

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO EM ESCALA  
REDUZIDA DOS EFEITOS DO *REELING* NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
DUTOS SUBMARINOS DE AÇO X70

**Marina Morgan Martins**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Porto Alegre  
2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Martins, Marina Morgan  
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO EM  
ESCALA REDUZIDA DOS EFEITOS DO REELING NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS SUBMARINOS DE AÇO X70  
/ Marina Morgan Martins. -- 2024.  
72 f.  
Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Duto Submarino. 2. Aço x70. 3. Reeling. 4.  
Efeito Bauschinger. 5. Correlação de Imagem Digital.  
I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauro, orient. II.  
Título.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, pela oportunidade em realizar esse trabalho e pelos ensinamentos e suporte durante sua elaboração, que foram essenciais para a condução das atividades.

Ao Dr. Allan Romario de Paula Dias pela sua contribuição técnica, que foi de grande importância para desenvolvimento do trabalho, pelos inúmeros ensinamentos tanto profissionais quanto acadêmicos e, também, pelo suporte emocional.

Ao LAMEF como instituição que possibilitou o desenvolvimento desse estudo. Aos colegas do Grupo de Ensaio Não Destrutivos (GEND), em especial ao Dr. Matheus Freitas Kuhn, pelo auxílio, apoio e pela troca de conhecimentos durante o desenvolvimento do trabalho. Aos colegas do Grupo de Ensaio Mecânicos (GEM), pela participação e auxílio durante a execução dos testes experimentais.

À Equinor pelo fornecimento de amostras e recursos financeiros através da IAP-1509.

À minha mãe por todo incentivo aos estudos e pelo apoio no decorrer da graduação, além de ser um exemplo para minha vida pessoal e profissional. Ao meu pai, pelo amor incondicional e pelas lições de vida que moldaram minha essência.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	OBJETIVOS .....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
3.1	Dutos Rígidos .....	13
3.2	Instalação de dutos rígidos.....	13
3.2.1	S-Lay.....	14
3.2.2	J-Lay .....	15
3.2.3	Reel-Lay.....	16
3.3	Simulação do efeito do <i>Reeling</i> .....	18
3.4	Modos de falha de dutos submarinos.....	19
3.4.1	Deformação plástica acumulada e ovalização .....	20
3.4.2	Flambagem localizada ( <i>local buckling</i> ).....	20
3.4.3	Colapso por pressão externa .....	21
3.5	Mecanismos metalúrgicos atuantes em carregamento cíclico .....	22
3.5.1	Encruamento .....	22
3.5.2	Envelhecimento.....	23
3.5.3	Efeito Bauschinger.....	24
3.6	Banda de Luders: Efeito do Escoamento Descontínuo.....	25
3.6.1	Atmosfera de Cottrell.....	28
3.7	Mecanismo de endurecimento cíclico em aços.....	29
3.8	Correlação de Imagem Digital (DIC) .....	31
3.8.1	Parâmetros externos que geram influência na medida via DIC.....	32
4	METODOLOGIA .....	34
4.1	Simulação do efeito do <i>Reeling</i> em escala reduzida (SSRS).....	34
4.1.1	Avaliação do patamar de escoamento.....	35
4.1.2	Geometria de Corpo de Prova.....	37
4.1.3	Determinação de coeficientes de endurecimento.....	38
4.1.4	Alteração de propriedades mecânicas após simulação de reeling .....	40
4.2	Avaliação da sensibilidade às variáveis de aplicação do padrão estocástico.....	42
4.2.1	Aplicação de decalque .....	44
4.2.2	Pintura com auxílio de aerógrafo.....	45

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	Definição de geometria do corpo de prova.....	47
5.2	Avaliação da extensão do patamar de escoamento.....	50
5.3	Determinação dos coeficientes de endurecimento cíclico.....	54
5.4	Comparação de propriedades mecânicas após carregamento cíclico.....	56
5.5	Avaliação da sensibilidade à aplicação do padrão estocástico.....	57
5.6	Comparação entre resultados pelo método de DIC e COD.....	60
6	CONCLUSÕES.....	64
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
	ANEXO A.....	71

## RESUMO

Dutos de aço carbono são amplamente utilizados para transporte de petróleo e gás e seus derivados. Essas tubulações podem ser bobinadas em grandes carretéis, em um processo denominado *reeling*, que simplifica o armazenamento, transporte e instalação do duto com embarcações em ambiente de exploração de petróleo *off-shore*. No entanto, durante o processo de bobinamento e desbobinamento, são introduzidas deformações compressivas e trativas no tubo, ocasionando modificações das propriedades mecânicas do material e redução da sua vida em serviço. Para estudar estes efeitos, uma possibilidade é a execução de ensaios mecânicos em escala real, mas os equipamentos necessários para induzir níveis comparáveis de deformação em laboratório são caros e complexos. Outra possibilidade é executar ensaios em escala reduzida a fim de obter parâmetros de entrada para modelos de elementos finitos que possam descrever os fenômenos. O presente trabalho se dedica a investigar uma metodologia para condução destes ensaios em escala reduzida de forma a se obter dados de boa qualidade a respeito das propriedades mecânicas do material, no formato requerido por softwares de elementos finitos. Foi possível verificar fenômenos como a ocorrência ou ausência de escoamento descontínuo dependendo da configuração do ensaio, e também avaliar as características dos patamares de escoamento, e o surgimento do efeito Bauschinger sob o regime de carregamento cíclico em tração e compressão. Os ensaios mecânicos conduzidos foram monitorados por DIC (correlação de imagem digital) e COD (extensômetro do tipo clip gauge) e os dados obtidos com estes dois métodos são comparados.

**Palavras-chave:** Dutos submarinos; aço X70; *Reeling*; bandas de Luders; efeito Bauschinger, Correlação de imagem digital.

## ABSTRACT

Carbon steel pipelines are widely used for the transportation of oil, gas, and their derivatives. These pipes can be coiled on large reels, in a process called reeling, which simplifies the storage, transportation, and installation of the pipeline with vessels in offshore oil exploration environments. However, during the coiling and uncoiling process, compressive and tensile deformations are introduced into the tube, causing modifications to the mechanical properties of the material and a reduction in its service life. To study these effects, one option is to perform full-scale mechanical tests, but the equipment needed to induce comparable levels of deformation in the laboratory is expensive and complex. Another option is to perform tests on a reduced scale to obtain input parameters for finite element models that can describe the phenomena. This work is dedicated to investigating a methodology for conducting these small-scale tests to obtain high-quality data regarding the mechanical properties of the material, in the format required by finite element software. It was possible to observe phenomena such as the occurrence or absence of discontinuous yielding depending on the testing conditions, and to evaluate the characteristics of the yield plateau and the emergence of the Bauschinger effect under cyclic loading in tension and compression. The conducted mechanical tests were monitored by DIC (digital image correlation) and COD (clip gauge strain gauge), and the data obtained with these two methods are compared.

**Palavras-chave:** Subsea pipelines; X70 steel; Reeling; Luders bands; Bauschinger effect; Digital Image Correlation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 Representação esquemática do método de lançamento em S, no qual a configuração dos dutos se aproxima da letra S. Fonte: Adaptado de Kyriakides et al. (2023). .....	14
Figura 3.2 Representação do método de lançamento em J, no qual a configuração do tubo se aproxima da letra J. ....	16
Figura 3.3 Representação esquemática do bobinamento de um duto em carretel no método de instalação Reel-Lay. ....	17
Figura 3.4 Montagem de estrutura para realização de simulação do efeito do reeling em escala real (FSR). Fonte: Mannesmann Line Pipe, 2023. Disponível em: < <a href="https://www.mannesmann-linepipe.com/en/processes/tests.html">https://www.mannesmann-linepipe.com/en/processes/tests.html</a> >. Acesso em: 15/12/2023. ....	18
Figura 3.5 Gráfico para influência da relação entre diâmetro/espessura de parede na resistência ao colapso de tubos e os quatro regimes de colapso: escoamento, plástico, transição e elástico para um determinado aço. Fonte: Adaptado de Brechan et al (2020). ....	21
Figura 3.6 Curva representativa do fenômeno de endurecimento exibido no material. ....	23
Figura 3.7 (a) Curva de carregamento de ensaio uniaxial para liga AA2024-T4; (b) carregamento seguido de descarregamento em que o efeito Bauschinger modifica a tensão de escoamento em compressão do material. ....	24
Figura 3.8 Gráfico tensão-deformação para o aço X60: (a) ênfase na região do patamar de escoamento descontínuo; (b) curva até ruptura do material. ....	27
Figura 3.9 Sequência de fotos demonstrando a evolução das bandas de Luders em teste trativo para tiras de aço X70. ....	28
Figura 3.10 Superfície de escoamento mediante ciclos de deformação plástica e a resposta do material para os mecanismos de endurecimento: (a) isotrópico; (b) cinemático; (c) combinado. ....	30
Figura 3.11 Comparação de medidas realizadas em imagens analisadas por DIC (a) sem aplicação de deformação; (b) após deformação. Fonte: Picoy, 2016. ....	31
Figura 3.12 Fluxograma de possibilidades de técnicas de medição e monitoramento de ensaios. Fonte: Adaptado de Picoy, 2016. ....	32
Figura 4.1 Fluxograma de fatores a serem avaliados e determinados para simulação do <i>reeling</i> em escala reduzida. ....	35
Figura 4.2 Execução de ensaio de tração com monitoramento por meio da técnica de DIC. ....	36
Figura 4.3 Equipamento universal de testes (a) fabricado pela INSTRON; (b) fabricado pela MTS. ....	38



Figura 4.4 Forno convencional utilizado para envelhecimento. ....	40
Figura 4.5 Amostra após deformação cíclica, envelhecimento e adequação de geometria. Fonte: a Autora.....	41
Figura 4.6 Fluxograma do procedimento previsto na norma DNV-ST-F101 para análise de propriedade mecânica do material submetido ao ensaio cíclico para simulação do <i>reeling</i> . ...	41
Figura 4.7 Fluxograma do processo de preparação das chapas de alumínio para aplicação do padrão estocástico e ERE.....	43
Figura 4.8 Representação de duas das chapas preparadas com o padrão estocástico para aplicação de tensão trativa. A linha na superfície da chapa demarca a região central da amostra para referência de medida. ....	43
Figura 4.9 Equipamento GOM-ARAMIS com duas câmeras de 6M.....	44
Figura 4.10 Padrões gerados computacionalmente (a) 10% de pontos escuros, (b) 20% de pontos escuros, (c) 30% de pontos escuros.....	45
Figura 4.11 Aerógrafo utilizado para elaboração dos pontos. ....	46
Figura 5.1 Amostras de diferentes geometrias testadas em ensaio cíclico que apresentaram flambagem, sendo elas: (a) H1, (b) H2, (c) H3.....	48
Figura 5.2 Amostra de geometria H4 após carregamento cíclico. ....	48
Figura 5.3 Ensaio cíclico para as 3 amostras testadas da geometria H4.....	49
Figura 5.4 Amostra submetida ao carregamento cíclico, salientando-se regiões específicas para análise na curva.....	50
Figura 5.5 Amostras submetidas ao ensaio de tração monitoradas por DIC e COD.....	51
Figura 5.6 Comparação da extensão do patamar de escoamento para amostras submetidas à ensaio de tração uniaxial (T-A e T-B) e amostra com carregamento em histerese (H3).....	52
Figura 5.7 (a) Gráfico de Tensão (MPa) x Deformação (%) para amostra submetida ao ensaio de tração. (b) Propagação das bandas de Luders visualizadas na superfície da amostra por meio da técnica de DIC ao longo da extensão do patamar de escoamento.....	53
Figura 5.8 Comparativo entre curva do material submetida à ensaio uniaxial sem aplicação de deformação prévia e amostra, do mesmo material, submetida a três ciclos de deformação e ao tratamento térmico de envelhecimento. Fonte: a Autora. ....	56
Figura 5.9 Amostra D10: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.....	57

Figura 5.10 Amostra D20: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.....	58
Figura 5.11 Amostra D30: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.....	58
Figura 5.12 Amostra P2: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.....	58
Figura 5.13 Amostra P5: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.....	58
Figura 5.14 Gráfico de dispersão referente à médias de valores obtidos com monitoramento por DIC e ERE nos patamares de força constante aplicada no decorrer de ensaio trativo. ....	59
Figura 5.15 Curva de resultado de ensaio monitorado por DIC e COD para mesma amostra .	61
Figura 5.16 Trajetória, em verde, de três pontos monitorados na amostra no decorrer do ensaio com sucessivos carregamentos e descarregamentos. A linha vermelha refere-se à trajetória retilínea esperada para esse comportamento.....	61
Figura 5.17 Monitoramento de três pontos sobre a região do corpo de prova durante ensaio de tração evidenciando seu deslocamento retilíneo, demonstrado em coloração verde na superfície da amostra, desde o começo do teste até próximo ao momento de ruptura.....	62

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de tubulações de aço ao carbono pela indústria de óleo de gás apresenta um crescimento constante, principalmente em instalações marítimas de águas profundas, pois a principal alternativa a estes, os dutos flexíveis, possuem uma restrição quanto ao seu limite de capacidade em elevadas profundidades.

Para o transporte e instalação dessas tubulações, tem-se três métodos convencionais: S-Lay, J-Lay e o Reel-Lay. Os dois primeiros consistem em realizar a montagem dos trechos da tubulação em terra e promover sua união, por meio de conexões ou soldagem, em navios ou plataformas. Já o método Reel-Lay, cujo processo é conhecido como *reeling*, consiste no bobinamento de longos trechos da tubulação em terra e no transporte dessas estruturas prontas para instalação em navios especiais. Esse processo requer menores custos de infraestrutura nos navios, além de otimizar o espaço de estocagem; em função disso, a técnica se destaca pelo menor custo e tempo que demanda na operação comparado aos demais métodos (Kyriakides et al, 2023).

No entanto, o processo do *reeling* aplica deformações à tubulação no sentido de bobinamento e desbobinamento desse componente nos carretéis. Em razão desse processo, pode-se acarretar modificações nas propriedades metalúrgicas dos tubos, afetando a pressão de colapso, a ductilidade e a resistência mecânica do componente, por exemplo. De modo geral, há três mecanismos de plasticidade que influenciam as propriedades de materiais submetidos ao carregamento cíclico ocasionado pelo bobinamento: encruamento, efeito Bauschinger e o envelhecimento (Vilas Bôas, 2012). Sendo assim, estudos que verificam a influência desse processo na tubulação são importantes para prever como esse método de instalação afeta as propriedades do material e, conseqüentemente, modifica seu desempenho em campo.

Uma das possibilidades para avaliar o efeito do *reeling* na tubulação é por meio de simulações numéricas por elementos finitos. Porém, para isso, faz-se necessário realizar a calibração do material a partir da atribuição de coeficientes que descrevem o comportamento desse material após a aplicação de deformações cíclicas. Portanto, ensaios que simulam esse fenômeno em escala reduzida podem ser realizados não apenas para avaliar o efeito em si, mas, também, para determinar os coeficientes necessários para que os estudos sejam conduzidos por simulação numérica.

O aço utilizado para fabricação dessas estruturas apresenta escoamento descontínuo, fenômeno conhecido como bandas de Luders, que altera o comportamento convencional do regime plástico no material. Com a formação dessas bandas, tem-se um patamar em que a tensão

necessária para que se mantenha a taxa de deformação é constante. Esse fenômeno se propaga pelo material como frentes de deformação e se encerra quando essas frentes abrangem todo o comprimento do componente. Logo, a extensão desse patamar é dependente do material analisado.

Ensaio mecânico podem ser realizados para simular o efeito *reeling* em escala reduzida e para avaliar a propagação das bandas de Luders. Esses testes podem ser monitorados por técnicas convencionais, como extensômetro do tipo clip gauge (COD), ou por meio de métodos não convencionais, no quais se pode citar a Correlação de Imagem Digital (DIC – *Digital Image Correlation*). Para possibilitar a utilização do método não convencional mencionado, a superfície das amostras precisa ser preparada com a aplicação de um padrão de pontos aleatórios e homogeneamente distribuídos que permita a identificação da região de análise pelo equipamento. Esse padrão é conhecido como padrão estocástico e influencia diretamente na medida realizada pelo equipamento e, conseqüentemente, nos resultados obtidos pelo método.

## 2 OBJETIVOS

Como objetivo principal desse trabalho têm-se a investigação de uma metodologia de simulação em escala reduzida para avaliar o efeito do *reeling* em dutos submarinos.

Os objetivos específicos consistem em:

- Adequação dos parâmetros de ensaio para SSRS (*small scale reeling simulation*);
- Obtenção dos coeficientes de endurecimento do material para calibração em simulação numérica;
- Investigação da extensão do patamar de escoamento descontínuo para o aço API X70;
- Avaliação de método não convencional de monitoramento via correlação de imagem digital (DIC) para ensaio com carregamento cíclico.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Dutos Rígidos

Tubulações rígidas são amplamente utilizadas em águas profundas e exigem que os materiais apresentem propriedades específicas, principalmente no que diz respeito à sua resistência mecânica (Vilas Bôas, 2012).

A nomenclatura utilizada para esses tubos geralmente segue o sistema API, nos quais tem-se uma letra e um número que se referem ao limite de escoamento do material em ksi (Vasconcelos, 2015). Na Tabela 3-1, tem-se os diferentes graus dos aços API, bem como suas tensões de escoamento.

Tabela 3.1 Aços API e seus respectivos valores de tensão de escoamento

GRAU	Tensão Mínima de Escoamento	
	Ksi	MPa
A25	25	172
A	30	207
B	35	241
X42	42	289
X46	46	317
X52	52	358
X56	56	386
X60	60	413
X65	65	448
X70	70	482
X80	80	551

Fonte: API 5L

#### 3.2 Instalação de dutos rígidos

Há diversos métodos para instalação de tubulações submarinas e essa escolha se relaciona com sua viabilidade técnica e econômica avaliada na etapa do projeto. Dois métodos comuns são o S-Lay e J-Lay. Atualmente, o método denominado Reel-Lay tem sido amplamente empregado em função de apresentar uma redução de tempo de lançamento e de custo da operação.

### 3.2.1 S-Lay

O método S-Lay é identificado por uma curva em forma de "S" durante a instalação do duto, ocorrendo na área entre a rampa onde a tubulação é lançada, denominada *overbend*, e a região próxima ao fundo do oceano, conhecida como *sagbend*. (Vilas Bôas, 2012). A Figura 3.1 representa, esquematicamente, esse método de lançamento. No processo, a embarcação não atua apenas como ferramenta de transporte, mas também como uma plataforma de trabalho para a montagem da linha e para o armazenamento desses trechos da tubulação que serão conectados. (Kyriakides et al., 2023).

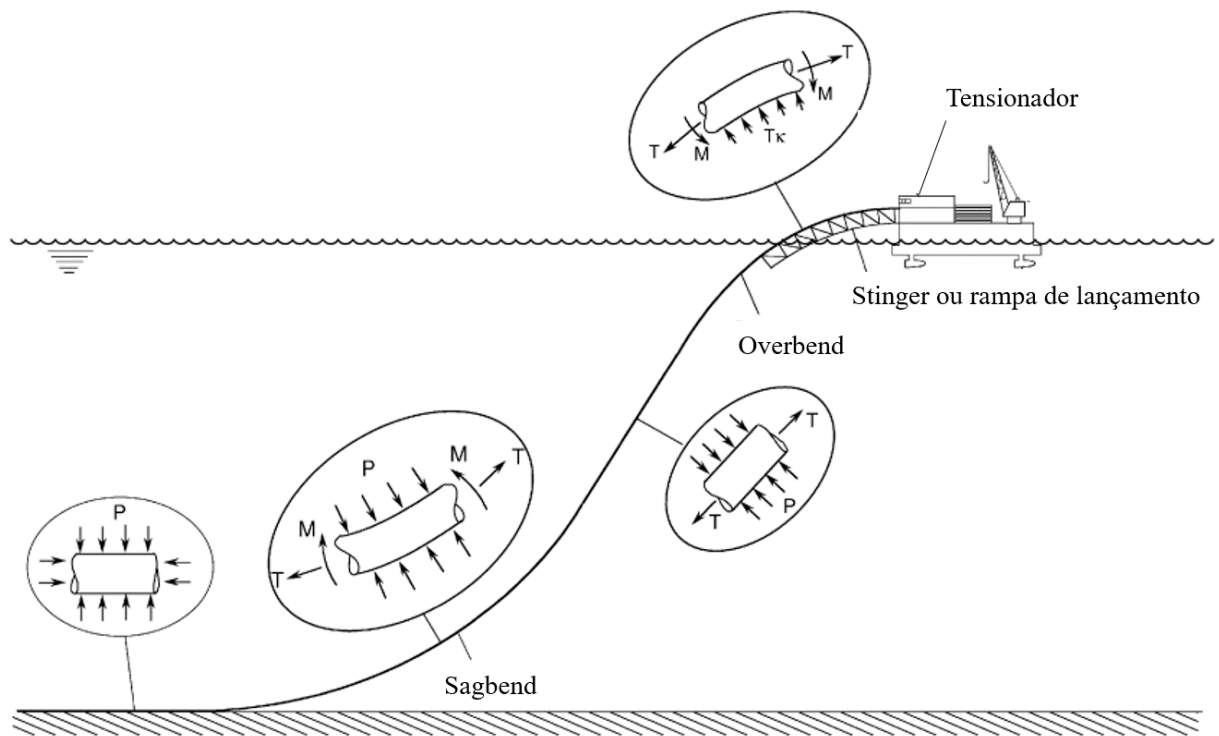


Figura 3.1 Representação esquemática do método de lançamento em S, no qual a configuração dos dutos se aproxima da letra S. Fonte: Adaptado de Kyriakides et al. (2023).

A embarcação responsável pela montagem e lançamento da linha no oceano apresenta uma capacidade de estocagem limitada. Com isso, navios secundários são utilizados para envio de novas seções de dutos, a fim de possibilitar a conexão do comprimento do trecho necessário para a instalação. Nesse processo, também são utilizados tensionadores, com o intuito de controlar a tração presente nessa linha, e um dispositivo que minimiza a variação angular que age sobre o duto durante seu lançamento (Vilas Bôas, 2012).

Uma das vantagens desse método consiste na capacidade da embarcação em realizar a instalação de tubulações com diferentes diâmetros e comprimentos. Porém, a profundidade da instalação é limitada em função da capacidade de tensionamento da linha (Herdiyanti, 2013).

### 3.2.2 J-Lay

O método J-Lay é similar ao S-Lay, consistindo de uma variação do mesmo. A principal modificação está presente na rampa de lançamento que é projetada com um ângulo mais próximo da posição horizontal. Essa configuração evita a formação da região *overbend*, o que aproxima o formato da curvatura do duto para a letra “J”. Assim como no método S-Lay, a montagem da linha é realizada na embarcação (Vilas Bôas, 2012). A Figura 3.2 representa esse modo de lançamento e a região destacada em vermelho indica o local onde se observaria o *overbend*.

Comparado ao método S-Lay, o método de instalação J-Lay é mais preciso devido ao ângulo formado na descida da tubulação do navio em relação ao leito do oceano. Entretanto, essa técnica não é adequada para instalação em águas rasas, pois a curvatura do tubo no fundo do mar será muito acentuada e causará danos à tubulação (Herdiyanti, 2013).



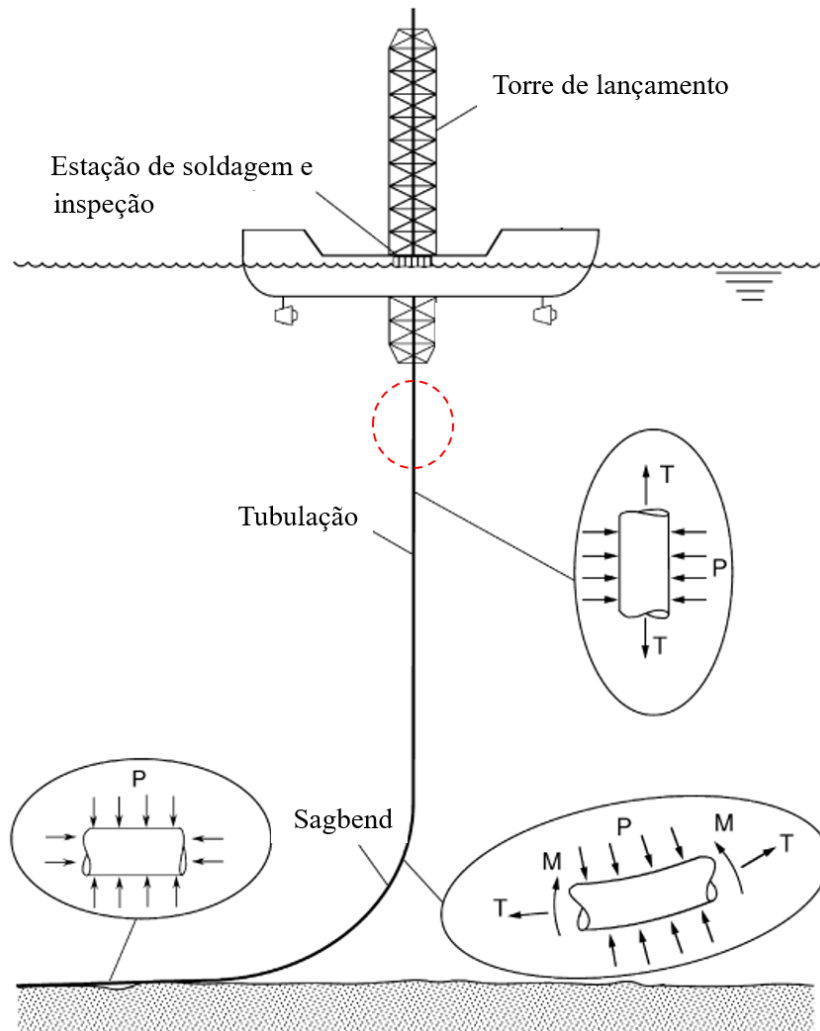


Figura 3.2 Representação do método de lançamento em J, no qual a configuração do tubo se aproxima da letra J.

Fonte: Adaptado de Kyriakides et al. (2023).

### 3.2.3 Reel-Lay

O Reel-Lay é um método de instalação de dutos offshore caracterizado por ser eficiente e econômico (Lin et al., 2018). Seu princípio consiste na conexão e inspeção da tubulação em terra, seguido pelo seu bobinamento em grandes carretéis, visando facilitar o processo de transporte e instalação em águas profundas. Para isso, requer uma embarcação especial que permita o transporte desse carretel e o lançamento do trecho do duto em alto-mar (Vilas Bôas, 2012). A Figura 3.3 é uma representação esquemática do processo de enrolamento de um duto, também conhecido como *reeling*, no carretel que se encontra instalado na embarcação (Kyriakides et al., 2023).

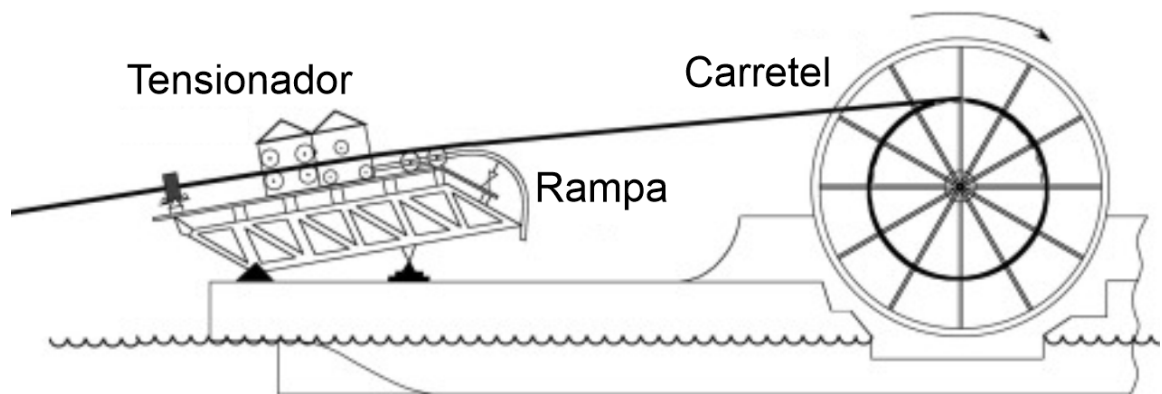


Figura 3.3 Representação esquemática do bobinamento de um duto em carretel no método de instalação Reel-Lay.

Fonte: Adaptado de Kyriakides et al. (2023).

Em comparação com os métodos convencionais, S-Lay e J-Lay, o Reel-Lay configura-se como o mais rápido e com maior vantagem econômica, apresentando um excelente custo-benefício, como demonstrado em licitações realizadas pela Petrobras S.A. (Netto et al., 2008). Essa vantagem econômica deve-se ao fato do processo de conexão e inspeção ser realizados em terra, já que, em alto-mar, demandariam um maior investimento de equipamento e maior número de profissionais especializados a bordo da embarcação (Vilas Bôas, 2012). Ainda assim, são necessários soldadores qualificados e equipamentos de soldagem na embarcação; porém, em menor quantidade comparado ao requerido nos demais métodos (Schmidt et al., 2009).

Atualmente, o processo de instalação em carretel tem se destacado por sua eficiência. Entretanto, durante o processo de bobinamento, deformações plásticas cíclicas são introduzidas na tubulação, e esses esforços podem causar modificações nas propriedades mecânicas do aço desse componente (Lin et al., 2018). Há três efeitos principais que podem ser observados quando essas deformações são introduzidas no duto: endurecimento por deformação, efeito Bauschinger e aumento no envelhecimento (Meiwes et al., 2014).

O processo de fabricação de dutos inicia-se em uma base costeira na qual trechos, chamados de tramos, são conectados. A embarcação atraca próxima à base, onde os dutos são guiados para o interior passando pela polia de alinhamento e sendo guiados até o carretel. Durante o bobinamento, o duto é curvado, passando por deformações elásticas até atingir o raio de curvatura do carretel. Após o bobinamento no carretel, a embarcação navega até o local de instalação, onde se iniciando o desbobinamento. Nesse processo, a parte externa, anteriormente tracionada, é submetida à compressão, enquanto a interna está sob tração. Uma deformação residual é controlada aumentando a carga de tração no carretel. A seção desbobinada é

novamente curvada na polia de alinhamento, sujeita a deformações plásticas, e atravessa um equipamento tensionador. Este último aplica uma deformação oposta à anterior, resultando em um duto retilíneo após o relaxamento das deformações residuais. Essas etapas compõem um ciclo básico do processo de lançamento, no qual sua totalidade inclui a soldagem dos dutos em terra, bobinamento no carretel, desbobinamento a partir do carretel, dobramento na polia de alinhamento e endireitamento no retificador (Vilas Bôas, 2012). No entanto, geralmente o processo de instalação envolve mais ciclos de deformação já que operações de recolhimento da tubulação são necessárias para garantir o alinhamento e o posicionamento adequado do trecho (Bedrossian et al., 2003).

### 3.3 Simulação do efeito do *Reeling*

Há diferentes possibilidades para realização de testes que simulam o processo de desbobinamento da tubulação. Esses experimentos podem ser realizados tanto em escala reduzida (*SSR – Small Scale Reeling*), quanto em escala real (*FSR – Full Scale Reeling*). A simulação em escala reduzida é realizada em pequenas amostras do material retiradas da tubulação, já os procedimentos em escala real requerem maior tempo para realização dos testes, além de apresentarem um custo elevado e uma maior complexidade de execução pela necessidade de infraestrutura compatível com a demanda. A Figura 3.4 exemplifica a configuração de um equipamento de ensaio para FSR.



Figura 3.4 Montagem de estrutura para realização de simulação do efeito do reeling em escala real (FSR). Fonte: Mannesmann Line Pipe, 2023. Disponível em: <<https://www.mannesmann-linepipe.com/en/processes/tests.html>>. Acesso em: 15/12/2023.

Os procedimentos para a simulação do *reeling* são definidos no apêndice B da norma DNV-ST-F101, que estipula que as amostras devam ser sucessivamente deformadas em tensão e compressão, correspondendo ao processo de instalação. Para reprodução dos esforços, a deformação plástica aplicada deve ser igual ou próxima à deformação plástica introduzida durante o processo de instalação. Caso se tenha como objetivo a realização de testes de corrosão ou testes que avaliem propriedades mecânicas do material, como ensaio de tração e testes de impacto, a norma prevê que, após a o carregamento cíclico, o material seja submetido ao tratamento térmico de envelhecimento durante uma hora à 250°C.

A tensão aplicada durante o enrolamento no carretel, segundo a mesma norma – DNV-ST-F101, deve ser suficientemente alta para que as camadas formadas da tubulação sobre carretel estejam compactadas de modo a evitar o deslizamento entre elas e proporcionar maior controle da curvatura imposta.

#### 3.4 Modos de falha de dutos submarinos

Há diversos modos de falha que podem estar presentes em componentes como tubulações e que diferem quanto ao grau de severidade. Segundo a DNV-ST-F101, tem-se duas configurações que representam o estado limite, também conhecido como modo de falha, a partir da qual a estrutura já não satisfaz sua especificação de projeto:

- Estado limite de serviço (SLS – *serviceability limit state*): Essa condição diz respeito à perda de capacidade da estrutura em cumprir pré-requisitos e exigências delimitadas pelo projeto.
- Estado Limite Último (ULS – *ultimate limit state*): Tem-se a perda da função primária do componente, configurando-se como a condição mais grave entre os modos de falha.

Conforme a seção 4 da norma DNV-ST-F101, os modos de falha estão diretamente associados ao tipo de carregamento ao qual a estrutura é submetida. No âmbito do método de instalação Reel-Lay, as deformações resultantes desse processo podem originar modos de falha no componente, potencialmente relacionados ao estado limite último, como flambagem localizada e colapso plástico. Além disso, estão associados a estados limites de serviço, como ovalização, deformação plástica acumulada e o desenvolvimento de trincas que podem conduzir à fratura do componente. Ressalta-se que ambos os modos de falha representam condições que necessitam de avaliação na tubulação, uma vez que um estado limite de serviço pode desencadear a ocorrência de um estado limite último.

### 3.4.1 Deformação plástica acumulada e ovalização

No caso do *reeling*, o carregamento cíclico ao qual a tubulação é submetida pode ocasionar aumento na ovalização do componente. Com isso, a norma DNV-ST-F101 sugere uma equação para que seja realizado uma avaliação da ovalização de dutos submetidos à flexão, com o intuito de validar o projeto do componente, na qual a ovalização experimentada pela tubulação não deve exceder 3%.

Nesse modo de instalação, o critério é válido durante todo o processo, incluindo o enrolamento, desenrolamento e alinhamento. Com isso, tem-se esse critério indicado pela equação 5.48 da norma DNV-ST-F101, conforme exemplificado na equação 1. Onde,  $D_{max}$  e  $D_{min}$  referem-se, respectivamente, ao maior e menor diâmetro interno ou externo mensurado e  $O_0$  à própria ovalidade da tubulação.

$$O_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \leq 0.03 \quad (1)$$

### 3.4.2 Flambagem localizada (*local buckling*)

Dois critérios fundamentais para avaliar a flambagem localizada em dutos, conforme delineado na seção 5 da norma DNV-ST-F101, são o carregamento controlado e o deslocamento combinado.

O carregamento controlado consiste em uma resposta vinculada às cargas axiais impostas pelo carregamento. Nesse método, as variações na geometria e no formato do duto não afetam o carregamento aplicado, tornando esse modo inadequado para avaliar os efeitos do *reeling*. Em contrapartida, o controle de deslocamento utiliza como critério a resistência à tensão de flexão, representada pelo limite plástico do duto. Essa abordagem desencadeia uma resposta baseada na geometria do componente, podendo ser empregada para avaliar o efeito do bobinamento, dado que o *reeling* é um processo controlado pela curvatura da bobina. Entretanto, é possível que existam regiões do tubo com deformações em um critério intermediário situado entre o carregamento controlado e o deslocamento controlado. Isso ocorre devido à presença de locais nos quais não há um posicionamento completo do componente em relação à superfície da bobina (Vilas Bôas, 2012).

### 3.4.3 Colapso por pressão externa

A partir da origem do colapso, tem-se diferentes tipos e configurações desse fenômeno. Há investigações que avaliam o comportamento de dutos com diferentes dimensões e descrevem quatro modos de falha: colapso de escoamento, plástico, elástico e de transição. (Vilas Bôas, 2012). Esses modos estão apresentados na Figura 3.5 evidenciando a relação entre a razão  $D/t$  (diâmetro/espessura) e a resistência ao colapso (Brechan, 2020).

O colapso plástico consiste em um estado crítico no qual há perda da estabilidade da estrutura mediante a aplicação de tensão radial externa que leve à falha do material. Esse modo se refere à geração de altas deformações na direção circunferencial da tubulação e pode ser classificado em dois tipos, levando em conta o instante de vida da tubulação: de lançamento, relacionado com a instalação; e de operação (Kyriakides, 2023). O colapso por instalação configura a condição na qual o duto está mais sujeito a propagar esse colapso, em razão de estar vazio e submetido a alta tensão de flexão (Massa, 2003). A norma DNV-ST-F101 ainda prevê que durante a operação a pressão suficiente seria 1,3 vezes acima da pressão externa.

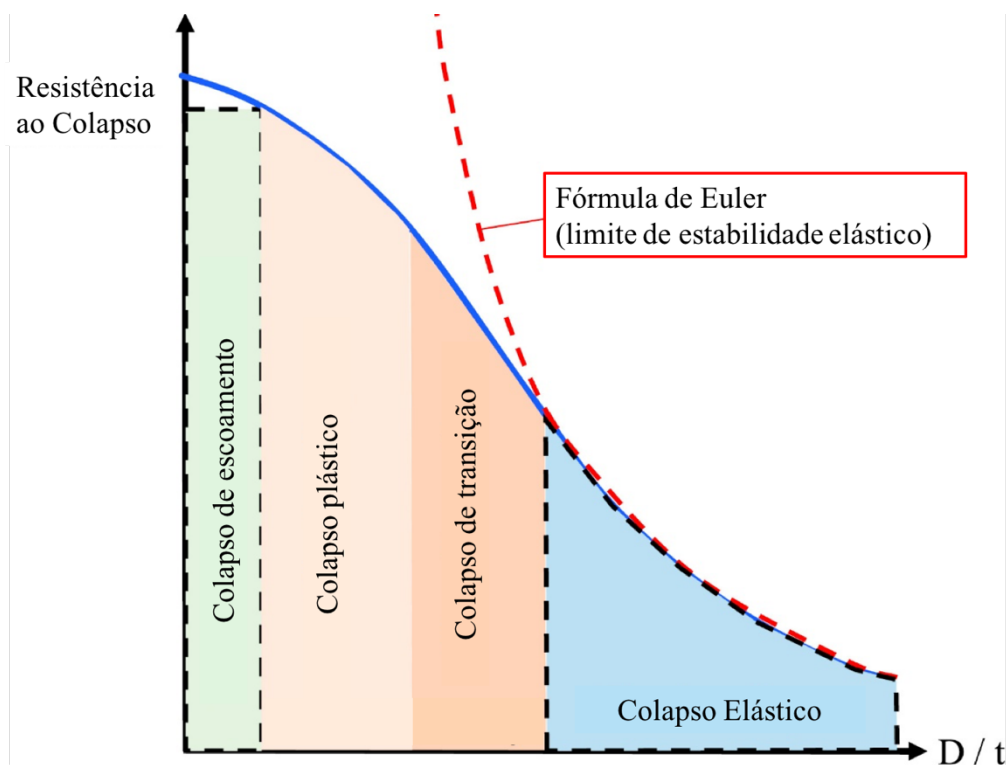


Figura 3.5 Gráfico para influência da relação entre diâmetro/espessura de parede na resistência ao colapso de tubos e os quatro regimes de colapso: escoamento, plástico, transição e elástico para um determinado aço. Fonte: Adaptado de Brechan et al (2020).

- Colapso de escoamento (*yield strenght collapse*): ocorre quando a pressão externa gera tensões que atinjam o limite de escoamento no interior da parede do tubo;
- Colapso plástico (*plastic collapse*): gerado quando tensão são maiores que o limite de escoamento no sentido circunferencial;
- Colapso elástico (*elastic collapse*): baseia-se na flambagem instável na direção circunferencial, acarretando uma tensão menor do que o limite de escoamento do material;
- Colapso de transição (*transition collapse*): situa-se entre o colapso plástico e elástico, descrevendo características intermediárias entre eles.

### 3.5 Mecanismos metalúrgicos atuantes em carregamento cíclico

Conforme mencionado na seção 3.2.3, são três os mecanismos metalúrgicos que acarretam uma nítida influência nas propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos à deformação cíclica: encruamento, existente durante a deformação plástica; envelhecimento, como um resultado do processo de difusão; o efeito Bauschinger, no qual verifica-se uma redução da tensão de escoamento do material mediante inversão no sentido de carregamento em um material sendo deformado no seu regime plástico (Dieter, 1988).

#### 3.5.1 Encruamento

O encruamento pode ser observado em metais dúcteis cujo limite de escoamento aumenta após o material ser deformado em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização (Meiwes et al., 2014). Esse mecanismo se baseia na movimentação de discordâncias presentes no material durante o processo de deformação, que só ocorre quando há presença de discordâncias móveis. Em virtude da deformação aplicada, fontes geradoras de discordâncias, como - por exemplo - fontes de Frank-Read<sup>1</sup>, aumentam a densidade dessas discordâncias no material e, conseqüentemente, a tensão necessária para que o material mantenha sua deformação também aumenta. Assim, tem-se o efeito do endurecimento por deformação, também conhecido como encruamento (Reed-Hill, 1982).

A Figura 3.6 é uma representação desse efeito, no qual o ponto  $\sigma_1$  representa o limite elástico do material. Desde o início do carregamento até este ponto, observamos a região

<sup>1</sup> Fontes de Frank-Read são mecanismos responsáveis pela emissão de novas discordâncias no material em planos de escorregamento específicos mediante a aplicação de uma força (Reed-Hill, 1982).

elástica do material, cujo comportamento é descrito pela lei de Hooke. Após esse ponto, o material exibe tanto comportamento elástico quanto plástico. Caso uma amostra seja carregada continuamente até o ponto  $\sigma_2$  e, em seguida, seja descarregada, essa redução da carga irá descrever um comportamento próximo ao elástico, sendo paralelo à região linear inicial da curva. No entanto, após a descarga, a deformação não retorna a zero, e essa parcela residual corresponde à deformação plástica aplicada. Se a amostra for submetida a um novo carregamento, a curva tensão-deformação seguirá um caminho de recarga idêntico ao caminho da descarga, desviando-se da linearidade somente quando a curva original é atingida novamente em  $\sigma_2$ . Essa mudança no comportamento da curva irá ocorrer para um valor de tensão e carga aplicada mais alta em relação à inicial, indicando que o limite elástico aumentou. Esse fenômeno é importante de ser considerado em projeto de tubulações que irão sofrer aplicação de um carregamento que gere deformação do componente (Meiwes et al., 2014).

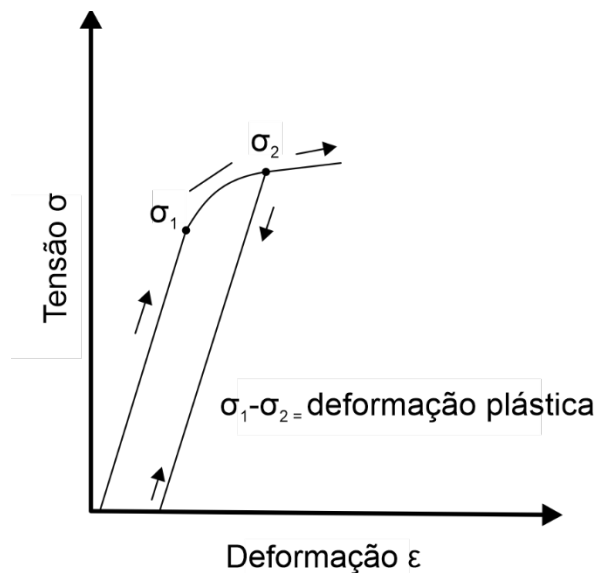


Figura 3.6 Curva representativa do fenômeno de endurecimento exibido no material.  
Fonte: Adaptado de Meiwes et al (2013).

### 3.5.2 Envelhecimento

O envelhecimento promove alterações nas propriedades do material ao longo do tempo quando exposto à temperatura ambiente, sendo possível sua aceleração em caso de variações térmicas. Esse fenômeno ocorre devido à interação entre discordâncias e átomos de soluto, resultando no reordenamento desses átomos causando o ancoramento de discordâncias anteriormente móveis (Reed-Hill, 1982).



Classifica-se o envelhecimento de duas formas: estático, que ocorre logo após a deformação; e dinâmico, ocorrendo simultaneamente com a deformação plástica introduzida no material. A partir dele, tem-se efeitos como:

- Aumento da tensão plástica, causando um endurecimento permanente;
- Aumento na resistência à fadiga;
- Redução do alongamento;
- Aumento da temperatura de transição dúctil-frágil.

### 3.5.3 Efeito Bauschinger

O fluxo do material é influenciado pelo estado de tensões do componente, resultando em uma modificação na curva de tensão-deformação do material. Assim, a deformação aplicada em um metal, caso sofra uma inversão de sentido após o escoamento, reflete-se em uma trajetória representada na Figura 3.7. Ao analisar esse esquema, observa-se que a tensão de escoamento para a inversão do sentido, de tração para compressão, exibe um valor reduzido. Ou seja, o módulo da tensão de escoamento em tração é superior ao registrado em compressão. Na Figura 3.7 representa-se uma liga de alumínio 2024, em que o ponto  $\sigma_{ot}$  indica a tensão de escoamento no sentido trativo,  $\sigma_{oc}$  refere-se a esse valor em módulo no sentido inverso (compressivo) e o ponto A representa a tensão de escoamento do material em compressão após a inversão do carregamento. Nota-se que o ponto A não corresponde ao mesmo valor do ponto  $\sigma_{oc}$ . Esse comportamento é conhecido como Efeito Bauschinger (Dowling, 2013).

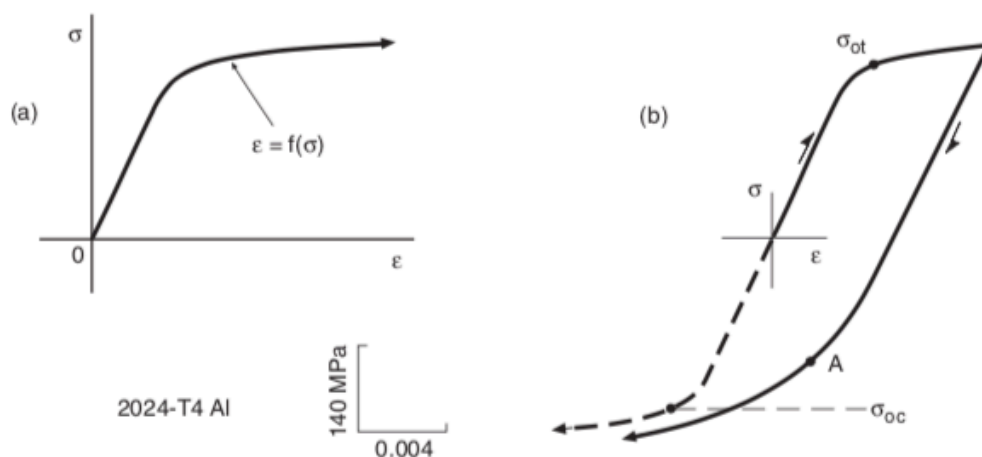


Figura 3.7 (a) Curva de carregamento de ensaio uniaxial para liga AA2024-T4; (b) carregamento seguido de descarregamento em que o efeito Bauschinger modifica a tensão de escoamento em compressão do material. Fonte: Dowling, 2013.

Sendo assim, evidencia-se que o efeito Bauschinger pode ser percebido quando um material é submetido à inversão de carregamento, no sentido trativo seguido de compressivo, resultando no endurecimento do material durante a tração. Para modelar esse comportamento, adota-se o modo de endurecimento cinemático como uma aproximação mais precisa que estime esse efeito (Lemaitre et al., 1994). Durante o *reeling* o material é submetido aos estágios de bobinamento, desbobinamento e alinhamento. Estima-se que o processo de instalação introduza dois ciclos de deformação no material. Durante o lançamento dos dutos ao mar, podem ser realizadas operações de abandono e recolhimento de trechos de tubos. Em função da capacidade de bobinamento do carretel no navio, o lançamento do comprimento total do duto necessário para um determinado projeto de uma única vez pode ser insuficiente. Nessa situação, o navio retorna à base para recarregar o carretel e prosseguir com o lançamento. Porém, para viabilizar esse processo, a ponta do último duto lançado na primeira viagem é soldada à extremidade do duto que ainda está no carretel. Diante disso, tem-se a realização de uma operação planejada que pode acarretar em mais um ciclo de deformação no material além do habitual (Hepner, 2018). Logo, para antecipar o comportamento do material sob carregamento cíclico, é essencial realizar uma previsão matemática que considere a atuação do efeito Bauschinger a cada inversão de sentido no carregamento durante cada ciclo (Lin et al., 2018).

### 3.6 Banda de Luders: Efeito do Escoamento Descontínuo

Um agravante no método de instalação das tubulações através do *reeling* existe quando o material utilizado exhibe bandas de Luders. Essas bandas representam uma instabilidade do material associada ao desprendimento das discordâncias de atmosferas de soluto, denominadas atmosferas de Cottrell (Kyriakides et al., 2015).

Esse fenômeno ocorre em aços com baixo teor de carbono e resulta na presença de um efeito no limite de escoamento, caracterizado por um ponto máximo de tensão na região do escoamento, seguido por uma redução (Reed-Hill, 1982). As bandas de Luders se propagam através do material, enquanto a tensão necessária para manter essa deformação permanece constante em uma região de limite inferior do escoamento. Quando toda a extensão do material é deformada pela movimentação dessa frente de deformação, ocorre o endurecimento homogêneo do corpo de prova, e o regime plástico passa a exibir o comportamento convencional desse estágio. A formação e propagação dessas frentes constituem o fenômeno conhecido como banda de Luders, sendo possível observá-lo macroscopicamente e reproduzi-

lo numericamente por meio do modelamento do material como um sólido elasto-plástico que manifesta esse efeito após o endurecimento (Kyriakides et al., 2015).

Devido à liberação inicial da primeira discordância em relação à nuvem de concentração de soluto, as próximas movimentações de discordâncias ocorrem em tensões menores em relação à primeira. Nesse estágio, observa-se um patamar com aspecto serrilhado na curva tensão-deformação do material - delimitando o limite inferior de escoamento-, que representa o destravamento de novas discordâncias acarretando movimentação e propagação da deformação ao longo do material (Reed-Hill, 1982). O estágio final desse fenômeno ocorre quando as bandas de Luders se espalham por todo o comprimento do componente, fazendo com que seja retomado o escoamento plástico da maneira convencional.

A Figura 3.8 demonstra o efeito das bandas de Luders em um aço X60 no começo do escoamento. A Figura (b), especificamente, registra a curva de tensão-deformação desse mesmo material até a ruptura do corpo de prova. A partir de 2,97% de deformação tem-se o início do regime plástico usual para o material avaliado (Kyriakides et al., 2023).

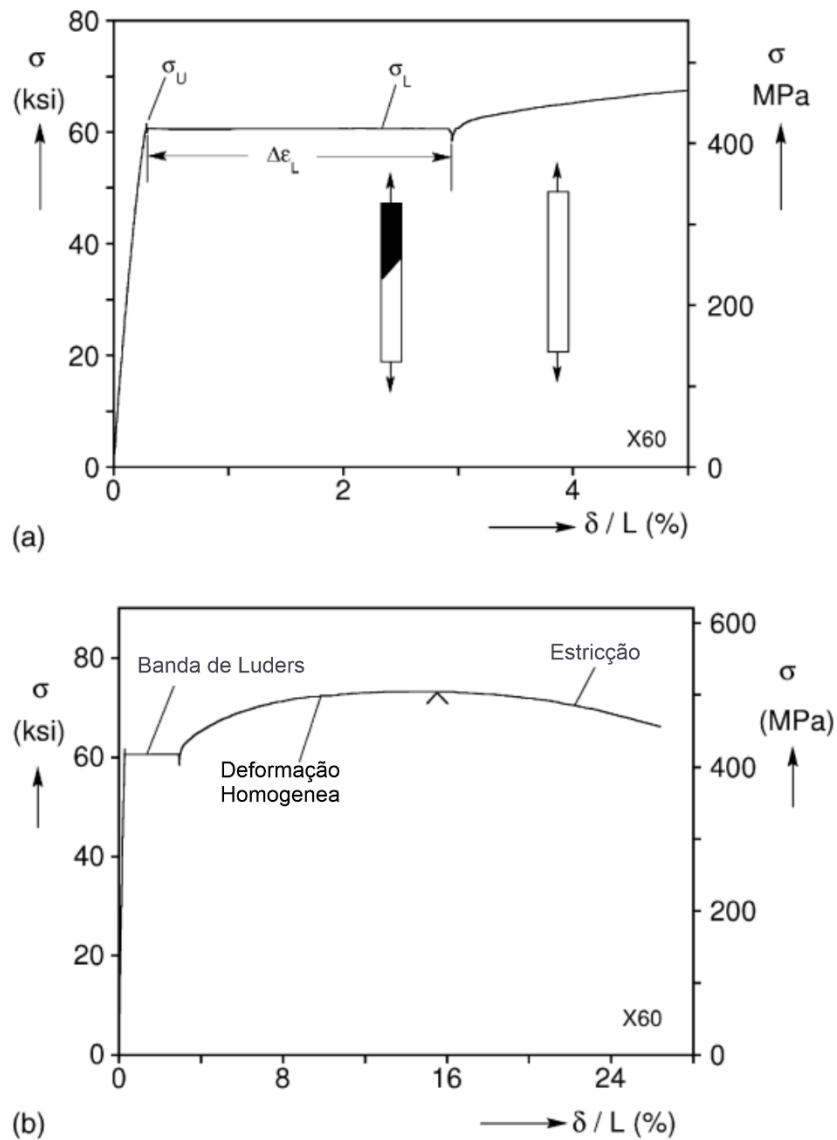


Figura 3.8 Gráfico tensão-deformação para o aço X60: (a) ênfase na região do patamar de escoamento descontinuo; (b) curva até ruptura do material.  
 Fonte: Adaptado de Kyriakides et al (2023).

Em função de representar um fenômeno visível macroscopicamente, essa deformação não homogênea pode ser ilustrada pela Figura 3.9, que representa uma sequência de imagens, com intervalo de tempo constante. Essas imagens retratam a superfície de um corpo de prova, exibindo a propagação das bandas de Luders entre 1% e 2% de deformação aplicada. As áreas claras indicam a região do material deformada, enquanto as áreas escuras representam uma região relativamente livre de deformações. Ambas são delineadas por uma frente de deformação que se move com velocidade praticamente constante (Kyriakides et al., 2023).

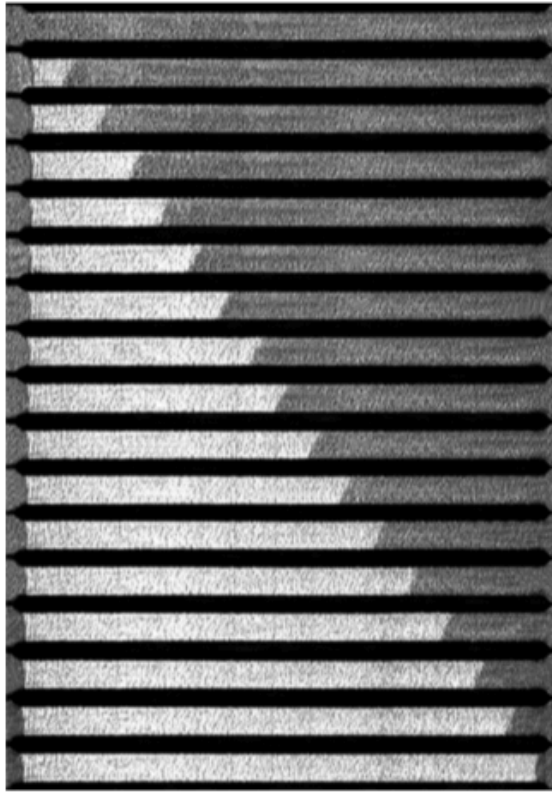


Figura 3.9 Sequência de fotos demonstrando a evolução das bandas de Luders em teste trativo para tiras de aço X70.

Fonte: Kyriakides et al. (2023).

Tanto o início desse efeito, caracterizado pelo limite superior de escoamento, quanto sua continuação, identificada pelo limite inferior, são influenciados pelo tamanho de grão e pela composição química do material. Além disso, esses fatores também estão associados à temperatura à qual o componente está exposto e à taxa de carregamento aplicada (Kyriakides et al., 2023).

Existem teorias científicas que buscam explicar microscopicamente a presença dessas bandas de deformação. Entre essas teorias, a proposta por Cottrell e Bilby é amplamente aceita e discutida.

### 3.6.1 Atmosfera de Cottrell

De acordo com a teoria de Cottrell e Bilby, o limite de escoamento definido é resultado da interação entre discordâncias e átomos de soluto, principalmente de nitrogênio, de modo que esses átomos concentrados na região das discordâncias as mobilizam ou ancoram. Em

homenagem ao pesquisador, nomeou-se essa concentração de átomos como “atmosferas de Cottrell” (Reed-Hill, 1982).

Na teoria, o limite superior de escoamento, identificado pelo ponto máximo de escoamento, simboliza a liberação da primeira discordância entre os átomos de soluto. Após essa liberação inicial, as discordâncias conseguem se movimentar sob tensões menores (Reed-Hill, 1982). A teoria de Cottrell e Bilby é amplamente aceita, inclusive para explicar a recorrência das bandas de Luders quando o material é submetido a um tratamento térmico que possibilita a difusão dos átomos para uma nova formação das regiões com concentrações de soluto. Esse fenômeno de reaparecimento ocorre em função do envelhecimento (Kyriakides et al., 2015).

### 3.7 Mecanismo de endurecimento cíclico em aços

O modelo de endurecimento uniaxial apresenta uma resposta no material que difere de quando está sujeito a carregamento cíclico, devido aos efeitos induzidos no material pelos esforços aplicados. Portanto, a amplitude das tensões e deformações impostas é descrita pelo comportamento em *loops* da histerese formada por essa configuração de carregamento. Assim, para otimizar a capacidade de previsão em análises por modelos numéricos, é necessário criar uma superfície que mantenha a memória desse carregamento e do efeito experimentado pelo material, considerando todos os ciclos de carregamento aos quais o material foi submetido (Filho, 2016).

Materiais com comportamento elastoplástico exibem características específicas quando submetidos a tensões cíclicas. Para descrever a superfície de escoamento, é empregado o critério de Von Mises, o qual postula que o início do escoamento ocorre na região onde há distorção de energia em um estado de tensões multiaxial. Nessa teoria, a superfície de escoamento se desloca por meio de alterações no estado de tensões, variando, portanto, conforme diferentes modos de carregamento e dependendo das propriedades do material para descrever sua trajetória (Jahed et al., 2021). As variações observadas nesse comportamento podem ocorrer no regime elástico do material – encruamento isotrópico; e/ou pela translação desse domínio – encruamento cinemático. Para poucos ciclos de deformação tende a ocorrer uma estabilização do mecanismo isotrópico, enquanto que para maiores deformações, considerando plasticidade cíclica, o mecanismo cinemático é o predominante.

A componente de endurecimento isotrópica é capaz de avaliar tanto carregamentos proporcionais como não-proporcionais, prevendo a expansão da superfície de Von Mises a

cada novo ciclo de carregamento. Por outro lado, a componente cinemática trata do deslocamento dessa superfície a cada novo ciclo, sendo responsável por descrever a atuação do efeito Bauschinger no material (Jahed et al., 2021). Quando o material exhibe ambos os mecanismos de endurecimento atuando simultaneamente, tem-se o mecanismo conhecido como combinado. Esse conceito foi introduzido por Armstrong e Frederick, e posteriormente modificado por Chaboche (Brogiato, et al., 2008).

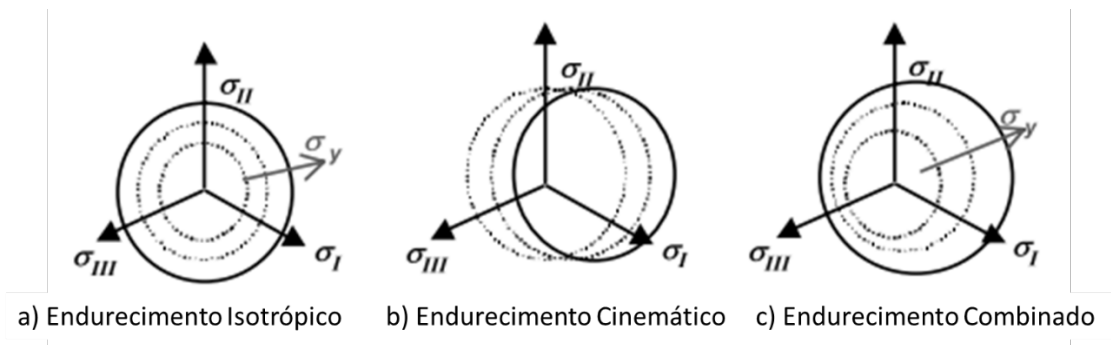


Figura 3.10 Superfície de escoamento mediante ciclos de deformação plástica e a resposta do material para os mecanismos de endurecimento: (a) isotrópico; (b) cinemático; (c) combinado. Fonte: Adaptado de Brogiato et al. (2008).

Na calibração de modelos numéricos que incluam os efeitos de ambas as componentes, são descritos equacionamentos matemáticos para cada parcela, de modo que, no mecanismo combinado, ambas devem ser consideradas. A componente isotrópica é descrita pela exponencial representada pela equação (2). Essa parcela considera a tensão inicial de escoamento e dois outros coeficientes,  $b$  e  $Q_\infty$ . Enquanto que o modo cinemático, representado pela equação (3), em que  $\sigma_{(k)}$  é chamado de backstress e, para ser determinado, são necessários outros dois coeficientes,  $C_k$  e  $\gamma_k$ , que descrevem o módulo do endurecimento e o seu incremento a cada novo ciclo, respectivamente (Rudolph et al., 2016).

$$\sigma = \sigma_{(k)} + Q_\infty(1 - e^{(-b*\epsilon_p)}) \quad (2)$$

$$\sigma_{(k)} = \frac{C_k}{\gamma_k}(1 - e^{(-\gamma*\epsilon_p)}) \quad (3)$$

### 3.8 Correlação de Imagem Digital (DIC)

A Correlação de Imagem Digital (DIC) representa um método óptico sem contato que pode ser utilizado para estimar a deformação de um componente mediante aplicação de uma força. Para isso, o equipamento é posicionado próximo ao componente a ser analisado e captura um conjunto de imagens ao longo da aplicação dos esforços. O software de análise é capaz de extrair os deslocamentos dessas imagens por meio da otimização da correlação entre as intensidades das áreas correspondentes (Zhou et al., 2014). Essa técnica permite a análise de campos de deslocamentos, que representam um mapeamento dos deslocamentos na superfície do objeto por meio do rastreamento de um conjunto de pixels (Alba et al., 2010). Por conta de sua disponibilidade e custo acessível, o DIC está gradualmente se consolidando como uma ferramenta analítica essencial em aplicações mecânicas e estruturais (Xie et al., 2015).

O princípio da técnica de DIC está baseado na comparação de imagens capturadas antes, durante e após a aplicação de um carregamento. Nesse processo, as imagens da superfície são divididas em sub-regiões de análise, e a correlação entre essas sub-regiões resulta em uma matriz de vetores de deslocamento, abrangendo toda a região (Picoy, 2016), como ilustrado na Figura 3.11. Entre as técnicas de metrologia óptica, o método de DIC adota uma abordagem não destrutiva, o que viabiliza a obtenção do campo de deslocamento sem prejudicar a integridade da estrutura. Além disso, a simplicidade de uso da técnica permite sua aplicação em experimentos com diferentes materiais e em diversas de estruturas industriais (Hedan et al., 2014).

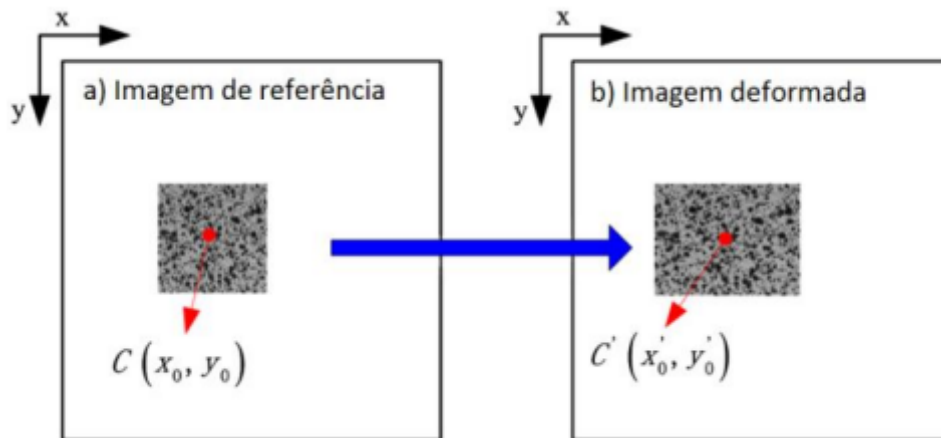


Figura 3.11 Comparação de medidas realizadas em imagens analisadas por DIC (a) sem aplicação de deformação; (b) após deformação. Fonte: Picoy, 2016.



Essa ferramenta, quando operada com apenas um dispositivo de captura é conhecida como 2D-DIC, permitindo a medição de deslocamentos em um plano perpendicular ao eixo óptico. Por outro lado, quando são utilizadas duas câmeras simultaneamente, a técnica recebe o nome de 3D-DIC, permitindo a medição de deslocamentos do objeto nas três direções espaciais (Sesé et al., 2014). Na análise e monitoramento de planos de deslocamentos em um determinado componente, além do DIC, outras técnicas ópticas, convencionais e numéricas podem ser utilizadas. A Figura 3.12 exemplifica possibilidades de técnicas de monitoramento divididas em três categorias: óptica, convencional e numérica. Entre os métodos ópticos, o DIC apresenta a vantagem de operar com um setup simples comparado às demais técnicas.

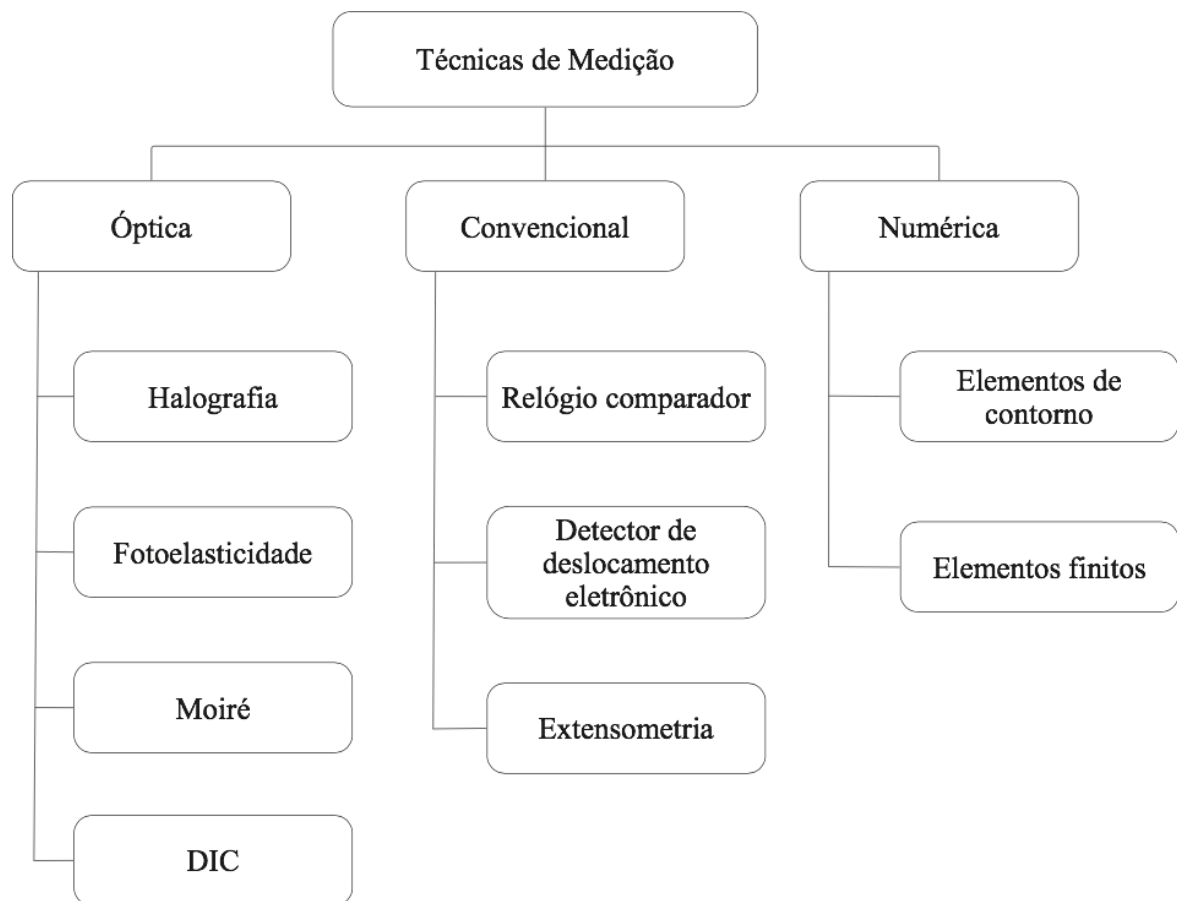


Figura 3.12 Fluxograma de possibilidades de técnicas de medição e monitoramento de ensaios. Fonte: Adaptado de Picoy, 2016.

### 3.8.1 Parâmetros externos que geram influência na medida via DIC

Há alguns fatores que precisam ser considerados para a implementação do método de DIC em função de poderem acarretar erros na aquisição por meio dessa técnica. Entre eles, a resolução da câmera é um dos parâmetros que deve ser considerado tendo como base a área que

se pretende analisar e a distância com que será possível posicionar o equipamento em relação à superfície analisada. A iluminação artificial também é um fator importante, já que mudanças no brilho da imagem afetam as intensidades dos pixels, podendo influenciar no resultado obtido, para isso, aconselha-se o uso de iluminação artificial. Outro fator a ser considerado é a frequência de aquisição das imagens que deve ser analisada em conjunto com as condições do ensaio e com o que se deseja mensurar. Dependendo da taxa de deformação aplicada e da resposta do material perante essa taxa, deve-se ajustar a frequência de aquisição de modo que se obtenham dados suficientes para realização do ensaio e não excessivas que aumentem exacerbadamente o tempo de análise computacional (Beleza, 2017).

Outro fator a ser considerado é a aplicação do padrão estocástico na superfície da amostra, que consiste em um conjunto de pontos homogênea e aleatoriamente distribuídos na superfície do corpo de prova de modo a possibilitar a identificação da região de análise. Salienta-se que esses pontos, além das características citadas, precisam apresentar um alto contraste com relação à coloração do fundo. As técnicas de elaboração do padrão apresentam diferentes tempos de preparo e podem ser realizadas com spray e tintas, consistindo em um método comumente utilizado, ou via simulação computacional. Salienta-se que é importante que o padrão elaborado apresente uma boa adesão à superfície da amostra e que o treino do operador também é importante para correta aplicação (Chen et al., 2015).

## 4 METODOLOGIA

O procedimento experimental utilizado neste trabalho avaliou parâmetros para a execução de ensaio em escala reduzida que simulam o efeito do *reeling*. Todos os equipamentos utilizados estão situados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A realização dos ensaios viabiliza a determinação dos coeficientes que caracterizam os mecanismos de endurecimento presentes no material quando expostos a tal carregamento. Para preparação dos corpos de prova, foram usinadas amostras a partir de um trecho de duto rígido sem costura API X70.

### 4.1 Simulação do efeito do *Reeling* em escala reduzida (SSRS)

O ensaio que simula o efeito do *reeling* em escala reduzida é realizado com aplicação de carregamento cíclico em equipamento servo hidráulico. O controle desse ensaio se baseia na deformação aplicada, já que o processo de bobinamento induz cerca de dois ciclos de deformação plástica, cujo valor se relaciona com o raio do carretel e da tubulação. Quanto à quantidade de ciclos, são comumente aplicados ciclos adicionais de deformação, além dos originados pelo processo convencional que envolve enrolamento, desenrolamento e alinhamento, devido às operações de recolhimento que são inerentes ao processo e ocorrem durante o lançamento (Hepner, 2008). Em função disso, como parâmetro para os ensaios realizados nesse trabalho, serão aplicados três ciclos de carregamento, iniciando em tração e finalizando em compressão, a fim de contemplar não apenas condição mínima dos dois ciclos, mas também adicionar uma parcela representativa do esforço adicional que se sabe que também é imposto.

O material estudado apresenta patamar de escoamento descontínuo e um dos objetivos do trabalho consiste em avaliar a extensão dessa região e identificar em qual zona do gráfico está ocorrendo a inversão do sentido do carregamento. Além disso, para sua execução é necessário definir uma geometria de corpo de prova que não apresente flambagem quando submetida à inversão do carregamento. O fluxograma na Figura 4.1 representa os elementos que serão estudados para realização dessa simulação.

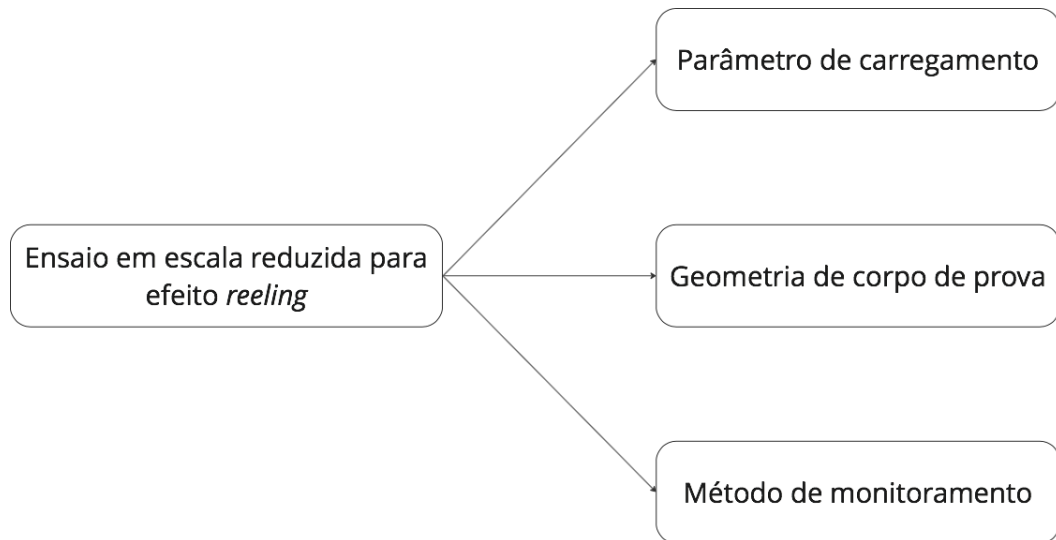


Figura 4.1 Fluxograma de fatores a serem avaliados e determinados para simulação do *reeling* em escala reduzida.

Fonte: a Autora.

#### 4.1.1 Avaliação do patamar de escoamento

Para realização do ensaio do efeito do *reeling* em escala reduzida, é necessário deformar plasticamente o material, sucessivamente, no sentido trativo e compressivo. Utilizando-se a Equação 3, é possível prever o quanto de deformação será imposta na tubulação durante o processo de bobinamento com base no raio do duto ( $r_{duto}$ ) e do raio do carretel ( $r_{carretel}$ ) (Vilas Bôas, 2012).

A tubulação da qual foram retirados os corpos de prova, possui raio de curvatura de 130mm e será considerado o raio do carretel equivalente a 6 metros, representando uma configuração comum para esse processo (Vilas Bôas, 2012). Sendo assim, tem-se que o valor que estima a deformação aplicada para execução do carregamento sob essas condições será de 2,1%, conforme descrito na Equação 3. Porém, para fins de simplificação, considera-se o valor aproximado de 2%, com começo no sentido trativo seguido de uma inversão para o sentido compressivo.

$$\varepsilon = \frac{r_{duto}}{r_{carretel} + r_{duto}} = \frac{130}{6000 + 130} = 2,1\% \quad (3)$$

O material analisado apresenta o efeito do patamar de escoamento descontínuo e, para investigar a região do regime plástico na qual ocorre a inversão do sentido do carregamento, foram realizados ensaios mecânicos de tração que possibilitam a verificação da extensão desse patamar. Para isso, foram usinadas duas amostras do mesmo material, extraídas na mesma direção do tubo e denominadas T-A e T-B, na qual “T” se refere ao carregamento trativo uniaxial à qual foi submetida, a geometria das amostras é especificada na Tabela 4.1. O ensaio foi monitorado por meio de uma técnica não-convencional de correlação de imagem digital (DIC) e por extensômetro do tipo clip gauge (COD). Entre as amostras testadas, variou-se o comprimento do COD, com intuito de avaliar se essa alteração iria provocar uma modificação na extensão de propagação do patamar de escoamento. Os corpos de prova foram tracionados até sua ruptura em um equipamento de teste servo hidráulico fabricado pela MTS.

Tabela 4.1 Identificação e geometria para amostrar utilizadas em ensaio de tração.

Identificação	Diâmetro [mm]	Extensômetro tipo clip gauge [mm]
T-A	12,5	25
T-B	12,5	50

Fonte: a Autora.

Os dados adquiridos foram plotados em um gráfico de Tensão [MPa] x Deformação [%], possibilitando a visualização gráfica da região que delimitava o começo do regime plástico convencional e, com isso, permite-se a comparação com relação ao valor calculado de inversão do carregamento para SSRS. A Figura 4.2 representa a configuração de montagem do ensaio utilizando o equipamento de monitoramento por meio da técnica de DIC.

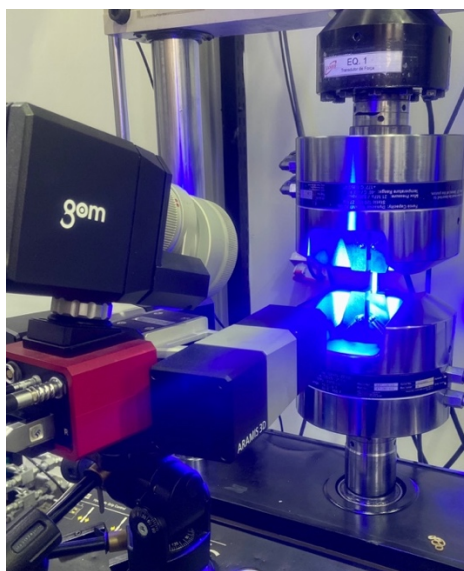


Figura 4.2 Execução de ensaio de tração com monitoramento por meio da técnica de DIC.  
Fonte: a Autora.

#### 4.1.2 Geometria de Corpo de Prova

A geometria do corpo de prova é de grande relevância para a execução de ensaios experimentais, especialmente quando envolve uma inversão no sentido do carregamento, já que esse fato pode acarretar em flambagem do corpo de prova e inviabilizar a análise do resultado obtido. A norma DNV-ST-F101 prevê algumas condições para a simulação do reeling em escala reduzida. No entanto, para definição da geometria do corpo de prova, tem-se o manual de boas práticas DNV-RP-F108 que sugere uma geometria para realização de diversos ensaios mecânicos com diferentes configurações. No entanto, durante a simulação com carregamento cíclico, alguns autores observaram a ocorrência de flambagem no corpo de prova, mesmo seguindo a geometria sugerida. Diante disso, tornou-se necessário projetar um dispositivo que evitasse essa ocorrência (Schoeman et al., 2023).

Para definir uma geometria que possibilite a realização dos ensaios para as condições estabelecidas na seção 4.1.1 sem que ocorra flambagem da amostra ou que seja necessário um dispositivo que a evite, foram usinadas amostras com diferentes geometrias, conforme especificado na Tabela 4.2. Evidencia-se que a relação entre o diâmetro e o comprimento do corpo de prova são os principais parâmetros que influenciam no seu desempenho durante o teste.

Tabela 4.2 Identificação e geometria de amostras para ensaio com carregamento cíclico.

<b>Identificação</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Número de amostras</b>
<b>H1</b>	12,5 mm	200mm	3
<b>H2</b>	6,0 mm	100mm	3
<b>H3</b>	10 mm	100mm	3
<b>H4</b>	20 mm	200mm	3

Fonte: a Autora.

Após a usinagem, as amostras foram preparadas para o monitoramento via DIC que será abordado com maior detalhamento na seção 4.2. Além desse método, utilizou-se o COD para monitoramento dos ensaios em todas as amostras testadas. Como mencionado anteriormente, iniciou-se o carregamento no sentido trativo seguido por compressivo e utilizou-se um equipamento servo hidráulico fabricado pela MTS, com capacidade máxima de 100kN, para realização dos ensaios nas amostras de geometria H1, H2 e H3. Já a amostra H4, além de

demandar a aplicação de uma carga máxima mais alta em função de seu maior diâmetro, foi projetada uma rosca M24 para fixação da amostra no equipamento a fim de evitar possíveis escorregamentos do corpo de prova. Esses fatores conduziram à realização do ensaio em um equipamento servo-hidráulico fabricado pela INSTRON capaz de suportar o incremento na carga máxima do ensaio, em até 200kN, e fornecer os dispositivos necessários para a fixação do corpo de prova. Todos os ensaios foram conduzidos com taxa de deformação de 0,75mm/min. A Figura 4.3 representa os equipamentos utilizados para realização dos testes.

Quanto à organização dos testes, inicialmente foi testada uma amostra para cada geometria, enquanto que as demais apenas nas condições em que não houve evidência de flambagem do corpo de prova no primeiro ensaio. A avaliação da ocorrência ou não de flambagem foi realizada visualmente.

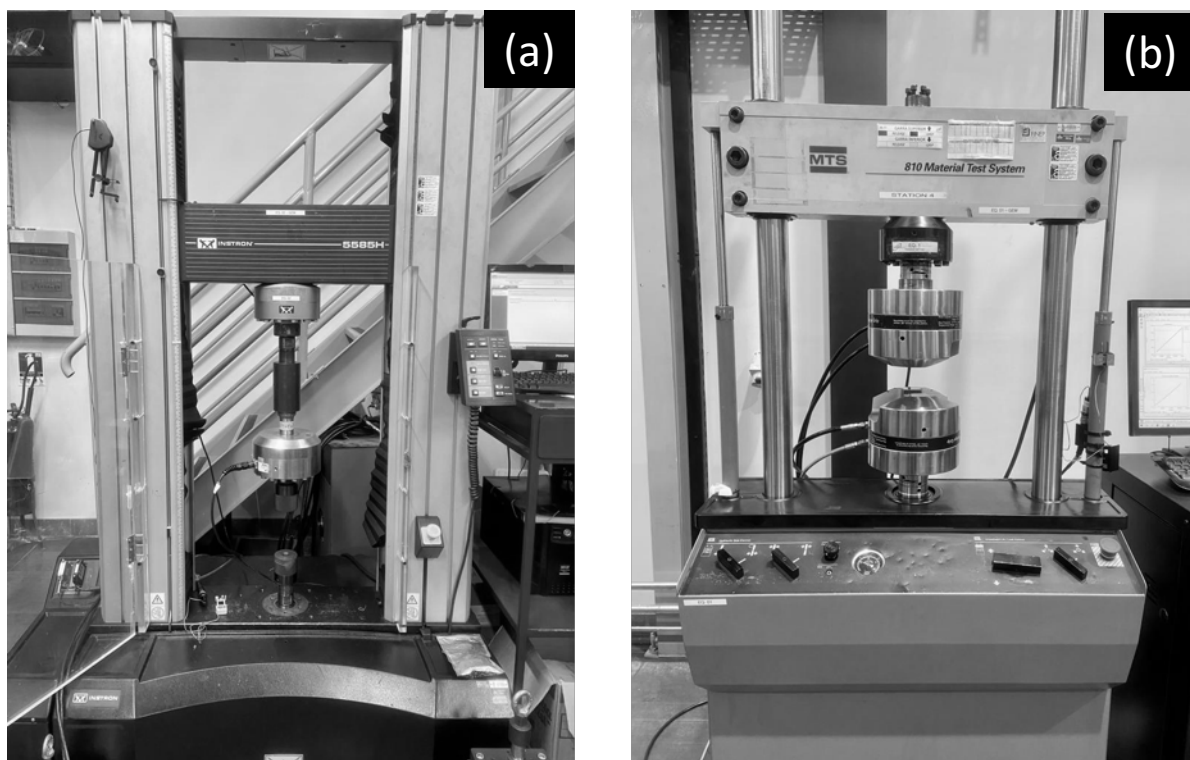


Figura 4.3 Equipamento universal de testes (a) fabricado pela INSTRON; (b) fabricado pela MTS.

Fonte: a Autora.

#### 4.1.3 Determinação de coeficientes de endurecimento

O material analisado apresenta um mecanismo de encruamento combinado, ou seja, prevê a existência de duas componentes de endurecimento atuando simultaneamente. Enquanto

que o endurecimento isotrópico é responsável pela expansão da superfície de escoamento inicial a cada novo ciclo de tensões e deformações impostas no material, o modelo cinemático prevê que a superfície de escoamento se desloque conforme esse incremento de deformação ocorre, considerando o efeito Bauschinger atuando no material.

A partir da curva experimental do ensaio em histerese, possibilita-se o cálculo dos coeficientes que descrevem o comportamento tanto da componente isotrópica, quanto cinemática. Como se deseja obter dados para o modelo combinado, ambas deverão ser estimadas. Para isso, o resultado do ensaio com melhor desempenho realizado conforme especificado na seção 3.1.2 será utilizado como base para os cálculos.

#### 4.1.3.1 Coeficiente de encruamento isotrópico

O modelo isotrópico descreve o comportamento dos ciclos considerando dois parâmetros: “ $Q_\infty$ ”, que descreve a mudança máxima da superfície de escoamento, e “ $b$ ”, que se refere à taxa com que ocorre esse crescimento (Rudolph et al., 2016). Para calibração do modelo por elementos finitos, são esses os dois coeficientes que precisam ser informados visando a descrição do comportamento isotrópico do material, além do valor de  $\sigma_0$  referente à tensão inicial do regime plástico.

Para a determinação dos parâmetros, considerou-se o último pico trativo de deformação da curva experimental, especificamente no terceiro ciclo, uma vez que esses dados representam o histórico do carregamento aplicado. Portanto, sobre essa porção da curva, utilizou-se a equação 5.

$$\sigma = \sigma_0 + Q_\infty(1 - e^{(-b*\varepsilon_{equiv.p})}) \quad (5)$$

#### 4.1.3.2 Coeficiente de encruamento cinemático

O encruamento cinemático pode ser observado quando se aplica uma inversão do carregamento no regime plástico do material e se verifica uma movimentação da superfície de escoamento deslocando seu centro, porém mantendo a área dessa região. O fator conhecido como *backstress*, indicado como  $\sigma$  na equação (4), é utilizado para descrever o comportamento do material.

Na simulação por elementos finitos, o software realiza o cálculo do *backstress* desde que sejam informados valores para as variáveis presentes na equação (C,  $\gamma$  e sua respectiva



deformação plástica). Dessa forma, a curva experimental de histerese fornece os dados necessários para a aplicação das equações 7 e 8, selecionando-se valores de tensão e deformação a partir de pontos extraídos da curva.

$$\sigma = \frac{C_K}{\gamma_K} (1 - e^{(-\gamma \varepsilon_p)}) \quad (6)$$

Onde,

$$C_K = \frac{\sigma_{(k)} - \sigma_{(k-1)}}{\varepsilon_{p(k)} - \varepsilon_{p(k-1)}} - \frac{\sigma_{(k+1)} - \sigma_{(k)}}{\varepsilon_{p(k+1)} - \varepsilon_{p(k)}} \quad (7)$$

$$\gamma_K = \frac{1}{\varepsilon_{p(k)}} \quad (8)$$

#### 4.1.4 Alteração de propriedades mecânicas após simulação de reeling

As alterações nas propriedades mecânicas do material provenientes da instalação pelo método Reel-Lay podem ser analisadas na simulação em escala reduzida sem a necessidade de uma análise por elementos finitos ou demais recursos. Porém, a norma DNV-ST-F101 especifica que, para esse propósito, além do carregamento cíclico deve-se realizar o envelhecimento artificial a 250°C por um período de uma hora. Portanto, selecionaram-se duas amostras submetidas ao carregamento cíclico, identificadas como H4-A e H4-B, para aquecimento em um forno convencional convectivo, representado na Figura 4.4. A temperatura foi monitorada com auxílio de termopares.



Figura 4.4 Forno convencional utilizado para envelhecimento.  
Fonte: a Autora.

Após o tratamento térmico, foi realizada uma adequação da geometria para realização de ensaio de tração, conforme Figura 4.5.

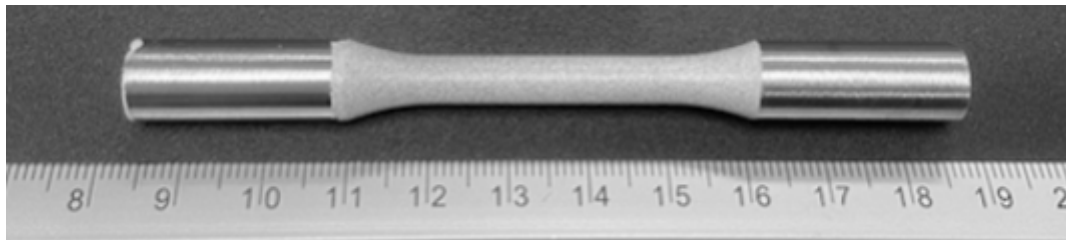


Figura 4.5 Amostra após deformação cíclica, envelhecimento e adequação de geometria.  
Fonte: a Autora.

O procedimento estabelecido para essa análise segue o fluxograma do processo conforme especificado na Figura 4.6.

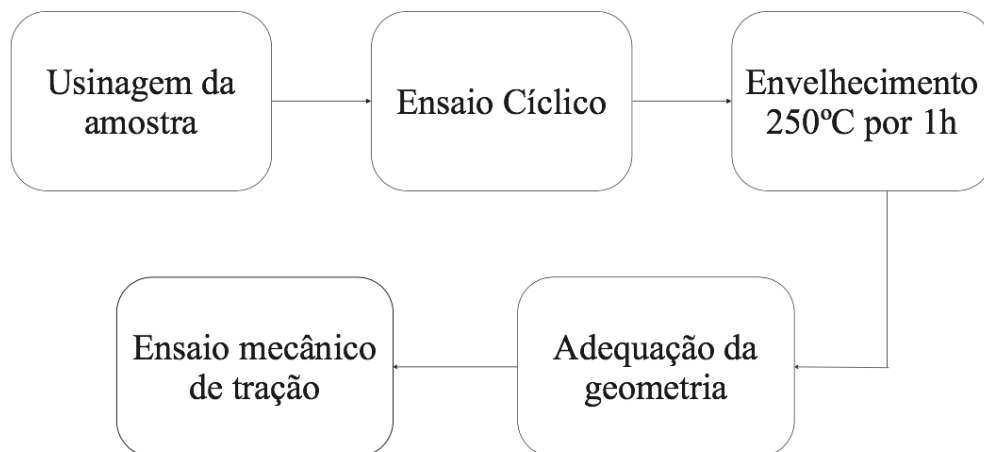


Figura 4.6 Fluxograma do procedimento previsto na norma DNV-ST-F101 para análise de propriedade mecânica do material submetido ao ensaio cíclico para simulação do *reeling*.  
Fonte: a Autora

A fim de comparar esse resultado com a condição sem aplicação do carregamento cíclico, será utilizado os resultados dos testes T-A e T-B realizados na seção 4.1.1. Todos os ensaios foram monitorados por meio do DIC e do COD.

#### 4.2 Avaliação da sensibilidade às variáveis de aplicação do padrão estocástico

Uma das variáveis que influenciam na análise via DIC é a iluminação do local em que será realizado o monitoramento. Porém, como esse fator é de difícil controle, o equipamento possui, além do conjunto de lentes, uma iluminação artificial para minimizar erros relacionados a essa variável. Outro fator importante consiste na frequência de aquisição do equipamento, medida em hertz, que deve ser suficientemente alta para permitir a captura de uma quantidade de imagens adequada para a análise, mas sem resultar em um arquivo extenso que dificulte o processamento dos dados. Sendo assim, para os ensaios mecânicos realizados, utilizou-se 1,5Hz como setup para essa condição.

Além dos fatores mencionados, para identificação da superfície de análise pelo método de correlação de imagem digital, é necessário a preparação da superfície da amostra com aplicação de um padrão estocástico de pontos. Para tal, realizou-se um estudo visando investigar duas técnicas de aplicação desse padrão em amostras submetidas ao carregamento uniaxial no sentido trativo. Esse ensaio foi monitorado simultaneamente por DIC e extensômetro de resistência elétrica (ERE), com o intuito de avaliar a acuracidade entre a técnica não convencional e a convencional.

Para esse estudo, foram selecionadas quatro chapas retangulares de alumínio da série 5000 divididas em áreas de  $12,25 \text{ cm}^2$ . Sobre essas regiões foi aplicado o padrão estocástico por meio de duas técnicas: decalque e pintura com auxílio de um aerógrafo; ambas serão especificadas nas seções 4.2.1 e 4.2.2. O lado oposto a esse preparo foi instrumentado com extensômetros de resistência elétrica (ERE) na direção longitudinal e seu alinhamento foi realizado com auxílio de um esquadro. Após a preparação, as chapas foram submetidas à carregamento trativo no regime elástico do material, com taxa de carregamento de  $0,5 \text{ mm/min}$  até  $20 \text{ kN}$  de força aplicada. Sendo que, a cada  $5 \text{ kN}$ , o carregamento era mantido constante durante 5 segundos, a fim de se formar quatro patamares que possibilitassem a comparação entre os dados adquiridos via DIC e ERE nesse intervalo de tempo. A sequência básica de preparação das amostras está demonstrada na Figura 4.7.

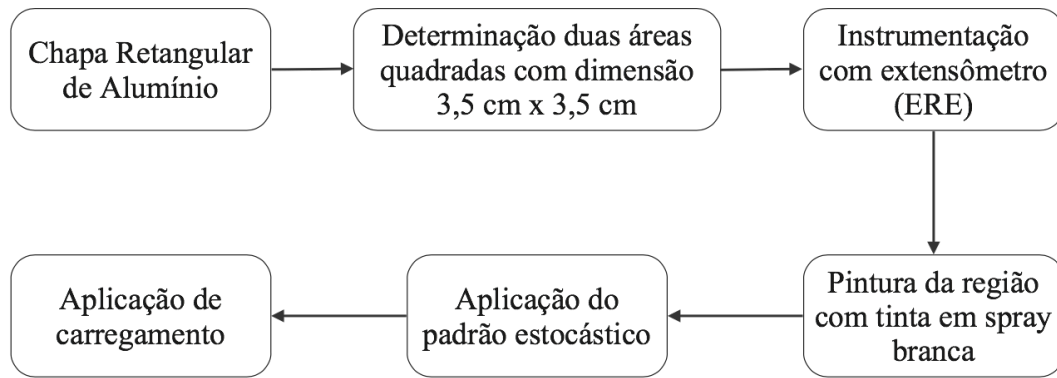


Figura 4.7 Fluxograma do processo de preparação das chapas de alumínio para aplicação do padrão estocástico e ERE.

Fonte: a Autora.

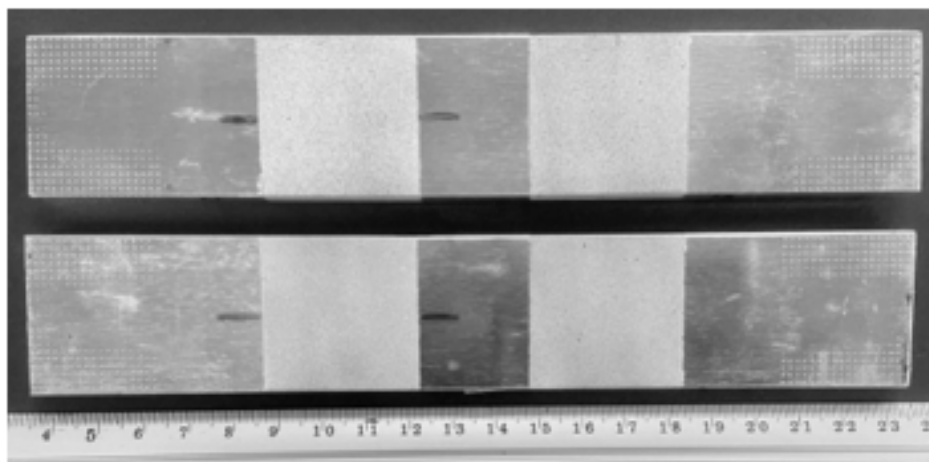


Figura 4.8 Representação de duas das chapas preparadas com o padrão estocástico para aplicação de tensão trativa. A linha na superfície da chapa demarca a região central da amostra para referência de medida.

Fonte: a Autora.

O equipamento de DIC utilizado para todos os testes conduzidos foi o GOM-ARAMIS 3D equipado com duas câmeras de 6M (2752 x 2200), demonstrado na Figura 4.9. Os dados gerados foram analisados através do software GOM Correlate™.



Figura 4.9 Equipamento GOM-ARAMIS com duas câmeras de 6M.  
Fonte: a Autora.

#### 4.2.1 Aplicação de decalque

Utilizando o MATLAB foram elaboradas imagens de padrões de pontos escuros com distribuição aleatória e homogênea, sendo possível a variação do teor desses pontos. O código criado para essa geração está exemplificado no Anexo A.

Elaborou-se imagens com 10%, 20% e 30% de pontos escuros sobre um fundo incolor, conforme Figura 4.10. Após a geração, foi realizado a impressão à laser em papel de decalque. Em seguida, as imagens foram posicionadas sobre a superfície delimitada na amostra, que já havia sido preparada com a aplicação de tinta branca, e o decalque foi transferido com água conforme especificação do fabricante desse papel.

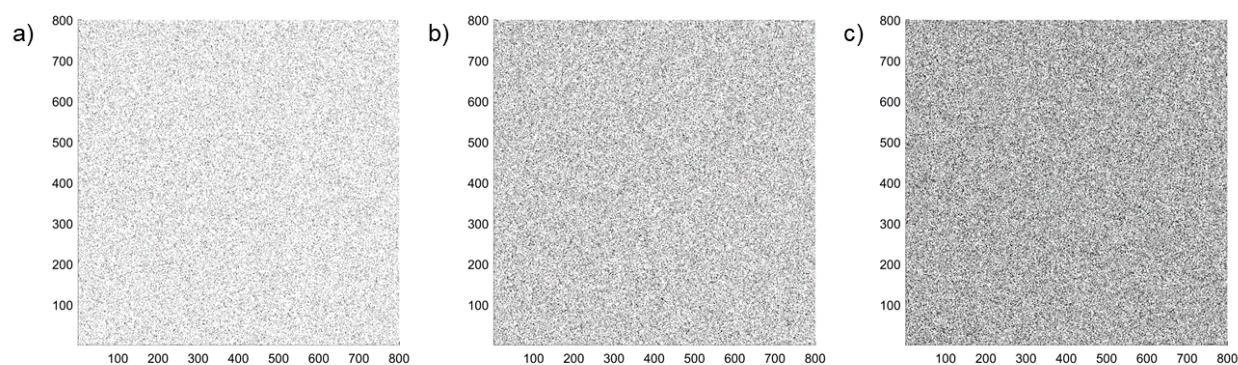


Figura 4.10 Padrões gerados computacionalmente (a) 10% de pontos escuros, (b) 20% de pontos escuros, (c) 30% de pontos escuros.

Fonte: a Autora.

#### 4.2.2 Pintura com auxílio de aerógrafo

Após a pintura da região delimitada para análise com tinta branca, utilizou-se um aerógrafo para aplicação da tinta preta e elaboração de pontos dispersos aleatoriamente sobre a superfície. O aerógrafo utilizado para essa técnica está representado na figura 4.11. Nesse processo, variou-se o diâmetro da abertura de saída do aerógrafo que permite a passagem da mistura (tinta e ar), a fim de se analisar tanto a técnica de aplicação do padrão com o uso de tintas, quanto o diâmetro mais apropriado da ferramenta para essa aplicação. A identificação das amostras preparadas para ambas as técnicas está descrita na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Identificação de amostras submetidas a duas técnicas de aplicação do padrão estocástico para análise por meio de DIC.

<b>Identificação</b>	<b>Técnica</b>	<b>Parâmetro</b>
D10	Decalque	10% de pontos escuros
D20	Decalque	20% de pontos escuros
D30	Decalque	30% de pontos escuros
P2	Pintura com aerógrafo	Diâmetro de saída da mistura 0,2mm
P5	Pintura com aerógrafo	Diâmetro de saída da mistura 0,5mm

Fonte: a Autora.



Figura 4.11 Aerógrafo utilizado para elaboração dos pontos.  
Fonte: a Autora.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Definição de geometria do corpo de prova

Os resultados dos ensaios com carregamento cíclico realizados para cada geometria de amostra estão especificados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Geometria de corpos de prova testadas em carregamento cíclico.

<b>Identificação da geometria</b>	<b>Identificação de amostras testadas</b>	<b>Observação</b>
<b>H1</b>	H1-A	Evidenciou-se flambagem na inversão do sentido do carregamento.
<b>H2</b>	H2-A	Evidenciou-se flambagem na inversão do sentido do carregamento.
<b>H3</b>	H3-A, H3-B, H3-C	Primeira amostra não apresentou flambagem, porém para as duas amostras ensaiadas na sequência se verificou essa ocorrência.
<b>H4</b>	H4-A, H4-B, H4-C	Não apresentou flambagem durante execução dos três testes.

Fonte: a Autora.

Os testes para as amostras usinadas conforme as geometrias H1 e H2 apresentaram flambagem assim que o sentido do carregamento aplicado foi revertido, dessa forma, já no primeiro ensaio, elas foram descartadas. A primeira amostra da geometria H3 não apresentou flambagem aparente, sendo assim foi testada em triplicata. No entanto, a reprodução desse ensaio não foi possível, pois se observou flambagem para as outras duas amostras testadas na sequência. A geometria H4 foi reproduzida em triplicata e não se observou flambagem aparente em nenhum dos corpos de prova. Em função disso, seu resultado será utilizado, nas seções seguintes, para cálculo dos coeficientes de endurecimento cíclico do aço e para análise da sua propriedade mecânica após o carregamento em ciclos.



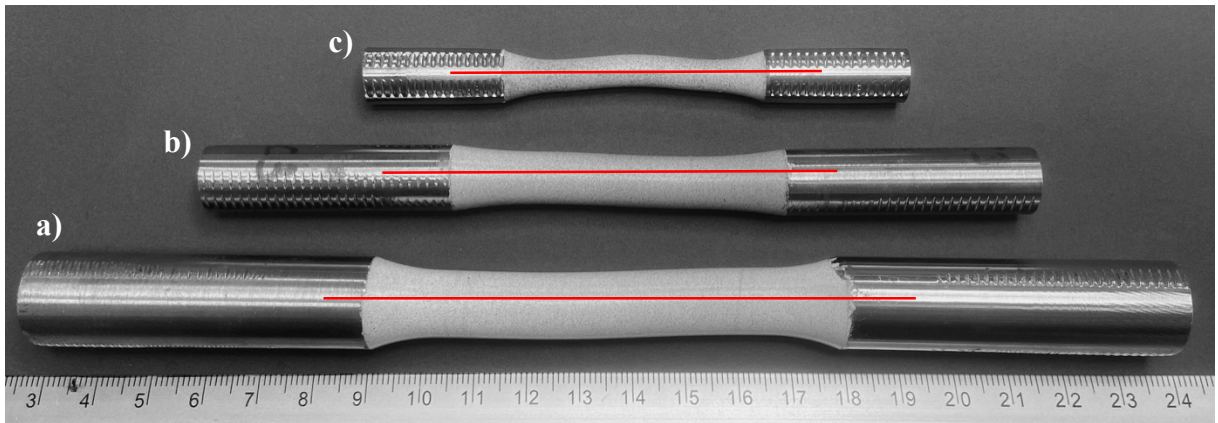


Figura 5.1 Amostras de diferentes geometrias testadas em ensaio cíclico que apresentaram flambagem, sendo elas: (a) H1, (b) H2, (c) H3.

Fonte: a Autora.

A verificação da ocorrência de flambagem no corpo de prova foi realizada visualmente. Na Figura 5.1 estão representados os corpos de prova das geometrias H1, H2 e H3 que apresentaram flambagem após a aplicação da deformação proveniente dos esforços aplicados. A Figura 5.2 representa a geometria H4.

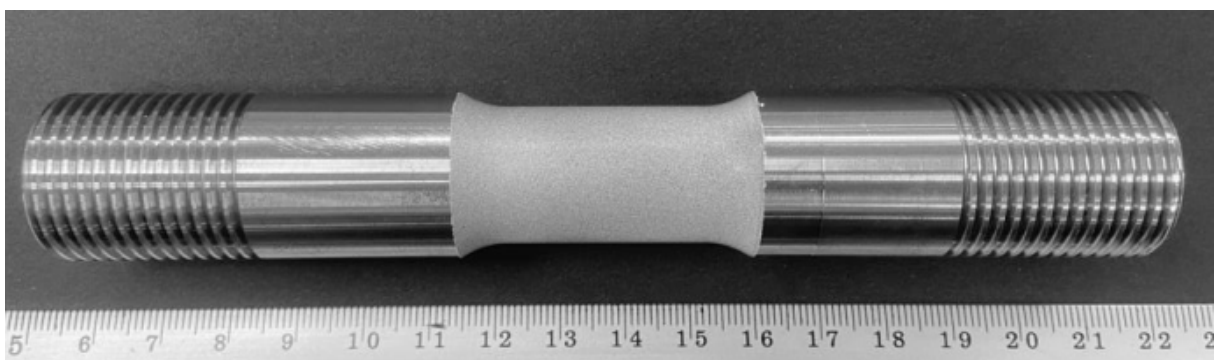


Figura 5.2 Amostra de geometria H4 após carregamento cíclico.

Fonte: a Autora.

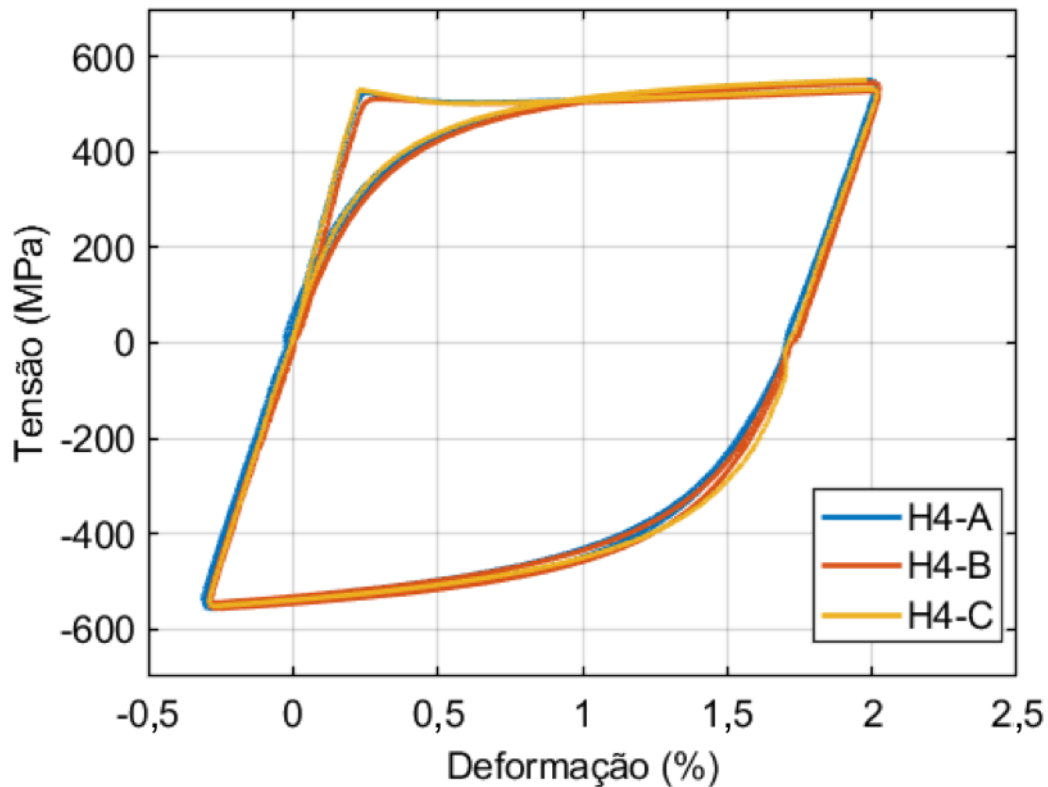


Figura 5.3 Ensaio cíclico para as 3 amostras testadas da geometria H4.  
 Fonte: a Autora.

Como mencionado, a geometria H4 foi testada em triplicata e não apresentou flambagem aparente em nenhum dos corpos de prova. Na Figura 5.2 se evidencia esse alinhamento. As curvas que representam o carregamento das amostras com esse dimensional estão demonstradas na Figura 5.3, referentes aos resultados adquiridos pelo COD. Verifica-se uma correspondência do comportamento da curva em histerese para as três amostras testadas. Durante o primeiro ciclo de carregamento, observa-se um comportamento diferenciado quanto ao formato da curva em função da presença das bandas de Luders, fenômeno tipicamente presente em materiais laminados a quente e submetidos ao tratamento de térmico de têmpera e revenimento durante sua fabricação. Na formação desse patamar, tem-se o destravamento das discordâncias de nuvens de solutos, no qual apenas após o destravamento de todas as discordâncias ao longo da extensão do material, tem-se o comportamento do regime plástico convencional (Reed-Hill, 1982). Nos ciclos realizados na sequência, não foram fornecidas as condições necessárias para que houvesse, novamente, a difusão de átomos de soluto. Sendo assim, no segundo e terceiro ciclo as atmosferas de Cottrell não estão atuando na retenção do movimento das discordâncias e, portanto, o fenômeno do escoamento descontínuo não é

visualizado novamente, portanto, tanto em tração quanto em compressão, para o segundo e terceiro ciclo, a curva apresenta um formato arredondado. Houve pequenas folgas na inversão do carregamento decorrentes da rosca utilizada para fixação do corpo de prova na máquina de testes, porém essas folgas não influenciaram no resultado obtido.

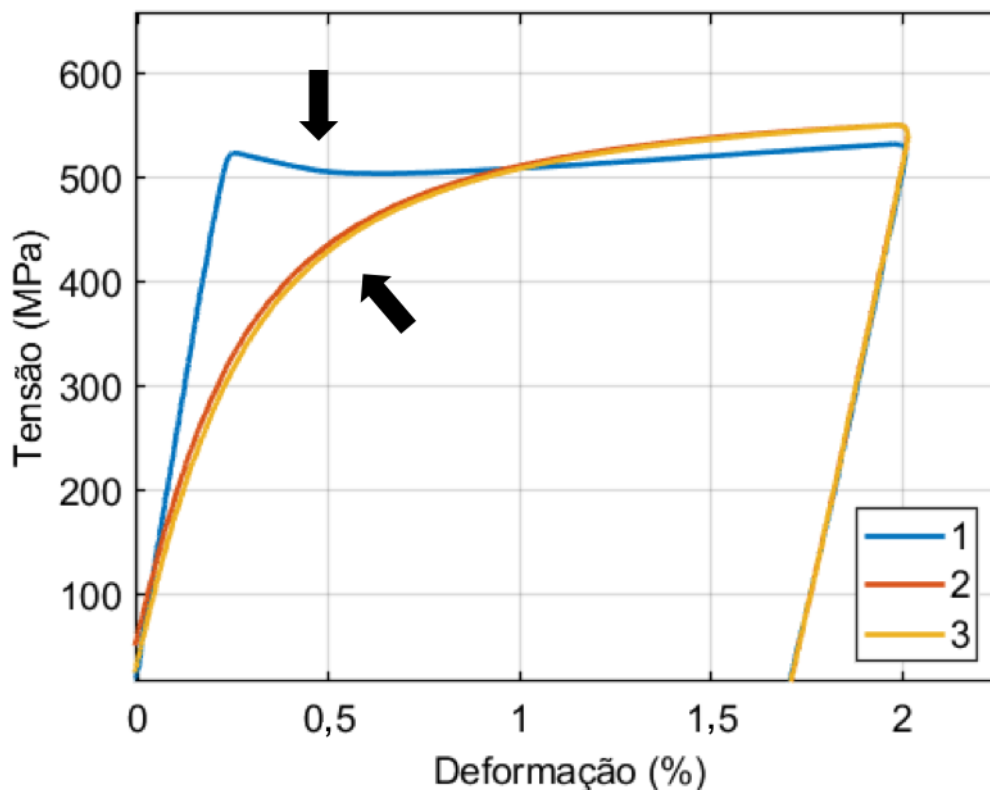


Figura 5.4 Amostra submetida ao carregamento cíclico, salientando-se regiões específicas para análise na curva.

Fonte: a Autora.

De modo geral, o comportamento da curva em histerese foi similar ao esperado em comparação com outros estudos avaliando o mesmo tipo de aço e a aplicação do carregamento cíclico até, aproximadamente, 2% de deformação em tração e compressão (Vilas Bôas, 2012). O gráfico exposto na Figura 5.4 evidencia os picos trativos para cada um dos três ciclos em uma das amostras analisadas, salientando a modificação do comportamento descrito em decorrência do patamar de escoamento.

## 5.2 Avaliação da extensão do patamar de escoamento

As amostras T-A e T-B foram usinadas a partir do mesmo segmento do tubo da qual foram retirados os corpos de prova para simulação do efeito do *reeling*. Ambos os corpos de prova foram tracionados até sua ruptura com aplicação de carregamento trativo uniaxial. Os

resultados obtidos tanto pelo método de DIC quanto de COD, para ambas as amostras, estão apresentados na Figura 5.5.

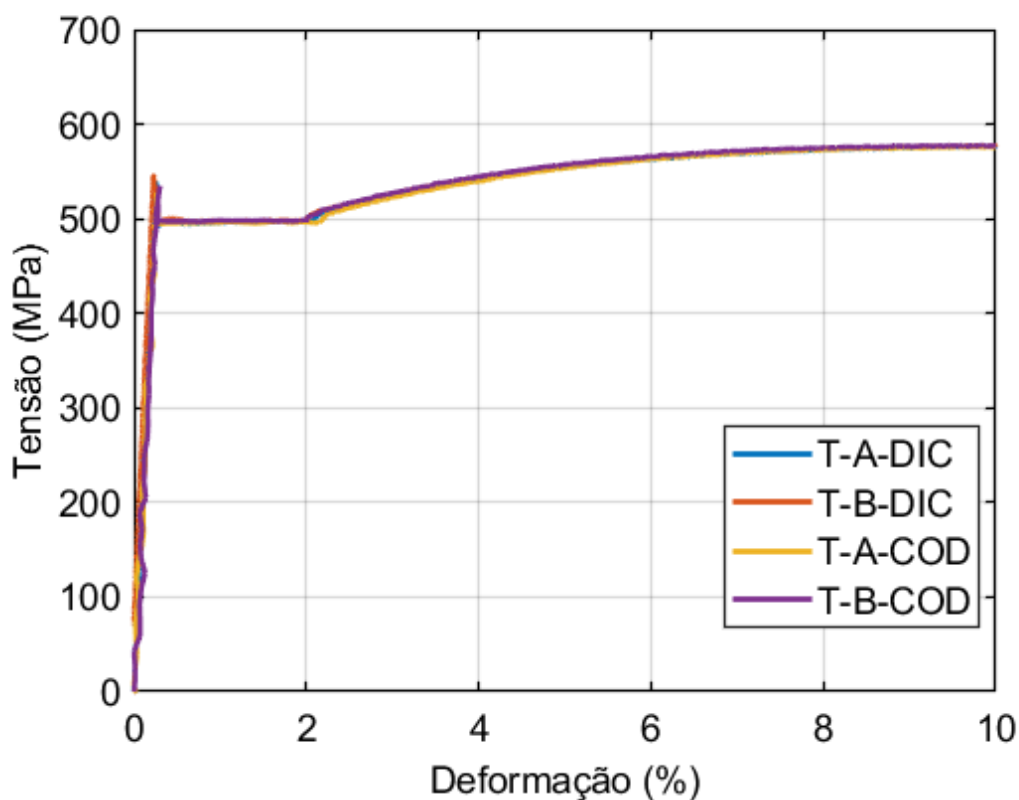


Figura 5.5 Amostras submetidas ao ensaio de tração monitoradas por DIC e COD  
Fonte: a Autora.

Pela análise dos valores adquiridos, verificou-se que a propagação do patamar ocorreu com tensão constante de, aproximadamente, 500 MPa e por volta de 1.8% de deformação, foi possível observar a ocorrência de um gradual aumento da tensão aplicada para manter a taxa de deformação. O valor de tensão de escoamento obtido foi próximo do esperado para esse tipo de aço API X70, já que a norma API 5L prevê uma tensão de escoamento de 482MPa, conforme exposto na Tabela 3.1. Quanto à extensão do patamar de escoamento, infere-se que o parâmetro do ensaio estabelecido para realização da inversão do sentido de carregamento como sendo 2% de deformação, encontra-se na região entre o final da propagação do patamar e o começo do comportamento do regime plástico convencional. Além disso, evidenciou-se que em ambos os métodos de monitoramento, DIC e COD, registraram resultados muito próximos, demonstrando que a técnica não-convencional também foi apropriada para monitoramento dos ensaios com carregamento uniaxial e em sentido trativo.

O comprimento do COD utilizado para a amostra T-B foi o dobro de T-A, visando avaliar se a redução dessa medida utilizada na aquisição dos dados iria influenciar no resultado

obtido. Porém, como pode ser visto pelo gráfico na Figura 5.5, essa alteração não modificou os valores obtidos como resultado do teste. De modo complementar, pode-se comparar também a extensão do patamar de escoamento registrado para a amostra H3-A, que não apresentou flambagem ao final de três ciclos de carregamento, com os resultados das amostras T-A e T-B. Essa análise permite uma comparação entre diferentes áreas de corpo de prova, a fim de verificar a influência da geometria na propagação do patamar. Salienta-se que, embora a amostra com geometria H3 tenha sido submetida ao carregamento em histerese, a região que será avaliada não foi influenciada por esse modo de carregamento, justificando a possibilidade da realização dessa comparação. Os dados analisados foram adquiridos pela técnica de monitoramento convencional por meio do COD.

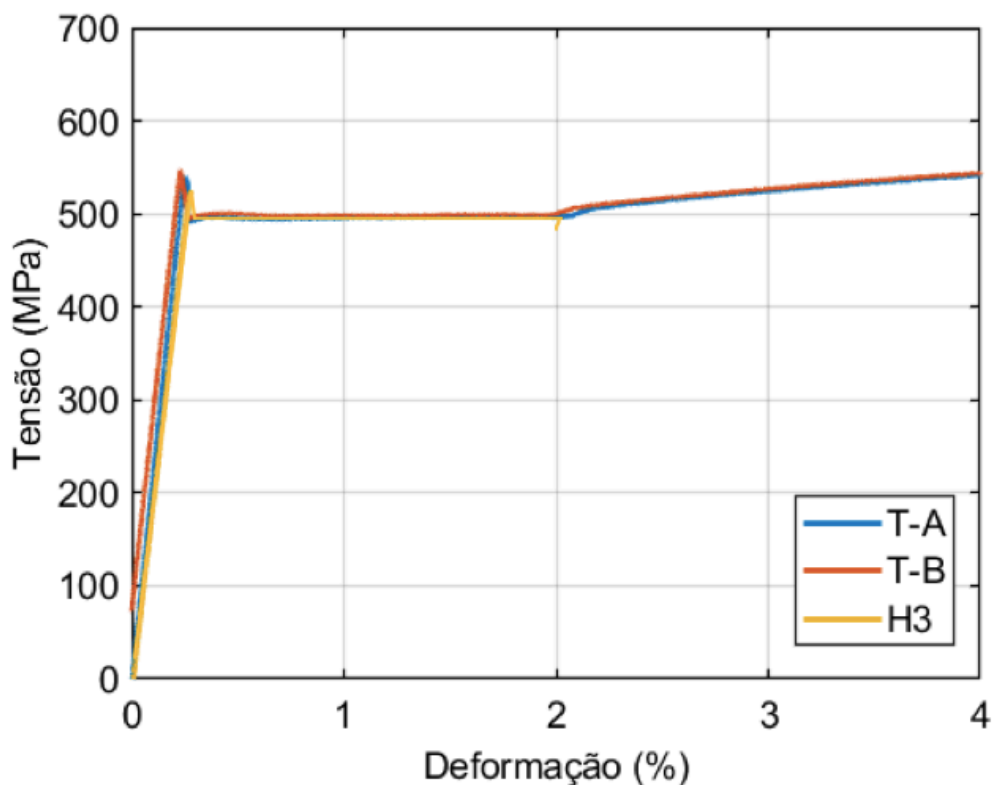


Figura 5.6 Comparação da extensão do patamar de escoamento para amostras submetidas à ensaio de tração uniaxial (T-A e T-B) e amostra com carregamento em histerese (H3).  
Fonte: a Autora.

A Figura 5.6 demonstra a extensão do patamar de escoamento para cada um dos ensaios mencionados (T-A, T-B e H3-A). Percebe-se que a amostra H3-A, cuja curva completa do ensaio foi realizada em histerese, apresentou um limite superior de escoamento ligeiramente menor comparado às demais. No entanto, quanto ao patamar de escoamento, não foram perceptíveis alterações significativas em relação à deformação ou tensão aplicada.

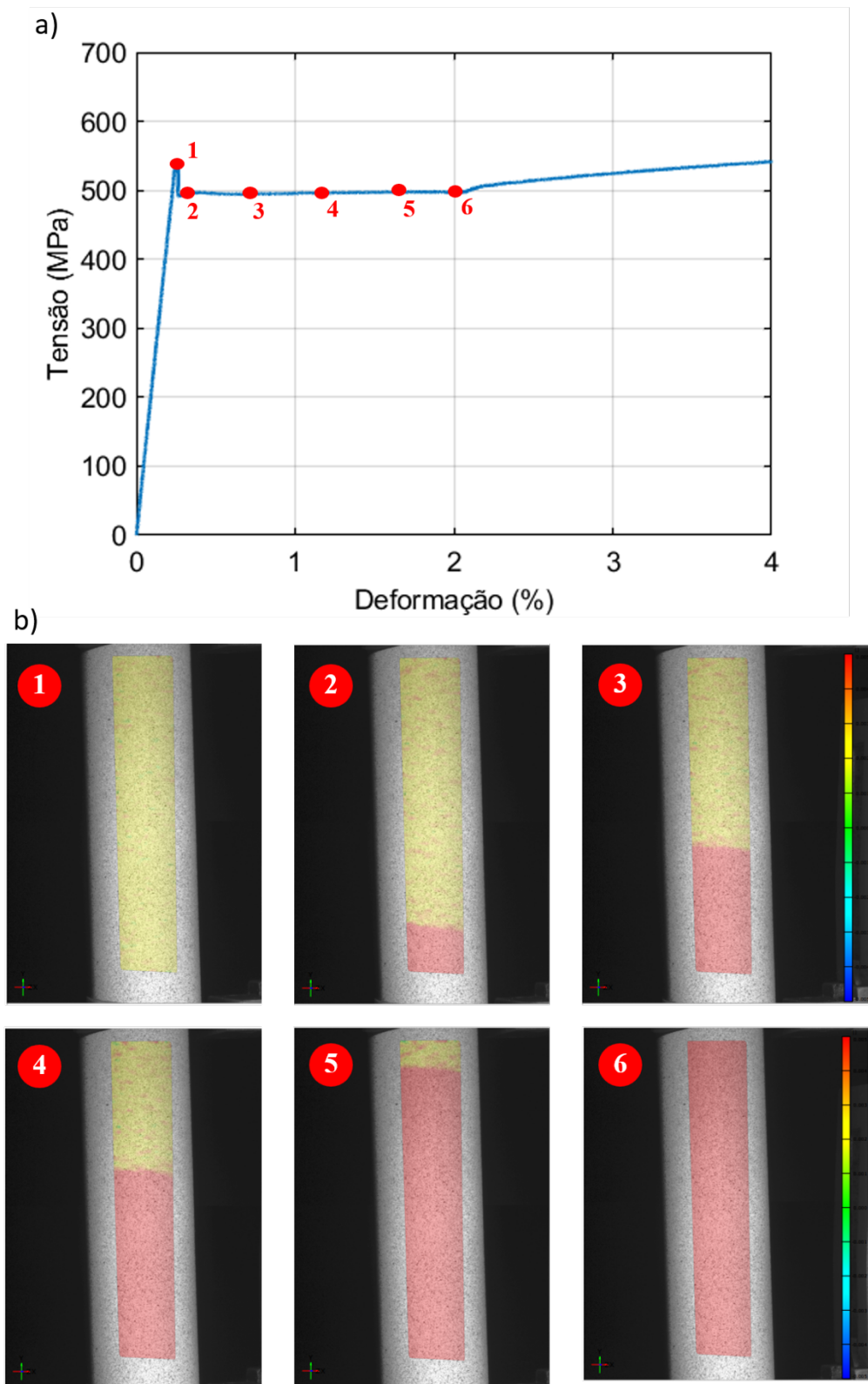


Figura 5.7 (a) Gráfico de Tensão (MPa) x Deformação (%) para amostra submetida ao ensaio de tração. (b) Propagação das bandas de Luders visualizadas na superfície da amostra por meio da técnica de DIC ao longo da extensão do patamar de escoamento.  
 Fonte: a Autora.

O acompanhamento das frentes de deformação se propagando pelo corpo de prova enquanto o teste é conduzido pode ser realizado por meio da correlação de imagem digital utilizando o software GOM Correlate para tratamento dos dados. A Figura 5.7 indica essa propagação para a amostra T-B, na qual visualiza-se a frente de deformação como a região de coloração vermelha. A escala de cores está associada à quantidade de deformação presente no material, sendo que a coloração azul representa a condição sem nenhum carregamento aplicado, ou seja, 0% de deformação; o vermelho representa a condição de 0,05% de deformação; e o amarelo representa um teor intermediário entre ambas as configurações anteriores. No limite superior de escoamento, indicado pelo ponto 1 no gráfico, verifica-se que a deformação é homogênea pelo corpo de prova. Nessa região tem-se a liberação das primeiras discordâncias dos átomos de soluto. No ponto 2, pelo gráfico de tensão e deformação, identifica-se uma queda da tensão aplicada e uma região que determina o início patamar de escoamento. Nesse momento, observa-se a região retangular delimitada para análise, que a frente de deformação, que anterior não era visível aparece na imagem. Além disso, verifica-se que essa frente acarreta a perda da homogeneidade da deformação no material. Ao longo do patamar, nos pontos 3 a 5, a propagação da deformação ocorre axialmente pelo comprimento do corpo de prova, aumentando a região com nível superior deformação. Ao final do patamar, no ponto 6, a região analisada está homogeneamente deformada para uma condição maior do que a inicial registrada no ponto 1. Com o final da propagação das bandas de Luders, o gráfico de tensão e deformação exhibe o comportamento convencional para o regime plástico. O comportamento descrito e observado no teste experimental é condizente com o esperado quanto à formação e propagação desse fenômeno em relação à etapa do carregamento do ensaio, conforme observado por Kyriakides (2022). No entanto, salienta-se que a análise realizada por esse autor se refere a um aço de baixo teor carbono com patamar de escoamento até 3,5%, sendo assim a quantidade de deformação não pode ser comparada, mas o comportamento relativo dessa propagação segue uma tendência similar.

### 5.3 Determinação dos coeficientes de endurecimento cíclico

A determinação dos coeficientes que descrevem o comportamento isotrópico e cinemático para o material foram realizados com base nos resultados obtidos para uma das amostras H4 submetidas aos três ciclos de carregamento. Os resultados estão expostos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Coeficientes de endurecimento isotrópico e cinemático obtidos a partir de curva histerese do aço APIX70 para calibração em FEA.

Coeficiente	Valor
$C_1$	203162
$\gamma_1$	831
$C_2$	7597
$\gamma_2$	192
$C_3$	726
$\gamma_3$	82
$Q_\infty$	338
$b$	302

Fonte: a Autora.

Os coeficientes  $Q_\infty$  e  $b$  estão associados com a magnitude e a taxa como ocorre o endurecimento isotrópico. Quanto aos parâmetros de Chaboche que se referem ao mecanismo cinemático do endurecimento,  $C_K$  e  $\gamma_K$  indicam magnitude e taxa do endurecimento, respectivamente, de modo similar aos coeficientes do modelo isotrópico (Hartloper et al., 2021). Os coeficientes  $C_K$  e  $Q_\infty$  apresentam unidade em MPa, enquanto que  $\gamma_k$  e  $b$  são adimensionais.

Ambos os parâmetros estão associados com a evolução da superfície de escoamento a cada novo ciclo e verifica-se que a influência desses fatores aumenta proporcionalmente com o incremento do número de ciclos aplicados no material (Cooke et al., 2015). Sendo assim, infere-se que os valores obtidos dizem respeito ao material testado na condição específica do ensaio, de modo que deveria ser reavaliado caso os parâmetros do carregamento sejam modificados.

Os valores da componente cinemática apresentaram um comportamento decrescente de acordo com os pontos analisados. Esse padrão também foi evidenciado nos resultados obtidos por Rudolph et al. (2015) e Kubaschinski et al. (2022) para calibração de outros materiais que apresentavam esse modelo de endurecimento. Já com relação a componente isotrópica, os valores calculados são superiores aos observados por demais autores, como Hartloper (2021). No entanto, esse comportamento pode estar vinculado ao modo como o carregamento foi conduzido e às características específicas do material analisado. Kubaschinski et. al (2022) analisou valores obtidos para o coeficiente  $b$  considerando o carregamento cíclico e estimou o resultado para um carregamento monotônico, evidenciando um aumento significativo de algumas ordens de grandeza. Com isso, infere-se que essa parcela do endurecimento é



fortemente influenciada pela quantidade de ciclos realizados e, como os ensaios conduzidos foram executados para uma quantidade baixa de ciclos, a ordem de grandeza desse coeficiente pode estar vinculada a esse fator.

#### 5.4 Comparação de propriedades mecânicas após carregamento cíclico

A Figura 5.8 apresenta o resultado para a amostra submetida à deformação cíclica e ao tratamento térmico de envelhecimento, e ao material sem a aplicação desses processos. Salienta-se que o envelhecimento é uma especificação da norma DNV-ST-F101 para avaliação das propriedades mecânicas do material após a simulação do *reeling*.

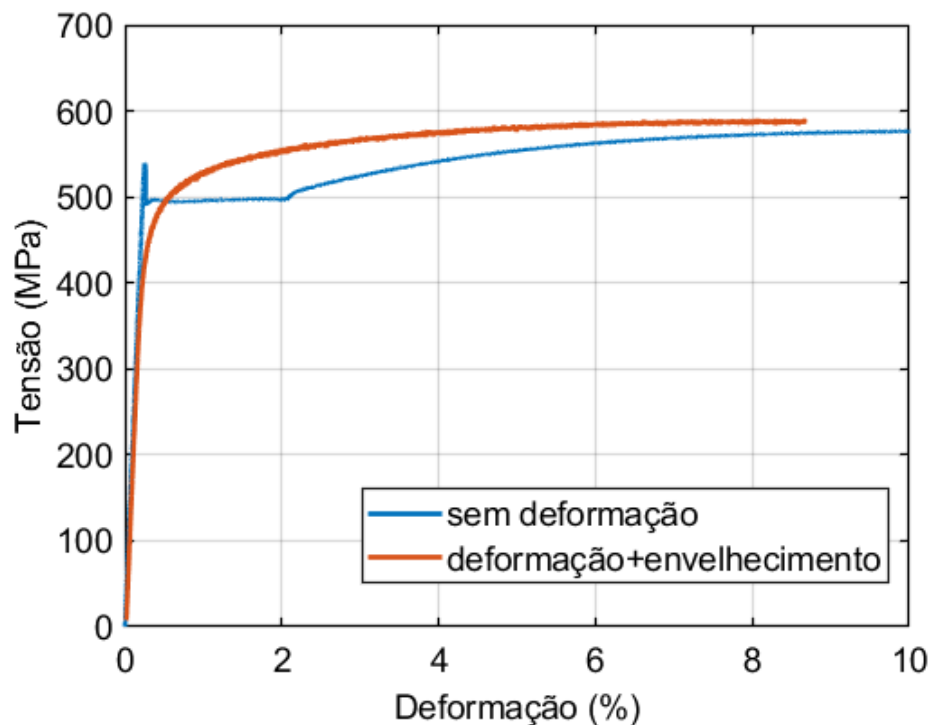


Figura 5.8 Comparativo entre curva do material submetida à ensaio uniaxial sem aplicação de deformação prévia e amostra, do mesmo material, submetida a três ciclos de deformação e ao tratamento térmico de envelhecimento. Fonte: a Autora.

Quando submetido a um carregamento sequencial de tração e compressão, espera-se que três mecanismos metalúrgicos atuem sobre o material, conforme discutido na seção 2.4: encruamento, envelhecimento e o efeito Bauschinger. Devido à última etapa de aplicação ocorrer no sentido compressivo, nota-se uma redução na tensão de escoamento do material, ressaltando a razão pela qual os testes foram inicialmente conduzidos em tração, seguidos por compressão.

A amostra tracionada sem deformação prévia aplicada, apresentou tensão de escoamento a 0,2% em 495MPa, enquanto que a amostra submetida ao ciclo de deformações e ao

envelhecimento registrou limite de escoamento de 483MPa. Sendo assim, evidencia-se uma redução na tensão de escoamento de 12MPa, demonstrando que o efeito Bauschinger afetou o material e que, mesmo com o tratamento térmico, esse valor permaneceu inferior ao inicial. Essa redução era esperada e condizente com a literatura, onde foi observada queda de 26MPa para o mesmo material, porém submetido a cinco ciclos de carregamento até, aproximadamente, 2% de deformação em tração seguido de compressão (Vilas Bôas, 2012).

Salienta-se que não foi observado o retorno do patamar de escoamento que seria esperado após a aplicação do tratamento térmico do envelhecimento (Meiwes, 2014). Porém o aquecimento foi realizado conforme previsto pela norma, mesmo que sua efetividade possa ser questionada.

### 5.5 Avaliação da sensibilidade à aplicação do padrão estocástico

Durante a realização dos ensaios com carregamento trativo nas amostras de alumínio, se observou que a pintura desempenhou uma boa aderência à superfície da amostra, permitindo que o padrão fosse deformado simultaneamente com a superfície do corpo de prova. Com relação ao decalque, observaram-se pequenas bolhas formadas durante o teste, sugerindo um possível descolamento em algumas regiões. Por meio do software GOM Correlate, foram analisadas as imagens adquiridas pelo equipamento de DIC fixando-se uma área de medida sobre a superfície preparada. Assim, permite-se analisar se essas falhas quanto à homogeneidade da área de análise foram registradas ao longo do ensaio. Esse resultado está demonstrado nas Figuras 5.9 a 5.13.

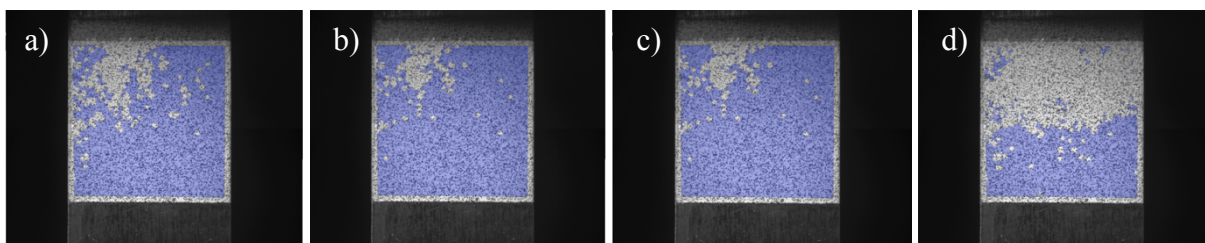


Figura 5.9 Amostra D10: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.

Fonte: a Autora.

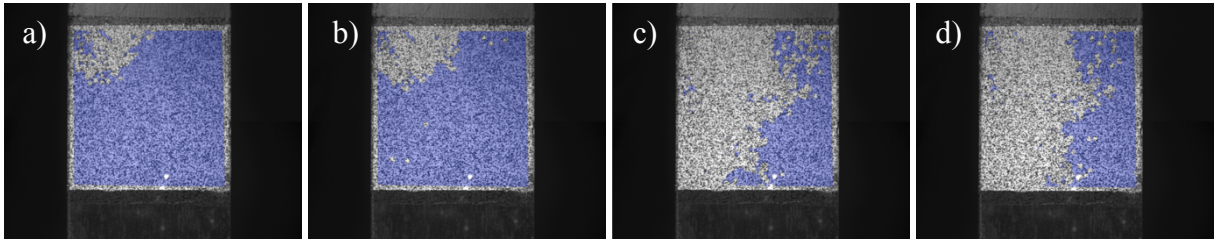


Figura 5.10 Amostra D20: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.  
Fonte: a Autora.

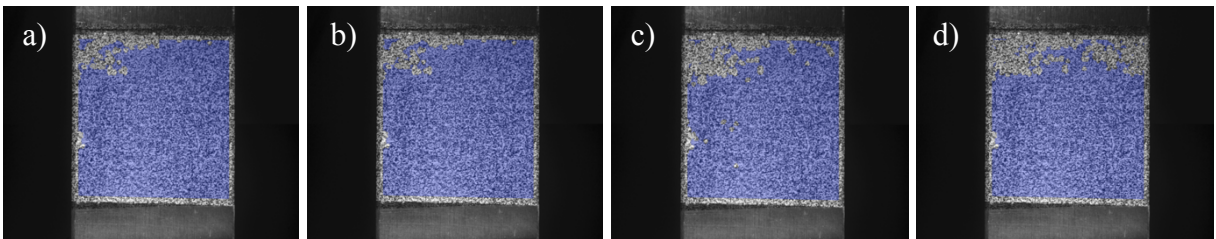


Figura 5.11 Amostra D30: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.  
Fonte: a Autora.

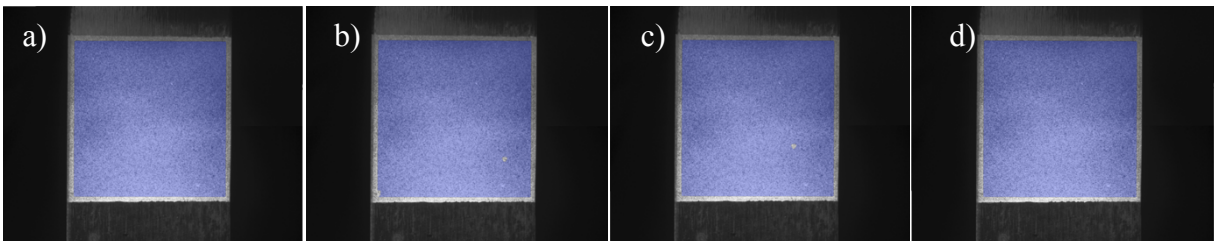


Figura 5.12 Amostra P2: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.  
Fonte: a Autora.

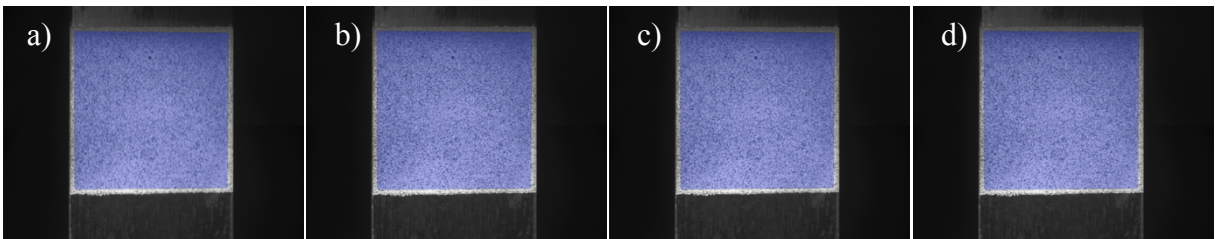


Figura 5.13 Amostra P5: Acompanhamento da região de medida e do reconhecimento do padrão estocástico durante o ensaio trativo para (a) primeiro patamar, (b) segundo patamar, (c) terceiro patamar, (d) quarto patamar.  
Fonte: a Autora.

Ao selecionar uma região para análise pelo software, verifica-se o surgimento de uma coloração azul sobre a superfície, indicando que foi possível adquirir os dados dessa respectiva área. Caso o padrão não esteja apropriado para identificação pelo equipamento, a superfície dentro da região selecionada que deveria estar nessa coloração, se encontra com a mesma tonalidade da superfície da amostra demonstrando que a área não está sendo analisada. A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que a superfície preparada com a aplicação da tinta demonstrou um comportamento mais homogêneo quanto à capacidade de leitura ao longo do ensaio, já as amostras preparadas com aplicação de decalque evidenciaram uma perda quanto a homogeneidade da aquisição dos dados para essa mesma área ao longo do ensaio. Portanto, infere-se que, nesse aspecto, as amostras preparadas por meio do aerógrafo registraram um desempenho superior.

Quanto à correlação da medida registrada entre o ERE e o DIC, os valores médios adquiridos em cada patamar do ensaio foram plotados em um gráfico de dispersão, representado na figura 5.14, registrando o resultado obtido em cada método para os quatro patamares de deformação formados durante o carregamento. Junto a eles, tem-se uma reta de coloração preta que indica uma proporção de 1:1 entre os eixos avaliados.

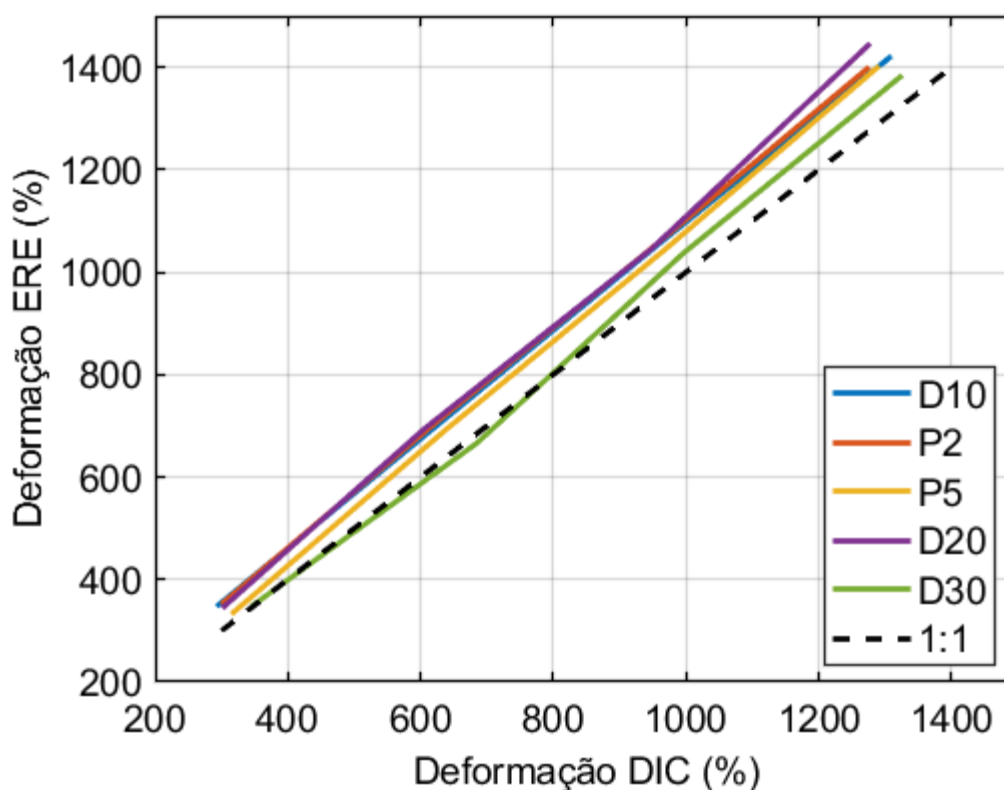


Figura 5.14 Gráfico de dispersão referente à médias de valores obtidos com monitoramento por DIC e ERE nos patamares de força constante aplicada no decorrer de ensaio trativo. Fonte: a Autora.

Analisando os resultados expostos na Figura 5.4, considerando o comportamento das linhas plotadas, verifica-se que, para todas as medidas, obteve-se um desvio da proporcionalidade. No entanto, entre as amostras preparadas pela técnica do decalque, a amostra D30 foi a que apresentou uma menor variação quanto à medida realizada em cada patamar, registrando 0,02 de desvio, enquanto que as amostras D10 e D20 registraram 0,12. Na técnica da pintura, verificou-se que a amostra P5 obteve 0,07 de desvio entre suas medidas pelo SG e pelo DIC, enquanto que a amostra P2 registrou 0,11.

Os resultados obtidos quanto ao acompanhamento da superfície sugerem que a técnica de pintura apresenta um melhor desempenho comparado com a aplicação de decalque possivelmente em função de uma melhor adesão na amostra. Já nos valores comparados com a medida pelo SG, verificou-se que todas as condições acarretaram algum desvio, no entanto, entre as amostras pintadas com aerógrafo, a amostra P5 apresentou o menor desvio e, entre as amostras nas quais foi utilizado o decalque, a condição D30 apresentou melhor desempenho. Portanto, para a preparação das amostras submetidas aos ensaios mecânicos mencionados na seção 4.1, utilizou-se a técnica de aplicação da pintura com abertura da ferramenta com 0,5mm.

Salienta-se que, para ambas as técnicas analisadas são necessários treinamentos por parte do operador que realizará a aplicação. Sendo assim, o conhecimento prévio é um fator indispensável para obtenção de bons resultados e que pode causar divergências na medida realizada. No presente trabalho, a fim de excluir essa variável e evitar um erro amostral, o mesmo técnico realizou todos os procedimentos.

#### 5.6 Comparação entre resultados pelo método de DIC e COD

No ensaio de tração realizado para avaliação da extensão do patamar de escoamento, observou-se que os resultados adquiridos pelo DIC e pelo COD apresentaram uma boa sobreposição entre as curvas, conforme demonstrado na Figura 5.5. Com isso, infere-se que o método de monitoramento não-convencional DIC acarretou resultados satisfatórios quando o componente analisado está sujeito a essa configuração de carregamento, podendo ser utilizado como alternativa ao método convencional de COD. A comparação para os resultados obtidos para o ensaio cíclico está demonstrada na Figura 5.15. Além disso, foi realizado o monitoramento da trajetória de pontos na superfície das amostras em cada um dos ensaios realizados, o que está demonstrado na Figura 5.16, para o carregamento cíclico, e na Figura 5.17, para o teste de tração.

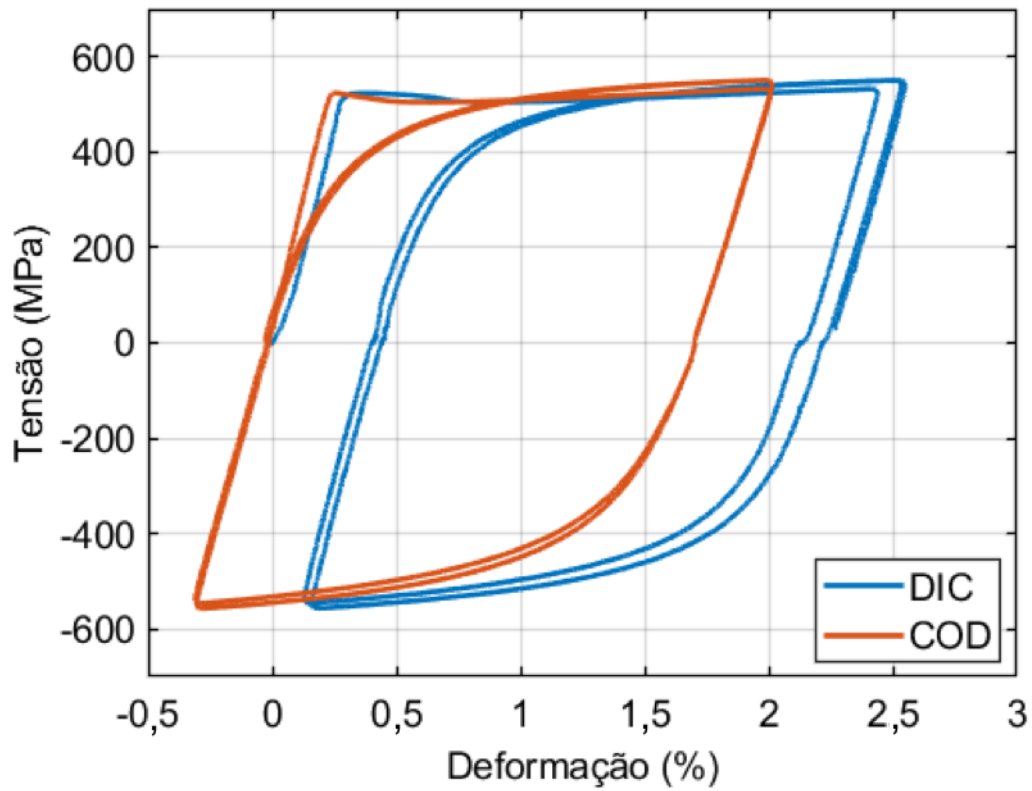


Figura 5.15 Curva de resultado de ensaio monitorado por DIC e COD para mesma amostra  
 Fonte: a Autora.

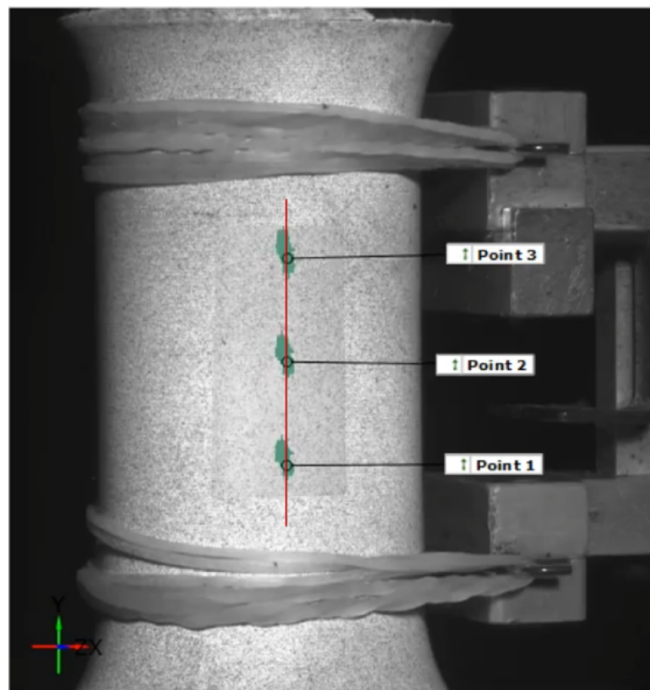


Figura 5.16 Trajetória, em verde, de três pontos monitorados na amostra no decorrer do ensaio com sucessivos carregamentos e descarregamentos. A linha vermelha refere-se à trajetória retilínea esperada para esse comportamento.  
 Fonte: a Autora.

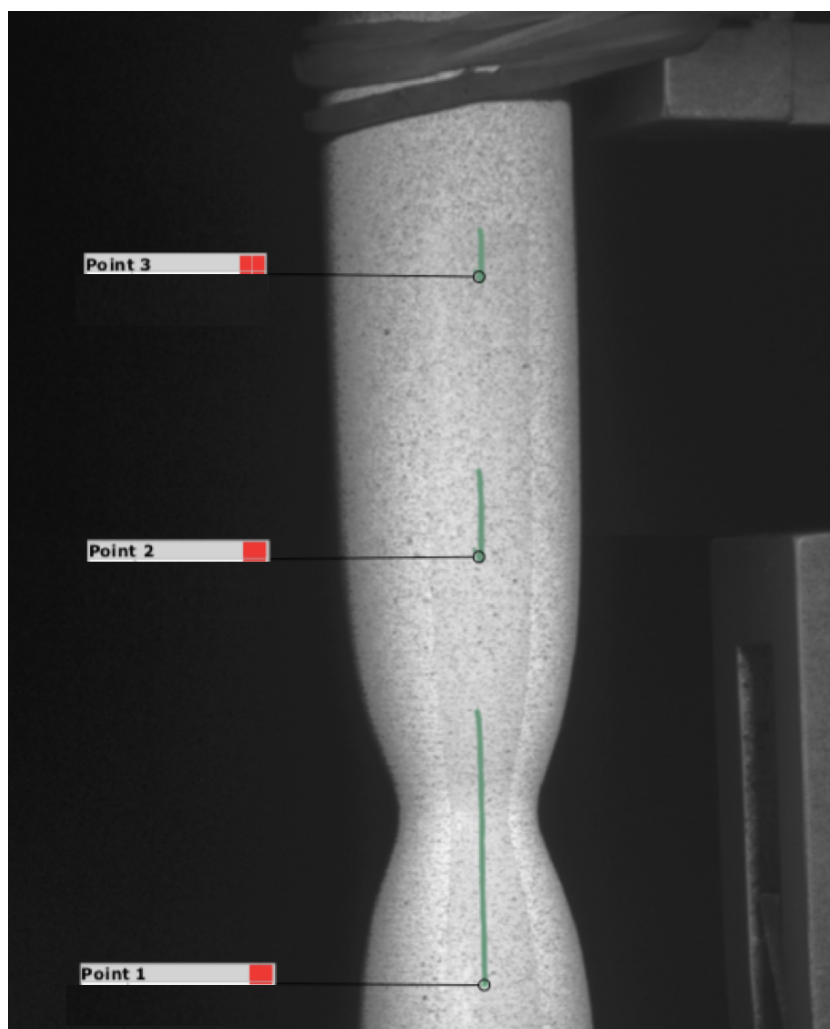


Figura 5.17 Monitoramento de três pontos sobre a região do corpo de prova durante ensaio de tração evidenciando seu deslocamento retilíneo, demonstrado em coloração verde na superfície da amostra, desde o começo do teste até próximo ao momento de ruptura.  
Fonte: a Autora.

Quanto ao acompanhamento das amostras submetidas ao carregamento em histerese, as curvas adquiridas pelo COD e pelo DIC, na Figura 5.15, não apresentaram o mesmo comportamento. Uma das possibilidades sugeridas para essa divergência pode estar associada ao deslocamento de corpo rígido. Para verificar a existência desse fenômeno, o software de análise permite o acompanhamento de pontos na superfície da amostra durante ensaio, no qual espera-se que a trajetória experimentada por esses pontos seja retilínea em função do sentido de aplicação dos esforços. Analisando Figura 5.16, que demonstrou a trajetória de três pontos durante o ensaio realizado em histerese, se observa que essa movimentação não ocorreu de modo retilíneo ao se comparar a região verde, referente ao deslocamento do ponto, e a linha vertical vermelha que indicaria a trajetória uniaxial desejada. Já na Figura 5.17, em que se acompanha a trajetória de três pontos na amostra durante o teste de tração até o momento

próximo à ruptura do corpo de prova, não houve qualquer alteração no sentido do carregamento. Nessa análise, a região verde, que indica a trajetória do ponto, apresenta um comportamento retilíneo mesmo após a formação da estrição. A fim de suprimir os efeitos desse fenômeno, existem alternativas de metodologias que propõe correções realizadas nos dados adquiridos durante o ensaio (Sousa et al., 2018). Além disso, alguns softwares de análise possuem ferramentas que permitem a correção desse efeito no processamento após o ensaio.

Analisando novamente a Figura 5.15, observa-se que o erro de medida está presente já no primeiro ciclo do carregamento trativo, no qual o valor de deformação registrado pelo DIC é superior aos 2% imposto pelo teste e verificado pelo COD. Dessa forma, infere-se que são necessários mais estudos e testes a fim de verificar a causa dessa discrepância na medida entre as duas técnicas de monitoramento para essa configuração de ensaio e, assim, estabelecer uma metodologia correta para o processamento dos dados obtidos.

Quanto à preparação dos corpos de prova, exclui-se essa opção como uma possível causa do erro associado às curvas de histerese, pois a técnica de aplicação do padrão estocástico foi a mesma utilizada para ambas as configurações dos ensaios, definida após a avaliação de sensibilidade para essa aplicação. Portanto, caso o método de preparo utilizado não fosse apropriado, esperava-se uma divergência dos resultados obtidos pelo DIC e COD em todas as configurações testadas e não apenas nos ensaios com carregamento cíclico.



## 6 CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo principal a investigação de uma metodologia de simulação do efeito do *reeling* em escala reduzida (SSRS). Para tanto, foram conduzidos experimentos para auxiliar na determinação dos parâmetros desse ensaio.

Desse modo, investigou-se diferentes geometrias de amostras com intuito de definir uma configuração que não apresentasse flambagem da amostra mediante a aplicação de três ciclos de carregamento com inversão em 2% de deformação, no sentido trativo e compressivo. A partir dessa análise, definiu-se essa geometria para a condição que não apresentou flambagem aparente em nenhum dos ensaios conduzidos nesse estudo. Como resultado desse teste também foi possível observar a mudança no comportamento entre o primeiro ciclo em tração e os seus ciclos subsequentes, referente a presença das bandas de Luders atuando na retenção da movimentação das discordâncias durante o primeiro carregamento.

A fim de analisar a extensão do patamar de escoamento, foram conduzidos ensaios de tração nos quais visualizou-se a extensão dessa região até, aproximadamente, 2% de deformação em uma tensão constante de 500MPa. Ao comparar os resultados obtidos com uma amostra de diferentes proporções, percebeu-se que a alteração dimensional não desencadeou modificações quanto à extensão do patamar de escoamento. Com isso, infere-se que a inversão do sentido de carregamento imposto nas amostras submetidas ao carregamento cíclico se localiza na região limítrofe entre o final do patamar de escoamento e o comportamento convencional do regime plástico.

A modificação nas propriedades do material foi avaliada a partir da aplicação do carregamento cíclico e do posterior tratamento térmico de envelhecimento a 250°C por um período de 1 hora. Nesse caso, comparou-se os valores obtidos para tensão de escoamento do material exposto a essas condições e sem quaisquer carregamentos ou processos associados. Nessa análise, registrou-se uma tensão de escoamento de 495Mpa para a condição sem deformação prévia e de 483MPa para a amostra submetida ao ciclo de deformação e ao tratamento térmico. Com isso, tem-se uma queda na tensão de escoamento de 12MPa em decorrência da atuação do efeito Bauschinger. Salienta-se que o tratamento térmico de envelhecimento não foi suficiente para suprir a queda na tensão proveniente desse fenômeno.

A partir do ensaio cíclico na amostra que apresentou melhor desempenho entre as geometrias testadas e os parâmetros de ensaio, foram determinados os valores para as componentes de endurecimento atuantes no material, isotrópica e cinemática. Com isso, torna-se viável que estudos posteriores que se dediquem a avaliar o efeito do *reeling* no aço X70

mediante a condição de ensaio considerando três ciclos de carregamento, sejam conduzidos por meio de simulação numérica por elementos finitos.

Com relação aos métodos de monitoramento utilizados durante os ensaios mecânicos, para a aplicação de carregamento uniaxial, obteve-se resultados próximos entre os obtidos por DIC e COD. No entanto, para situação com inversão do sentido de carregamento, se observou uma divergência entre os resultados obtidos por ambos os métodos.

Com intuito de estabelecer uma configuração adequada que possibilite a elaboração do padrão estocástico na superfície da amostra de modo a reduzir os erros associados a esse fator, foi realizado um estudo acerca da avaliação da sensibilidade à aplicação do padrão para análise por DIC. Com isso, identificou-se a técnica que apresentou melhor comportamento entre as analisadas foi a aplicação dos pontos com auxílio de um aerógrafo e utilizando-se uma abertura de 0,5mm, que registrou uma variação de 0,07 nos dados de deformação obtidos pelo DIC com relação aos dados adquiridos por ERE durante o mesmo teste. Assim, a configuração definida com esse teste foi a utilizada para a preparação de todas as amostras submetidas aos ensaios mecânicos realizados no trabalho.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os objetivos do trabalho e a análise dos resultados obtidos durante seu desenvolvimento, há alguns pontos que ainda não foram mapeados e necessitam de maior atenção para completa elucidação. Dessa forma, os seguintes estudos são propostos:

- Realização dos ensaios de histerese começando em compressão seguida de tração, a fim de verificar a influência dessa configuração de carregamento nos fenômenos metalúrgicos atuantes no material.
- Verificação dos parâmetros obtidos com o ensaio cíclico experimental em simulação por elementos finitos.
- Investigar e aplicar metodologias para processamento dos dados obtidos via correlação de imagem digital para monitoramento de ensaios com inversão de carregamento.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, E. L. et al. In: Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2010, Lagunillas. Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes. Lagunillas: Asociación Española de Ingeniería Mecánica. p. 01-08. 2010.

API 5L. Specification for Line Pipe Steel. Estados Unidos, 42ed., New York, 2004.

BEDROSSIAN, An. et al. Extending the Strain Limits For Reeling Small Diameter Flowlines. In: The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 2003.

BELEZA, Sílvia Cristiana Almeida. Medição de deformação através da técnica de Correlação Digital de Imagem. 2017. p.101 Dissertação de mestrado em engenharia mecânica - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

BRECHAN, B. et al. Collapse prediction of pipe subjected to combined loads. Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 191, 2020.

BROGIATTO, Giobani. B. et al. The Chaboche nonlinear kinematic hardening model: calibration methodology and validation. Meccanica, volume 43, p. 115–124, 2008.

CHEN, Zhenning. et. al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation. Meas. Sci. Technol., 2015.

DIETER, George E. Mechanical Metallurgy. McGraw Hill Book Company, 1988.

COOKE, R.J. et al. Constitutive parameter calibration for structural steel: Non-uniqueness and loss of accuracy, Journal of Constructional Steel Research, Volume 114, p. 394-404, 2015.

DNV-ST-F101, Submarine Pipelines Systems, 2021.

DNVGL-RP-F108, Assessment of flaws in pipeline and riser girth welds, 2017.

DOWLING, Norman E. Mechanical Behaviour of Materials. 4º Edição. Pearson, 2013.

FILHO, Carlos Magnos Lopes da Silva. Modelos Incrementais para Plasticidade Cíclica: Um Estudo Numérico. 2016. p. 1-44. Dissertação de mestrado em ciências mecânicas - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

HARTLOPER, Alexander R. et al. Constitutive Modeling of Structural Steels: Nonlinear Isotropic/Kinematic Hardening Material Model and Its Calibration. *Journal of Structural Engineering*, Volume 147, Jan 2021

HEDAN, S. et al. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Oxford, v. 68, p. 22–35, June 2014.

HEPNER, G. Estudo analítico de abandono e recolhimento de dutos rígidos. 2008. Projeto final para requisito para obtenção do diploma de engenheiro naval – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

HERDIYANTI, Jihan. Comparisons Study of S-Lay and J-Lay Methods for Pipeline Installation in Ultra Deep Water. p. 1-105. Tese de Mestrado. Universidade de Stavanger. Noruega, 2013.

HOWARD-JONES, Al.; JAHED, Hamid et al. *Cyclic Plasticity of Metals: Modeling Fundamentals and Applications*. 1ª edição. Elsevier, 2021.

KANG, Y. et al. Digital image correlation technique. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 1-2, Feb. 2015.

KUBASCHINSKI, Paul. et al. Calibration of a combined isotropic-kinematic hardening material model for the simulation of thin electrical steel sheets subjected to cyclic loading. *Materialwiss*, volume 53, p. 422-439, 2022.

KYRIAKIDES, Stelios et al. Reeling of pipe with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 72. 2015.

KYRIAKIDES, Stelios et al. Evolution of Lüders banding under axial loading and reverse loading, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 257, 2022.

KYRIAKIDES, Stelios et al. *Mechanics of Offshore Pipelines: Buckling and Collapse*, Volume 2, Elsevier - Oxford, UK, 2023.

LEMAITRE, Jean et al. *Mechanics of Solid Materials* – Paris: Cambridge University Press, 1994.

LIN, Shuang et.al. Effect of cyclic plastic deformation on microstructure and mechanical properties of weld metals used for reel-lay pipeline steels, School of Materials Science and Engineering, Tianjin Universit, China, , volume 737, 2018.

MASSA, A. L. L. Contribuição ao estudo de flambagem em dutos rígidos submarinos conduzindo fluidos aquecidos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

MEIWES, Karl Chritoph, et al. Impact of small-scale reeling simulation on mechanical properties on line pipe steel. Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference – Canadá, 2014

NETTO, T. et al. Fatigue performance of pre-strained pipes with girth weld defects: Local deformation mechanisms under bending. International Journal of Fatigue v. 30, p. 1080-1091, 2008.

PICOY, Y. M. Correlação digital de imagens para medições de deslocamentos em vigas em balanço. 2016. p. 1-76. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

REED-HILL, Robert E. Princípios de Metalurgia Física. 2º Edição. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois S.A., 1982.

RUDOLPH, Jurgen, et al. Using Nonlinear Kinematic Hardening Material Models for Elastic–Plastic Ratcheting Analysis. ASME. J. Pressure Vessel Technol. 2016.

SCHMIDT, T. et al. Impact of Reel-Laying on Mechanical Pipeline Properties Investigated by Full and Small-Scale Reeling Simulations. International Offshore and Polar Engineering Conference, 2009.

SCHOEMAN, Petronel. et al. Development of accurate experimental technique for small scale reeling simulation. Rio Pipeline 2023: Technical Papers. 2023.

SESÉ, L. F. et al. Simultaneous in-and-out-of-plane displacement measurements using fringe projection and digital image correlation. Optics and Lasersin Engineering, London, v. 52, p. 66–74. 2014.

SOUSA, Pedro J. et al. Correction of rigid body motion in deformation measurement of rotating objects. *Measurement*, Volume 129, p.436-444, 2018.

VASCONCELOS, Guilherme Matos de. Estudo do efeito Bauschinger em tubos de aço API 5L X70 aplicados no transporte de petróleo e gás. 2015. P.68. Trabalho de Graduação em engenharia de materiais. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016

VILAS BÔAS, Ana Carolina. C. Comportamento mecânico e de corrosão do aço X70 sob carregamento cíclico simulando o bobinamento de tubos. 2012. P.1-103. Dissertação mestrado em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

XIE, H.; ZHOU, Y. et al. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 46-56. 2014.

## ANEXO A

Conforme indicado na seção 4.2.1, o código utilizado para geração das imagens para aplicação do padrão estocástico na superfície das amostras, por meio do software MATLAB, está descrito a seguir.

```
clear all
clc
close all

% Conversão de Pixel (X) para Milímetro
% 1 pixel (X) = 0.2645833333 mm
% 1 mm = 3.7795275591 pixel (X)
%
% Exemplo: converter 15 pixel (X) para mm:
% 15 pixel (X) = 15 × 0.2645833333 mm = 3.96875 mm

clr = 0.3;           % o nível de preto varia entre 0 e 1; sendo 0.3 = 30%
A = rand(800);      % o número entre parênteses fornece a quantidade de pixels
A(A<clr) = 0;       % fornece imagem binária
A(A>=clr) = 1;
% A(A>0.2 & A<0.5) = 0.3;   % fornece a escala de cinza na figura
% A(A>0.5 & A<0.75) = 0.6;
% A(A>0.75) = 1;

figure(2)
surf(A);
shading flat
colormap gray;
view(2);
axis tight square
grid off
```