podem provocar oscilações igualmente cíclicas nas tensões atuantes, favorecendo a iniciação e o crescimento de trincas por fadiga (SHUAI; SHUAI; ZHANG, 2018). Dessa forma, estimativas realistas de vida em fadiga para trechos com ovalização ou mossa precisam considerar a evolução da excentricidade durante o carregamento, o que requer a

incorporação de modelos capazes de descrever essa mudança de forma induzida pela pressão interna. (SILVA et al, 2025)

De maneira geral, os resultados obtidos ao longo deste trabalho mostram que tanto os modelos analíticos quanto as simulações numéricas conseguem reproduzir, com boa aproximação, o comportamento observado experimentalmente em tubos ovalizados submetidos à pressão interna. No entanto, a comparação detalhada deixa claro que essa capacidade preditiva depende da geometria envolvida: quanto mais o defeito se afasta da forma elíptica ideal, como ocorre em situações com mossas ou deformações mais complexas, maior a necessidade de ajustes no fator de severidade CC . Isso indica que, para geometrias não convencionais, não basta aplicar diretamente os valores sugeridos pelas normas; torna-se indispensável avaliar ou calibrar esse parâmetro com base na geometria real do defeito. Assim, os resultados reforçam a importância de se aprimorar os critérios existentes ou incorporar ferramentas complementares que permitam representar de maneira mais fiel as condições encontradas em serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, F. **Avaliação da integridade estrutural de vasos de pressão em conformidade com a norma API 579-1/ASME FFS-1 e comparação com avaliação realizada com a aplicação da técnica DIC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for line pipe (API 5L).** 46th ed. Washington, DC: API, 2018.
- ANDOLFATO, R.; CAMACHO, J.; BRITO, G. **Extensometria básica.** Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 2004.
- ANDRADE, G.; TOLEDO, E.; LIMA, J. P. Estudo numérico do efeito de ovalização na resistência ao colapso de tubos de revestimento de poços. In: **XXXV Iberian Latin-American Congress On Computational Methods In Engineering** – CILAMCE, Fortaleza 2014.
- ASME. **Fitness-for-service: API 579-1/ASME FFS-1.** International Code. December 2021. Houston: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7910:2019 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.** London: BSI, 2019.
- CORRELATED SOLUTIONS, Inc. **Speckle Generator.** Columbia, SC, 2017.
- CRAMMOND, G.; BOYD, S. W.; DULIEU-BARTON, J. M. **Speckle pattern quality assessment for digital image correlation.** Optics and Lasers in Engineering, v. 51, n. 12, p. 1368–1378, 2013.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis.** New York: McGraw-Hill, 1991.
- FRY, D. **Mechanical stress and strain measurement using strain gages.** Wiley, 2014.
- HASSAN, H. et al. **Investigation of material properties effect on the ovalization phenomenon in the tube bending produced by RDB.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020.
- KARAMANOS, A. **Mechanical behavior of steel pipe bends: an overview.** Journal of Pressure Vessel Technology, v. 138, n. 4, p. 041203, 2016.

- LEPAGE, W. **A practical guide to dic.** Experimental Mechanics, 2017.
- NEIMAR, A. **Análise Experimental De Tensões Em Um Tubo Ovalizado**, p. 1-31, 2016
- OMEGA ENGINEERING. **Strain Measurement Handbook**. Omega Press, 2008.
- PASQUALINO, I ; PINHEIRO, B.; SOARES, C. G. **Generalized expressions for stress concentration factors of pipeline plain dents under cyclic internal pressure**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 170, p. 82-91, 2019.
- SCHALK, P; OFNER, R; O'LEARY, P. **Pipe eccentricity measurement using laser triangulation**. **Image and Vision Computing**, v. 25, n. 7, p. 1194-1203, 2007.
- SCHREIER, H.; ORTEU, J.-J.; SUTTON, M. A. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements**. 1. ed. New York: Springer, 2009.
- SHUAI, Y., SHUAI, J., ZHANG, X. **Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure**. Journal of Natural Gas Science <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.05.037> Rio Pipeline & Logistics 2025 and Engineering, 56, 81-92, 2018.
- SILVA, A. et al. Experimental study of ovalized thin-walled pipes. In: **RIO PIPELINE & LOGISTICS**, 2025, Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos [...]** Rio de Janeiro: Expo Rio, 2025. Artigo n.º 513817, 2025. Disponível em: <https://biblioteca.ibp.org.br/scripts/bnmapi.exe?router=upload/38854>. Acesso em: 12 de Setembro de 2025.
- SUTTON, M.; ORTEU, J.; SCHREIER, H. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements**. New York: Springer, 2009.
- VIEIRA, R. B. **Correlação digital de imagens: princípios e aplicações**. Notas de aula do Curso de Análise Experimental de Tensões. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2024.
- VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Strain gage users' manual**. Vishay, 2018.
- WANG, J.; SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. **Influence of ovalisation on the plastic collapse of thick cylindrical tubes under uniform bending**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 168, p. 94-99, 2018.

ZHANG, X; PAN, G. **Collapse of thick-walled subsea pipelines with imperfections subjected to external pressure.** Ocean Engineering, v. 213, p. 107705, 2020.