

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**ESTUDO DO REPARO POR LUVAS BI-PARTIDAS EM DUTOS RÍGIDOS COM
DEFEITOS TIPO PERDA DE ESPESSURA**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Ana Paula de Almeida Souza

Porto Alegre

2022

ANA PAULA DE ALMEIDA SOUZA

**ESTUDO DO REPARO POR LUVAS BI-PARTIDAS EM DUTOS RÍGIDOS COM
DEFEITOS TIPO PERDA DE ESPESSURA**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões

Vice-Reitora: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-Coordenadora: Andréa Moura Bernardes

SOUZA, A. P. A.
ESTUDO DO REPARO POR LUVAS BI-PARTIDAS EM DUTOS
RÍGIDOS COM DEFEITOS TIPO PERDA DE ESPESSURA / A. P.
A. SOUZA. -- 2022.
114 f.
Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Reparo de dutos. 2. Perda de espessura. 3.
Corrosão. 4. Reparo por Dupla Calha. 5. Elementos
Finitos. I. Reguly, Prof. Dr. Afonso, orient. II.
Título.

ANA PAULA DE ALMEIDA SOUZA

**ESTUDO DO REPARO POR LUVAS BI-PARTIDAS EM DUTOS RÍGIDOS COM
DEFEITOS TIPO PERDA DE ESPESSURA**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sendo aprovada em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Afonso Reguly

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Vieira Braga Lemos.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Cleber Rodrigo de Lima Lessa.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Nesse pequeno texto, mas honesto e sincero, dedico este título à minha família, especialmente aos meus pais e minha avó materna, que me deram força para sair e buscar tudo aquilo que desejo e mesmo longe, sempre oraram e torceram pelas minhas conquistas. Também agradeço muito a Deus, que abençoa meus sonhos, que nunca deixou que eu me sentisse sozinha nessa busca árdua, e que alimenta meu coração de confiança na minha capacidade de me tornar quem, e tudo que eu desejo ser.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelas oportunidades que colocou em minha vida e por me preparar para todas elas com saúde, força de vontade e muita perseverança. Agradeço também a todos que me apoiaram e me acolitaram para execução desse estudo, ao meu Professor orientador Dr. Afonso Reguly por acreditar em mim e assim ter aberto as portas de entrada ao meu ingresso no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), onde recebi muito incentivo no desenvolvimento do meu mestrado além de todo conhecimento e crescimento que venho adquirindo diariamente aqui dentro. Agradeço a todo ensinamento, confiança e apoio dos meus colegas de equipe; Renan Mensch Landell e Luis Fernando Kanan que sempre estiveram dispostos a me auxiliar e a repassar seus conhecimentos. Ao LAMEF pela oportunidade de crescimento profissional com todo o aprendizado aqui colhido e aos meus colegas de projeto Guilherme Barbosa Cabral, Juliano Pereira Gerber e Maxwell Rodrigues da Silva que auxiliaram e foram essenciais para a conclusão das etapas deste estudo. Ao professor Dr. Marcelo Favaro Borges pelo apoio e incentivo para obtenção desse título, e para conquistar maiores degraus de conhecimento. À PETROBRAS pelo apoio financeiro e todo incentivo à pesquisa. E principalmente, a minha família que me ampararam, mesmo longe, tornando possível minhas conquistas, meu desenvolvimento profissional e pessoal.

RESUMO

Os sistemas de transporte por dutos operam geralmente em ambientes hostis e mesmo que a construção dessas dutovias sigam normas internacionais e frequentes inspeções, nesse modal de transporte é constantemente detectado defeitos que ocorrem inevitavelmente durante sua vida útil em serviço, ficando susceptíveis a danificações de diferentes naturezas, até mesmo por processos de ordem natural, como os defeitos por corrosão. O defeito de redução de espessura de parede causada pelo processo corrosivo é o modo de falha mais comum detectado nas manutenções do sistema dutoviário, apesar da presença, em muitos casos, de revestimentos protetores. Tendo em vista que os custos com interrupções do fluxo da linha e paralizações para manutenções não programadas são muito onerosas para as empresas responsáveis por esse modal, além de ser consideradas como um dos últimos recursos devido ao custo global que essas paradas representam, as inspeções e reparos periódicos se tornam fundamentais pois garantem a segurança de utilização desse modal. Com base nisso, esse trabalho tem como objetivo principal recompor integralmente a resistência mecânica dos dutos nas regiões com danos do tipo perda de espessura na parede externa, através do reparo da área danificada pelo método de Reparo por Dupla Calha, tipo A, onde a linha pode continuar ativa durante a manutenção, impactando apenas em uma redução da pressão de funcionamento, no momento do reparo. Esse reparo consiste na instalação de duas calhas bipartidas que envolvem a região defeituosa do duto, sendo então aplicada uma força de tensão compressiva circunferencial sobre as calhas, que são unidas através da soldagem de talas de fixação, com a solda aplicada apenas sobre as calhas e não sobre o duto. Nesse estudo, desenvolveu-se um procedimento de reparo que garantisse a aplicação de tensões circunferenciais compressivas na região do defeito e possibilitasse a padronização dos ensaios experimentais de forma eficiente e com repetibilidade. Também foi desenvolvido um método para calcular a eficiência, a fim de validar o reparo quando esse conseguir devolver a integridade estrutural do duto na região reparada ao nível da região sem dano (região íntegra do tubo). As condições ensaiadas experimentalmente foram também simuladas através do Método de Elementos Finitos e, por meio disso, foi realizada uma comparação dos dados, validando assim o modelo numérico e abrindo a possibilidade de extrapolação dos parâmetros de reparo para diferentes condições. Ainda, com o objetivo de avaliar a

melhor combinação de Força de Aperto, e Pressão de Reparo na aplicação desse método, foi criada uma ferramenta que auxilia o operador de manutenção de dutovias, a identificar qual é a melhor combinação desses parâmetros, para que resulte em um reparo eficiente para cada caso pontual encontrado na via (severidade do dano, diâmetro da tubulação, espessura e material do duto). Os resultados obtidos mostram uma excelente efetividade na redução das tensões na região do reparo, além de permitir a compreensão da influência de cada parâmetro variável na eficiência do reparo.

Palavras-chave: Reparo de dutos. Perda de espessura. Corrosão. Reparo por Dupla Calha. Elementos Finitos.

ABSTRACT

Pipeline transportation systems generally operate in hostile environments and even though the construction of these pipelines follows international norms and frequent inspections, defects are constantly detected in this mode of transportation that inevitably occur during their useful life in service, making them susceptible to damage of different types, even by natural processes, such as corrosion defects. The defect of reduced wall thickness caused by the corrosive process is the most common failure mode detected in pipeline system maintenance, despite the presence, in many cases, of protective coatings. Considering that the costs with interruptions in the flow of the line and shutdowns for unscheduled maintenance are very expensive for the companies responsible for this modal, besides being considered as one of the last resources due to the global cost that these shutdowns represent, the periodic inspections and repairs become fundamental because they guarantee the safety of use of this modal. Based on this, the main objective of this work is to fully recover the mechanical resistance of the pipelines in the regions with damage such as loss of thickness in the external wall, by repairing the damaged area using the Metallic Sleeves Repair method, type A, where the line can remain active during maintenance, impacting only a reduction in operating pressure at the time of repair. This repair consists of the installation of two split Sleeves that wrap around the faulty region of the pipeline, and then a circumferential compressive stress force is applied to the Sleeves, which are joined by welding splints, with the weld applied only to the Sleeves and not to the pipeline. In this study, a repair procedure was developed to ensure the application of circumferential compressive stresses in the defect region and to enable the standardization of experimental tests in an efficient and repeatable manner. A method was also developed to calculate the efficiency in order to validate the repair when it returns the structural integrity of the pipe in the repaired region to the level of the undamaged region (intact region of the pipe). The experimentally tested conditions were also simulated using the Finite Element Method and, through this, a comparison of the data was performed, thus validating the numerical model and opening the possibility of extrapolation of the repair parameters to different conditions. Also, with the objective of evaluating the best combination of Tightening Force and Repair Pressure in the application of this method, a tool was created to help the pipeline maintenance operator to identify which is the best combination of these parameters, in

order to result in an efficient repair for each specific case found in the pipeline (severity of the damage, pipe diameter, thickness and material of the pipeline). The results obtained show an excellent effectiveness in reducing the stresses in the repair region, besides allowing the understanding of the influence of each variable parameter in the repair efficiency.

Keywords: Pipeline repair. Loss of thickness. Corrosion. Metallic Sleeves Repaire. Finite Elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custo aproximado por tonelada-milha de cinco modais de transporte.....	18
Figura 2 - Dutovia.....	19
Figura 3 - Malha Dutoviária no Brasil	20
Figura 4 - Distribuição de incidentes em gasodutos Europeus - 2010 á 2019	22
Figura 5 - Defeito causado por corrosão em um duto e sua representação normativa	23
Figura 6 - Corrosão externa que causou o rompimento do duto em Santa Bárbara .	24
Figura 7 - Métodos de reparo mais utilizados pela indústria	29
Figura 8 - Método de reparo de remoção e substituição	30
Figura 9 - Método de reparo de lixamento	30
Figura 10 - Método de reparo com mangas de reforço compósitas	31
Figura 11 - Sequência do reparo com deposição de solda. A) Deposição do primeiro passe de perímetro e diversos passes da primeira camada; B) Esmerilhamento do primeiro passe de perímetro; C) Deposição do segundo passe de perímetro e diversos passes da segunda camada; D) Reparo completo.....	32
Figura 12 - Método de reparo de aplicação de Abraçadeiras Mecânicas.....	33
Figura 13 - Método de reparo Hot Tapping	34
Figura 14 - Método de trepanação para substituição de trecho	34
Figura 15 – Diferença do reparo por Dupla Calha Tipo A e tipo B	35
Figura 16 - Detalhamento do Reparo de duto pelo método de dupla calha tipo A por interferência com o uso de talas intermitentes.	38
Figura 17 – Reparo de duto pelo método de dupla calha tipo A por interferência com o uso de talas intermitentes.....	39
Figura 18 - Relações teóricas entre as tensões no duto e reparo, pressão do duto durante aplicação do reparo e espessura de parede do duto e do reparo.	40
Figura 19 - Etapas Experimentais em tubos íntegros.....	42
Figura 20 - Etapas Experimentais em tubos com perda de espessura	42
Figura 21 – Representação do sistema de ensaio de fadiga e hidrostático. Itens 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 referentes a bomba hidropneumática, bunker, mangueiras e acessórios, aquisitor de dados, célula de pressão, atuador hidráulico, reparo e tubo, respectivamente	43
Figura 22 - Etapas de Simulação Numérica em tubos íntegros	44
Figura 23 - Etapas de Simulação Numérica em tubos com perda de espessura	44
Figura 24 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de análise química	46
Figura 25 - Equipamento usado para os ensaios de tração (a) e corpos de prova usinados (b).....	46
Figura 26 - Composição química do aço API 5L X65 utilizado no projeto (% em massa).	47
Figura 27 - Propriedades mecânicas do tubo de aço API 5L X65 de 18 polegadas de diâmetro.	47
Figura 28- Marcações da amostra.....	48
Figura 29 - Aplicação de lubrificante (Molykote) nas superfícies do tubo e calhas ...	49
Figura 30 - Preparação da superfície interna das calhas	50
Figura 31 - Posicionamento da Calha no Tubo em relação ao centro do Defeito	50
Figura 32 - Posicionamento final das Calhas	51

Figura 33 - Posicionamento das luvas sobre o tubo.....	52
Figura 34 - Instrumentação da região central da calha	52
Figura 35 - Extensômetro da região externa ao reparo	53
Figura 36 - Área lubrificada pelo Molykote	53
Figura 37 - Posicionamento do dispositivo de aperto.....	54
Figura 38 - Lado da união das correntes.....	54
Figura 39 - Corrente envolvendo a amostra.....	55
Figura 40 - Fixação das células de carga.....	55
Figura 41 - Posicionamento do dispositivo de aperto.....	56
Figura 42 - Talas Intermitentes.....	57
Figura 43 - Passe de raiz realizado com o processo TIG.....	57
Figura 44 - Passe de enchimento realizado com o processo MAG.....	58
Figura 45 - Talas Intermediárias.....	59
Figura 46 - Gráfico de relação de tensões versus relação de pressões.....	63
Figura 47 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos	63
Figura 48 - Identificação das calhas lado cilindro (a) e lado célula de carga (b).	64
Figura 49 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01	65
Figura 50 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Final da etapa 1	66
Figura 51 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Etapa 2	67
Figura 52 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Etapa 3	68
Figura 53 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1800GR01.....	69
Figura 54 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1800GR01	69
Figura 55 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR02	70
Figura 56 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1800GR02.....	71
Figura 57 - Localização do defeito tipo perda de espessura (a) e tubo com defeito usinado (b).	72
Figura 58 - Espessura remanescente das amostras com defeito tipo perda de espessura (medidas em milímetros).	73
Figura 59 - Ensaio hidrostático de explosão - T1870PE01 – Sem Reparo	74
Figura 60 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE01.....	75
Figura 61 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1890PE05 – Sem Reparo	76
Figura 62 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE05.....	76
Figura 63 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos dos tubos com Perda de espessura.....	77
Figura 64 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1870PE02.....	78
Figura 65 - Deformações Circunferenciais para o hidrostático de explosão - T1870PE02	80
Figura 66 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE02.....	80
Figura 67 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1890PE06.....	81
Figura 68 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1890PE06	82

Figura 69 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1890PE06.....	82
Figura 70 - Partes do modelo numérico	85
Figura 71 - Condições de contorno do modelo numérico: restrição da corrente no plano (1); aplicação da carga de ensaio (2a); leitura das células de carga (2b); simetria longitudinal (3); e simetria transversal (4).	85
Figura 72 - Eficiência do reparo dos modelos numéricos dos tubos íntegros	88
Figura 73 - Dados experimentais e de simulação para o reparo de tubos íntegros ..	89
Figura 74 - Dimensional do defeito de perda de espessura	91
Figura 75 - Modelo numérico com $\frac{1}{4}$ de simetria do (a), zoom na região de perda de espessura (b) e locais de medição das tensões circunferenciais.....	93
Figura 76 - Eficiência do reparo para defeitos do tipo perda de espessura. Variáveis: Diâmetro (D), espessura (t), tensão admissível do material (Sadm), porcentagem de perda de espessura (PE), pressão de reparo (PR) e força de reparo (FR).....	95
Figura 77 - Eficiência Delta do reparo para defeitos do tipo perda de espessura. Variáveis: Diâmetro (D), espessura (t), tensão admissível do material (Sadm), % perda de espessura (PE), pressão de reparo (PR) e força de reparo (FR).	96
Figura 78 - Influência dos parâmetros na variação da média da eficiência.....	97
Figura 79 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados	98
Figura 80 - Influência das interações entre os parâmetros na variação da média da eficiência	99
Figura 81 - Interface da planilha de definição de parâmetros de reparo	101
Figura 82 - Dados iniciais de preenchimento na planilha.....	101
Figura 83- Resultados após o preenchimento dos dados iniciais de na planilha	102
Figura 84 - Resultado com o preenchimento de todos os campos de entrada na área 1	103
Figura 85 - Resultado com o preenchimento de todos os campos de entrada na área 1 e Eficiência dentro do limite.....	103
Figura 86 - Relações Geométricas do Dispositivo de Aperto do LAMEF	104
Figura 87 - Tensões circunferenciais no modelo numérico com pressão interna durante o reparo de 32 bar e 16 bar.....	111
Figura 88 - Gráfico da tensão circunferencial pela pressão interna de um tubo reparado nas condições de 32 bar de pressão interna e 500 kN de força de aperto.	112
Figura 89 - Gráfico de tensão circunferencial pela pressão interna de um tubo reparado nas condições de 16 bar de pressão interna e 500 kN de força de aperto.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem para os passes de raiz	57
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem para os passes de enchimento.....	58
Tabela 3 - Parâmetros de reparos experimentais dos tubos íntegros.....	62
Tabela 4 - Dados finais da aplicação do reparo nas amostras de tubos íntegros	72
Tabela 5 - Dados finais das amostras de tubos com perda de espessura	83
Tabela 6 - Parâmetros de reparo utilizados na simulação numérica dos tubos íntegros.	86
Tabela 7 - Parâmetros de reparo utilizados na simulação numérica dos tubos com perda de espessura.....	90
Tabela 8 - Limites dos parâmetros utilizados no estudo estatístico	97

LISTA DE ABREVIATURAS

CP_Corrente	Pressão nos cilindros de aperto na corrente
CP_Tubo	Pressão interna no tubo
D	Diâmetro externo do tubo
EPL	Empresa de Planejamento e Logística S.A
F – Fr	Força de Aperto das Correntes
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MEF	Método de Elementos Finitos
MME	Ministério de Minas e Energia
PE	Perda de Espessura
Ph	Pressão de projeto do duto, sem a presença do defeito (Ph)
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration
Pop	Pressão de Operação
Pr	Pressão no momento de aplicação do reparo (Pr)
PRCI	Pipeline Repair Manual
Prep – Pr	Pressão da linha no momento do reparo
REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento de Infraestrutura
Sadm – Sad	Tensão admissível do material
Sext	Tensão Externa, fora da área de reparo
SG	Strain Gauge
SMYSc	Mínima tensão de escoamento do duto
SMYSs	Mínima tensão de escoamento do reparo
So	Tensão circunferencial no duto (So)
Sr	Tensão circunferencial no duto, após a instalação da dupla calha (Sr)
Srep	Tensão no Reparo
SY	Tensão de escoamento do material
t	Espessura do Tubo
ta	Espessura real do duto
TIG	Tungstein Inert Gas
ts	Espessura da parede das calhas utilizada para o reparo (ts)
ϵ_{ext} - Def ext	Deformação fora da região de reparo
ϵ_{rep} – Def rep	Deformação na região do reparo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	SISTEMA DUTOVIÁRIO	18
1.1.1	Integridade dos dutos	21
1.1.1.1	Corrosão	22
1.1.1.1.1	Perda de espessura	23
2	OBJETIVOS	26
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1	TIPOS DE REPARO.....	29
3.1.1	Remoção e Substituição de um Segmento Defeituoso.....	29
3.1.2	Lixamento	30
3.1.3	Mangas de reforço compósitas.....	31
3.1.4	Depósito de Solda	31
3.1.5	Abraçadeiras Mecânicas.....	33
3.1.6	Trepanação ou Hot Tapping	33
3.1.7	Dupla Calha.....	34
4	METODOLOGIA.....	38
4.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	45
4.1.1	Caracterização Mecânica e Metalúrgica	45
4.1.2	Procedimento de reparo dos tubos experimentais	47
4.1.2.1	Identificação e sinalização da amostra	48
4.1.2.2	Posicionamento das calhas.....	48
4.1.2.3	Instrumentação da amostra.....	52
4.1.2.4	Posicionamento do dispositivo de aperto	53
4.1.2.5	Realização do reparo	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
5.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS ÍNTEGROS	61
5.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA.....	72
5.2.1	Ensaio Experimental em Tubos com Perda De Espessura Sem Reparo.....	74

5.2.2	Ensaio Experimentais em Tubos com Perda de Espessura Com Reparo.....	77
5.2.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA.....	82
5.3	MODELOS NUMÉRICOS EM TUBOS ÍNTEGROS	83
5.4	MODELOS NUMÉRICOS DOS TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA.....	90
5.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES DOS TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA	96
5.6	FERRAMENTA DE CONSULTA DE EFICIÊNCIA PARA APLICAÇÃO DO REPARO DE DULPA CALHA, TIPO A.....	100
6	CONCLUSÕES	105
7	TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS.....	108
	APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REPARO DOS TUBOS DE 18 POLEGADAS E COM O DEFEITO TIPO PERDA DE ESPESSURA	111

1 INTRODUÇÃO

Defronte a um mercado cada vez mais competitivo, o maior desafio de uma empresa hoje é conseguir reduzir seus custos e elevar a sua eficiência. Assim, encontrar formas de melhorar suas atividades em relação aos seus resultados econômicos resultaria na obtenção de uma vantagem competitiva frente aos seus concorrentes (MÁS; PINTO, 2003).

Uma característica importante, dentro desse contexto, circunda as operações de transporte. Geralmente considerada um dos principais gargalos da cadeia produtiva (MÁS; PINTO, 2003), o transporte para a maioria das empresas chega a representar a maior parcela do custo logístico da organização. Segundo Ballou (2006), o transporte representa o membro vital integrante do projeto e do gerenciamento dos sistemas logísticos de uma corporação, configurando uma parcela tão significativa que o transporte chega a constituir entre um e dois terços dos custos logísticos totais da organização.

Ainda conforme Ballou (2006), para a empresa, o custo do serviço de transporte varia de acordo com o transporte utilizado, que deverá ser avaliado em termos de características básicas a todos os serviços, como: preço, tempo médio de viagem, variabilidade do tempo de trânsito, perdas e danos.

Presume-se que o serviço esteja disponível e possa ser fornecido com uma frequência capaz de torná-lo atraente como uma opção de serviço. [...] Os modais de transporte variam conforme a possibilidade, ou impossibilidade, de proporcionar conexão direta entre os pontos de origem e destino. (BALLOU, 2006, p.150-152)

Destarte, a Figura 1 proporciona o custo aproximado para transportar, por tonelada-milha, cinco modais de transporte. Lembrando que os dados fornecidos na Figura 1, são médias resultantes do quociente de renda de transporte gerado por um modal em relação ao total embarcado de milhas-toneladas.

Tendo por conhecimento que os dutos precisam trabalhar com altos volumes, entre os quais seja possível ratear os altos custos fixos para ser um modal competitivo, extrai-se da Figura 1 que, o transporte aéreo é o mais caro e a movimentação pelo sistema dutoviário e o hidroviário os menos dispendiosos, quando tomados por suas características de custo e desempenho (BALLOU, 2006).

Figura 1 - Custo aproximado por tonelada-milha de cinco modais de transporte

TABELA 6-1 Preço médio da tonelada/milha conforme o modal de transporte	
<i>Modal</i>	<i>Preço, US\$ cents/ tonelada-milha^a</i>
Ferroviário	2,28 ^b
Rodoviário	26,19 ^c
Hidroviário	0,74 ^d
Dutoviário	1,46 ^e
Aeroviário	61,20 ^f

^a Baseado na média por tonelada-milha.
^b Classe I.
^c Carga não integral.
^d Barcaça.
^e Doméstico.
Fonte: Rosalyn A. Wilson, "Transportation in America 2000", 18ª ed. (Washington DC: ENO Transportation Foundation, 2000), pág. 19 .

Fonte: (Ballou, 2006, p. 151)

Assim, cabe ressaltar que, dentre os principais modais de transporte (mencionados na Figura 1), o uso de dutos além de se sobressair em relação ao custo-benefício, se torna mais eficiente pela possibilidade de realizar um posicionamento logístico mais efetivo para a coleta e distribuição do produto (como petróleo e seus derivados; água, gás, produtos químicos), sobretudo em longas distâncias.

1.1 SISTEMA DUTOVIÁRIO

O sistema dutoviário caracteriza-se por ser uma linha de condução de produtos (geralmente fluidos ou minérios) composto por vários segmentos de tubos ou cilindros, que unidos (normalmente por soldas circunferências e alguns componentes) formam uma fileira de tubos chamada de dutovia (ou pipeline), como mostra a Figura 2. Essas dutovias são antecipadamente arranjadas com o propósito de conectar pontos de oferta com a demanda, saindo de uma área produtora em direção a uma área consumidora ou exportadora (como os portos, por exemplo).

A infraestrutura desse sistema é fixa e pode ser instalada sobre o solo, no subsolo ou submarina. A norma ASME B31, ou Código de Projeto para Construção de Tubulações, é utilizada para estabelecer os critérios necessários para construção desses dutos. Atualmente o aço mais utilizado para construção de dutos para transporte de gás, petróleo e minério, para aplicações de alta pressão, é o aço com classificação X70, porém os aços X60 e X65 também já foram bastante empregados.

Figura 2 - Dutovia



Fonte: (ANTT, 2022)

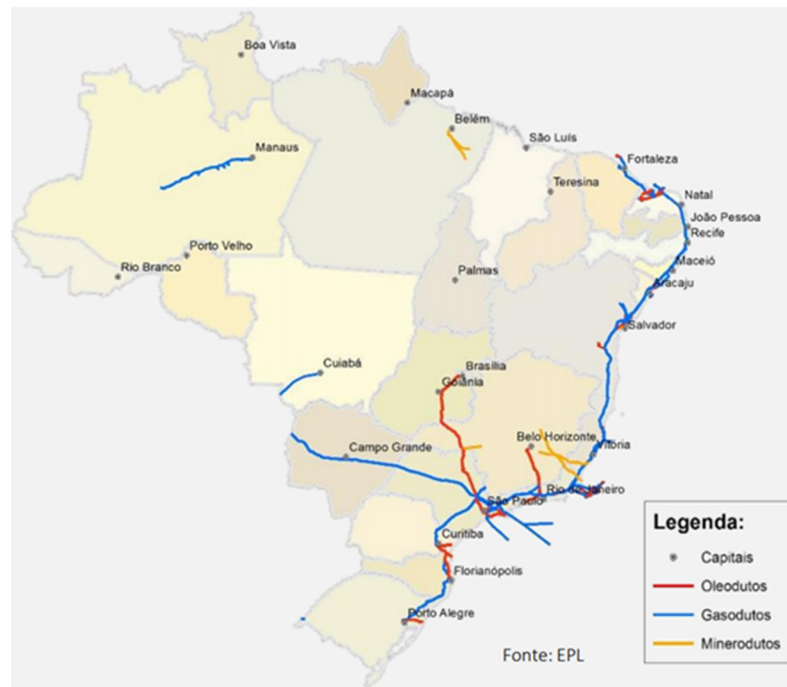
Segundo os dados fornecidos pela EPL- Empresa de planejamento e logística S.A (2019), em parceria com a iniciativa Abastece Brasil do Governo Federal e liderada pelo Ministério de Minas e Energia, em 2019 o Brasil possuía em torno de 21 mil km de dutovias, distribuídas em 11,7 mil km em gasodutos, 1,7 mil km em minerodutos e 8 mil km em combustíveis, arranjadas conforme a Figura 3.

Entre as variações do sistema dutoviário localizado no Brasil, destacam-se: o Oleoduto São Sebastião-Paulínia com 226 km e de Angra dos Reis-Caxias com 125 km de comprimento; o mineroduto Paragominas-Barcarena, Pará com 250 km; e o Gasoduto Brasil-Bolívia, com 3150 km de extensão (sendo 2593 km em território brasileiro), considerado o maior da América latina e um dos maiores do mundo. O gasoduto Brasil-Bolívia é também conhecido como Gasbol, começa na cidade boliviana de Santa Cruz de La Sierra e tem seu final na cidade gaúcha de Canoas, passando por cerca de quatro mil propriedades em 135 municípios. (PETROBRAS, 2020).

Segundo o que afirma o Ministério de Minas e Energia (MME, 2021), os projetos de movimentação por dutovias, para o transporte de produtos inflamáveis e combustíveis, vem recebendo incentivos governamentais e vê-se hoje no Brasil com grandes expectativas de crescimento em médio e longo prazo.

Ainda conforme o (MME, 2021), as dutovias representam uma excelente alternativa às limitações da infraestrutura de transporte de cargas atual no Brasil, que utiliza, principalmente, o meio rodoviário. Tendo em vista os dados oferecidos pela Transpetro (2021), um único dia de transporte por dutos tira mais de 20 mil caminhões-tanque das vias, desta maneira o sistema dutoviário além de evitar a sobrecarga de fluxo das rodovias evita também a deterioração dessas.

Figura 3 - Malha Dutoviária no Brasil



Fonte: (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A, 2019)

Segundo a Petrobras (2014), esse modal permite a uma distribuidora obter um diferencial competitivo face aos ganhos econômicos do sistema dutoviário frente ao rodoviário.

Além dos benefícios do sistema dutoviário em relação ao transporte rodoviário, o transporte via dutos atrai investimentos no setor e promove a concorrência, devendo então diminuir os preços ao consumidor, trazendo um forte impacto positivo para a economia do país além de geração de empregos. Também promove a redução do consumo de combustíveis fósseis e reduz os índices de emissão de gases de efeito estufa. Ademais, o modal dutoviário é uma movimentação do tipo 24 horas/dia, sete dias por semana, o que torna, segundo Ballou (2006) a velocidade de transporte efetiva bem maior quando comparada com a de outros modais.

Técnicos avaliam que o enquadramento destes projetos de dutovias no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento de Infraestrutura (REIDI), beneficia toda a sociedade pois promovem custos finais competitivos de transporte e, por consequência, potencial redução no custo das mercadorias e serviços. (MME, 2021)

Ainda afirma Ballou (2006) que em relação ao tempo em trânsito, o serviço dutoviário é o mais confiável de todos os modais pelo fato de que interrupções causadoras de variabilidade desse tempo de movimentação são quase nulas. Isso porque os danos e perdas dos produtos nos dutos são reduzidos, pois, os líquidos e gases (principais e mais viáveis produtos movimentados por esse tipo de modal) não são sujeitos a danos em grau de igual semelhança aos produtos manufaturados, e o número de riscos que podem afetar uma operação dutoviária é limitado.

1.1.1 Integridade dos dutos

Os sistemas de transporte por dutos operam geralmente em ambientes hostis (subterrâneos ou submarinos), e mesmo que a construção dessas dutovias sigam normas internacionais e frequentes inspeções, os dutos podem sofrer diversos tipos de danos em serviço e por isso esse sistema é constantemente ameaçado por defeitos e danos que ocorrem inevitavelmente durante a vida útil em serviço do pipeline e assim, estão susceptíveis à danificações de diferentes naturezas, até mesmo por processos de ordem natural, como os defeitos por corrosão. A presença de defeitos na linha é a principal causa de falhas nas dutovias.

Segundo Freire (2009), o dano em uma tubulação de transporte é uma transformação na microestrutura do material ou na geometria de um duto, que foi gerada em consequência de suas condições de trabalho. O defeito, por sua vez, seria o dano limite ou crítico para que seja mantido as condições desejadas de operação desse duto, ou seja, quando a condição do dano está no limite de trabalho e pode colocar em risco a funcionalidade para qual a estrutura foi projetada.

Visando a segurança na operação da dutovia e buscando manter as melhores condições de serviço, e ainda sabendo que durante a vida útil das tubulações como as de transporte de óleo e gás "on-shore", é normalmente detectado (por meio de ferramentas de inspeção) a presença de defeitos na linha; é necessário que sejam realizadas variadas inspeções periódicas (por técnicas de ensaios não destrutivos) para verificar a integridade de um duto e seu estado de operação, e é através disso que gera a demanda de manutenções corretivas e/ou preventivas quando se detecta alguma anomalia, antes da ocorrência de uma potencial falha. (FREIRE, 2009)

Inspeccionar um duto visa localizar e dimensionar os defeitos encontrados, para avaliar as condições de integridade estrutural quanto aos danos mecânicos da

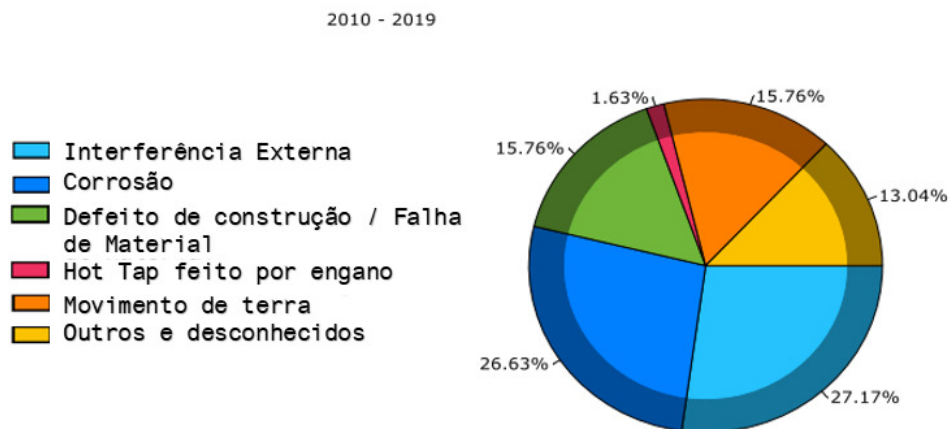
tubulação, estado de revestimento, sistema de proteção catódica, sistema de proteção operacional, além de outros problemas como o processo corrosivo, tanto interno quanto externo.

1.1.1.1 Corrosão

Segundo Nahal (2019), a corrosão é o modo de falha mais comum detectado nas manutenções dos sistema dutoviário, apesar da presença, em muitos casos, de revestimentos protetores.

Segundo Benjamin (2014), dentre os diversos defeitos que podem afetar a integridade de um duto ao longo de sua vida útil, o defeito de redução de espessura de parede causada pelo processo corrosivo, é um dos mais decorrentes nas atividades de reabilitação de dutos, tanto terrestres quanto marítimos. Segundo Cruz (2019), geralmente, a taxa de corrosão é utilizada ainda como parâmetro para definição de vida útil do pipeline. Assim, para garantir a segurança de utilização, garantir a vida útil dos dutos e até mesmo o prolongamento dessa vida útil, as inspeções e reparos periódicos são muito importantes.

Figura 4 - Distribuição de incidentes em gasodutos Europeus - 2010 á 2019



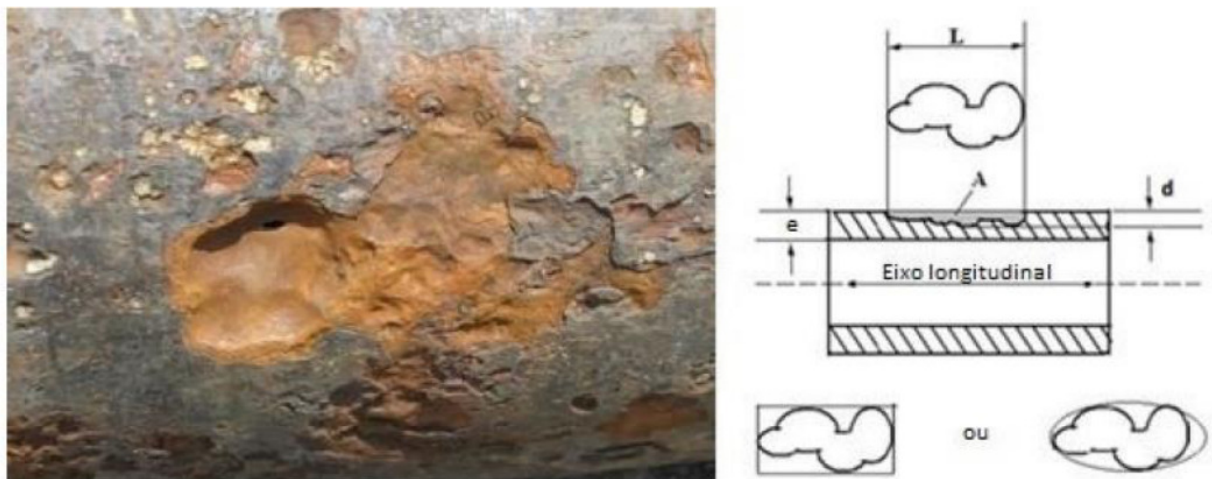
Fonte: (Adaptado de EGIG, 2019, pg 21)

Conforme os dados do relatório Europeu sobre Incidentes com Gasodutos (EGIG, 2019), durante o período de 1970 a 2019, os principais causadores de incidentes nos gasodutos da Europa são: a interferência externa e a corrosão, que ocorrem aproximadamente na mesma taxa. Dados mais recentes (2010-2019), mostram que a falhas por corrosão ainda se mantém como um dos maiores índices

de ocorrências de falhas conforme mostra a Figura 4, o que salienta a importância de estudos de reparo em tubos, com esses defeitos, para os operadores desse modal de transporte.

Segundo (BENJAMIN, 2005) os defeitos de corrosão podem ocorrer isoladamente ou em colônias, e como metodologia de avaliação de integridade, normas de tubulações tentam aproximar a região corroída através de um retângulo ou de uma elipse com uma profundidade total correspondente à corrosão de maior profundidade encontrada, medida ao longo do eixo do duto como ilustrado na Figura 5, resultando em uma metodologia conservativa no que diz respeito à segurança.

Figura 5 - Defeito causado por corrosão em um duto e sua representação normativa



Fonte: (CRUZ, 2019)

1.1.1.1.1 Perda de espessura

Entre os efeitos decorrentes da presença de defeitos por corrosão localizada nos dutos, a redução da espessura da parede da tubagem pode inserir uma concentração adicional de tensão, causando redução da capacidade de suporte de carga nessas vias danificadas, comprometendo a capacidade do tubo de conter sua pressão interna oriunda da operação em serviço. (GONG; ZHOU, 2018)

A corrosão resulta geralmente em poços localizados com várias profundidades e formas, nas superfícies externas e internas dos tubos. Um exemplo de corrosão externa é apresentado na Figura 6, onde a PHMSA - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration divulgou em relatório que essa corrosão

foi o que gerou o afinamento da parede do duto e conseqüentemente causou o rompimento da tubulação na região do defeito e assim, foi a causa raiz do devastador derramamento de óleo em Santa Bárbara, no dia 19 de maio de 2015, despejando mais de 140.000 galões de petróleo bruto.

Figura 6 - Corrosão externa que causou o rompimento do duto em Santa Bárbara



Fonte: (Pipeline Technology Journal, 2016)

Os defeitos de corrosão encontrados em dutovias podem colocar em risco a operação segura do duto pois, essa redução de espessura localizada faz com que a resistência da tubulação diminua conforme aumenta o tamanho dessa perda de espessura (PE). Assim, a perda de material por corrosão vai aumentando com o passar do tempo e conseqüentemente vai sendo reduzida a capacidade do duto de sustentar cargas externas (como aquelas resultantes de cargas de tráfego, cargas térmicas e afundamento do solo) bem como a pressão interna, como afirma Rajabipour (2013), e isso pode fazer com que o duto falhe por um dos dois modos de falha: por vazamento ou por estouro (ZHOU, 2010).

Na maioria das tubulações o transporte por dutovias é de substâncias com alta inflamabilidade e toxicidade, e sabendo que essa redução da capacidade de suportar a pressão causada pela corrosão interna e/ou externa, pode ter como resultado a falha dessas tubulações (EGIG, 2019), o fruto desse dano vai além da poluição do meio ambiente pela possibilidade de ocorrer grandes vazamentos, ou até mesmo fugas médias, mas também quebras de tubos, explosão e outros grandes acidentes catastróficos, como fatalidades humanas.

Além disso, a avaliação da resistência de dutos com a presença de defeitos causados por corrosão tem importância cada vez mais crescente, por motivos econômico-financeiros (GUIMARÃES, 2005). As operadoras deste tipo de transporte visam evitar que os dutos corroídos sofram rupturas em serviço, pois o resultado disso são custos adicionais ao gerados apenas com a realização do reparo na região onde o defeito foi detectado, além da realização, então, de uma interrupção forçada na linha de operação, por exemplo.

Devido ao potencial de consequência dessas falhas no pipeline, os riscos de operação de uma dutovia devem ser administrados, avaliados e reparados. Segundo Koch (2002), os pontos de corrosão em um duto se tratam de um processo dependente do tempo, ou seja, à medida que os sistemas de condutas se tornam mais antigos, cada vez mais são necessárias reparações.

Portando, visando diminuir os acidentes com a requisição de menor valor financeiro, reparos localizados em regiões danificadas são muito mais vantajosos que uma troca completa de um trecho da via dutoviária, e por isso diversas técnicas são estudadas e podem ser aplicadas para esses casos, com o objetivo de contribuir cada vez mais para a execução de reparos mais confiáveis e evitando ainda o desperdício de recursos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

- O presente estudo teve como objetivo principal recompor integralmente a resistência mecânica do duto nas regiões com danos de perda de espessura na parede, conforme norma N-2737 - Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre (PETROBRAS, 2014), através da aplicação do reparo do tipo dupla calha por interferência tipo A, conforme Pipeline Repair Manual (2008), de modo que as regiões reparadas tenham deformações circunferenciais menores ou iguais aos níveis encontrados nas regiões integras de uma tubulação em serviço.
- Aumentar a confiabilidade na aplicação do reparo do tipo dupla calha por interferência tipo A, para defeitos do tipo perda de espessura externa (causados por corrosão), a partir do desenvolvimento de um procedimento padronizado para esse tipo de reparo, além da identificação e definição de parâmetros otimizados que variam de acordo com as especificações do duto, severidade do defeito e condição de operação da linha (pressão interna);
- A otimização dos parâmetros e padronização do procedimento de reparo, visou reduzir o custo de manutenção ao setor industrial de óleo e gás em relação a manutenção de linhas com defeitos de perda de espessura, evitando recursos desnecessários.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Para garantir a aplicação de tensões circunferenciais compressivas nas regiões de reparo, avaliou-se uma série de testes experimentais preliminares, com o apoio de modelos numéricos, com a finalidade de definir os melhores parâmetros, desenvolver e padronizar o procedimento de reparo;
- Para a validação da eficiência do reparo na redução das tensões circunferenciais na região do defeito, foram realizados e comparados tanto ensaios experimentais quanto análises por modelamento numérico;
- A compreensão e validação dos resultados do modelamento numérico foram essenciais para o entendimento da distribuição das tensões, e abriu a

possibilidade de extrapolação e avaliação de parâmetros de reparo para diferentes condições de criticidade de defeito, dimensional do tubo, força de aplicação e pressão de reparo;

- Com essa possível extrapolação foi desenvolvido de um método que possibilitou calcular a efetividade e observar o comportamento do reparo em diferentes condições de severidade e de diferentes parâmetros de aplicação do reparo;
- Ao abrir margem para avaliar o desempenho das regiões danificadas e reparadas do duto, com o embasamento e combinação dos dados resultantes de 1845 simulações numéricas, se tornou possível avaliar o parâmetro que resulta na melhor eficiência para cada caso disponível ao operador do reparo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

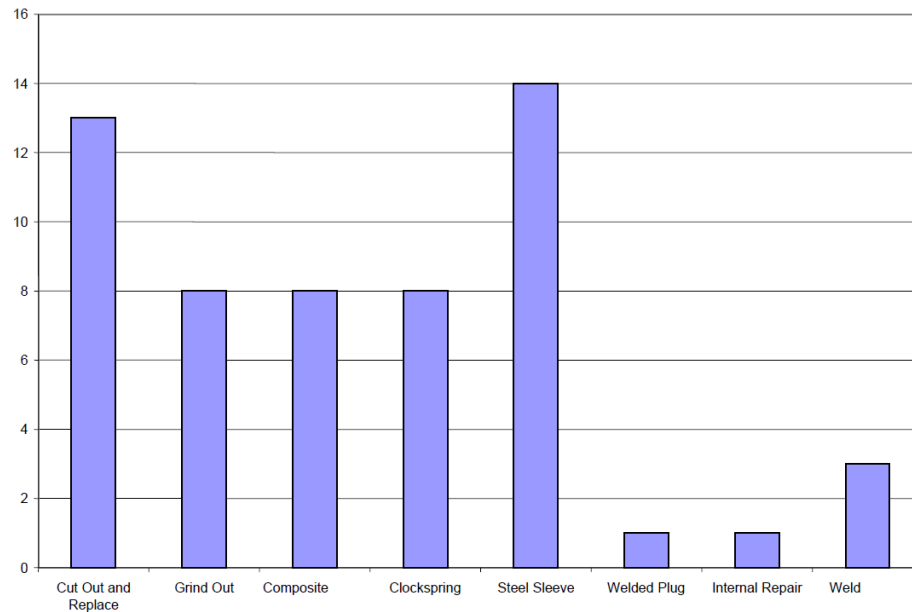
No Brasil, a norma mais proeminente relacionada a manutenção de oleodutos e gasodutos, é a norma N-2737 - Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre (PETROBRAS, 2014), que aborda três diferentes classificações, iniciais, de reparos:

- Reparos de contingência: Utilizados para conter ou prevenir vazamentos, e assim permitir condicionamento da linha para posterior aplicação de reparos temporários ou permanentes. Esses reparos de contingência são aplicados para reduzir os impactos ao meio ambiente e sobre as pessoas;
- Reparos temporários: servem para reforçar a região danificada com o objetivo de devolver a capacidade operacional da linha e, conforme N-2737 (PETROBRAS, 2014) devem ser substituídos em um prazo não superior a dois anos;
- Reparos permanentes: servem para recompor integralmente a resistência mecânica do duto.

Levando em conta que o custo de implantação de uma dutovia é alto, muitas tubulações montadas a mais 50 anos ainda continuam em operação, devido aos avanços de inspeção e reparos localizados em regiões danificadas do duto, que garantem a confiabilidade operacional da via depois de reparada.

Segundo Boring (2007), foi realizado um levantamento nas indústrias americanas para o Departamento de Energia dos E.U.A., para estimar quais eram os tipos de reparos mais utilizados pelas empresas, tomados como ações corretivas devido a degradação por corrosão e fissuração em tubulações em serviço. O resultado dessa pesquisa está apresentado na Figura 7, e pode-se concluir que o método de reparo mais utilizado para estender a vida útil dos pipelines nos trechos danificados por corrosão, é o reparo tipo luva de aço (também chamado nesse estudo por dupla calha), seguido por corte e substituição. Além disso, abordou-se também, nessa pesquisa, quais eram os principais critérios que afetam na escolha do método de reparação aplicada pelas empresas, e as repostas mais frequentes ficam entre o custo e a disponibilidade, seguido pela posição do defeito e se a linha deve estar fora de serviço ou não.

Figura 7 - Métodos de reparo mais utilizados pela indústria



Fonte: (BORING; PORTER; LAMORTE, 2007)

Os defeitos detectados no modal dutoviário podem ser reparados por uma variedade de métodos. De maneira mais específica, o Pipeline Repair Manual (PRCI, 2008), fornece as diretrizes aceitáveis para aplicação da técnica de reparação em um duto em funcionamento, e entre os que têm sido normalmente utilizados pelos operadores destes pipelines destacam-se: Remoção e Substituição de um Segmento Defeituoso, Lixamento, Mangas de reforço compósitas, Depósito de Solda, Abraçadeiras Mecânicas, Trepanação ou Hot Tapping e Dupla Calha.

3.1 TIPOS DE REPARO

3.1.1 Remoção e Substituição de um Segmento Defeituoso

Esse tipo de reparo, mostrado na Figura 8, é um reparo permanente, que consiste em remover a seção do duto que contém o defeito, e substituí-lo por outro segmento pré-testado, e assim, fazendo com que seja eliminado, totalmente, qualquer tipo de dano que tenha acontecido no duto.

A substituição de trecho de um duto só é recomendável quando este tenha perdido sua estanqueidade, ou o dano seja muito severo, pois é necessário a parada operacional dessa linha, isolamento e exigir a completa drenagem do mesmo, acarretando em um alto custo de manutenção bem como o lucro cessante devido a parada operacional.

Figura 8 - Método de reparo de remoção e substituição



Fonte: (JPNL, 2022)

3.1.2 Lixamento

O método de reparo de lixamento, como mostra a Figura 9, é utilizado para reparar defeitos, tais como: imperfeições de solda, queimaduras de arco, rasgos, ranhuras e, em alguns casos, para reparar regiões com trincas superficiais, desde que a quantidade e distribuição do metal removido não reduza significativamente a capacidade de transporte de pressão do duto, e por isso a quantidade de metal removido por lixamento é limitada, pelo mesmo critério utilizado para avaliar a perda de parede local causada pela corrosão.

Figura 9 - Método de reparo de lixamento



Fonte: (ROOSTER FABRICATION, 2022)

O Lixamento, também é utilizado como procedimento prévio para a execução de outros reparos posteriores, como em casos de amassamentos com concentradores de tensões que precisam ser removidos, ou algum outro defeito que precise de reforço adicional.

3.1.3 Mangas de reforço compósitas

Consiste em envolver o trecho corroído com mangas de materiais compostos (conforme Figura 10), formados por uma matriz de resina reforçada com fibra de alta resistência a corrosão. Devido à sua flexibilidade de aplicação pode ser utilizada em geometrias mais complexas, como curvas e derivações. A instalação deste reparo é bastante simples e permite reparar longos comprimentos de duto aplicando reparos múltiplos.

Figura 10 - Método de reparo com mangas de reforço compósitas



Fonte: (SKPS, 2022)

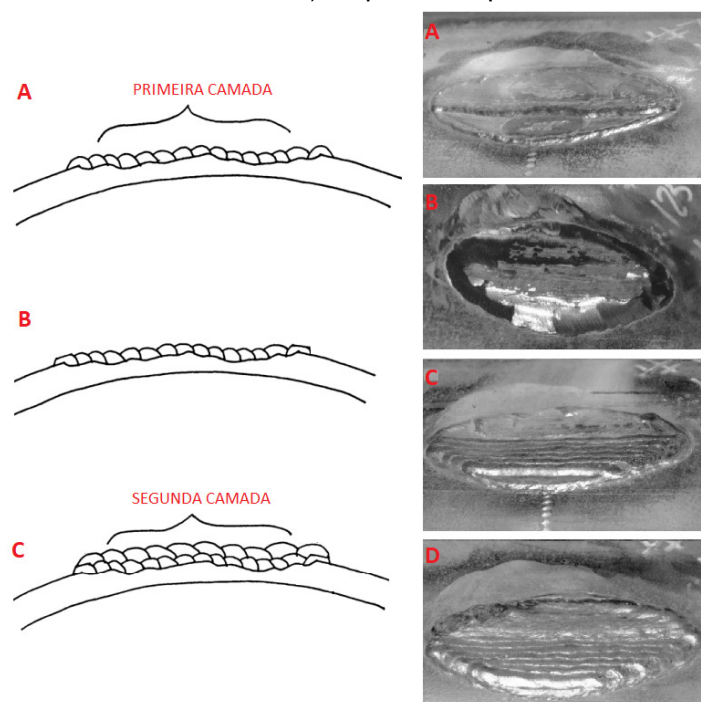
3.1.4 Depósito de Solda

O reparo de defeitos em tubulações por este método, consiste em realizar a reposição do metal perdido da região danificada, restaurando a continuidade do duto, através de técnicas de soldagem, como mostra a Figura 11.

Este método de reparo em serviço é simples, direto e pode ser aplicado em lugares onde a utilização de outras técnicas de reparo são mais difíceis e complexas, como intervenções em conexões e curvas, para as quais não estão disponíveis luvas

de envolvimento completo, devido à difícil conformação das mesmas. Assim, o método de reparo por depósito de solda, geralmente, é o mais utilizado para reparar pequenas áreas corroídas, rasgos, ranhuras, queimaduras de arco e imperfeições de soldas produzidas com metal de aporte (desde que não localizados em alguma zona de amassamento).

Figura 11 - Sequência do reparo com deposição de solda. A) Deposição do primeiro passe de perímetro e diversos passes da primeira camada; B) Esmerilhamento do primeiro passe de perímetro; C) Deposição do segundo passe de perímetro e diversos passes da segunda camada; D) Reparo completo



Fonte: (Adaptado de BORING; PORTER; LAMORTE, 2007) e (TORRES, 2016)

Entre os aspectos negativos desse método, é importante salientar que dependendo da espessura remanescente da parede e da penetração da solda, esse método representa um risco considerável quando aplicado em uma linha em operação.

Segundo o Manual de Métodos Avançados de Reparos para Tubulações em serviço (BORING; PORTER; LAMORTE, 2007) o defeito de corrosão nos dutos é normalmente reparado através da instalação do reparo pelo método de dupla calha ou através da deposição direta de metal de solda, porém esse método de deposição de solda para substituir a perda de metal por corrosão precisa de mais estudos para uma aplicação em campo, mas se trata de uma alternativa atrativa em secções de dobra e acessórios, onde a instalação do reparo com dupla calha é difícil, pois a

aplicação do depósito de solda é direta, relativamente barata, e não requer materiais adicionais além de consumíveis de solda.

3.1.5 Abraçadeiras Mecânicas

São estruturas robustas que abraçam o duto na região do defeito e depois são apertadas, na maioria dos casos, por meio de grandes parafusos, conforme Figura 12.

Figura 12 - Método de reparo de aplicação de Abraçadeiras Mecânicas



Fonte: (ANHUI HENG SHENG GROUP, 2022)

Esse método é de rápida e fácil aplicação e por isso são muito utilizadas em casos de emergência, ou em lugares nos quais as condições de trabalho são adversas, como, por exemplo, nas tubulações off-shore. Porém são muito dispendiosas e pesadas. Um pequeno desvio circunferencial do duto pode impedir sua utilização, ou seu correto funcionamento. Em geral são limitadas para reparar defeitos não muito compridos, e são utilizadas para o reparo de defeitos com, ou sem vazamentos.

3.1.6 Trepanação ou Hot Tapping

Esta é uma técnica para remover trechos de duto danificados sem interromper a operação da linha, de forma a perfurar uma tubulação em carga ou com um fluido dentro dela sem que o fluido interno vaze, ou seja, com estanqueidade total.

Para essa técnica de reparo, são necessários equipamentos estanques especiais que são acoplados à tubulação danificada a qual se deseja furar (como

mostra a Figura 13), e através de uma válvula realizam a perfuração. O resultado final da trepanação de tubos é uma linha com uma derivação lateral (ver Figura 14) que possui uma válvula que ao abrir, permite que o fluido escoe por ela.

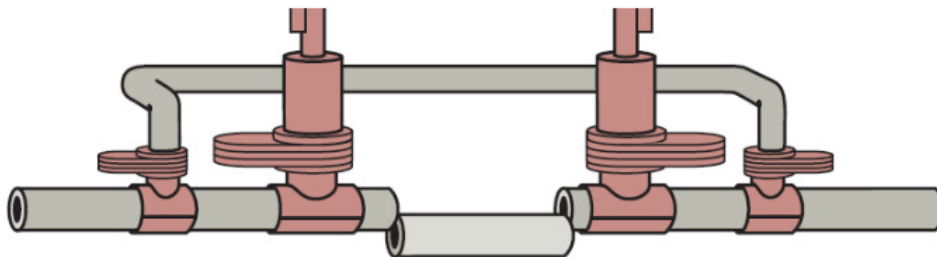
Figura 13 - Método de reparo Hot Tapping



Fonte: (BORING; PORTER; LAMORTE, 2007)

No caso do método de trepanação para substituição do trecho, são utilizados “tes” que servem para isolar o trecho, bloqueando a passagem do fluido transportado.

Figura 14 - Método de trepanação para substituição de trecho



Fonte: (BORING; PORTER; LAMORTE, 2007)

3.1.7 Dupla Calha

Segundo a publicação de Métodos Avançados de Reparos, para Tubulações em Serviço (BORING; PORTER; LAMORTE, 2007), o reparo mais comum utilizado pelas indústrias a fim de prolongar a vida útil dos dutos, com danos de perdas de espessura (interna e externa) causados por corrosão, é o método por dupla calha.

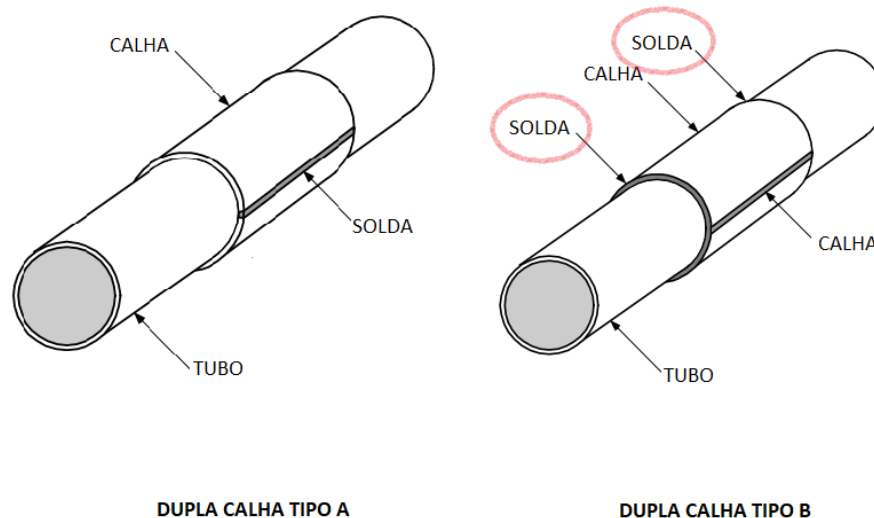
O reparo por dupla calha tem sido desenvolvido e aplicado nos últimos 20 anos e tem ganhado um forte espaço para uma vasta gama de aplicações de

reparação de tubulações de transporte, e hoje em dia esse método é utilizado rotineiramente para o reparo de gasodutos.

Tendo em vista que os custos com interrupções do fluxo da linha e paralizações para manutenções não programadas, nos transportes por dutos, são muito onerosas e sendo ainda consideradas como um dos últimos recursos devido ao custo global que essas paradas representam, no presente trabalho será aprofundado o método de reparo chamado de dupla calha, onde a linha pode continuar ativa durante a manutenção, impactando apenas em uma redução da pressão de funcionamento no momento do reparo (que será abordada no decorrer desse estudo como Pressão de Reparo ou Prep), se tornando ainda um dos métodos mais disponíveis para a manutenção de pipelines corroídos.

Conforme o PRCI, (2008) o método de reparo por dupla calha se subdivide em tipo A e tipo B.

Figura 15 – Diferença do reparo por Dupla Calha Tipo A e tipo B



Fonte: Adaptado de (PRCI, 2008)

No tipo A, a solda de união entre as duas meias calhas não tem contato direto com o tubo, onde a junta pode ser de topo, ou pode-se utilizar uma união sobreposta com solda de filete, e é utilizada para reforço estrutural da região danificada. Já no tipo B, a união das duas meias calhas que abraçam a região do defeito no duto é realizada através da aplicação de uma solda longitudinal para o encaixe das calhas que são unidas ao tubo através de uma solda circunferencial. No método de reparo por dupla calha tipo B, a solda realizada diretamente sobre o tubo atua de maneira a

vedar e isolar a região danificada, e por isso que o tipo B é também usado para contenção de pressão. Essa diferença está apontada na Figura 15.

Dessa maneira, a não necessidade de soldagem direta da calha metálica com o duto, para o método de reparo por dupla calha tipo A, diminui o risco da criação de trincas, ou de outras anomalias do produto da soldagem que, conforme Palmer (PALMER-JONES ANDREW PALMER; PAISLEY, 2000), a solda de filete localizada na extremidade da luva e em contato com o tubo (como é realizado no método pelo tipo B) é muitas vezes uma fonte de defeitos. Ainda, a vantagem de não possuir soldas diretamente sobre o tubo, reduz os riscos de acidentes a patamares mais confortáveis do que os atuais e sendo assim, não é necessário interromper o fluxo no interior do tubo para a realização da manutenção.

Assim, indo ao encontro da norma N-2737 (PETROBRAS, 2014), para a utilização de luvas bipartidas de aço (reparo por dupla calha), com ou sem solda circunferencial, devem ser observados as seguintes recomendações:

- O comprimento mínimo da calha deve ser suficiente para envolver a região defeituosa, devendo exceder, no mínimo, 50 milímetros a partir dos limites do defeito, e antes de sua instalação as calhas devem ser inspecionadas visualmente por partículas magnéticas e por ultrassom;
- A espessura da dupla calha deve ser dimensionada para atender a condição de projeto do duto, onde as definições de espessura e grau do aço devem ser suficientes para resistir, no mínimo, o que o duto original resiste e por isso, para a fabricação das calhas, os materiais devem ter certificados de fabricação indicando composição química e propriedades mecânicas. Em caso de indisponibilidade do certificado, os materiais para a fabricação das calhas devem ser analisados e ensaiados para a determinação das propriedades mecânicas. Para assegurar maior eficiência do reforço, antes da aplicação do reparo em defeitos do tipo moessa ou corrosão externa, a região defeituosa deve ser preenchida com massa epóxi com finalidade de completar os vazios existentes entre a luva bipartida e o duto;
- Para a aplicação do reparo do tipo dupla calha sem solda circunferencial, a pressão de operação deve ser reduzida para no mínimo 80% da pressão máxima de operação (prática recomendada).

Uma observação importante sobre esse método é que, a aplicação de um reparo a ser instalado próximo ao outro existente, para que não exista interação apreciável entre esses reparos sucessivos, esses devem estar separados por pelo menos meio diâmetro do dimensional da tubulação (OTEGUI et al., 2002).

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse projeto, foi desenvolvido um método de reparo por dupla calha tipo A, montado por interferência (esse método se encontra na seção 4.1.2 - Procedimento de reparo dos tubos experimentais). Esse tipo de reparo envolve a instalação de duas calhas bipartidas sobre a região defeituosa do duto, representada na Figura 16.

Figura 16 - Detalhamento do Reparo de duto pelo método de dupla calha tipo A por interferência com o uso de talas intermitentes.



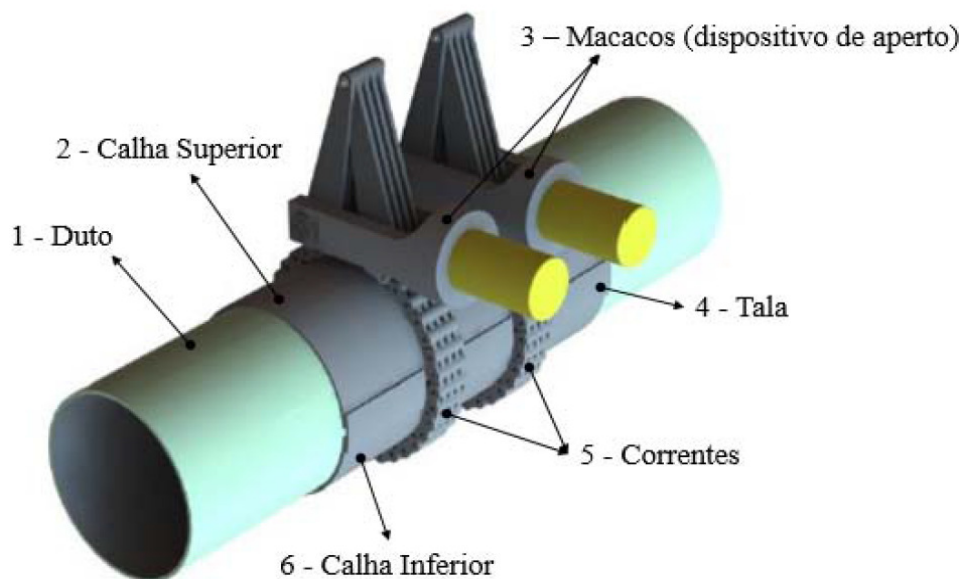
Após a montagem das calhas sobre essa região, é então aplicado uma tensão compressiva circunferencial até certo nível, através do emprego, nesse caso, de dois atuadores hidráulicos de 700 kN de força e duas correntes que aplicam força de compressão sobre as calhas. Vale salientar a importância da aplicação de lubrificante (graxa) na parede do tubo e na superfície interna das calhas, assim como na superfície externa das calhas na faixa onde serão posicionadas as correntes, para a redução do coeficiente de atrito (detalhado no Procedimento de reparo dos tubos experimentais, seção 4.1.2). Além do uso de lubrificante, também se recomenda a aplicação da resina epóxi no preenchimento da região do defeito e nas calhas, para melhorar a distribuição da força de compressão. Anteriormente ao processo de aperto e indo ao encontro do que sugere a PCRI (2008), é reduzida a pressão de operação do duto para aumentar a eficiência do reparo na redução das tensões circunferenciais tratativas. Assim, com a

pressão a níveis menores que a pressão de operação e após aplicar a força de aperto sobre as calhas, são soldadas seis talas de fixação unindo as calhas, a fim de manter as forças compressivas sobre o tubo. Depois disso, para reforçar o reparo, o dispositivo de aperto é desmontado e quatro talas de fixação são soldadas nos espaços livres deixado ao retirar as correntes.

Esse processo de aplicação de reparo tem por objetivo principal manter a região defeituosa do duto sob tensão compressiva circunferencial, sendo o reparo responsável por suportar o carregamento da pressão de operação do duto.

A Figura 17 representa o esquema de montagem e as peças que compõe o reparo de dupla calha tipo A, por interferência, com o uso de talas intermitentes para a união das calhas.

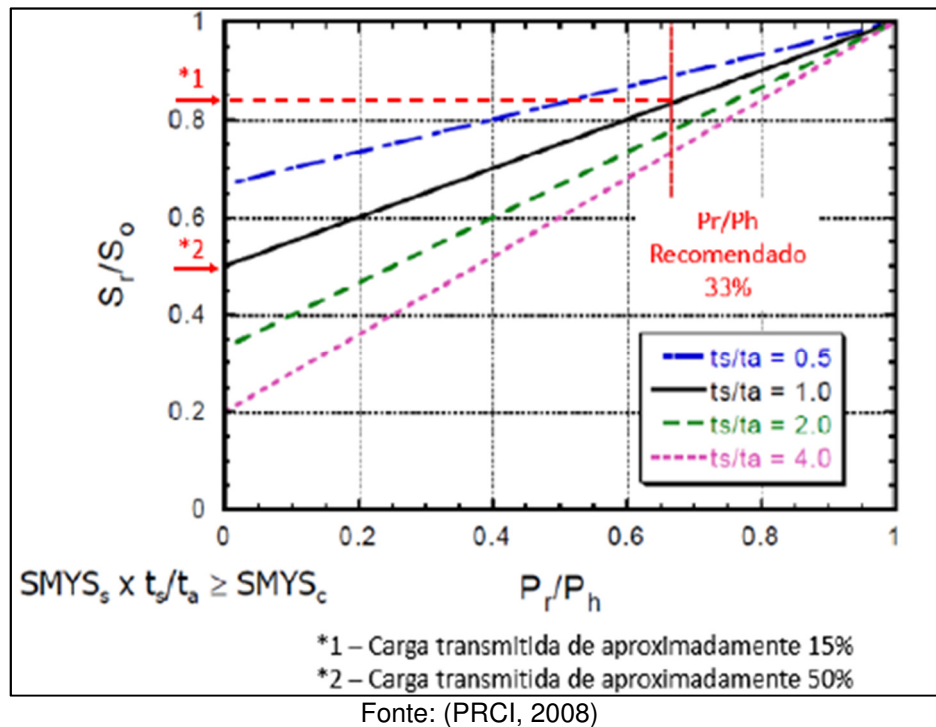
Figura 17 – Reparo de duto pelo método de dupla calha tipo A por interferência com o uso de talas intermitentes.



Fonte: Adaptado de (MOSQUEN, 2013)

O desempenho do reparo no controle da tensão pode ser melhorado por uma redução da pressão de operação no momento da instalação. De acordo com o manual PRCI (2008), a pressão de operação durante a aplicação do reparo tipo A tem grande influência na eficiência final do reparo, de forma que, à medida que a pressão de operação é reduzida há um aumento significativo da eficiência. Essa relação é mostrada na Figura 18, onde são apresentadas as relações teóricas entre as tensões no duto e no reparo, a pressão durante aplicação do reparo e a espessura da parede do duto e do reparo.

Figura 18 - Relações teóricas entre as tensões no duto e reparo, pressão do duto durante aplicação do reparo e espessura de parede do duto e do reparo.



Na Figura 18, P_r/P_h é a relação entre a pressão do duto no momento da aplicação do reparo e a pressão de projeto; S_r/S_o é a relação entre a tensão circunferencial no duto após a aplicação do reparo e a tensão circunferencial no duto sem a aplicação do reparo; t_s/t_a é a relação entre a espessura da parede da calha e a espessura da parede do duto. E que:

- Espessura real do duto (t_a);
- Espessura da parede das calhas utilizada para o reparo (t_s);
- Tensão circunferencial no duto (S_o);
- Tensão circunferencial no duto, após a instalação da dupla calha (S_r);
- Pressão no momento de aplicação do reparo (P_r);
- Pressão de projeto do duto, sem a presença do defeito (P_h);
- Mínima tensão de escoamento do duto ($SMYS_c$);
- Mínima tensão de escoamento do reparo ($SMYS_s$).

Ainda segundo o PRCI (2008), normalmente, os carregamentos transmitidos do duto para o reparo são ainda menores que os mostrados na Figura 18, pois essas condições são para um ajuste perfeito entre duto e calhas. O PRCI (2008), também

afirma que em condições reais de aplicação do reparo, como encaixe entre luva e duto e preenchimento inadequado dos espaços entre luva e duto com resina, podem reduzir a eficiência do reparo em até 15 %. A relação $SMYS_s \times t_s / t_a \geq SMYS_c$ indica que a resistência mecânica circunferencial do reparo deve ser no mínimo igual à resistência mecânica circunferencial do tubo íntegro, ou seja, sem a presença do defeito.

Nesse estudo, para a validação da eficiência do reparo na redução das tensões trativas circunferenciais na região do defeito, foram abordados tanto ensaios experimentais quanto análises por modelamento numérico.

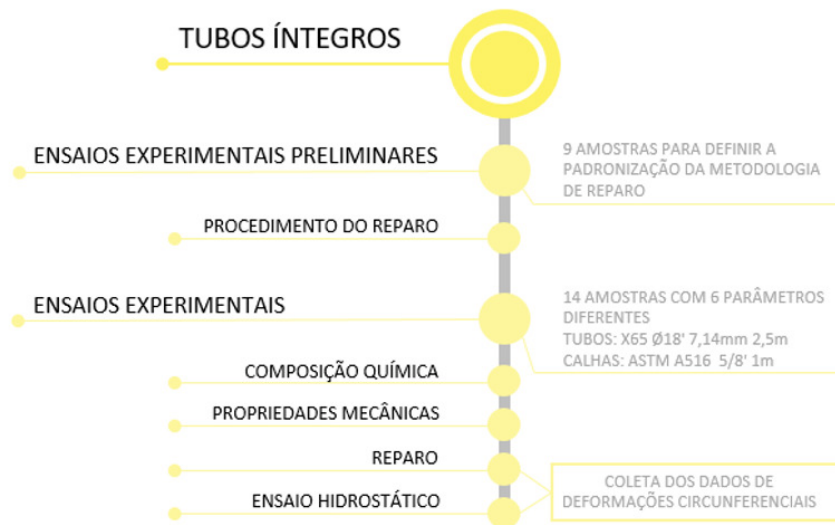
Vale observar que, previamente aos ensaios dos tubos íntegros, foram realizados 9 ensaios preliminares (em tubos sem defeitos) para ajustes das etapas de aplicação do reparo, servindo como base para o desenvolvimento das atividades experimentais do projeto atual. A definição da metodologia de reparo a ser utilizada, desenvolvida através dos ensaios preliminares, possibilitou a padronização dos ensaios experimentais e deu origem a uma instrução de aplicação desse reparo.

Assim, o presente trabalho se iniciou com a caracterização mecânica e análise química dos corpos de prova, e com o procedimento de reparo criado, possibilitando a padronização dos ensaios experimentais internos (e servindo como instrução de aplicação em campo), a parte experimental dividiu-se em duas etapas.

A primeira etapa experimental desse estudo, está relacionada aos ensaios dos tubos íntegros (sem defeitos) e a segunda relacionada aos ensaios dos tubos com defeitos (com perda de espessura). Para ambos, as deformações circunferenciais durante o processo do reparo foram monitoradas, bem como durante o teste hidrostático, realizado posteriormente ao reparo de cada amostra.

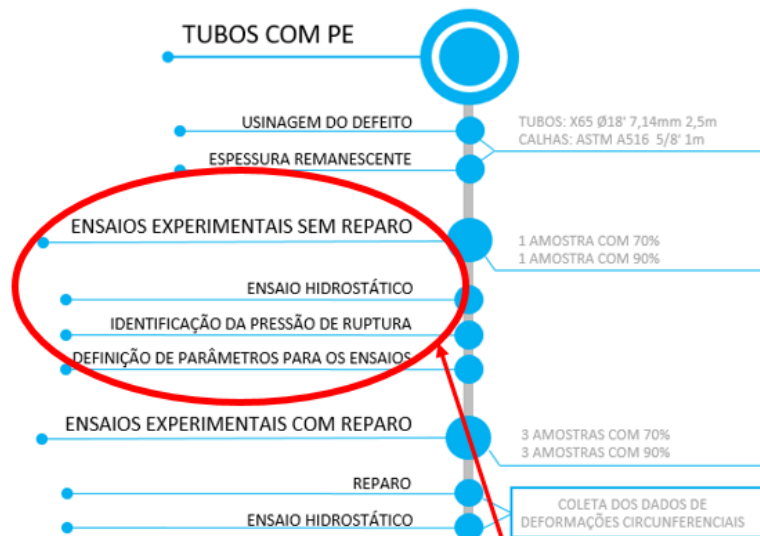
A etapa inicial do estudo dos tubos íntegros, consistiu em reparar tubos sem defeitos executados em diferentes parâmetros: variando a força de aperto das correntes (F) e a pressão da linha no momento do reparo (Prep). Com posse dos dados obtidos com essas variáveis, foi montado um gráfico adimensional que mostrasse a influência desses parâmetros na eficiência do reparo. A Figura 19 apresenta a ordem das etapas experimentais para os tubos sem danos (tubos íntegros).

Figura 19 - Etapas Experimentais em tubos íntegros



Já para os ensaios experimentais em tubos com perda de espessura (Figura 20), foi realizado um ensaio hidrostático de explosão nos tubos sem reparo, que serviram como base, de segurança, para definir o valor de força aplicada nas correntes e de pressão interna para os ensaios experimentais dos demais tubos com defeito.

Figura 20 - Etapas Experimentais em tubos com perda de espessura

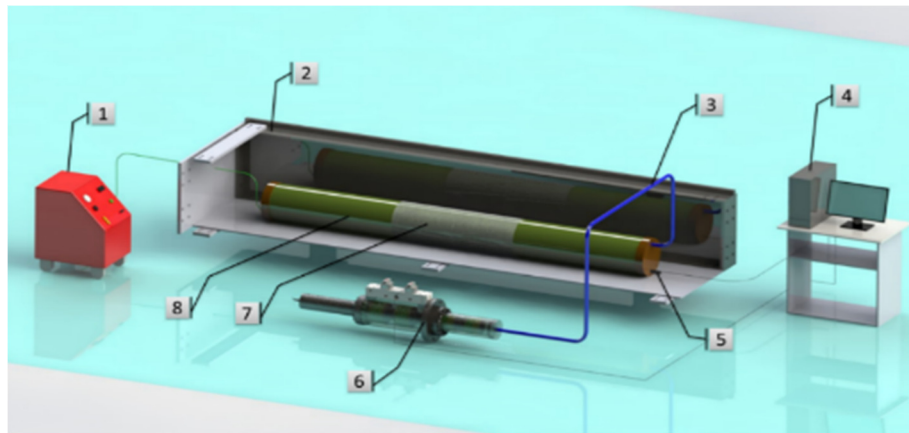


UTILIZADO PARA DETERMINAR QUE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS SERIAM REALIZADOS COM $\frac{1}{4}$ DA PRESSÃO DE RUPTURA (16 bar), E FORÇA DE APERTO DE 500 KN (CORRESPONDENTE À 600 BAR NOS CILINDROS).

Para os ensaios hidrostáticos foi utilizada uma unidade hidropneumática da marca Flutrol, com capacidade de aplicação de 400 bar de pressão, e acoplada diretamente ao tubo. Nesses testes a pressão interna foi elevada de forma contínua até a ruptura da amostra ou até a pressão pré-estabelecida.

A Figura 21 apresenta esquematicamente, através de um desenho, a área do bunker e os dispositivos utilizados para os testes.

Figura 21 – Representação do sistema de ensaio de fadiga e hidrostático. Itens 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 referentes a bomba hidropneumática, bunker, mangueiras e acessórios, aquisitor de dados, célula de pressão, atuador hidráulico, reparo e tubo, respectivamente



Após a definição dos parâmetros de reparo, os tubos com perda de espessura foram todos reparados conforme o método desenvolvido nesse estudo, e as deformações circunferenciais foram monitoradas durante o reparo e no posterior ensaio hidrostático de explosão que cada corpo de prova foi submetido.

Por fim, 25 simulações numéricas foram desenvolvidas, incluindo as mesmas condições ensaiadas experimentalmente. Os mesmos pontos monitorados experimentalmente, foram analisados também na simulação numérica e com posse de ambos, foi realizada uma comparação dos dados, validando assim o método desenvolvido numericamente e abrindo a possibilidade de extrapolação dos parâmetros de reparo para diferentes condições, não ensaiadas experimentalmente (como diferentes níveis de criticidade de defeito, dimensional do tubo, força de aplicação e pressão de reparo).

Essa etapa, através do modelo numérico validado, ainda permitiu que fosse desenvolvido uma metodologia para o cálculo da eficiência do reparo, que foi utilizada para o desenvolvimento de uma base de dados de 1845 simulações numéricas,

estendendo as análises anteriores a vários novos níveis de criticidade do defeito e condições de carregamentos.

Assim, com o objetivo de avaliar a melhor combinação de parâmetros para aplicação do reparo por dupla calha em tubos com defeitos do tipo perda de espessura, foi criada uma ferramenta que auxilia o operador de manutenção de dutovias com defeitos de corrosão a identificar qual a melhor combinação de parâmetros, para uma maior eficiência do reparo, em cada caso encontrado na via.

Assim, as etapas de simulação numérica seguiram conforme Figura 22 e Figura 23.

Figura 22 - Etapas de Simulação Numérica em tubos íntegros

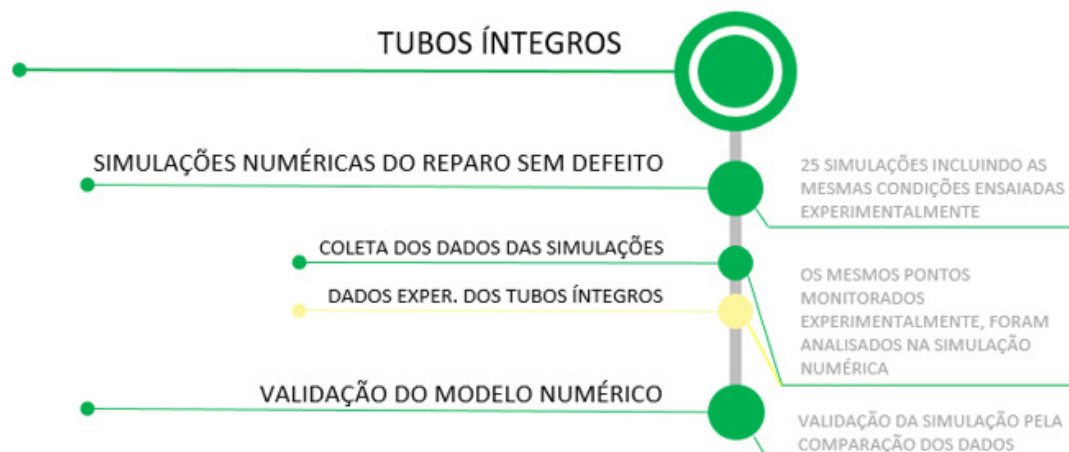
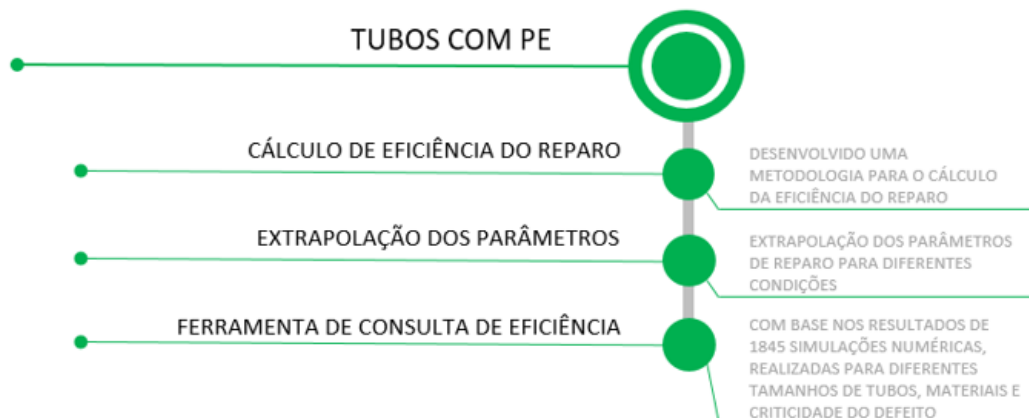


Figura 23 - Etapas de Simulação Numérica em tubos com perda de espessura



Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um atuador hidráulico, servo controlado, em série com um cilindro preenchido com água, que foi

conectado ao duto por meio de mangueiras hidráulicas de alta resistência à pressão. Esse sistema possibilitou a variação da pressão interna. Simultaneamente, foram conectadas ao duto as células de pressão do sistema de controle e do sistema de aquisição de dados. O equipamento utilizado para monitoramento e controle do ensaio foi um controlador da marca MTS, modelo FlexTest, para seis canais de controle, acoplado a um computador. Essa versão possibilita o monitoramento *on-line*, ou seja, os parâmetros como tempo de resposta e autoajuste do controle são configurados durante o ensaio, permitindo maior confiabilidade.

4.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para o desenvolvimento dos ensaios experimentais foram utilizados corpos de prova tubulares de aço API 5L X65, com diâmetro nominal de 18 polegadas, espessura de 7,14 mm e comprimento de 2.500 mm. Essas amostras foram recebidas como doação por parte da Petrobras. Já para fabricação das calhas, foram utilizadas chapas de aço ASTM A516 de 5/8 polegadas (pouco mais de 2 vezes a espessura nominal do tubo) e de 1 metro de comprimento que após compradas, foram encaminhadas para um fornecedor externo para serem calandradas de acordo com a geometria do tubo.

4.1.1 Caracterização Mecânica e Metalúrgica

Após o recebimento dos tubos, foram extraídos alguns corpos de prova para os ensaios de caracterização mecânica e metalúrgica. Esta etapa foi de grande importância para confirmar as informações do material recebido, bem como prover as informações que configuram, também, os modelos numéricos.

O primeiro ensaio realizado foi o de análise química, efetuado por um equipamento de espectrometria de emissão óptica, da marca Spectro, Modelo Spectrolab e seguindo o procedimento interno do LAMEF - GAF PE 008. O corpo de prova utilizado para o ensaio é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de análise química



Para determinação das propriedades mecânicas dos tubos de diâmetro de 18 polegadas utilizados nesse estudo, foi realizado o ensaio de tração em quatro corpos de prova, usinados de acordo com a norma ASTM E8/E8M. O ensaio foi realizado em um equipamento de ensaio universal da marca Instron, modelo 5585H pertencente ao LAMEF, conforme a Figura 25.

A Figura 26 mostra a composição química do aço API 5L X65 utilizado nessa análise (% em massa). A composição química e o carbono equivalente ($CEP_{cm} = 0,195$) do aço estão de acordo com os limites estipulados pela norma API 5L - *Specification for Line Pipe*.

Figura 25 - Equipamento usado para os ensaios de tração (a) e corpos de prova usinados (b).

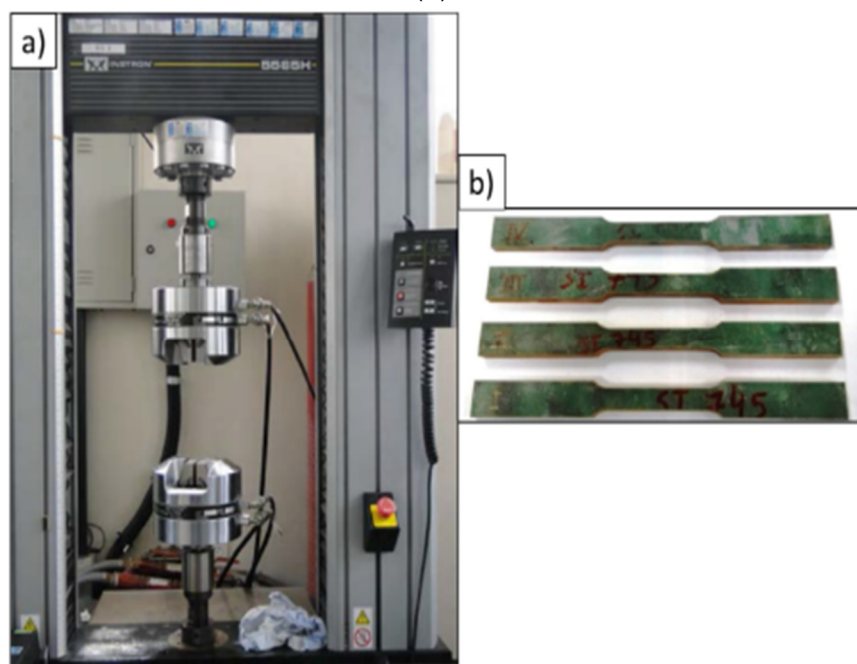


Figura 26 - Composição química do aço API 5L X65 utilizado no projeto (% em massa).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0,110	0,340	1,440	0,013	0,005	0,020	0,040
Ni	Cu	Mo	Co	Ti	V	Nb
0,009	0,010	<0,005	<0,010	0,030	0,030	0,050

A Figura 27 mostra os valores médios das propriedades mecânicas do tubo de aço API 5L X65. Os valores de tensão de escoamento, resistência à tração e alongamento estão de acordo com os limites estabelecidos pela norma API 5L - *Specification for Line Pipe*.

Figura 27 - Propriedades mecânicas do tubo de aço API 5L X65 de 18 polegadas de diâmetro.

Tensão de Escoamento	Resistencia à Tração	Alongamento
(Mpa)	(Mpa)	(%)
522	600	27,5

4.1.2 Procedimento de reparo dos tubos experimentais

As etapas do procedimento de reparo, utilizado, nesse estudo, para a realização do método de reparo por dupla calha tipo A por interferência, está dividido em 5 etapas: Identificação e sinalização da amostra, posicionamento das calhas, instrumentação da amostra, posicionamento do dispositivo de aperto e por fim, a realização do reparo.

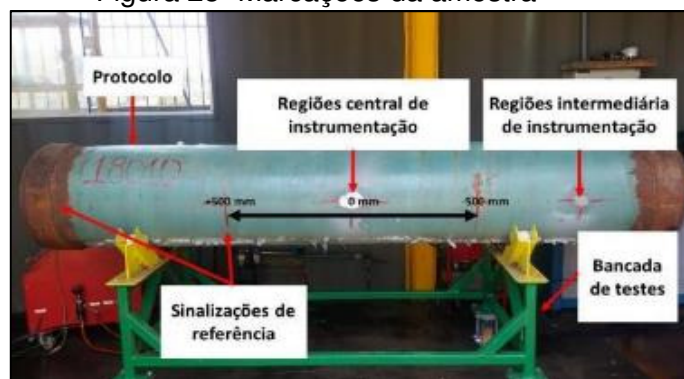
Esse procedimento de reparo tem como objetivo padronizar as etapas de aplicação do reparo a fim de garantir a aplicação de tensões circunferenciais compressivas na região do defeito em dutos.

As etapas a seguir foram realizadas para o desenvolvimento completo dessa análise, mas para uma aplicação em campo nem todas as etapas precisam ser incluídas, como exemplo, a instrumentação dos corpos de prova. Outra questão importante para uma aplicação em campo desse procedimento é que, indo ao encontro do que sugere a PCRI (2006), a pressão de operação do duto deve ser reduzida anteriormente a aplicação do reparo, para aumentar a eficiência desse método na redução das tensões circunferenciais.

4.1.2.1 Identificação e sinalização da amostra

- a) Foi identificada a solda longitudinal do tubo. Essa inspeção foi feita visualmente e nos casos que não foi possível a identificação visual, lixou-se a amostra no sentido circunferencial com uma ferramenta rotativa em ordem de granulação da lixa (80, 120, 220 e 360) e após, essas amostras foram atacadas quimicamente com Nital 5% até que a solda longitudinal fosse encontrada;
- b) Usando uma fita métrica, identificou-se o centro do tubo com marcador, garantindo que a marcação ficasse visível, conforme Figura 28. A marcação foi realizada afastada da solda longitudinal do tubo;
- c) A partir da região central do tubo, mediu-se e marcou os pontos referente a 500 mm para a esquerda e 500 mm para a direita, também de acordo com a Figura 28. Esses pontos serviram de referência para identificar o final do comprimento das calhas;
- d) Sinalizou-se também uma região intermediária entre a marcação do final do comprimento da calha e o final da amostra, para a colagem do extensômetro externo, que servirá como o ponto de análise da região íntegra do tubo.

Figura 28- Marcações da amostra



4.1.2.2 Posicionamento das calhas

- a) O defeito no duto foi preenchido com resina epóxi HardGel HSR 304-2, e após a cura, quando necessário, foi lixado os excessos de resina com o objetivo de recuperar a geometria original do tubo. Caso o tubo apresentasse

algum outro defeito volumétrico na região do reparo, esse volume também foi preenchido com resina antes de montar a calha, para melhorar a distribuição da força de compressão;

b) A resina foi misturada com o endurecedor, na proporção indicada pelo fabricante e a mistura foi realizada de forma lenta e contínua, para evitar a formação de bolhas, em um tempo máximo de 5 minutos e mínimo de 3 minutos;

c) Aguardou-se o tempo da cura da resina indicado pelo fabricante e lubrificou-se a superfície externa do tubo com Molykote G-n Plus apenas na região a ser reparada centralizando a região com defeito, sinalizada na etapa anterior (conforme Figura 29);

Figura 29 - Aplicação de lubrificante (Molykote) nas superfícies do tubo e calhas



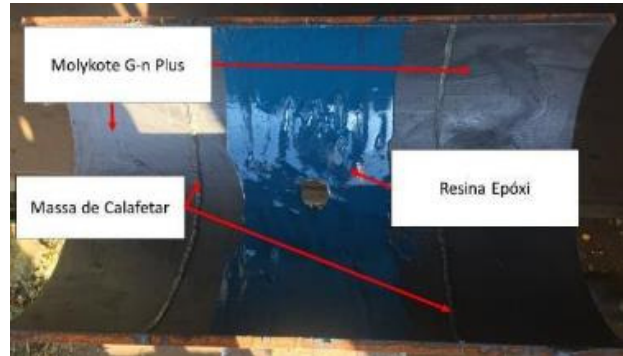
d) Foi selecionado o par de calhas adequados para o corpo de prova, de forma que a calha devesse ter o diâmetro interno entre 1 cm e 2 cm maior que o diâmetro externo da tubulação;

e) Lubrificou-se a superfície interna total das duas calhas com Molykote G-n Plus, conforme a Figura 30);

f) Em uma das calhas, foi acrescentado uma linha com massa de calafetar, conforme a Figura 30, a partir do centro da calha, 495 mm para a direita e 495 mm para a esquerda de forma que atue como um batente. Na Figura 30 o posicionamento da massa de calafetar está com ± 250 mm a partir do centro da calha, porém essa medida foi revisada ao longo desse estudo e foi constatado que aumentar o comprimento da região de aplicação da resina melhora a eficiência do reparo. Além disso a Figura 30 mostra a calha com uma furação central que foi utilizado para a colagem de *Strain Gauge* durante

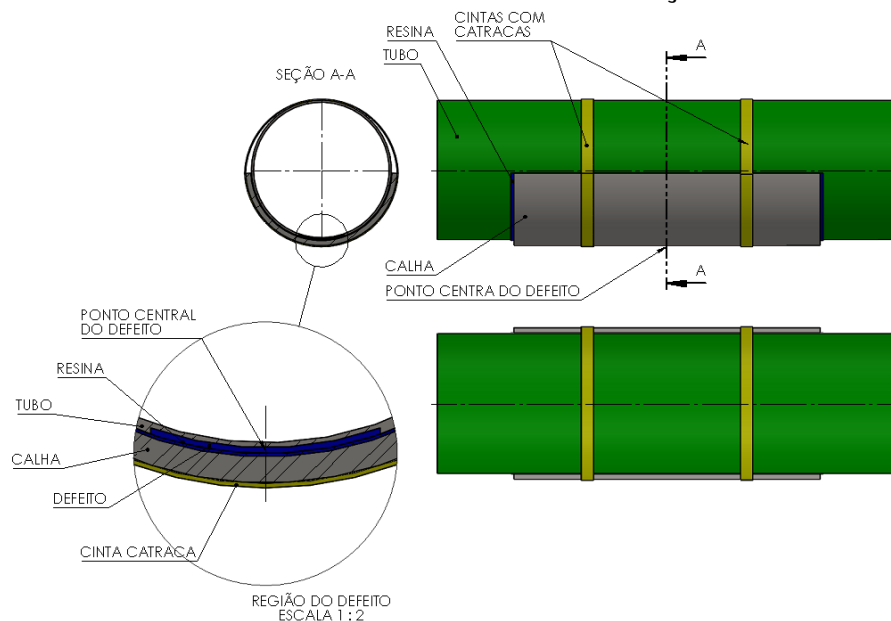
a análise de deformações, mas que não será aplicado em campo, portanto, utilizar sempre calhas sem furação, conforme Figura 31;

Figura 30 - Preparação da superfície interna das calhas



- g) Cobriu-se a primeira calha com resina epóxi HardGel HSR 304-2 da região do centro até a linha de massa de calafetar como indica a Figura 30, a fim de melhorar o encaixe da calha com o tubo;
- h) Antes da cura da resina aplicada na calha, aproximou-se aos poucos a calha ao tubo, centralizando-os de acordo com as marcações anteriores, e conforme a Figura 31 em relação ao defeito, devendo centralizar o defeito com o centro da calha;
- i) Fixou-se a calha ao tubo utilizando um par de cintas com catracas deixando a montagem bem firme, conforme Figura 31;

Figura 31 - Posicionamento da Calha no Tubo em relação ao centro do Defeito



- j) Foi removido o excesso de resina;
- k) Para assentar a segunda calha sobre o tubo, garantiu-se que a primeira calha não sofresse nenhum esforço e não saísse da posição em nenhum momento, nem ao retirar a cinta catraca que segurava a primeira calha;
- l) Após o tempo de cura total da resina (24 horas) aplicada na primeira calha, repetiu-se o procedimento na segunda calha;
- m) Antes da cura da resina aplicada na segunda calha, girou-se a amostra em 180° para posicionar a segunda calha. Soltou-se as cintas com as catracas e foi repetido a operação descrita anteriormente, dessa vez para o encaixe da segunda calha, conforme Figura 36;
- n) Após o término de acoplamento da segunda calha, apertou-se uma calha contra a outra utilizando as cintas com catraca garantindo que os espaçamentos entre os finais de cada calha não ultrapassassem 1" em relação a outra, conforme a Figura 32.
- o) Verificou-se o espaçamento final entre as calhas com paquímetro (indicado na Figura 33). O uso de um gabarito também serviu para evitar o contato direto entre as calhas;
- p) Aguardou o tempo de cura total da resina (recomendado pelo fabricante) da segunda calha sem movimentar o procedimento;

Figura 32 - Posicionamento final das Calhas

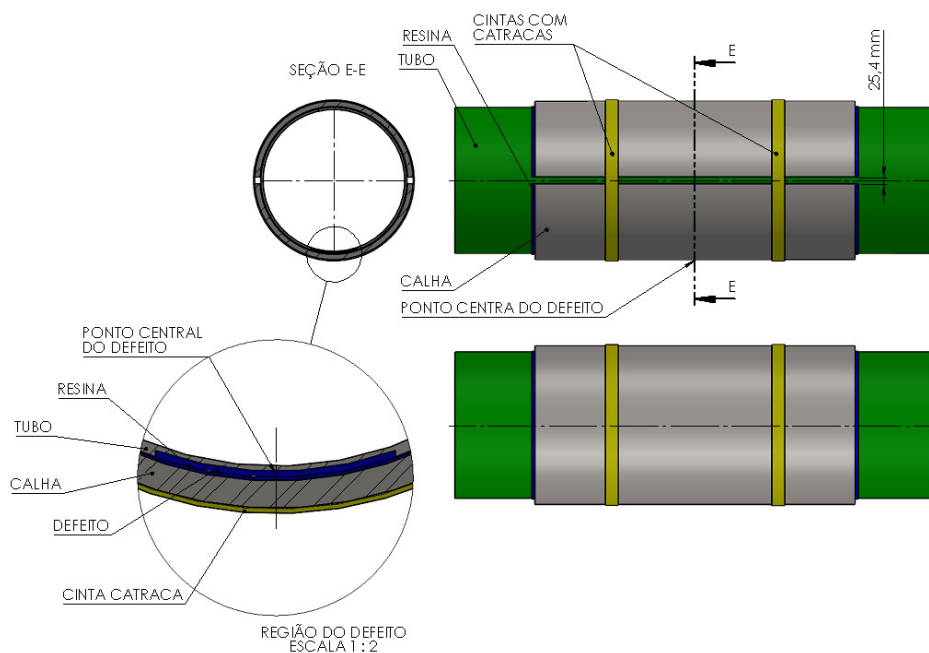
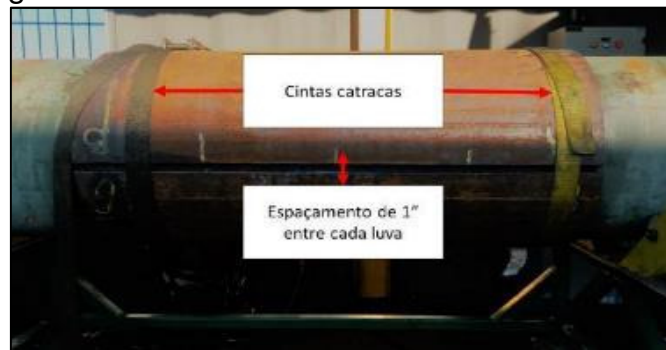


Figura 33 - Posicionamento das luvas sobre o tubo

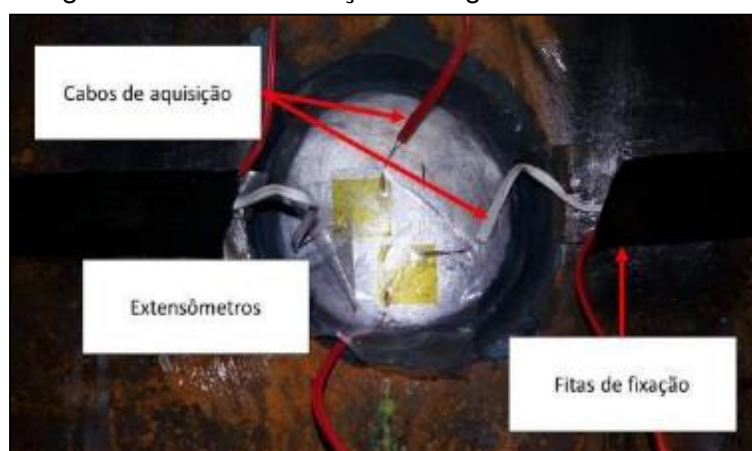


4.1.2.3 Instrumentação da amostra

Para fins de análise das deformações de cada amostra, com a aplicação desse tipo de reparo, foi realizada a instrumentação com extensômetros. Assim, para a obtenção de dados a serem analisados no decorrer desse trabalho, as seguintes regiões das amostras foram instrumentadas:

- O(s) furo(s) da(s) calha(s): Com 2 extensômetros biaxiais, conforme Figura 34. Importante destacar que não é recomendado a utilização de calhas com furo, para instrumentação, na região do defeito pois, durante as análises desse estudo, foi também constatado que o uso de calhas com furos na região do dano afeta e compromete a eficiência do reparo;

Figura 34 - Instrumentação da região central da calha



- Região externa ao reparo: 1 extensômetro colado a 375 mm do final do tubo. Esses devem estar centralizados em relação a calha, com uma das

direções no sentido axial e outra no sentido circunferencial em relação à amostra, como mostra a Figura 35.

Figura 35 - Extensômetro da região externa ao reparo



Foi ainda utilizado fitas dupla-face, isolante e crepe para reforçar a fixação dos cabos de aquisição de dados, impedindo sua ruptura caso sofram algum esforço.

4.1.2.4 *Posicionamento do dispositivo de aperto*

a) Com uma marcação a 220 mm, a partir do centro das calhas, nas duas direções axiais, direita e esquerda (ver Figura 36), foi lubrificado com Molykote G-n Plus uma faixa de 110 mm das extremidades das marcações em direção ao centro, cobrindo toda área circunferencial da amostra, conforme a Figura 36;

Figura 36 - Área lubrificada pelo Molykote



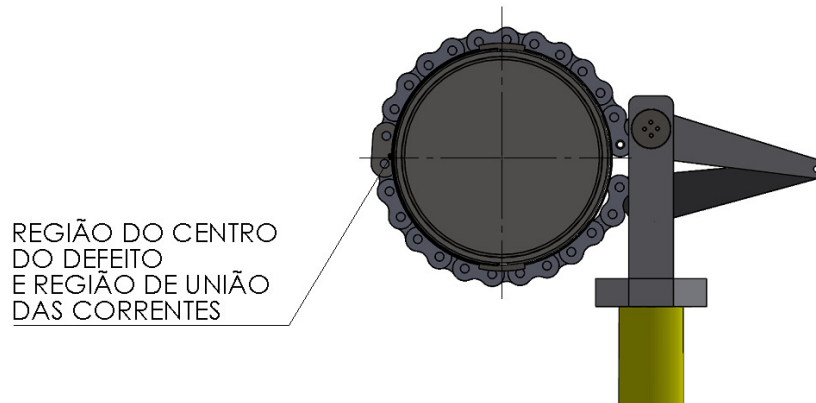
- b) Com auxílio de uma empilhadeira, o dispositivo de aperto foi elevado e aproximado do tubo, Figura 37;

Figura 37 - Posicionamento do dispositivo de aperto



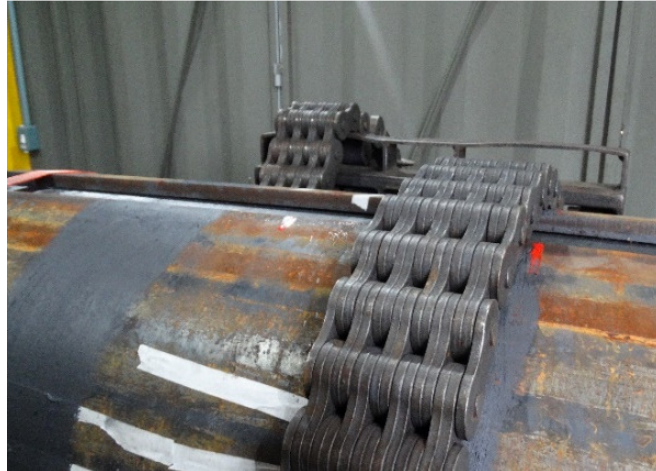
- c) Envolveu-se então a amostra com as correntes bipartidas do dispositivo de aperto em cima das faixas lubrificadas (Figura 39), e observando que o lado da união das correntes deve acontecer sobre centro da calha que envolve a região do defeito. Na região do defeito deve passar apenas a corrente, pois nesse lado a distribuição da força de compressão é mais homogênea, como aponta a Figura 38;

Figura 38 - Lado da união das correntes



- d) Centralizou-se as correntes em relação às luvas (calhas);
- e) Baixou-se o dispositivo de aperto até que ele ficasse apoiado em seu suporte;

Figura 39 - Corrente envolvendo a amostra



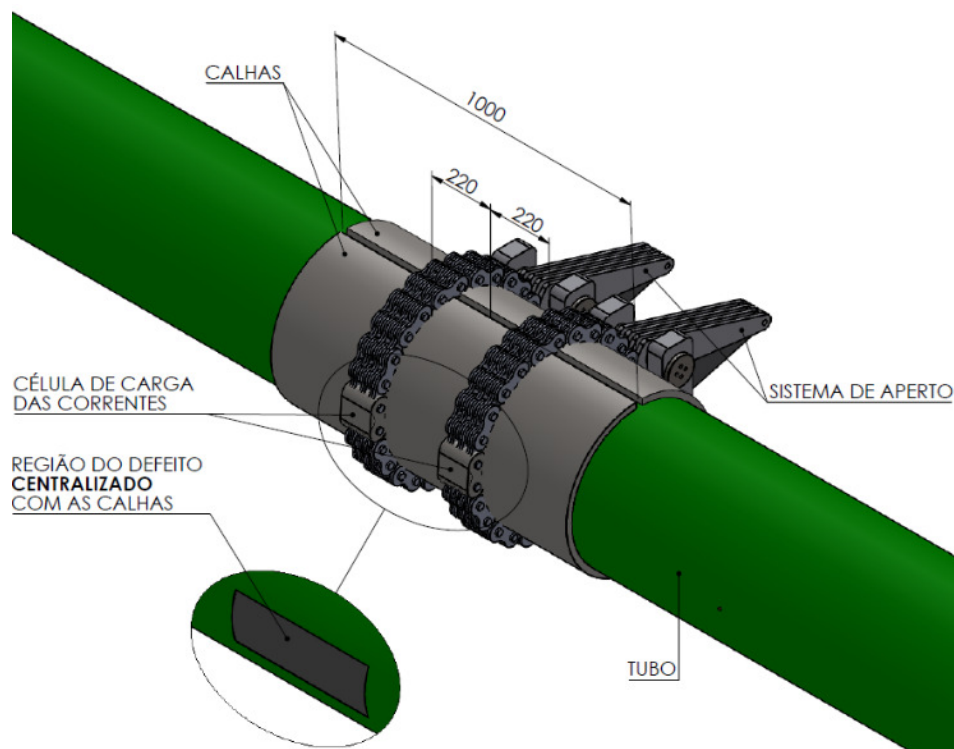
- f) Verificou-se com fita métrica se as correntes do dispositivo de aperto estavam bem centralizadas em relação ao reparo. Caso não estivessem, elevou-se novamente o dispositivo para ajustar posição e centralização das mesmas, atribuindo conformidade ao ensaio;
- g) Após posicionar as correntes sobre as calhas, foi ajustado o comprimento das correntes e as pontas soltas das correntes foram unidas colocando as células de carga, como mostra a Figura 40 (mantendo sempre apoiado o dispositivo de aperto para evitar acidentes);

Figura 40 - Fixação das células de carga



- h) Por fim, realizou-se a conexão das mangueiras da bomba hidráulica nos cilindros de aperto para aplicar a força nas correntes. Essa força foi mantida até a união das calhas através da soldagem das seis talas iniciais de fixação.
- i) As cintas catracas que estavam segurando as calhas, que agora estão sustentadas pela força de aperto das correntes, como mostra a Figura 41, só foram removidas depois da realização do aperto das correntes e não havendo nenhum risco de que as calhas pudessem cair.

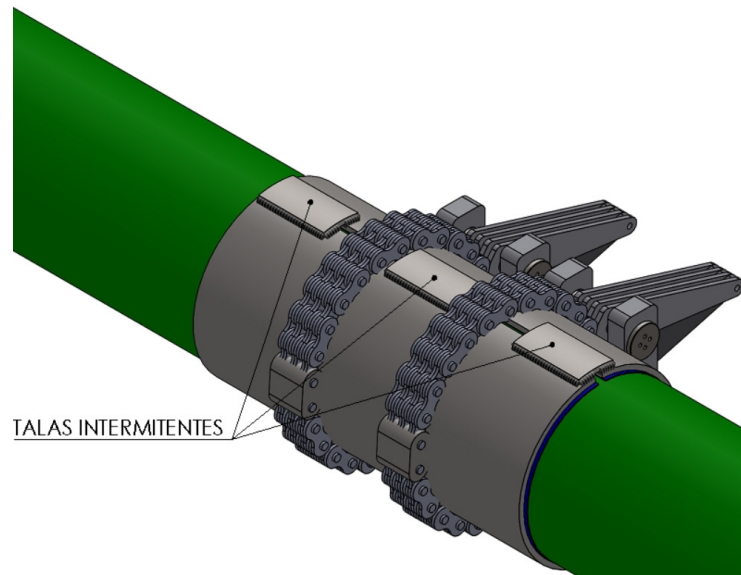
Figura 41 - Posicionamento do dispositivo de aperto



Após aplicar a força de aperto com as correntes sobre as calhas, as talas de fixação para união das calhas foram soldadas durante a realização do reparo, a fim de manter as forças compressivas sobre o tubo, conforme instrução a seguir:

- a) Após a aplicação da carga nas correntes, as talas intermitentes indicadas na Figura 42 (de ambos os lados, totalizando seis talas), foram soldadas para unir as calhas. A soldagem das talas foi ser realizada por um profissional especializado e qualificado;

Figura 42 - Talas Intermitentes

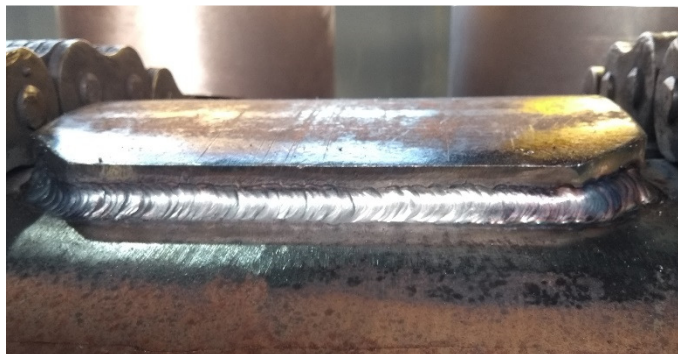


b) Para os passes de raiz, foi utilizado o processo TIG (*Tungstein Inert Gas*), com argônio como gás de proteção. Como consumível, utilizou-se arame maciço ER70S-6, com diâmetro de 2,5 mm. Os parâmetros e a energia de soldagem média de referência podem ser visualizados na Tabela 1. A Figura 44 mostra o passe de raiz em uma das talas de um tubo reparado;

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem para os passes de raiz

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm.s⁻¹)	Energia de Soldagem (kJ.mm⁻¹)
232,7	14,3	2,2	1,5

Figura 43 - Passe de raiz realizado com o processo TIG



c) Os passes de enchimento foram realizados com o processo MAG (GMAW). Como metal de adição, utilizar o arame ER70S-6 (1,2 mm de diâmetro). Foi utilizado uma mistura com 75% de argônio e 25% de CO₂ como gás de proteção. A Tabela 2 mostra os parâmetros de soldagem relativos ao arco elétrico (corrente e tensão). A velocidade de soldagem pode variar de 4,2 até 7,5 mm.s⁻¹; de acordo com a largura necessária para o cordão de solda. Para esta variação de velocidade de soldagem, a energia de soldagem pode variar de 0,9 a 1,7 kJ.mm⁻¹. A Figura 44 mostra o passe de raiz em uma das talas de um tubo reparado;

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem para os passes de enchimento

Corrente (A)	Tensão (V)
258	26,9

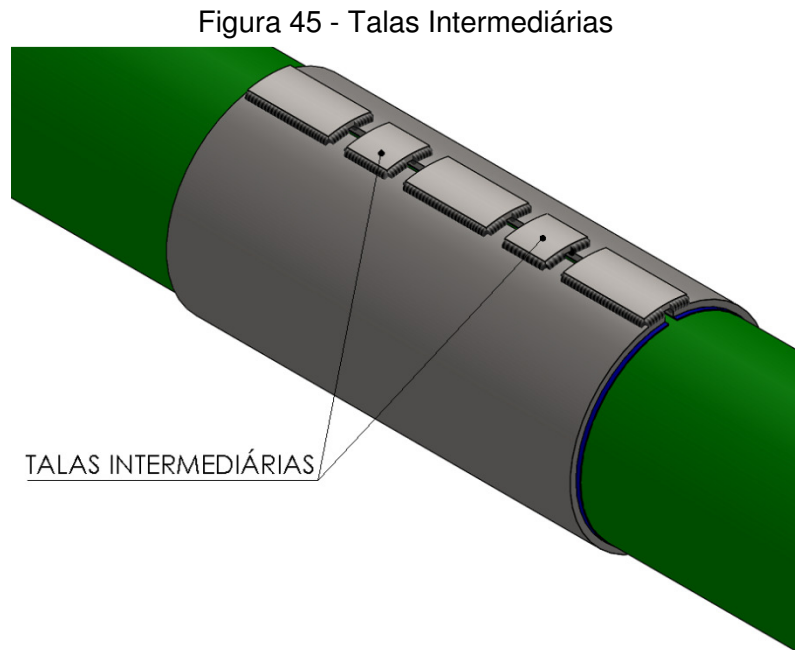
Figura 44 - Passe de enchimento realizado com o processo MAG



Salientando, ainda que, entre os passes de soldagem, foi realizado a limpeza do cordão com uma escova de aço rotativa. O número total de passes de soldagem pode variar entre 14 e 16 passes.

- d) O mesmo procedimento foi feito para a soldagem das seis talas intermitentes;
- e) Somente após a união das duas calhas através da soldagem das seis talas intermitentes, retirou-se o dispositivo de aperto e as correntes;

f) Com a remoção das correntes, foi soldadas as talas intermediárias de reforço conforme Figura 45, seguindo o mesmo procedimento as talas anteriores.



4.1.2.5 Realização do reparo

Cada ensaio experimental de cada amostra foi dividido em 4 etapas fundamentais. Em todas as etapas, os pontos de aquisição de dados foram monitorados por algum equipamento de aquisição (Lynx, MGC, QuantumX, etc.). Esse monitoramento segue o seguinte padrão: A pressão interna do tubo (CP_INT) está representada pela linha cinza, a pressão aplicada no dispositivo de aperto (CP_Corrente) possui cor lilás, as deformações na região de posicionamento do cilindro de aperto, também chamada de região oposta a região do defeito (SG_CIL) para as amostras com perda de espessura, estão representada pela cor verde, as deformações na região de posicionamento das células de carga das correntes, também chamada de região do defeito (SG_CC) para as amostras com perda de espessura, estão representada pela cor amarela e por fim, a região fora do reparo (fora das calhas) que representa os valores na região íntegra do tubo esta sinalizada pela cor azul (SG_EXT).

- Etapa 1 - Pressurização Interna do Tubo até a Pressão de Reparo: Para a realização da primeira etapa, para iniciar a pressurização interna do tubo a ser reparado; regulou-se a válvula de alívio de zero até a pressão de reparo (Prep = pressão limite de reparo estabelecida para cada ensaio) até as deformações atingirem níveis contínuos nessa pressão. Isso foi realizado manualmente via manômetros da bomba ou célula de pressão na amostra. A Pressão de reparo deve ser mantida constante até o final da etapa 2.
- Etapa 2 - Realização do Reparo: Com a estabilidade das deformações sofridas pela pressurização interna do tubo, o reparo foi iniciado, elevando a pressão lida pelos sensores da corrente (pressão correspondente para atingir o determinado valor de força aplicado pelas correntes sobre as calhas), até o alívio da pressão das correntes e conclusão da realização completa do procedimento de reparo.
- Etapa 3 - Teste Hidrostático: Após a estabilização do sistema depois realização do reparo, elevou-se a pressão interna da amostra através da unidade pneumática até atingir o valor de pressão de operação requisitada para cada ensaio (Pop). Essa etapa foi realizada em um bunker (por ser um local isolado), por motivos de segurança.
- Etapa 4 - Alívio da pressão Interna do Tubo: Dado o tempo para estabilização das deformações (entre 2 e 5 minutos), aliviou-se a pressão, retornando a zero.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado no diagrama da Figura 20, a parte experimental do projeto foi dividida em duas etapas, sendo a primeira etapa experimental relacionada aos ensaios dos tubos íntegros (sem defeitos) e a segunda relacionada aos ensaios dos tubos com defeitos (com perda de espessura). Ambos os resultados e interpretações serão abordadas nesse capítulo.

5.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS ÍNTEGROS

Cabe lembrar que anteriormente ao início dos testes com os tubos íntegros, foi necessário realizar uma série de testes preliminares, com o apoio de modelos numéricos, para definir os parâmetros e os procedimentos que padronizariam esse método de reparo. Esses testes foram importantes para garantir a aplicação de tensões circunferenciais compressivas nas regiões de reparo. Para isso, foram ensaiados um total de 9 tubos em diferentes condições de pressão interna, força de aperto, geometria das calhas, lubrificação das correntes, e com e sem aplicação de resina. Além disso, a simulação numérica avaliou a calibração do coeficiente de atrito das correntes e a geometria das calhas.

A partir dos resultados desses testes preliminares, foi possível verificar a necessidade de utilização de lubrificantes nas correntes para aumentar a eficiência do aperto, a aplicação de resina entre a calha e o tubo para melhorar a distribuição das tensões e a importância do controle dimensional das calhas nas tensões finais na região de reparo.

Depois de definida a metodologia de reparo a ser utilizada, foram realizados 14 reparos em tubos íntegros com 6 parâmetros diferentes, utilizando a resina com comprimento total de 500 mm (+/-250 mm a partir do centro do tubo).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados para os reparos dos tubos íntegros, com a variação dos patamares de força de aperto e pressão de reparo. Esses dados (6 pontos: A1, A5, B4, D3, E1 e E5) serviram como base para construção do - Gráfico de relação de tensões versus relação de pressões representado na Figura 46, bem como serviram para validar o modelo numérico.

Para cada um dos pontos A1, A5, E1 e E5 foram reparadas 3 amostras, já para os pontos B4 e D3 foi reparado 1 tubo em cada condição. Os pontos intermediários B4 e D3 foram definidos para validar os resultados intermediários dos

modelos numéricos dos tubos íntegros. Ao final, foi realizado o teste hidrostático em uma amostra sem reparo para servir de base de comparação dos resultados dos ensaios hidrostáticos.

Tabela 3 - Parâmetros de reparos experimentais dos tubos íntegros

Amostra	Ponto Tabela 1	Força de Aperto [kN]	Prep [bar]
T1800GR01*	D3	437,5	65
T1800GR02*	B4	312	72,5
T1800GR16	A5	250	80
T1800GR19*			
T1800GR20			
T1800GR17	E5	500	80
T1800GR18			
T1800GR21*			
T1800GR13*	A1	250	50
T1800GR14			
T1800GR15			
T1800GR10	E1	500	50
T1800GR11			
T1800GR12*			

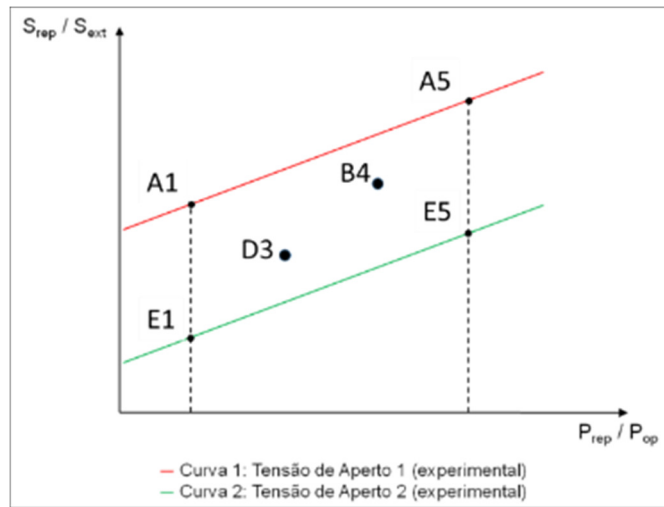
*Gráficos representativos aos demais de mesmo parâmetro.

**Não foi submetido até a ruptura.

Os resultados dos ensaios experimentais nos tubos íntegros, foram utilizados para a construção do um gráfico (ábaco) adimensional das relações entre Pressão de Reparo (Prep) pela Pressão de Operação (Pop) versus Tensão no Reparo (Srep) pela Tensão Externa (Sext), apresentado na Figura 46.

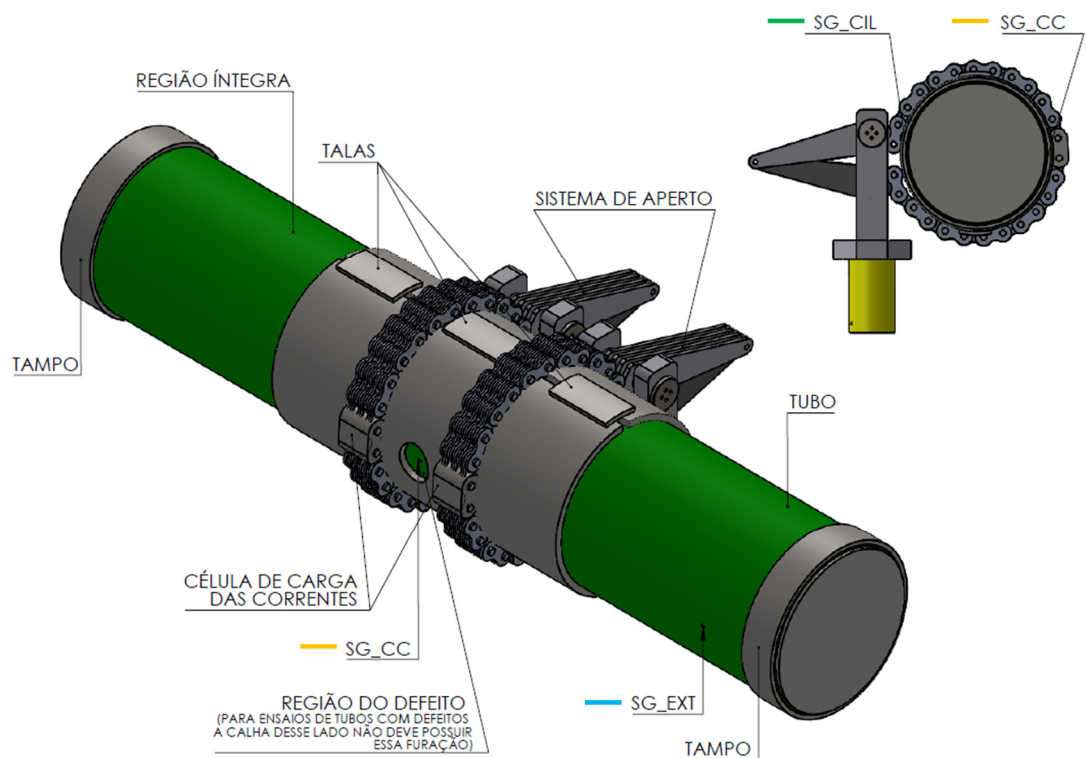
Na Figura 46, cada uma das curvas (linha vermelha e linha verde) representa um valor constante de força, utilizada para o fechamento das correntes. A utilização dessas curvas permite encontrar o percentual de redução das tensões circunferenciais na região do reparo (eixo das ordenadas) para uma determinada redução de pressão da linha, no momento da aplicação do reparo (eixo das abcissas), considerando uma determinada força de aperto no reparo.

Figura 46 - Gráfico de relação de tensões versus relação de pressões



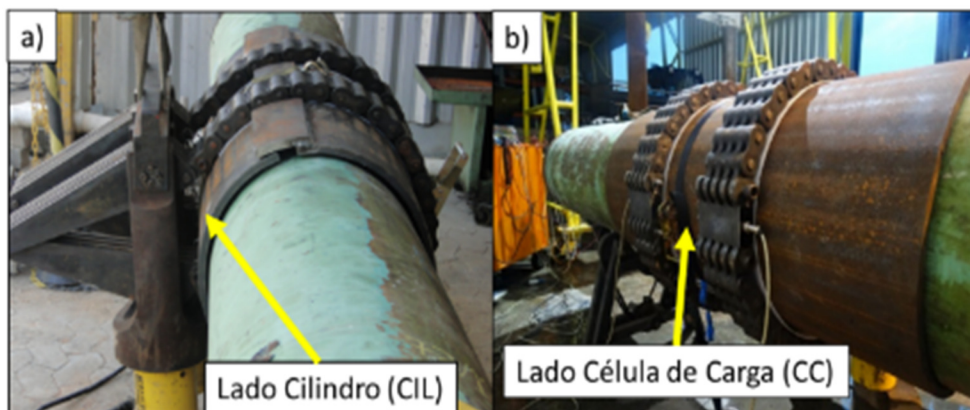
Para a análise do comportamento das deformações circunferenciais coletadas durante a aplicação do reparo, bem como das deformações circunferenciais coletadas durante os ensaios hidrostáticos de explosão dos tubos íntegros reparados, será apresentado nessa seção os resultados dos tubos T1800GR01 e T1800GR02 como representativos aos demais ensaios devido ao comportamento padrão dos resultados obtidos.

Figura 47 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos



Para as análises das deformações e seguindo o procedimento descrito na seção 4.1.2, durante a aplicação do reparo, as informações das deformações circunferenciais do tubo foram coletadas em 3 regiões diferentes. Dois pontos de aquisição foram realizados embaixo das calhas e ambos localizados no centro de cada uma dessas luvas, sendo 1 embaixo da calha do lado do cilindro de aperto (SG_CIL) e o outro do lado da célula de carga (SG_CC), conforme indicado na Figura 47, sendo um o oposto do outro (Figura 48). O terceiro ponto de aquisição das deformações foi realizado fora da região de reparo do tubo, afastada do local de reparo a uma distância de aproximadamente 350 mm do final da calha e identificado como ponto SG_EXT na Figura 47.

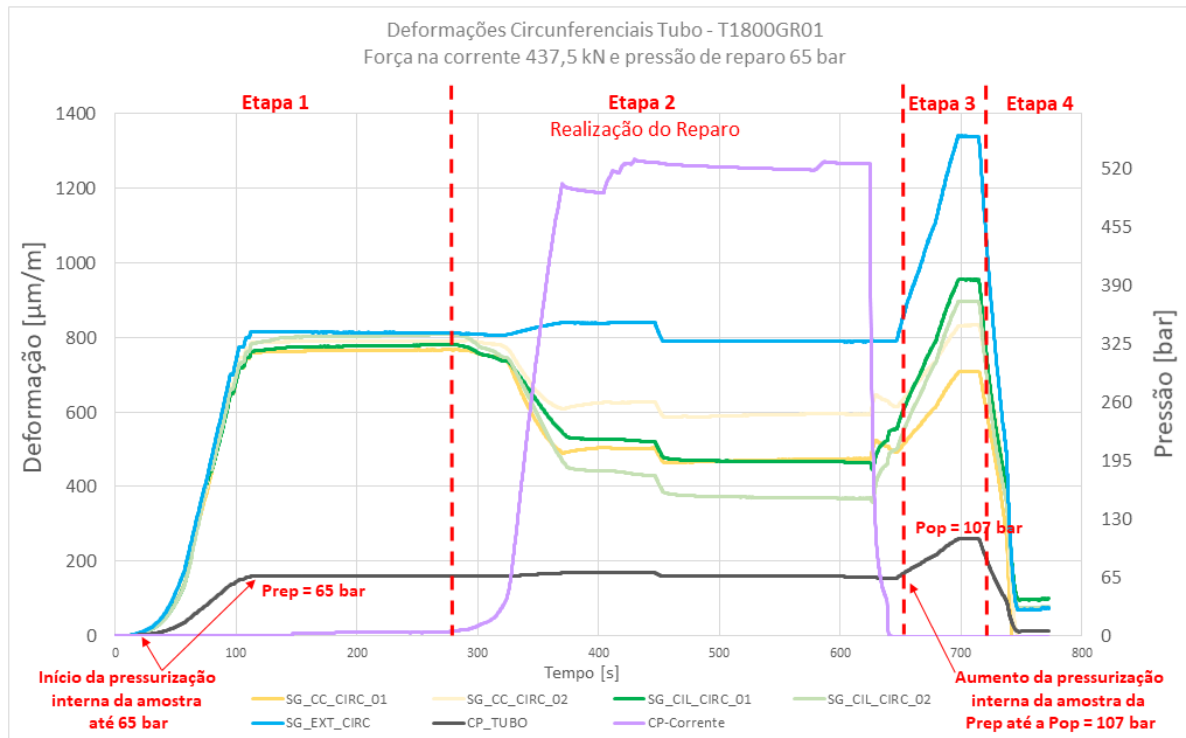
Figura 48 - Identificação das calhas lado cilindro (a) e lado célula de carga (b).



Para facilitar a leitura dos gráficos, foi definido uma nomenclatura padrão para ser utilizada, identificando os extensômetros (SG) por SG_XX_YY_ZZ, onde no espaço do XX é identificada a localização do extensômetro ao longo do tubo, que pode ser no lado das células de cargas (CC), no lado dos cilindros de aperto das correntes (CIL) ou na região fora do reparo (EXT). O espaço YY identifica qual deformação está sendo apresentada, circunferencial (CIRC) ou axial (AXIAL). E por fim o espaço ZZ identifica o número do extensômetro 01 ou 02, uma vez que podem ser colados mais de um extensômetro por região. Paralelo a isso, também foram coletadas as informações das pressões internas do tubo (CP_Tubo) e dos cilindros de aperto das correntes (CP_Corrente) por meio de células de pressões (CP) acopladas ao ensaio. Nos gráficos são apresentadas as condições de reparo de cada tubo, mas no lugar da força de aperto, é indicada a pressão interna do cilindro necessária para atingir a força desejada.

A Figura 49 apresenta o gráfico das deformações circunferenciais registradas durante todo o reparo do tubo da amostra T1800GR01, com 437,5 kN de força de aperto das correntes e pressão interna para o reparo de 65 bar, correspondente aos parâmetros do ponto D3 da Tabela 3.

Figura 49 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01



O gráfico foi separado em 4 etapas, conforme os procedimentos de realização do reparo descritos na seção 4.1.2.5:

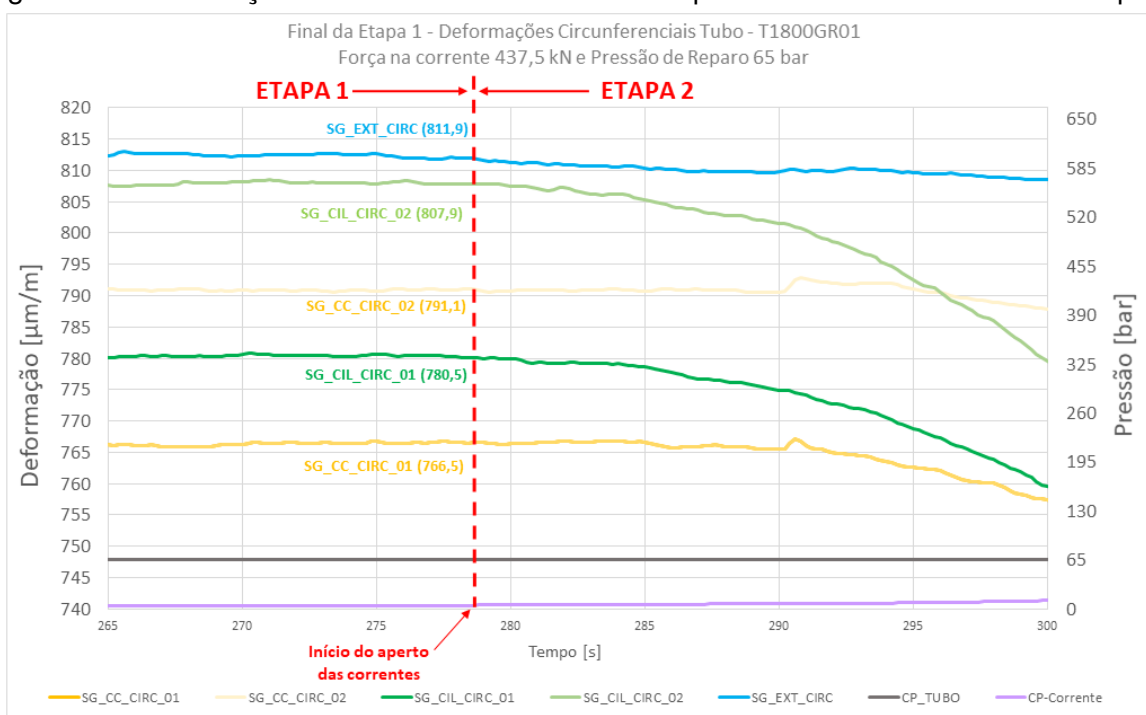
- Etapa 1: Nesse momento o tubo está com as calhas resinadas e apoiadas ao redor do defeito, porém estão soltas e sem pressões compressivas. Assim, a primeira etapa se caracteriza pelo início da pressurização interna do tubo, elevando a pressão interna de zero até o valor da Pressão de Reparo (Prep) solicitada.
- Etapa 2: Após a estabilização das tensões causadas pela pressurização interna do tubo é iniciado a etapa 2, marcada pelo início da pressão aplicada pelas correntes e realização de todo o procedimento de reparo nessa amostra, com o valor da Prep constante em relação ao final da etapa 1.

- Etapa 3: Com o tubo reparado e após os valores de deformações estabilizarem, a pressão interna do tubo é elevada do valor da Prep até o valor da Pressão de operação.
- Etapa 4: Por fim, é retirado toda a pressão do sistema e iniciado assim o alívio da pressão interna do tubo até zero bar.

Para um bom entendimento dos gráficos das demais amostras, que tiveram um padrão uniforme de comportamento durante a aplicação do reparo nos ensaios experimentais, uma análise mais detalhada será apresentada apenas para esse primeiro exemplo (T1800GR01).

Dessa maneira, analisando o gráfico da Figura 49 que contempla todas as etapas do procedimento, nota-se que durante a etapa 1 a pressão interna da amostra vai de zero até a pressão de reparo definida, nesse caso 65 bar. No início desse processo, os extensômetros partem de uma deformação igual a zero e conforme a pressão interna do tubo é elevada, os níveis de deformação registrados pelos SG aumentam até estabilizarem, quando a pressão interna do tubo chega na Prep e antes de iniciar a força de aperto das correntes, ponto que marca o final da primeira etapa e início da segunda, como apresenta mais detalhadamente a Figura 50, trazendo os valores aproximados de deformação para esse momento no procedimento.

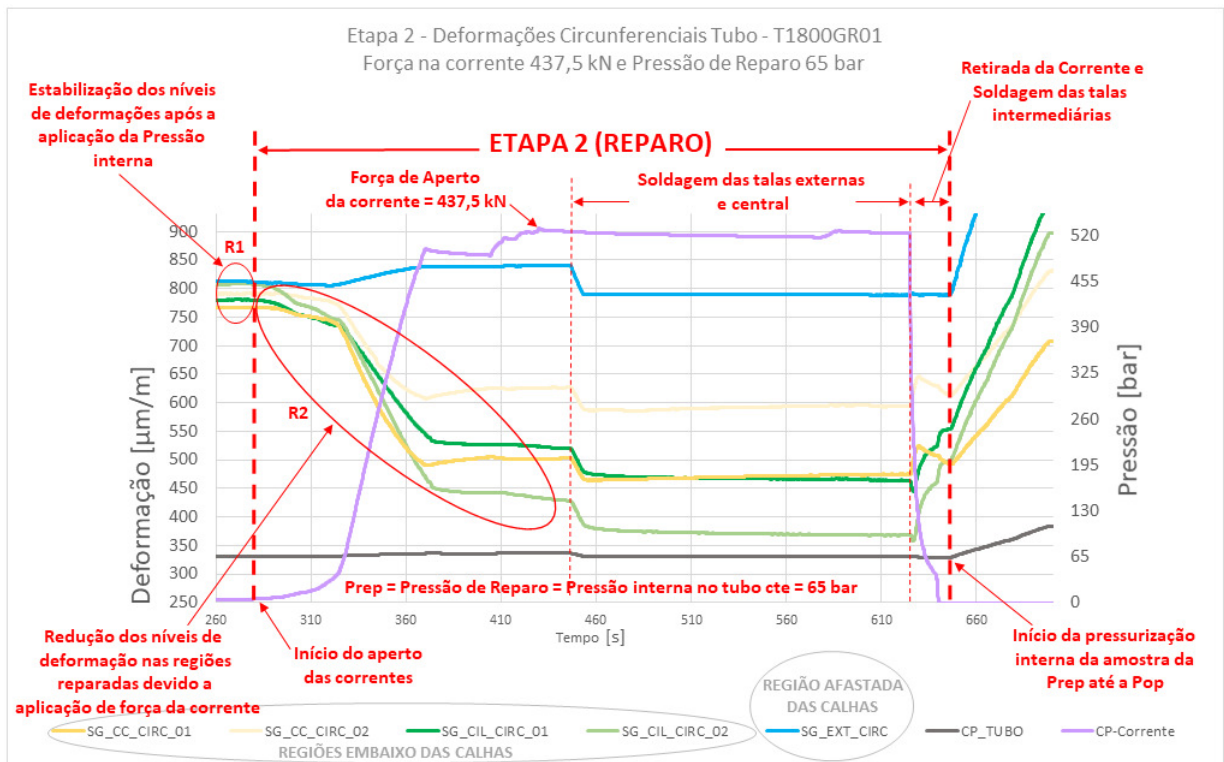
Figura 50 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Final da etapa 1



Na etapa 02, com o início do aperto das correntes, é possível visualizar que os SG colados abaixo das calhas (SG_CC e SG_CIL, representados pelas linhas em amarelo e em verde, padrão que contempla todo esse estudo, respectivamente) partem de um patamar de deformação muito próximos (região de estabilização das deformações ocorridas na primeira etapa (R1 da Figura 51) aos encontrados no SG_EXT (que indica uma deformação de 811,90 $\mu\text{m}/\text{m}$, conforme Figura 50) mas no decorrer do aumento da pressão realizada pela corrente, os índices de deformações medidos nas regiões do reparo começam a registrar valores mais baixos (R2 da Figura 51) que os valores apontados na região afastada das calhas, SG_EXT representado pela linha azul, que por sua vez não apresentou alterações tão significativas de deformação, nesse etapa, quanto os demais.

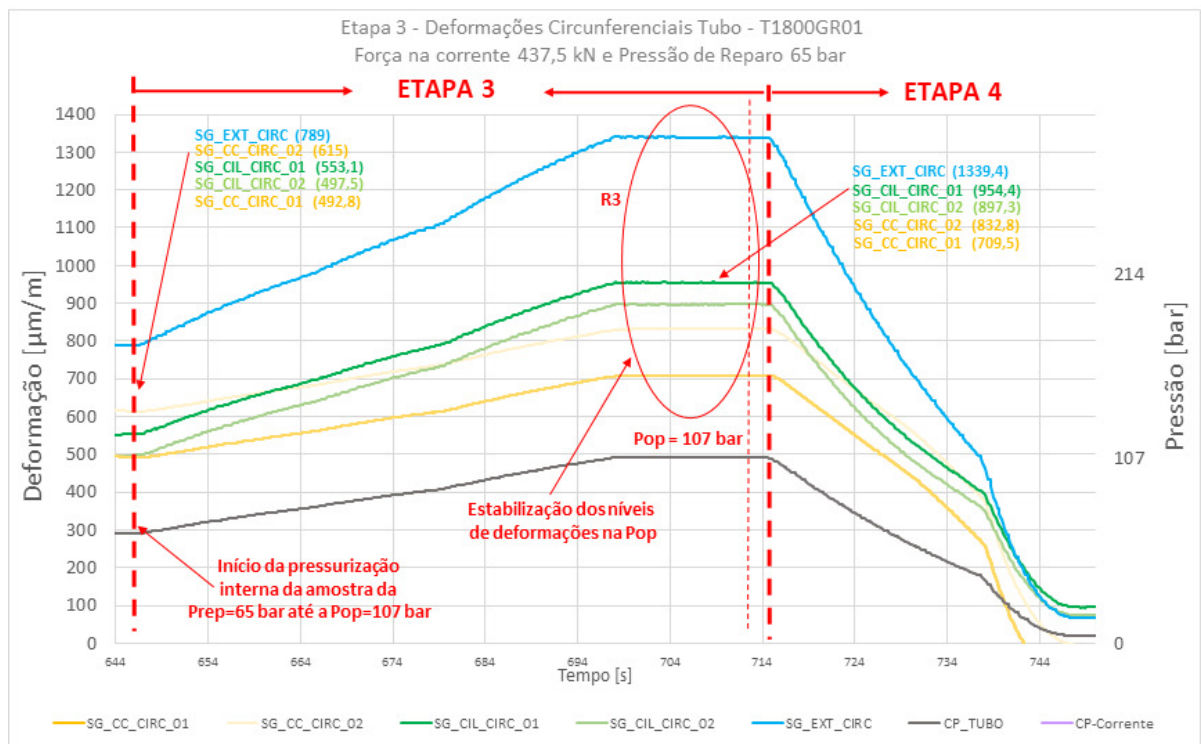
Até o final da segunda etapa, os extensômetros SG_CIL_CIRC_01 e 02 registraram a redução de 227,4 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 310,3 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente. Já os extensômetros SG_CC_CIRC_01 e 02, colados no lado das células de carga, registraram uma queda de 273,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 176,1 $\mu\text{m}/\text{m}$ nas deformações circunferenciais, respectivamente.

Figura 51 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Etapa 2



Depois de reparado, iniciou a etapa 3 através do aumento da pressão interna da amostra que parte da Prep até a Pop (Pressão de Operação), que para esse ensaio foi de 107 bar. No momento em que os valores de deformações se tornam constantes (na Pop) como indica a R3 da Figura 52, é possível observar que as tensões na região de reparo atingem valores de deformações tratativas bem abaixo dos valores fora da região do reparo (uma redução de pelo menos 174 $\mu\text{m}/\text{m}$, apontada na Figura 52).

Figura 52 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR01 - Etapa 3



Por fim, na etapa 4 realizou-se o alívio da pressão interna. Após a finalização das 4 etapas da aplicação do reparo, a amostra T1800GR01 foi submetida a um ensaio hidrostático de explosão. Esses valores de deformação obtidos por esse ensaio foram utilizados, posteriormente, para validar o modelo numérico.

A Figura 53 apresenta o gráfico das deformações circunferenciais pela pressão interna do tubo, registradas durante o ensaio hidrostático de explosão da amostra T1800GR01. Pelo gráfico é possível observar a diferença de comportamento dos SG localizados embaixo das calhas em relação ao SG colado na região externa. Os SG abaixo da calha registraram um aumento linear ao longo de todo o ensaio, até a ruptura da amostra em 195 bar, já o SG externo começou a apresentar um

comportamento exponencial a partir da pressão de 150 bar, indicando o início da plasticidade do material neste local.

A Figura 54 apresenta imagens da amostra T1800GR01, dentro do bunker, momentos antes de iniciar o teste hidrostático de explosão (a) e após o ensaio hidrostático de explosão (b), onde é possível identificar que o local de ruptura desse tubo foi fora da região do reparo.

Além disso, esse ensaio também foi muito importante para esse estudo pois, os valores de deformações obtidos nos ensaios hidrostáticos, foram utilizados para a validação do modelo numérico que contempla toda essa dissertação.

Figura 53 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1800GR01

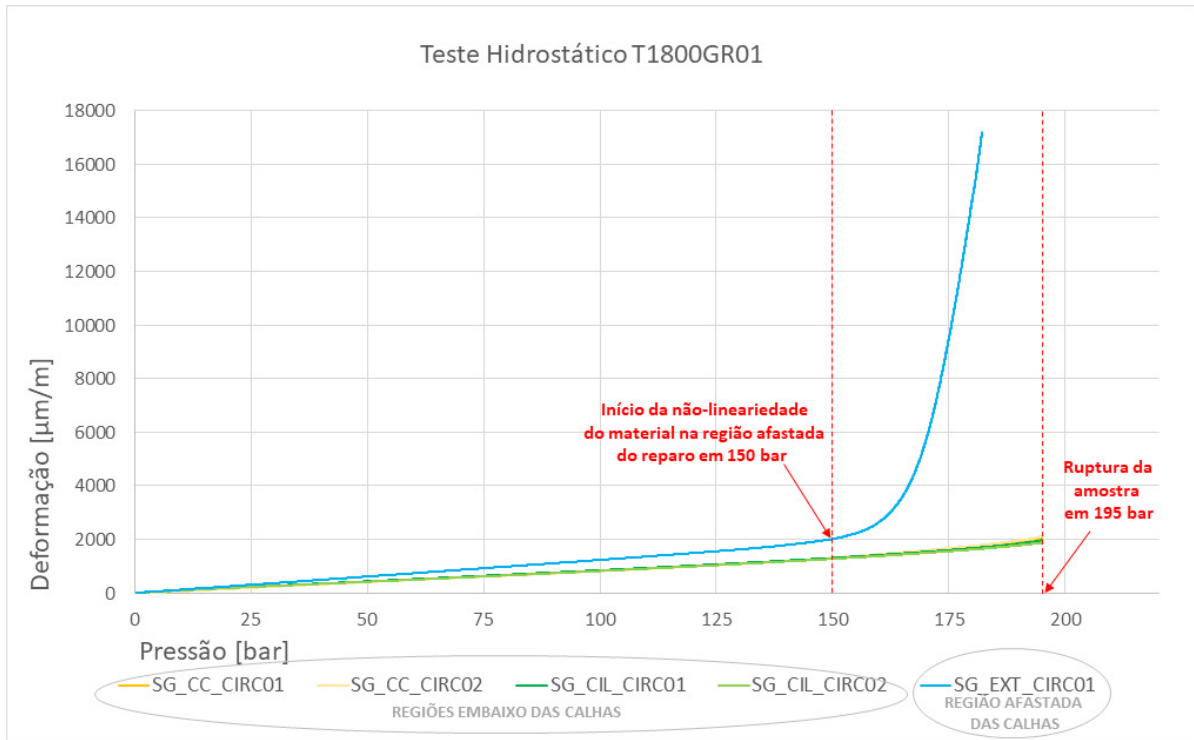
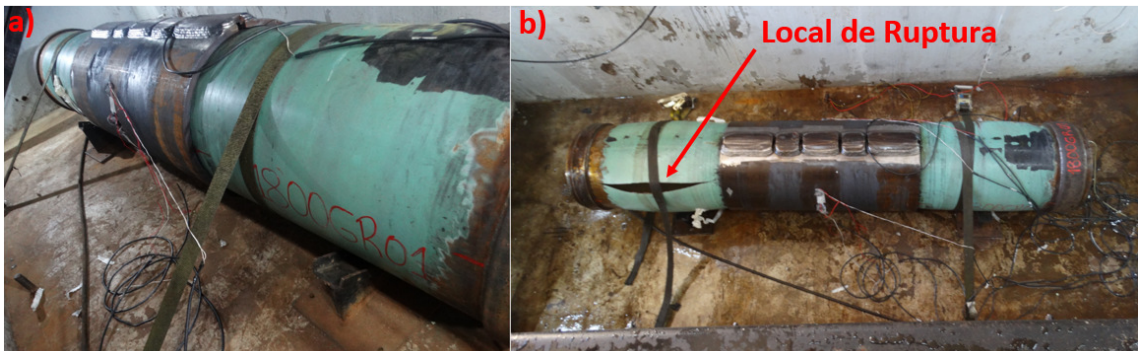


Figura 54 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1800GR01

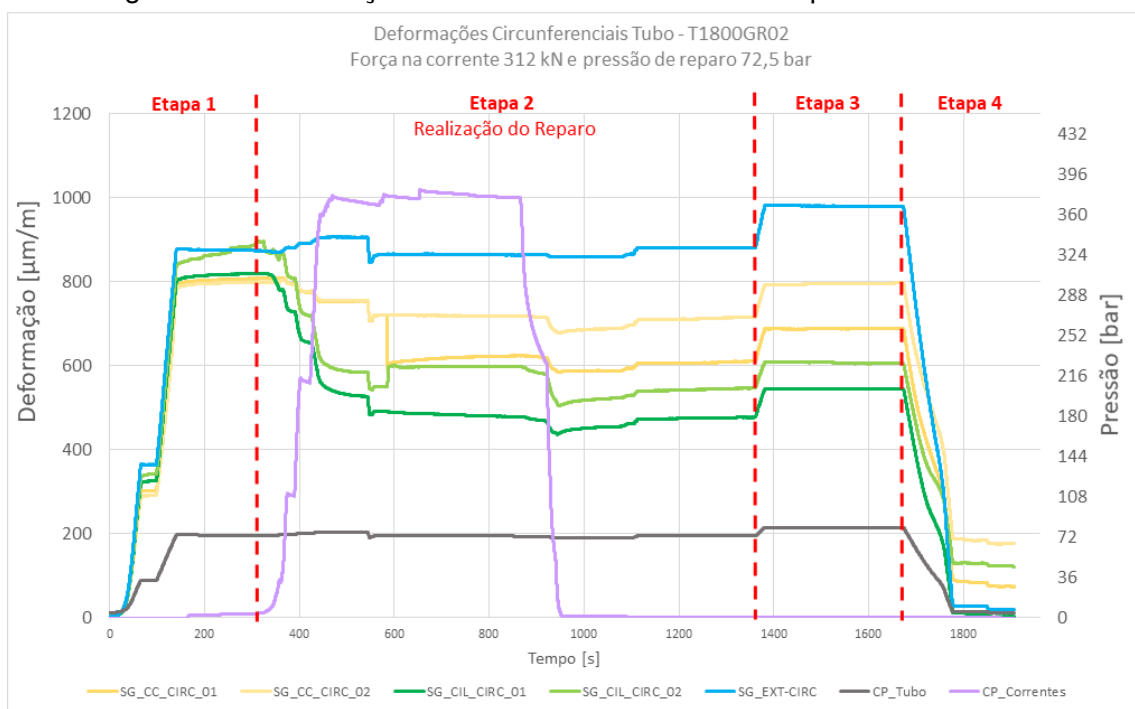


A Figura 55 apresenta o gráfico das deformações circunferenciais do tubo íntegro reparado nas condições de 72,5 bar de pressão interna e 312 kN de força de aperto, relacionados a amostra T1800GR02. Assim como a amostra T1800GR01, os extensômetros colados embaixo das calhas registraram uma redução dos valores de deformação com o início de aplicação de força da corrente (início da etapa 2). Para os SG colados no lado da célula de carga (SG_CC), as deformações iniciais, aproximadamente, 800 $\mu\text{m/m}$ medidas ao final da etapa 01, diminuíram para 609,8 $\mu\text{m/m}$ (SG_CC_CIRC_01) e 714,9 $\mu\text{m/m}$ (SG_CC_CIRC_02) no final da etapa 2.

Já os extensômetros colados no lado dos cilindros (SG_CIL_CIRC_01 e SG_CIL_CIRC_02) registraram uma queda de 818,4 $\mu\text{m/m}$ para 475,7 $\mu\text{m/m}$ e de 894,7 $\mu\text{m/m}$ para 545,4 $\mu\text{m/m}$, respectivamente. Enquanto isso, o extensômetro colado fora da região de reparo (SG_EXT_CIRC) se comportou de igual maneira que a amostra anterior (T1800GR02) medindo um valor constante, de aproximadamente 876 $\mu\text{m/m}$, para esse mesmo intervalo (da etapa 1 até o início da etapa 3).

Na etapa 3 a pressão interna do tubo foi aumentada até atingir o valor da Pop, para esse ensaio, de 80 bar e também, como na amostra anterior, os extensômetros colados debaixo das calhas registraram deformações circunferenciais menores que os valores de deformações obtidos pelo extensômetro localizado afastado da região reparada.

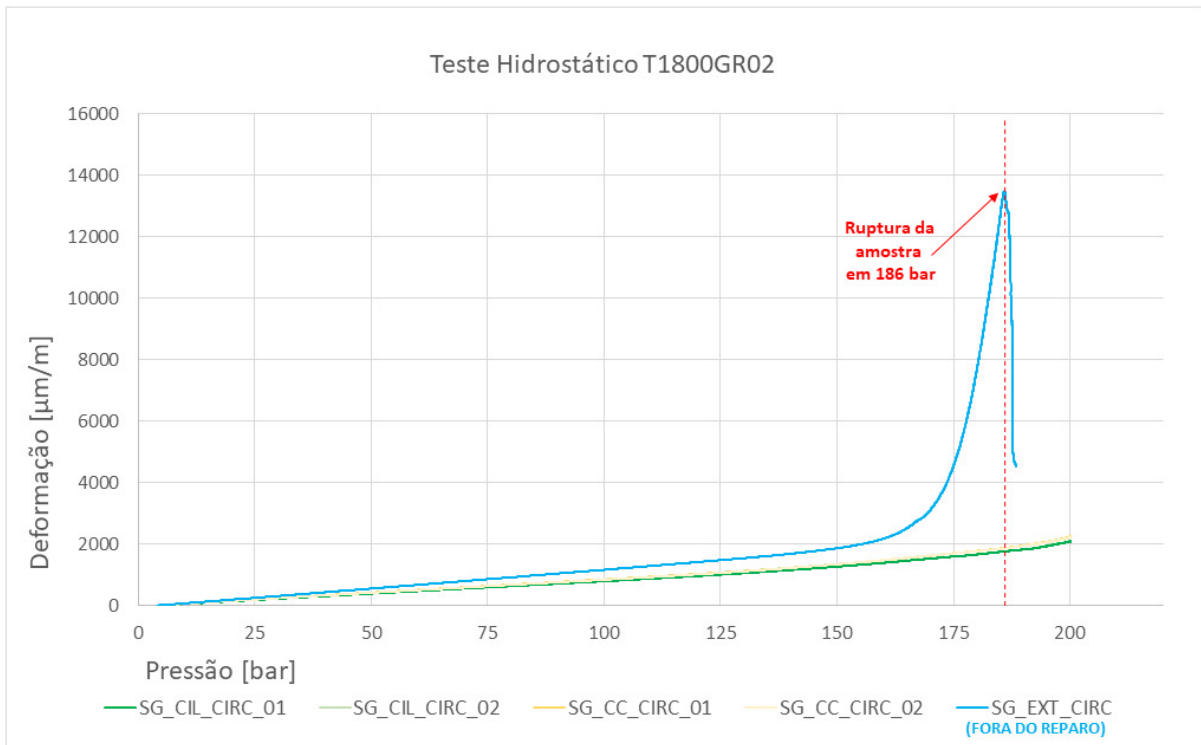
Figura 55 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1800GR02



Depois de reparada, a amostra T1800GR02 foi submetida ao ensaio hidrostático de explosão, ou seja, a pressão interna da amostra foi aumentada até o momento da ruptura. A Figura 56 apresenta o gráfico das deformações circunferenciais pela pressão interna do tubo durante esse ensaio. Comparando os resultados dessa amostra (T1800GR02) com os da amostra anterior (T1800GR01) é possível observar o mesmo comportamento dos extensômetros, nas diferentes regiões monitoradas.

A amostra T1800GR02 começou a apresentar um comportamento exponencial a partir da pressão de aproximadamente 140 bar, indicando o início da plasticidade do material a partir deste ponto, e rompeu com 186 bar fora da região de reparo.

Figura 56 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1800GR02.



A Tabela 3 apresenta os valores de deformações circunferenciais durante a aplicação do reparo para cada ponto estabelecido na Tabela 3 - Parâmetros de reparos experimentais dos tubos íntegros, usado como embasamento para a construção da Figura 46 - Gráfico de relação de tensões versus relação de pressões.

Tendo em vista o comportamento padrão desses ensaios, para conservar o equipamento de teste, apenas as duas primeiras amostras foram pressurizadas até a explosão.

Tabela 4 - Dados finais da aplicação do reparo nas amostras de tubos íntegros

Amostra	Ponto Tabela 1	Força de Aperto [kN]	Prep [bar]	Pop [kN]	Deformação circunferenciais no final do reparo [μm/m]				Pressão de Ruptura [bar]	
					SG_CC		SG_CIL			SG_EXT
					1	2	1	2		
T1800GR01*	D3	437,5	65	107	492,8	615,0	553,1	497,5	789,0	195
T1800GR02*	B4	312	72,5	80	609,8	714,9	475,7	545,4	879,3	186
T1800GR16	A5	250	80	110	810,0		824,2		1046,1	**
T1800GR19*										
T1800GR20										
T1800GR17	E5	500	80	110	771,4		616,0		1013,1	**
T1800GR18										
T1800GR21*										
T1800GR13*	A1	250	50	85	453,6		411,4		629,1	**
T1800GR14										
T1800GR15										
T1800GR10	E1	500	50	78	307,7		394,1		639,7	**
T1800GR11										
T1800GR12*										

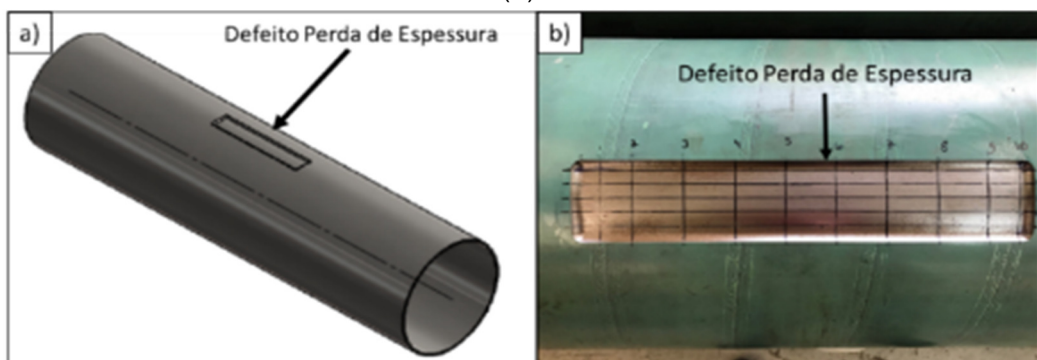
* Gráficos representativos aos demais de mesmo parâmetro.

** Não foi submetido até a ruptura.

5.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA

Para a realização dos ensaios experimentais dos tubos com defeitos de corrosão, inicialmente foi usinado no centro de cada amostra o dano tipo perda de espessura, cujo as dimensões estabelecidas, para todas as amostras, são de 450 mm de comprimento, 85 mm de largura e nas arestas 10 mm de raio. Figura 57 apresenta um desenho com a localização do defeito no tubo (a) e junto a ele, a imagem de um tubo já usinado (b).

Figura 57 - Localização do defeito tipo perda de espessura (a) e tubo com defeito usinado (b).



No total, 8 amostras com perda de espessura foram analisadas, considerando duas criticidades de perda de espessura: 70% e 90%.

Para o defeito de 70%; 4 amostras de tubos com 18 polegadas de diâmetro, 7,14 mm de espessura e 2,5m de comprimento, devem ficar uma espessura remanescente nominal de 2,14 mm após a usinagem do defeito.

Além desses, 4 amostras foram usinadas para o defeito de 90%, todas com 18 polegadas de diâmetro, 7,14 mm de espessura e 2,5m de comprimento, devendo medir uma espessura remanescente nominal de 0,714 mm na região usinada.

Figura 58 - Espessura remanescente das amostras com defeito tipo perda de espessura (medidas em milímetros).

	Tubos de 18 polegadas							
	70% de Perda de Espessura				90% de Perda de Espessura			
	T1870PE01	T1870PE02	T1870PE03	T1870PE04	T1890PE05	T1890PE06	T1890PE07	T1890PE08
Mínimo	1,91	1,82	1,9	1,96	0,68	0,88	0,8	0,73
Máximo	2,94	2,36	2,84	2,55	0,98	1,46	1,34	1,79
Média	2,242	2,022	2,293	2,261	0,821	1,116	1,057	1,32
Desv. Pad.	0,211	0,126	0,222	0,16	0,059	0,152	119	0,369

Para avaliar os valores de espessura remanescente após a usinagem do defeito nas amostras, realizou-se a medição dessa espessura nos diversos pontos traçados na Figura 57. Para realizar essas medições, foi utilizado um ultrassom da marca GE e foi calculado a espessura remanescente média, os valores de máximos, mínimos e o desvio padrão de cada tubo, conforme apresentado na Figura 58.

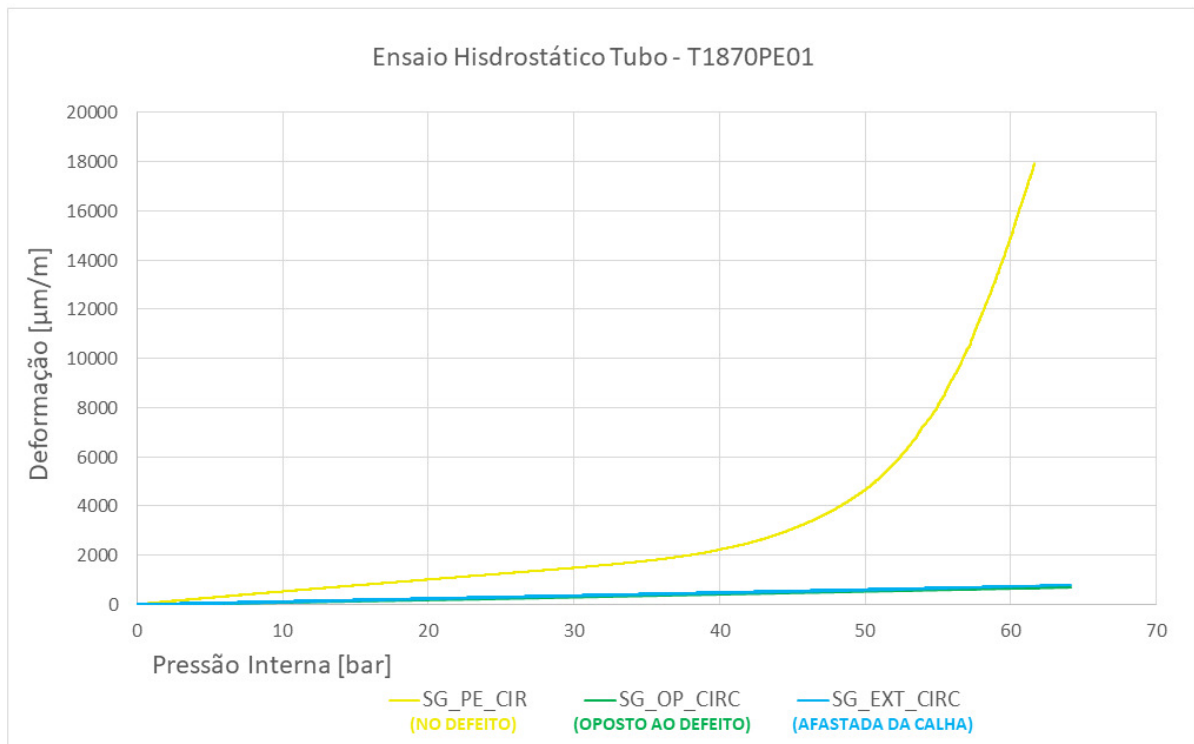
Para os ensaios experimentais dos tubos com perda de espessura e sem a aplicação das calhas (reparo), conforme indicação da Figura 47 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos, três regiões do tubo foram monitoradas por meio de extensômetros, no centro do defeito (SG PE_CIR), a 180° do defeito na região íntegra do tubo (SG_OP_CIRC) e na região íntegra do tubo fora do local de reparo (SG_EXT_CIRC), seguindo o mesmo padrão de cores que o restante dos ensaios apresentados nesse estudo.

5.2.1 Ensaios Experimentais em Tubos com Perda De Espessura Sem Reparo

A fim de possibilitar a comparação dos resultados dos ensaios, uma amostra de cada condição de perda de espessura foi ensaiada sem a aplicação do reparo, servindo também de referência para identificar a pressão de ruptura desses casos

A Figura 59 apresenta o gráfico com os valores das deformações circunferenciais durante o ensaio hidrostático de explosão da amostra T1870PE01, com 70% de perda de espessura e ensaiada sem reparo.

Figura 59 - Ensaio hidrostático de explosão - T1870PE01 – Sem Reparo



A partir da Figura 59 é possível observar que os extensômetros colados na região do defeito (da perda de espessura, representado pela cor amarelo) apresentaram valores de deformação maiores que o restante, chegando ao valor máximo de 18.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ (fundo de escala do extensômetro) aos 61 bar. A amostra falhou em 64 bar e apresentou valores máximos de deformações no SG_OP_CIRC e no SG_EXT_CIRC próximos, 685,3 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 781,8 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente.

A Figura 60 apresenta a imagem do local de ruptura dessa amostra, e pode-se afirmar que a ruptura da região com perda de espessura teve início no centro do

defeito e mais próximo ao raio de transição entre as regiões de defeito e íntegra do tubo, se propagando por quase toda a extensão do defeito.

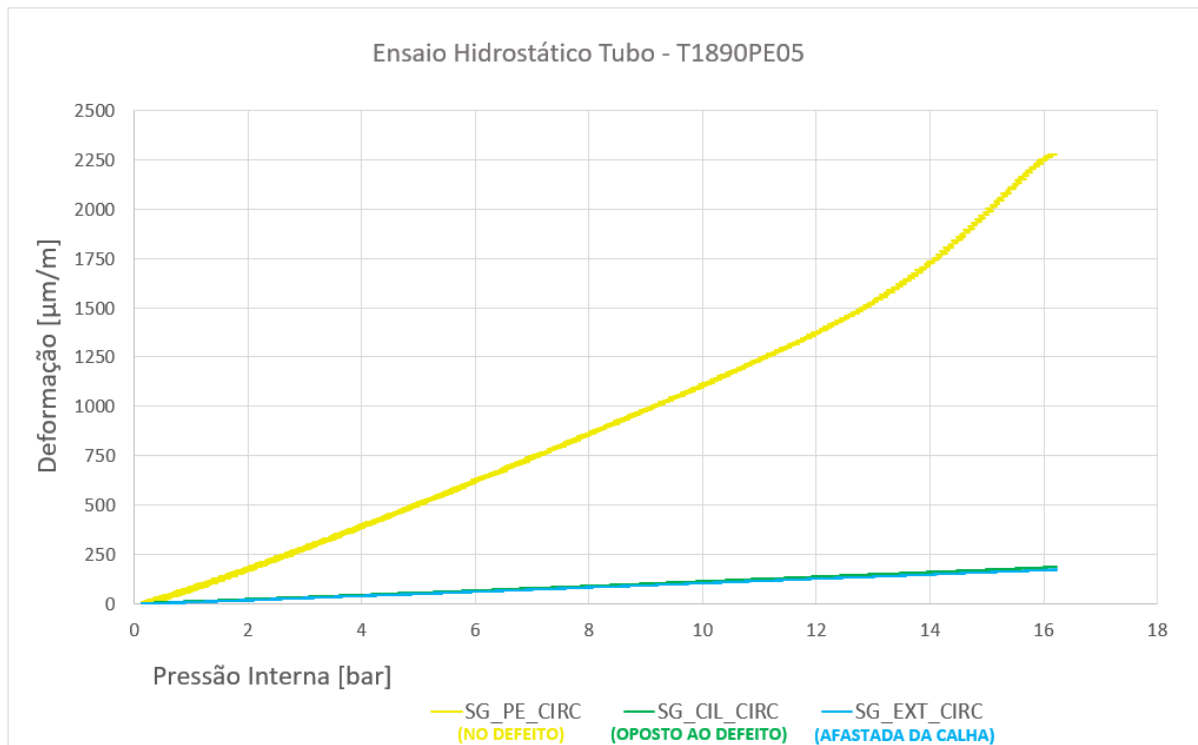
Pelo método de determinação dos parâmetros de reparo, apresentado no APÊNDICE A, sabe-se que para a condição de reparo com $\frac{1}{4}$ da pressão de ruptura do tubo (16 bar), foi possível obter um valor de tensão circunferencial na região de defeito menor que a tensão na região íntegra da amostra, para a pressão de operação desse tubo. Definiu-se então que, por segurança, os ensaios experimentais dos reparos dos tubos seriam realizados com $\frac{1}{4}$ da pressão de ruptura, e força de aperto de 500 kN (correspondente à 600 bar nos cilindros). Essa condição foi utilizada para os reparos experimentais com perda de espessura, tanto nos tubos com 70% e 90%.

Figura 60 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE01



Para a análise da amostra sem reparo e com severidade do defeito em 90%, a Figura 61 mostra as deformações circunferenciais durante o ensaio hidrostático de explosão do corpo de prova T1890PE05. Essa amostra apresentou uma pressão de ruptura de 16 bar.

Figura 61 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1890PE05 – Sem Reparo



A Figura 62 aponta a região de ruptura do corpo de prova T1890PE05. Pode-se perceber que a fratura abrangeu uma área menor quando comparada com a ruptura do tubo T1870PE01 e iniciou na mesma região.

Figura 62 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE05



O extensômetro colado no centro da região de perda de espessura (SG_PE_CIRC) registrou no momento de ruptura do tubo 2.250 µm/m de deformação

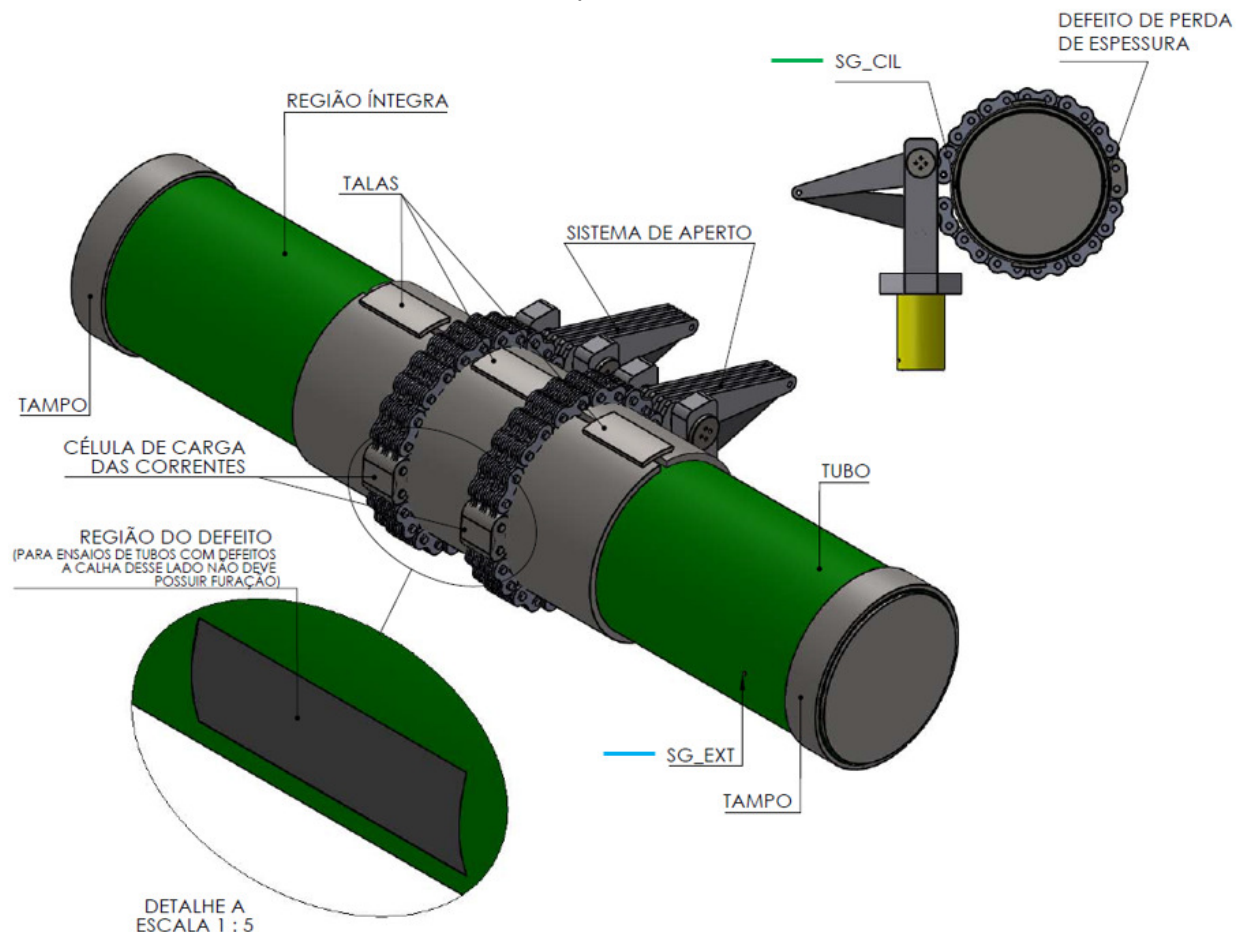
(conforme Figura 61), enquanto que o SG da região íntegra (SG_EXT) mediu 172 $\mu\text{m}/\text{m}$.

5.2.2 Ensaios Experimentais em Tubos com Perda de Espessura Com Reparo

Após a definição dos parâmetros de reparo, para as análises das deformações circunferenciais, e também seguindo o procedimento descrito na seção 4.1.2, para os ensaios experimentais dos corpos de prova com perda de espessura e com reparo, foram analisadas duas regiões diferentes.

Como mostra a Figura 63, um ponto de aquisição foi colocado embaixo da calha, localizada no centro desse reparo e no lado do cilindro de aperto (SG_CIL). O segundo ponto de aquisição das deformações foi realizado fora da região de reparo do tubo, afastada a uma distância de aproximadamente 350 mm do final da calha, e identificado como ponto SG_EXT.

Figura 63 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos dos tubos com Perda de espessura



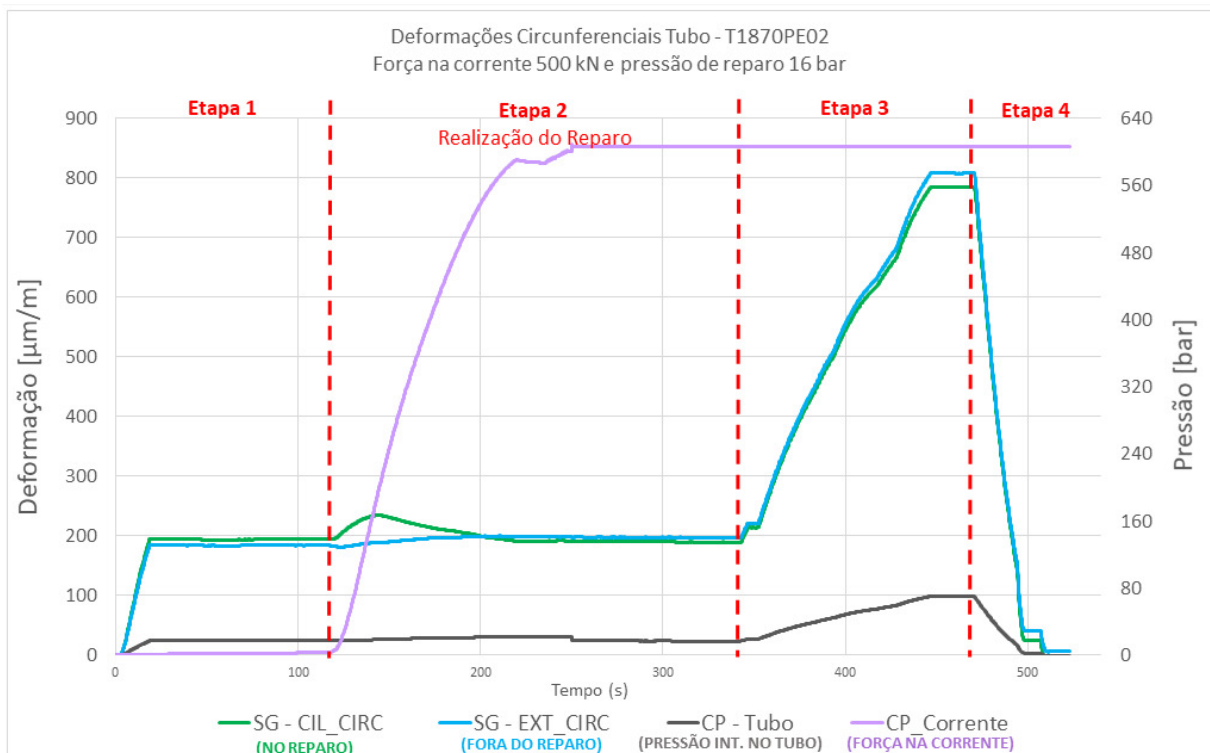
Lembrando que para os ensaios em tubos com defeitos a calha que cobre o lado da perda de espessura não deve conter furação. Assim, devido a aplicação da resina no local do defeito (para recuperação da geometria original do tubo), não foi utilizado calhas com furação nesse ponto, portanto não foi possível fazer a aquisição das deformações na região do defeito, conforme aponta o detalhe A da Figura 63, bem como sugerido anteriormente na Figura 47.

A partir disso, será apresentado as deformações circunferenciais coletadas durante os reparos, de uma amostra de cada severidade do defeito, para compreensão dos dados. Por fim, uma tabela com os resultados de todos tubos com perda de espessura, avaliados nessa etapa do estudo, será mostrada.

Portanto, utilizando a definição dos parâmetros de reparo citadas, de 500 kN de força de aperto e pressão interna de 16 bar, os tubos T1870PE02, T1870PE03 e T1870PE04 foram reparados conforme procedimento descrito na seção 4.1.2, mas utilizando a resina com comprimento total de 500 mm (+/-250 mm a partir do centro do defeito).

A Figura 64 apresenta os dados de deformação circunferencial da amostra T1870PE02, medidos nas regiões íntegras do tubo (fora do reparo) e abaixo da calha de reparo, em um gráfico de pressão e deformação pelo tempo.

Figura 64 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1870PE02

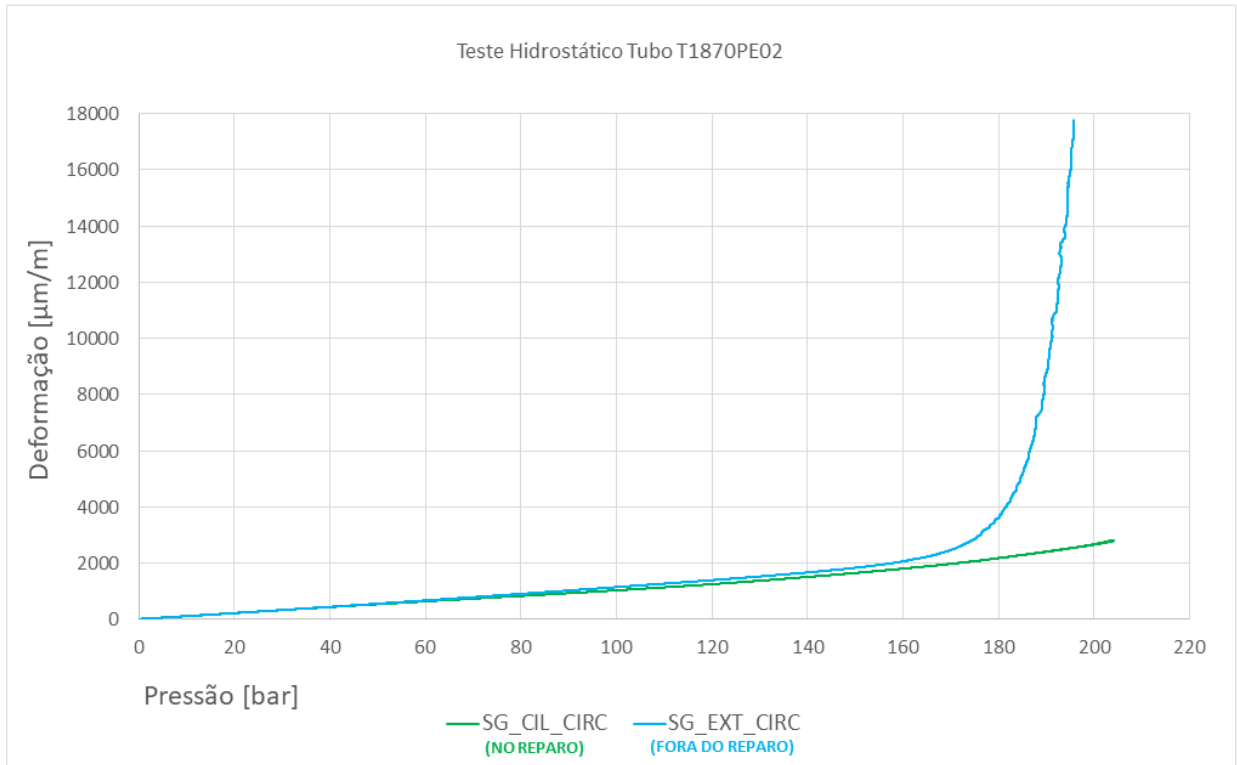


O gráfico foi delimitado em 4 regiões, seguindo as mesmas etapas utilizadas no processo de reparo de tubos íntegros. Na etapa 1, o tubo foi pressurizado até atingir o valor de Prep, definida para essa amostra. Mantendo a pressão de reparo, é realizada então a pressurização dos cilindros hidráulicos para fechamento das correntes e aplicação da compressão nas calhas, e assim para finalizar a segunda etapa, as talas intermediárias são soldadas unido as calhas e mantendo a pressão de compressão. Para a amostra T1870PE02, a força de aperto foi mantida nas etapas 3 e 4 por motivos de segurança. Na etapa 3, a pressão interna é elevada até a pressão de operação do tubo (80 bar) e por último (etapa 4) a pressão do tubo é aliviada até 0 bar.

As nomenclaturas CP-Tubo e CP-Corrente referem-se à pressão interna do tubo e à pressão dos cilindros de aperto das correntes, para obter a força em questão. As deformações circunferenciais registradas na região íntegra, mas abaixo da calha da amostra T1870PE02 (SG_CIL_CIRC), não apresentou queda dos valores conforme esperado. Esse comportamento pode estar relacionado com a perda da referência do extensômetro SG_CIL_CIRC. Mesmo com o comportamento não esperado do extensômetro SG_CIL_CIRC, esse registrou deformações semelhantes ao extensômetro colado fora do reparo (SG_EXT_CIRC). No final da etapa 3, com 70 bar de pressão interna no tubo, os extensômetros SG_EXT_CIRC e SG_CIL_CIRC registraram deformações de 807,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 784 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente.

Depois de reparada, a amostra T1870PE02 foi encaminhada para o bunker para a realização do ensaio hidrostático de explosão. A Figura 65 apresenta o gráfico das deformações circunferenciais pela pressão interna do tubo, e é possível observar que o SG colado na região externa ao reparo obteve um valor máximo de deformação igual ao fundo de escala de medição do extensômetro (18.000 $\mu\text{m}/\text{m}$), enquanto que o extensômetro SG_CIL_CIRC colado abaixo da calha na região íntegra, apresentou uma deformação circunferencial máxima de 2.789 $\mu\text{m}/\text{m}$. A amostra rompeu em 200 bar.

Figura 65 - Deformações Circunferenciais para o hidrostático de explosão - T1870PE02



A imagem do local de ruptura dessa amostra foi apontada na Figura 66, e pode-se ver que a ruptura da amostra T1870PE02 foi na região externa, afastada do reparo, que foi a região de maior registro de deformações pelos extensômetros no final do reparo e também no decorrer do teste hidrostático de explosão.

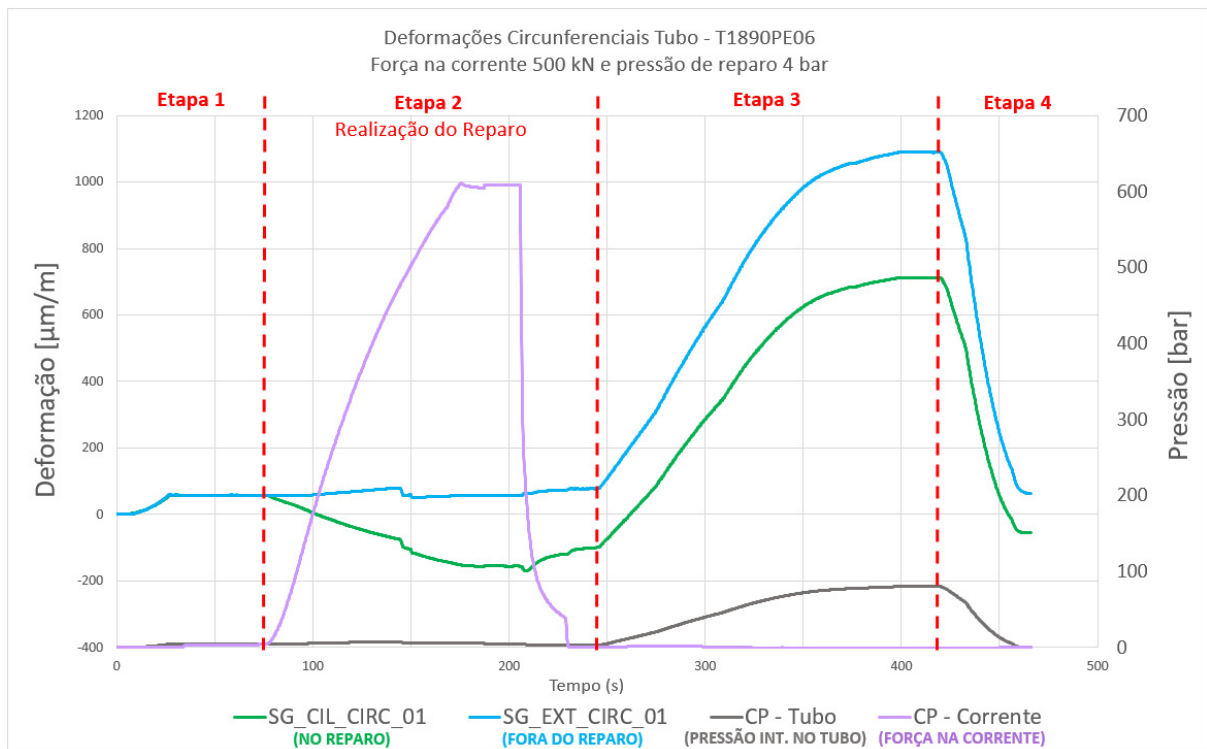
Figura 66 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1870PE02



A Figura 67 apresenta o gráfico de reparo do tubo T1890PE06. Na etapa 1 antes de ser reparado, com uma pressão interna de 4 bar foi registrada a deformação

circunferencial de 58 $\mu\text{m}/\text{m}$, tanto no SG_CIL_CIRC01 e SG_EXT_CIRC01. Depois de reparado, no final da etapa 2 o extensômetro SG_CIL_CIRC01 passou a medir $-100,3 \mu\text{m}/\text{m}$ e o SG_EXT_CIRC01 77,4 $\mu\text{m}/\text{m}$. Quando a amostra teve a pressão interna elevada até a pressão de operação de 80 bar, o extensômetro SG_EXT_CIRC01 registrou uma deformação circunferencial igual a 1.088,9 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto o extensômetro SG_CIL_CIRC01 marcou uma deformação de 712,1 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Figura 67 - Deformações Circunferenciais durante o reparo - T1890PE06



A amostra reparada T1890PE06 foi então submetida ao ensaio hidrostático e apresentou a falha com uma pressão interna igual a 196 bar, conforme apresentado na Figura 68. O local de fratura do tubo foi na região íntegra, longe do reparo (ver Figura 69). Essa região apresentou uma deformação máxima de 113.020,2 $\mu\text{m}/\text{m}$ a 184 bar e uma deformação máxima abaixo das calhas (SG_CIL_CIRC01 e 02) de 2087,2 $\mu\text{m}/\text{m}$ no momento da ruptura.

Figura 68 - Deformações Circunferenciais para o ensaio hidrostático de explosão - T1890PE06

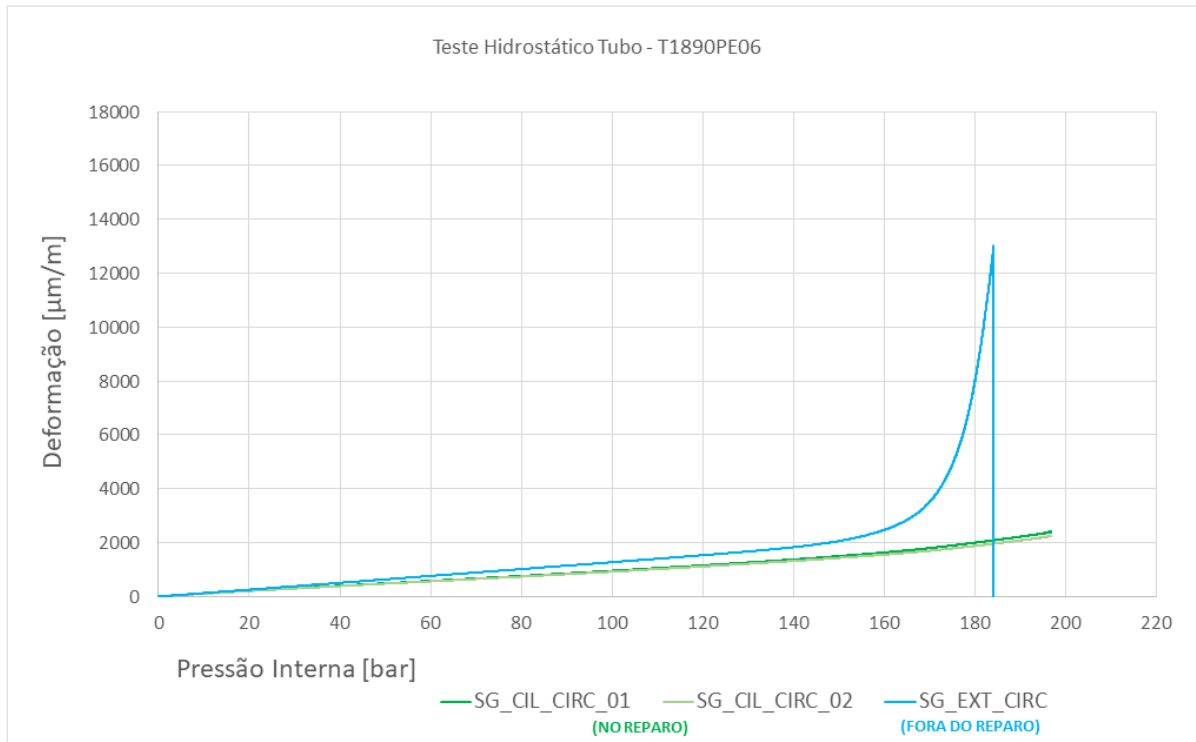


Figura 69 - Local de Ruptura do ensaio hidrostático de explosão - T1890PE06



5.2.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios hidrostáticos das amostras com perda de espessura de severidade em 70% e 90%, ambas com e sem reparo. No total foram ensaiados 8 tubos, sendo 4 em cada condição de perda de espessura. Para cada criticidade de defeito, foi ensaiado um tubo sem reparo e 3 com

reparo. Pelos dados, é possível verificar que as amostras sem reparo (T1870PE01 e T1890PE05) apresentaram a falha na região do defeito e a uma pressão muito abaixo da pressão de ruptura de um tubo íntegro, que é de aproximadamente de 190 bar (Tabela 4), apontando a verdadeira necessidade da aplicação do reparo nas regiões danificadas de um duto.

Alcançando o objetivo proposto, as amostras reparadas tiveram a resistência mecânica recuperada e apresentaram valores de ruptura mais elevados, de aproximadamente 200 bar.

Com exceção da amostra T1890PE08, todos os tubos reparados apresentaram falha fora da região de reparo. O corpo de prova T1890PE08 veio a romper na região da perda de espessura a uma pressão de 211 bar, no mesmo patamar de pressão das outras amostras reparadas.

Tabela 5 - Dados finais das amostras de tubos com perda de espessura

Nº da Amostra	Corpo de Prova	Material	PE	Reparo	Força de Aperto [kN]	Prep [bar]	Pressão de Ruptura [bar]	Local da Falha	Comp. TOTAL da resina
T1870PE01	TUBOS Ø18' 7,14mm 2,5m	X65	70%	SEM	-	-	64,13	NO DEFEITO	-
T1870PE02				COM	500	16	200	AFASTADO DO REPARO	500
T1870PE03				COM			210	AFASTADO DO REPARO	500
T1870PE04				COM			205	AFASTADO DO REPARO	500
T1890PE05			90%	SEM	-		-	16	NO DEFEITO
T1890PE06				COM	500	4	196	AFASTADO DO REPARO	500
T1890PE07				COM			200	AFASTADO DO REPARO	500
T1890PE08				COM			211	NO DEFEITO	500

Assim, pode-se observar que o reparo foi eficiente em todas as amostras. Mesmo na amostra T1890PE08, o reparo recuperou a resistência mecânica original do tubo, uma vez que a pressão de ruptura retornou aos mesmos patamares obtidos nas amostras íntegras (média de 190,5 bar). Cada uma das amostras teve os dados de deformação coletados ao longo da aplicação do reparo e durante a realização do ensaio hidrostático para posterior análise.

5.3 MODELOS NUMÉRICOS EM TUBOS ÍNTEGROS

Os modelos numéricos foram desenvolvidos para simular todas as etapas da aplicação do reparo, tanto para tubos íntegros quanto para os tubos com defeitos. Isso

possibilitou que dados de tensão e de deformação do tubo fossem adquiridos com um alto grau de confiabilidade e extrapolados para diversas condições de reparo, geometrias de tubos e criticidade de defeitos, sem a necessidade de realização de mais ensaios experimentais. O software comercial ABAQUS foi utilizado para o desenvolvimento dos modelos em elementos finitos. Todas as simulações seguiram um roteiro com 9 etapas definidas de acordo com as etapas experimentais da aplicação do reparo, sendo elas:

- Etapa 1: Ajuste dos contatos do modelo;
- Etapa 2: Pressurização do tubo na pressão de reparo;
- Etapa 3: Deslocamento inicial da corrente;
- Etapa 4: Aplicação de carga (força de aperto);
- Etapa 5: Solda das talas exteriores e tala central;
- Etapa 6: Retirada das correntes;
- Etapa 7: Solda das talas intermediárias;
- Etapa 8: Pressurização final do tubo;
- Etapa 9: Alívio da pressão interna.

A modelagem foi realizada em três dimensões (3D) para a obtenção dos dados de tensão, deformação e força. Para a redução do custo computacional foram consideradas relações de simetria longitudinal e transversal, em um modelo com representação de $\frac{1}{4}$ do modelo real, como mostra a Figura 70. Na imagem, estão indicadas as peças que formam o modelo, sendo elas: tubo, calha superior, calha inferior, talas, corrente e tampo. As peças que representam a resina se encontram entre as calhas e o tubo.

Para o modelamento computacional foram definidas duas propriedades para serem aplicadas às peças: elementos sólidos lineares 3D (C3D8R) aplicado para as calhas, talas, tubos, tampo e resina; e elementos de membrana linear (Shell) que foram utilizados para o modelamento da corrente (dispositivo de aperto). Os elementos de membrana linear foram selecionados devido a capacidade dessa propriedade em transmitir apenas força (sem incidência de momento). As condições de contorno aplicadas podem ser observadas na Figura 71.

Figura 70 - Partes do modelo numérico

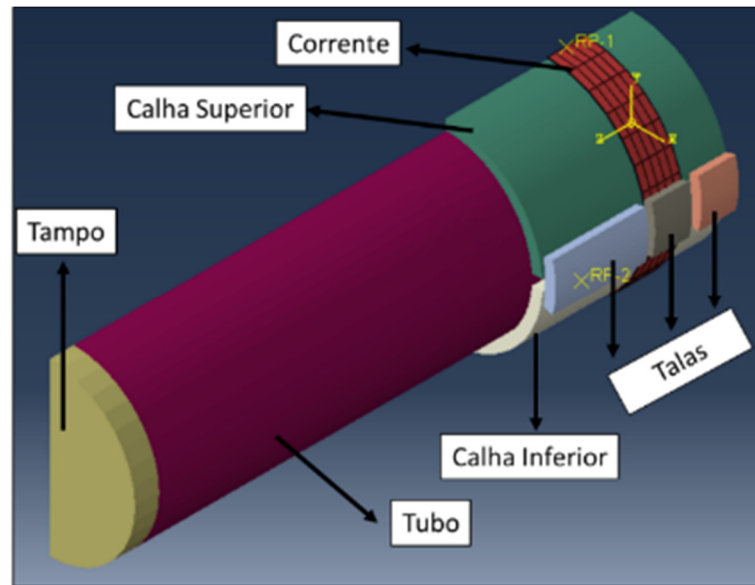
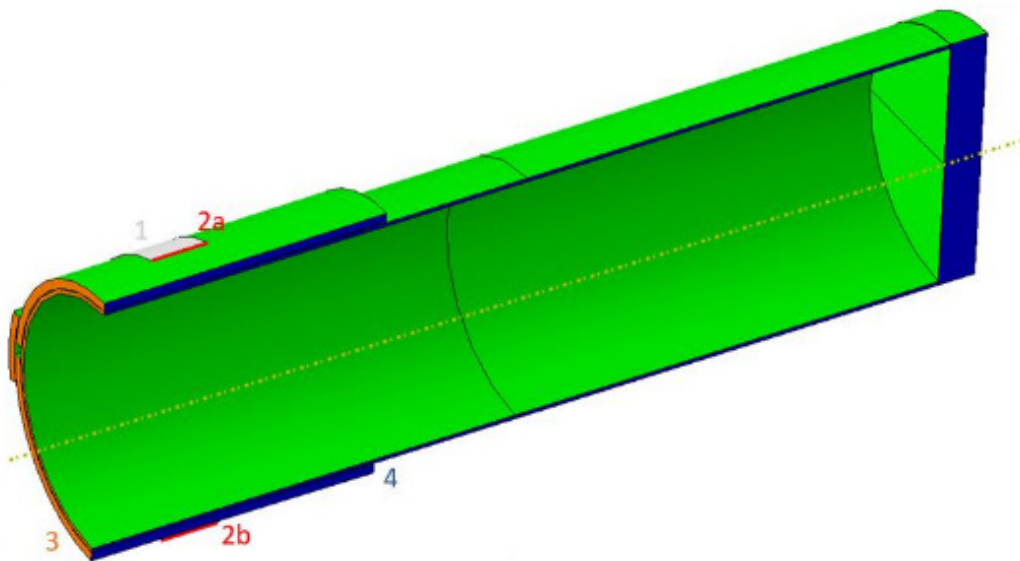


Figura 71 - Condições de contorno do modelo numérico: restrição da corrente no plano (1); aplicação da carga de ensaio (2a); leitura das células de carga (2b); simetria longitudinal (3); e simetria transversal (4).



As peças do modelo foram montadas com as aplicações de condições de contato que refletissem da maneira mais próxima da realidade, a interação verdadeira entre elas. Assim, para a união entre o tampo e o tubo foi utilizada a ferramenta TIE do software, para representar a união soldada entre as peças. Esse mesmo tipo de contato foi utilizado na união entre as talas com as calhas, e também entre a resina com a calha. A aplicação do contato tipo TIE garante o contato íntimo entre as peças,

não permitindo que as faces de contato deslizem uma sobre a outra. Já para a montagem da corrente sobre as calhas, e das resinas sobre o tubo foi utilizada a ferramenta CONTACT, que possibilita que os corpos selecionados deslizem entre si, com fator de atrito igual a 0,2, representando o uso da graxa nas montagens.

Como mostra a Tabela 6, um total de 25 simulações numéricas foram modeladas e reparadas utilizando o modelo numérico desenvolvido, variando força de aperto das correntes e pressão interna do tubo (Prep). Entre as combinações de parâmetros aqui analisados, 6 pontos foram os mesmos parâmetros avaliados experimentalmente (apresentados na Tabela 3 - Parâmetros de reparos experimentais dos tubos íntegros), para validar o modelo através da união e interpretação de ambos os resultados.

Tabela 6 - Parâmetros de reparo utilizados na simulação numérica dos tubos íntegros.

Amostra experimental	Ponto Tabela 1	Força de Aperto [kN]	Prep [bar]	Pop [kN]	Prep/Pop
T1800GR13*	A1*	250	50	80	0,625
-	A2		57,5		0,71875
-	A3		65		0,8125
-	A4		72,5		0,90625
T1800GR19*	A5*		80		1
-	B1	312,5	50		0,625
-	B2		57,5		0,71875
-	B3		65		0,8125
T1800GR02*	B4*		72,5		0,90625
-	B5		80		1
-	C1	375	50		0,625
-	C2		57,5		0,71875
-	C3		65		0,8125
-	C4		72,5		0,90625
-	C5		80		1
-	D1	437,5	50		0,625
-	D2		57,5		0,71875
T1800GR01*	D3*		65		0,8125
-	D4		72,5		0,90625
-	D5		80		1
T1800GR12*	E1*	500	50		0,625
-	E2		57,5		0,71875
-	E3		65		0,8125
-	E4		72,5		0,90625
T1800GR21*	E5*		80		1

*Pontos experimentais e simulados.

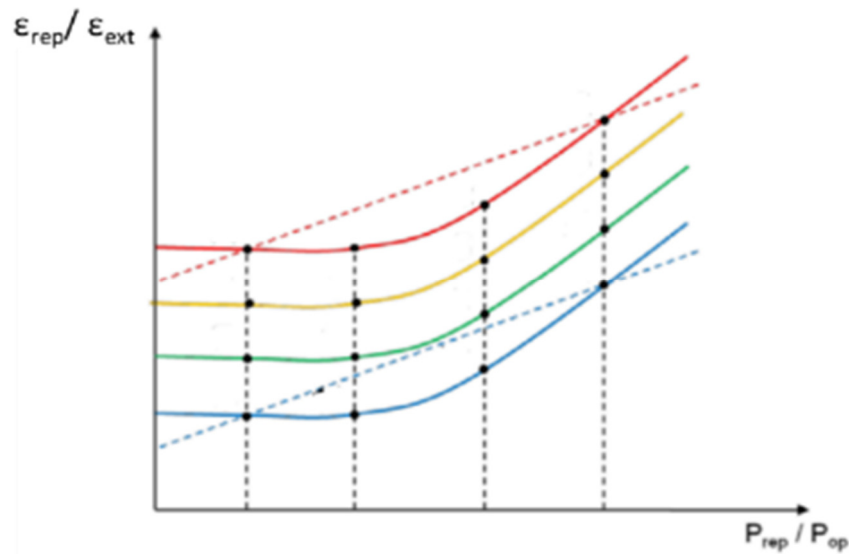
Para cada simulação numérica, foram selecionados dois pontos do tubo para aquisição dos dados de deformação e tensão circunferencial. A localização dos pontos foi a mesma utilizada para a colagem dos extensômetros nos ensaios experimentais, permitindo assim a comparação de ambos para ajuste e validação do modelo numérico (um ponto no centro e abaixo da calha oposta aos cilindros, referente ao SG_CC e outro ponto localizado fora da região de reparo referente ao SG_EXT, conforme aponta a Figura 63 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos dos tubos com Perda de espessura).

Os dados de deformação na região do reparo (ϵ_{rep}) e fora da região de reparo (ϵ_{ext}) foram usados para o cálculo da eficiência do reparo. Os valores de eficiência do reparo foram realizados para cada combinação de parâmetro, e foi calculada pela divisão do valor de deformação no defeito pela deformação na região íntegra do tubo. Para que seja considerado um reparo válido, dentro dos os critérios estabelecidos nesse estudo, esse valor deve ser igual ou menor que 1,00. Assim, definindo o limite da relação das tensões, ou das deformações, em 1,00, significa que quando a relação resulta em um valor menor que o limite, esse reparo foi capaz de devolver a integridade estrutural da região com defeito a níveis de tensão iguais ou menores que na região não danificadas.

Considerando os resultados obtidos pelos modelos numéricos dos tubos íntegros, os valores calculados de eficiência, para cada uma das condições simuladas, foram plotados na Figura 72. No eixo da ordenada está a relação de eficiência do reparo pelas deformações, no eixo da abscissa está a relação das pressões, e cada linha representa uma força de reparo utilizada. As linhas tracejadas (azul e vermelha) representam a interligação dos resultados experimentais e as linhas sólidas representam a interligação dos valores numéricos.

Além dos 25 pontos resultantes dos dados obtidos pelo reparo realizado através do modelo numérico, foi plotado, também, no mesmo gráfico (Figura 73) os resultados das deformações monitoradas nos ensaios experimentais (A1', A5', E1' e E5') e seus respectivos desvios médios.

Figura 72 - Eficiência do reparo dos modelos numéricos dos tubos íntegros



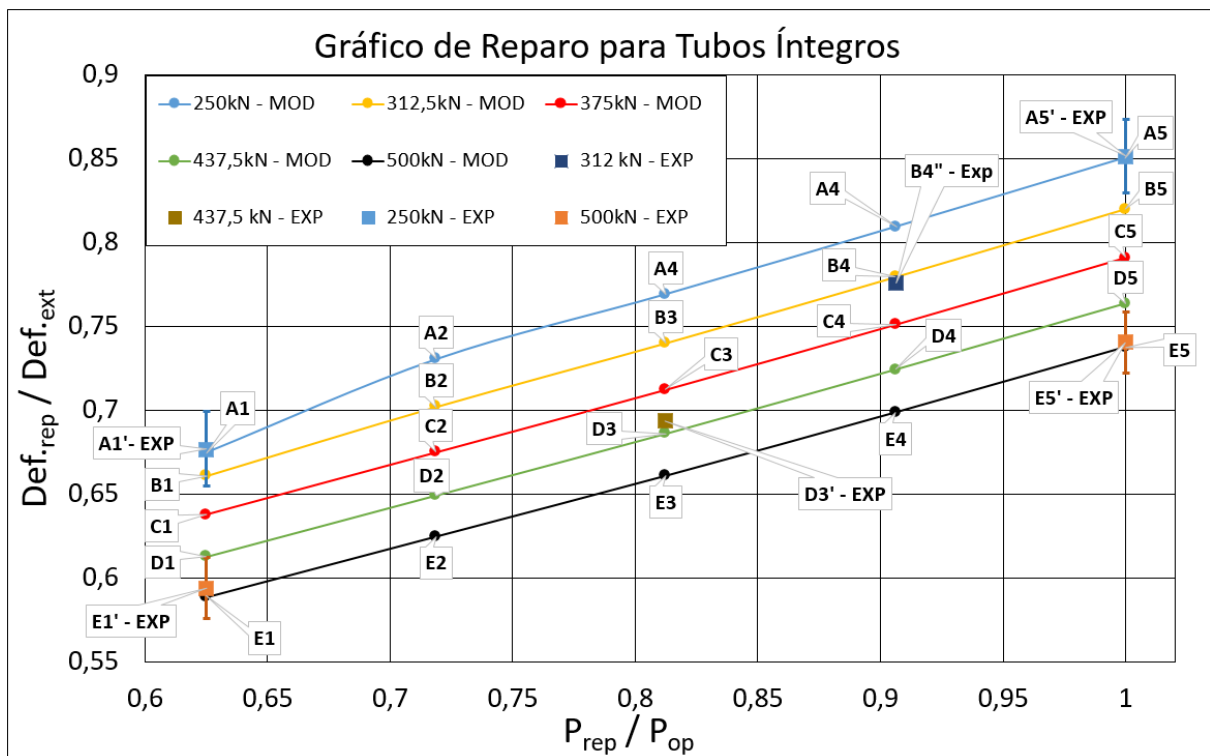
Para a confirmação das curvas da Figura 73 e assim, validar o modelo numérico, ao plotar ambos no mesmo gráfico foi possível realizar um comparativo dos resultados das deformações medidas nas amostras reais (obtidos durante o ensaio hidrostático no momento da pressão de operação de 80 bar), com as deformações resultantes do modelo numérico, nas mesmas condições.

Além dos pontos mencionados anteriormente, foram escolhidos dois pontos intermediários (B4 e D3), cujo os parâmetros também foram ensaiados experimentalmente (B4' e D3'), para validar os valores intermediários das simulações, bem como os outros 2 pontos experimentais; B4' (T1800GR02) e D3' (T1800GR01).

Assim, a Figura 73 apresenta o gráfico de reparo para os tubos íntegros, onde o eixo Y apresenta a relação entre as deformações circunferenciais na região do reparo (Def.rep é a deformação na região reparada medida no ponto referente ao SG_CC) e na região externa ao reparo (Def.ext é a deformação na região externa ao reparo medida no ponto referente ao SG_EXT), e no eixo X está a relação entre a pressão de reparo (P_{rep}) e a pressão de operação do tubo (P_{op}). Cada ponto do gráfico está identificado com uma letra, correspondente à força de aperto utilizada, e um número relacionado ao valor de pressão interna do tubo no momento do aperto. As letras A, B, C, D e E correspondem às forças de aperto de 250 kN, 312,5 kN, 375 kN, 437,5 kN e 500 kN, respectivamente. Já os números 1, 2, 3, 4 e 5 representam as pressões internas do tubo no momento do reparo sendo elas 50, 57,5, 65, 72,5 e 80 bar, respectivamente.

Portanto, analisando as curvas geradas pelos dados das simulações com os resultados dos ensaios experimentais, é possível afirmar que há convergência dos resultados e que o modelo numérico representa, de forma confiável, o comportamento de um tubo íntegro durante a aplicação do reparo para diversas condições. Ainda, pode-se verificar que para uma mesma força de aperto das correntes, diferentes relações de Def.rep/Def.ext são obtidas, e que ainda há uma relação diretamente proporcional com a pressão de reparo utilizada. Ou seja, pressões internas mais baixas durante o reparo resultam em deformações circunferenciais menores na região abaixo das calhas (maior compressão circunferencial proveniente do reparo).

Figura 73 - Dados experimentais e de simulação para o reparo de tubos íntegros



Onde:

A eficiência do reparo é a divisão do valor de deformação no defeito pelo valor de deformação na região íntegra do tubo. Quando esse valor for igual ou menor que 1,00, significa que esse reparo foi capaz de devolver a integridade estrutural da região com defeito a níveis de tensão iguais ou menores que na região não danificada do tubo.

5.4 MODELOS NUMÉRICOS DOS TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA

Visto anteriormente que, diferentes parâmetros de reparo (como variação da Prep ou da Força de aperto) influenciam na eficiência do reparo; com o objetivo de avaliar a melhor combinação de parâmetros para aplicação do reparo por dupla calha em tubos com defeitos do tipo perda de espessura, foram realizados estudos por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) de modo a estender as análises a vários níveis de criticidade do defeito e condições de carregamento.

Sendo assim, foram desenvolvidos 5 modelos de tubos com diâmetros diferentes, onde os valores de espessura de parede, criticidade do defeito e material foram variados conforme apresentado na Tabela 7. Além desses, foram testadas diferentes combinações de parâmetros de reparos, como força de aperto e pressão interna.

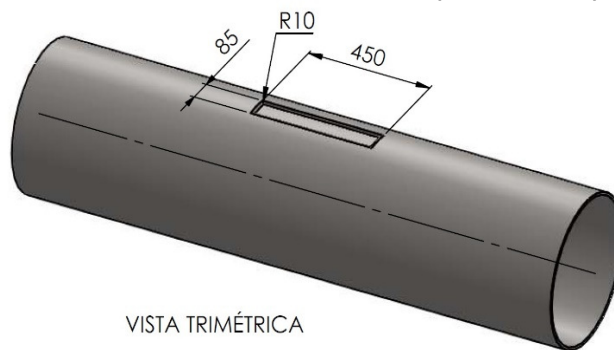
Tabela 7 - Parâmetros de reparo utilizados na simulação numérica dos tubos com perda de espessura

Diâmetro do Tubo [pol]	Espessura do Tubo [mm]	Perda de Espessura [%]	Material	Parâmetros de Reparo		Número Total de Simulações
				Força	Pressão	
10	6,35 11,1125 15,875	10 30 50 70 90	API grau B X52 X65	3 pontos	3 pontos	405
12,75	9,525	10 20 30 ... 90	API grau B	5 pontos	5 pontos	225
18	7,14	10 30 50 70 90	API grau B X52 X65	3 pontos	3 pontos	135
20	6,35 11,1125 15,875	10 30 50 70 90	API grau B X52 X65	3 pontos	3 pontos	405
30	6,35 11,1125 15,875	10 30 50 70 90	API grau B X52 X65	3 pontos	3 pontos	405

À vista disso, um total de 1.845 simulações de tubos com perda de espessura foram realizadas nessa etapa, a fim de fornecer dados confiáveis para permitir extrapolação das análises para tubos e criticidades de defeitos não modelados. Para realização de todas as simulações foi necessário desenvolver uma programação via Python e Microsoft Visual Basic.

Em relação ao modelo numérico, foi utilizado o mesmo dimensional do defeito para todos os casos desse estudo (experimental e nas simulações numéricas), onde o defeito tipo perda de espessura possui 85 mm de largura e 450 mm de comprimento, conforme apresentado na Figura 74.

Figura 74 - Dimensional do defeito de perda de espessura



Todas as variáveis estudadas contemplam três valores: mínimo, máximo e intermediário (média do mínimo e máximo). Para as simulações foram considerados os seguintes valores de tensão de escoamento: 245 MPa para o aço API grau B, 360 MPa para o aço API X52 e 475 MPa para o aço API X65. A partir desses valores foram definidos os limites de tensão admissíveis dos tubos, correspondendo a 0,72 da tensão de escoamento do material (S_y) do tubo (ASME B31.4). Assim, a tensão admissível (S_{adm}) utilizada nas simulações para o cálculo da pressão de operação foi de: 176,4 MPa para o material API grau B, 259,2 MPa para o material X52 e 342 MPa para o material X65.

Para o cálculo das pressões de operação foi utilizada a Equação 1:

$$P_{op} = (S_{adm} * 2 * t) / D \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- P_{op} é a pressão de operação [MPa];

- S_{adm} é a tensão admissível [MPa];
- t é a espessura do tubo [mm];
- D é o diâmetro Externo do tubo [mm].

A pressão máxima de reparo ($P_{repMáx}$) para que a região do defeito não ultrapasse a tensão máxima permitida do material foi calculada usando a Equação 2 e a Equação 3. A pressão mínima de reparo considera 6.25% da pressão máxima.

$$P_{repMáx} = \{P_{op} \ P_{yRem} ; P_{op} < P_{yRem} \ P_{yRem} < P_{op} \} \quad \text{Equação 2}$$

$$P_{yRem} = (S_y * t_{rem} * 2) / D \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- P_{op} é a pressão de operação [MPa];
- P_{yRem} é pressão limite para que não ocorra o escoamento do material na região com perda de espessura;
- S_y é a tensão de escoamento do material [MPa];
- t_{rem} é a espessura remanescente no defeito [mm];
- D é o diâmetro externo do tubo [mm].

A força máxima de reparo (F_{Max}) para cada caso foi calculada com base nos resultados dos tubos íntegros através da Equação 4. A força mínima considera 50% da força máxima.

$$F_{Max} = \frac{S_{adm}}{259,2} * \frac{t}{7,14} * 500 \ [kN] \quad \text{Equação 4}$$

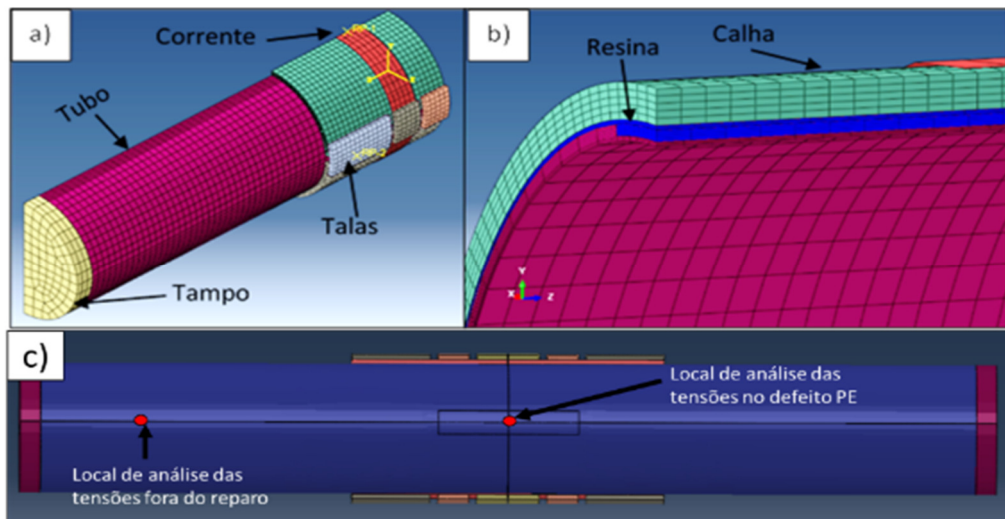
Onde:

- S_{adm} é a tensão admissível [MPa];
- t é a espessura do tubo [mm];

A Figura 75 apresenta o modelo numérico desenvolvido para o tubo com 18 polegadas de diâmetro, 7,14 mm de espessura de parede, com perda de espessura de 70% e comprimento de 2,5m. Nas imagens (a) e (b) da Figura 75 estão identificados os componentes do modelo e é possível visualizar a malha criada para cada um deles. Além das restrições de contato utilizadas, também, para tubos íntegros (conforme apresentado na seção 5.3), foi adicionado um contato de “Tie” entre a resina com a calha.

Os elementos sólidos foram analisados com os materiais indicados na Tabela 7 com exceção da resina de preenchimento do defeito, onde foi adotado 44 MPa para o Módulo de Young, ademais para todo o modelo do reparo considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3.

Figura 75 - Modelo numérico com $\frac{1}{4}$ de simetria do (a), zoom na região de perda de espessura (b) e locais de medição das tensões circunferenciais.



O modelo numérico, assim como o desenvolvido para os tubos íntegros, representa $\frac{1}{4}$ do tamanho real da amostra experimental e possui condições de contorno de simetria transversal e longitudinal (conforme Figura 71).

Ainda na Figura 75, a imagem (b) destaca o preenchimento do espaço do defeito da perda de espessura pela resina, representada em azul, que foi modelada de maneira que preenchesse todo o volume do defeito. Por fim a imagem (c) da Figura 75 apresenta o modelo 3D com a aplicação do recurso de visualização da simetria, e nele estão identificados os dois pontos de medição dos dados de deformação e de tensão circunferencial (pontos correspondem ao ponto SG_CC e SG_EXT nos ensaios experimentais).

Ao final das simulações, foram coletados os dados referentes às tensões circunferenciais na região do defeito, quando o tubo reparado é colocado em serviço em sua máxima pressão de operação permitida (conforme a Equação 1). Esse valor foi comparado com a tensão circunferencial na região fora do reparo, e um valor adimensional de eficiência foi calculado.

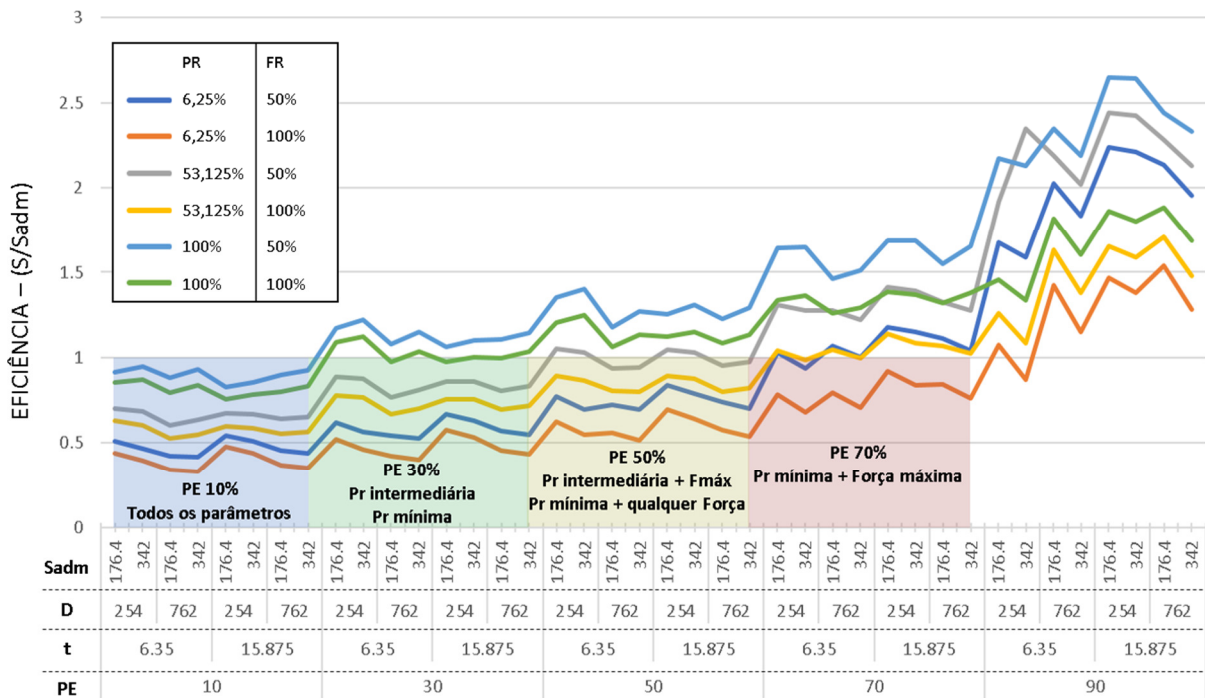
Lembrando que a eficiência do reparo, nesse estudo, é calculada pela divisão da tensão no defeito pela tensão na região íntegra do tubo, e para que seja considerado um reparo válido para os critérios estabelecidos nesse estudo, esse valor deve ser igual ou menor que 1,00. Definindo o limite da relação das tensões em 1,00, garante que o reparo seja capaz de devolver a integridade estrutural da região com defeito a níveis de tensão iguais ou menores que na região não danificada.

A eficiência do reparo calculada numericamente foi avaliada para os parâmetros da Tabela 7, podendo ser visto no gráfico da Figura 76.

Deste modo, conforme a Figura 76, quando o tubo reparado é submetido à pressão de operação, a tensão na região do defeito fica menor que na região externa (reparo que satsfez os objetivos desse estudo, ou seja, Eficiência do reparo $(S/S_{adm}) \leq 1$) nas seguintes condições:

- Quando a perda de espessura é 10%, qualquer parâmetro de reparo foi efetivo;
- Quando a perda de espessura é 30% qualquer tubo reparado com pressão mínima (6,25% da pressão de operação) e intermediária (53% da pressão de operação) foram efetivos;
- Quando a perda de espessura é de 50%, tubos reparados com pressão mínima com qualquer força e tubos reparados com pressão intermediária, mas apenas nos casos com força máxima foram efetivos;
- Quando a perda de espessura é de 70%, apenas tubos reparados com pressão mínima e força máxima foram efetivos;
- Quando a perda de espessura é de 90%, praticamente todos os casos tiveram tensão superior a externa.

Figura 76 - Eficiência do reparo para defeitos do tipo perda de espessura. Variáveis: Diâmetro (D), espessura (t), tensão admissível do material (Sadm), porcentagem de perda de espessura (PE), pressão de reparo (PR) e força de reparo (FR).

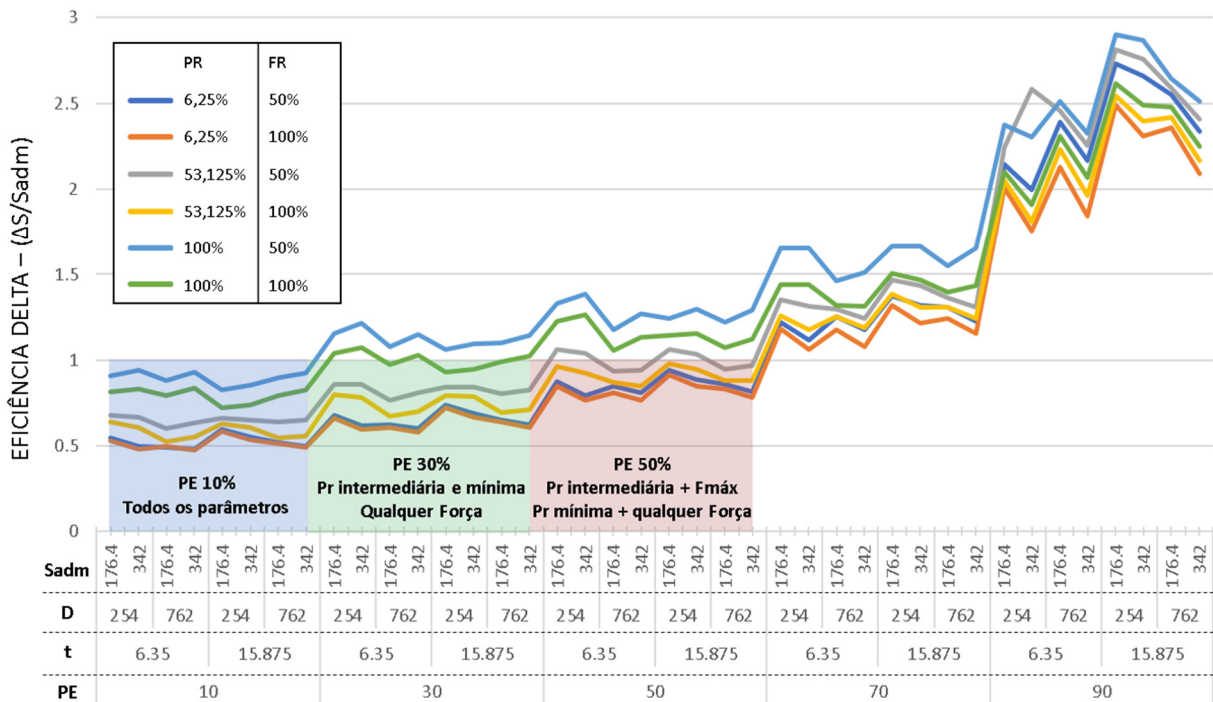


Além disso, foi avaliada a Tensão Delta, variação da tensão entre estado sem pressão e quando em pressão de operação, podendo ser visto no gráfico da Figura 77. A eficiência da Tensão Delta pode ser calculada como a variação de pressão na região do defeito após o reparo dividida pela variação da tensão externa ao reparo.

Os casos em que a eficiência delta foi menor que 1:

- Quando a perda de espessura é 10%, qualquer parâmetro de reparo foi efetivo;
- Quando a perda de espessura é 30% qualquer tubo reparado com pressão mínima (6,25% da pressão de operação) e intermediária (53% da pressão de operação) foram efetivos;
- Quando a perda de espessura é 50%, tubos reparados com pressão mínima com qualquer força e tubos reparados com pressão intermediária, mas apenas nos casos com força máxima foram efetivos;
- Quando a perda de espessura é 70% ou mais, todos os casos tiveram tensão Delta superior a externa.

Figura 77 - Eficiência Delta do reparo para defeitos do tipo perda de espessura. Variáveis: Diâmetro (D), espessura (t), tensão admissível do material (Sadm), % perda de espessura (PE), pressão de reparo (PR) e força de reparo (FR).



5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES DOS TUBOS COM PERDA DE ESPESSURA

Em paralelo a isso, a influência dos parâmetros na eficiência foi avaliada também por um método estatístico, o Box-Behnken Design. Este método utiliza o limite superior, o limite inferior e o ponto médio de cada parâmetro. Os limites utilizados na análise podem ser vistos na Tabela 8.

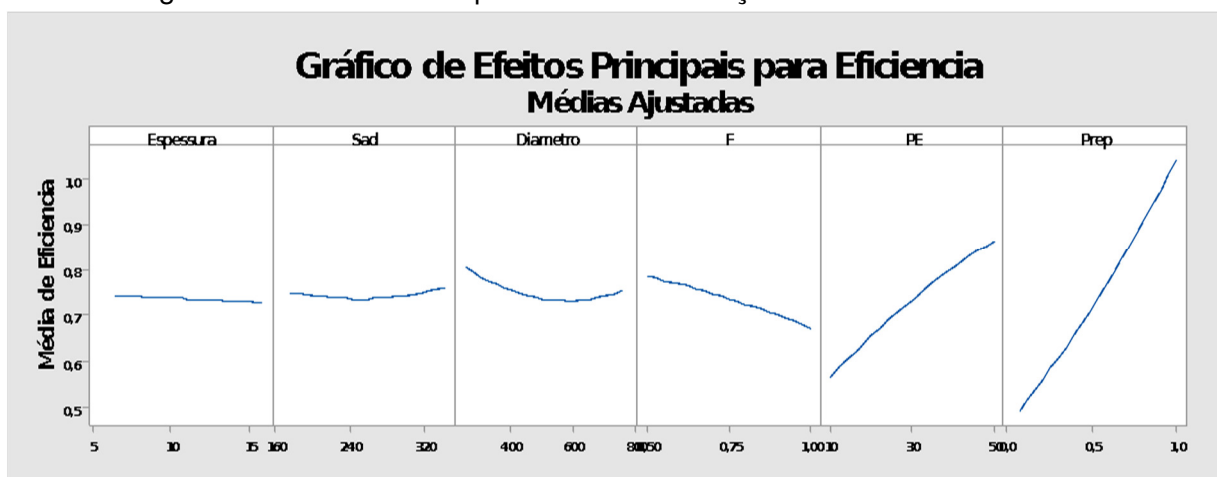
A força e a pressão de reparo foram normalizadas de acordo com as equações apresentadas na seção 5.4. Perdas de espessura superiores a 50% apresentaram muita dispersão e foram excluídas desta análise. Foram utilizadas 54 respostas de eficiência, em combinações variadas dos valores dos parâmetros.

Tabela 8 - Limites dos parâmetros utilizados no estudo estatístico

	Diâmetro do Tubo [mm]	Espessura do Tubo [mm]	Tensão Admissível [Mpa]	Força de Aperto	Pressão de Reparo	Perda de espessura
Limite Inferior	254	6,35	176	0,5	0,0625	10%
Ponto Médio	508	11,125	259	0,75	0,53125	30%
Limite Superior	762	15,875	342	1	1	50%

O resultado da influência dos parâmetros no valor médio da eficiência está apresentado na Figura 78. Pode-se observar que a espessura e a tensão admissível (Sad) apresentam influência negligenciável na eficiência (valores praticamente constantes). Isso se deve às equações, que determinaram a força e pressão de reparo com base nessas variáveis. O diâmetro, apesar de também ser considerado nas equações, ainda apresenta alguma influência. A força, a PE e a Prep apresentam as maiores influências, sendo a Prep o fator mais crítico.

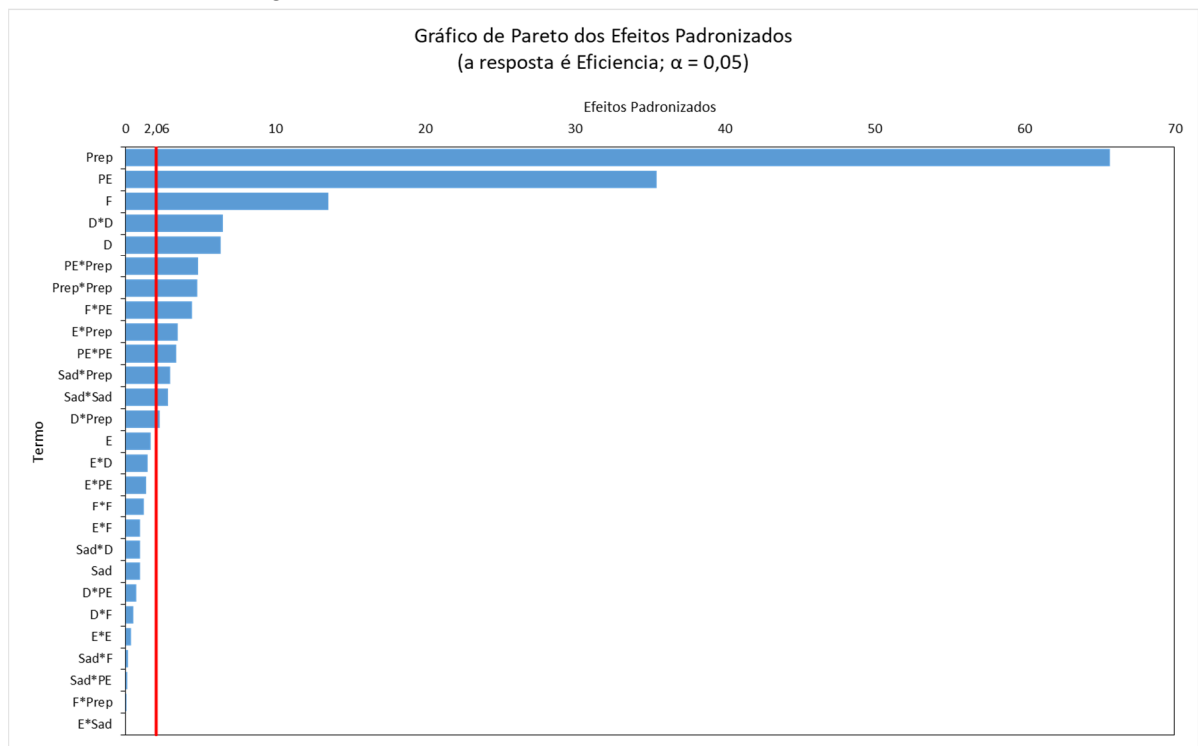
Figura 78 - Influência dos parâmetros na variação da média da eficiência.



Outra forma de observar a influência dos parâmetros é através do gráfico de Pareto (Figura 79), que compara o grau de influência de cada parâmetro e de suas correlações, sendo usado para determinar a magnitude e a importância dos efeitos. O

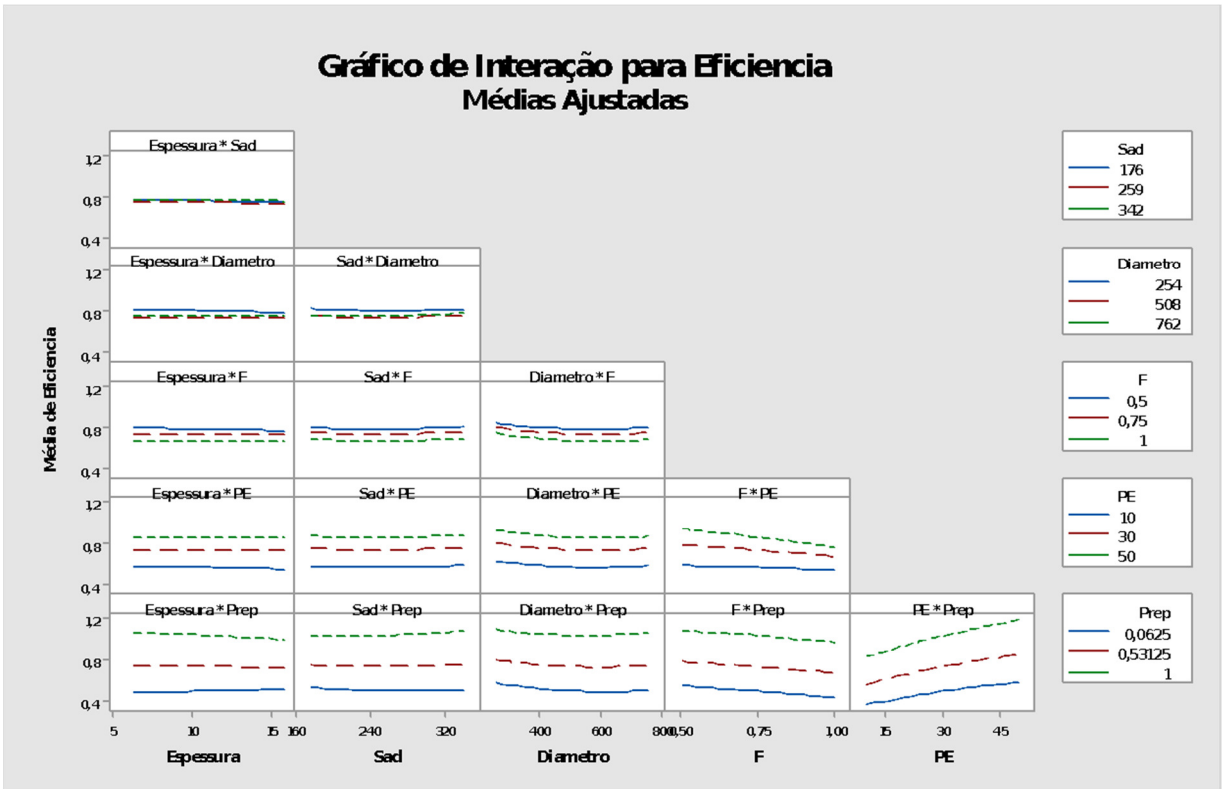
gráfico também representa graficamente a linha de referência (linha vermelha) para indicar que os efeitos são estatisticamente significativos. Utilizando os critérios do gráfico de Pareto pode-se novamente inferir a baixa significância estatística da espessura, da Tensão Admissível (Sad) e a magnitude da influência da Prep, PE e força.

Figura 79 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados



A variação da eficiência em função das interações das variáveis pode ser observada na Figura 80, sendo influenciada duas formas: A primeira no afastamento entre as curvas em função da variação de um dos parâmetros, ou seja, ao manter o valor de um parâmetro fixo e alterar o outro, haverá alteração na eficiência; A segunda na inclinação das curvas, onde uma mesma curva sofre alteração na eficiência ao variarmos o parâmetro representado no eixo horizontal. Novamente pode ser constatado maior influência das interações referentes aos parâmetros Prep, PE e Força.

Figura 80 - Influência das interações entre os parâmetros na variação da média da eficiência



5.6 FERRAMENTA DE CONSULTA DE EFICIÊNCIA PARA APLICAÇÃO DO REPARO DE DULPA CALHA, TIPO A

Com os resultados de 1.845 simulações numéricas, realizadas para diferentes tamanhos de tubos, materiais e criticidade do defeito, foi desenvolvido uma ferramenta que permite o operador de manutenção dessas vias, anteriormente a aplicação desse método de reparo em dutos com o defeito tipo perda de espessura externa (PE), consultar essa planilha para definir o melhor parâmetro de reparo a ser aplicado para cada caso pontual.

A partir dos dados de entrada referentes ao duto e a criticidade do defeito, a planilha fornece os parâmetros de força de aperto e pressão interna da linha (no momento do reparo) ideais para reduzir as tensões circunferenciais trativas na região do defeito. A planilha calcula os parâmetros ideais para que as tensões na região do defeito fiquem no mesmo patamar das tensões na região íntegra do tubo, considerando a pressão de operação máxima da linha.

O uso dessa ferramenta de consulta é válido para tubos de 10 até 30 polegadas de diâmetro, com espessuras de 6,35 até 15,875 mm, e com PE de até 90% da parede do tubo (esses limites estão descritos na área 3 da Figura 81), considerando ainda um fator de projeto de 0,72 da tensão de escoamento do material (S_y), conforme ASME B31.4 (2019).

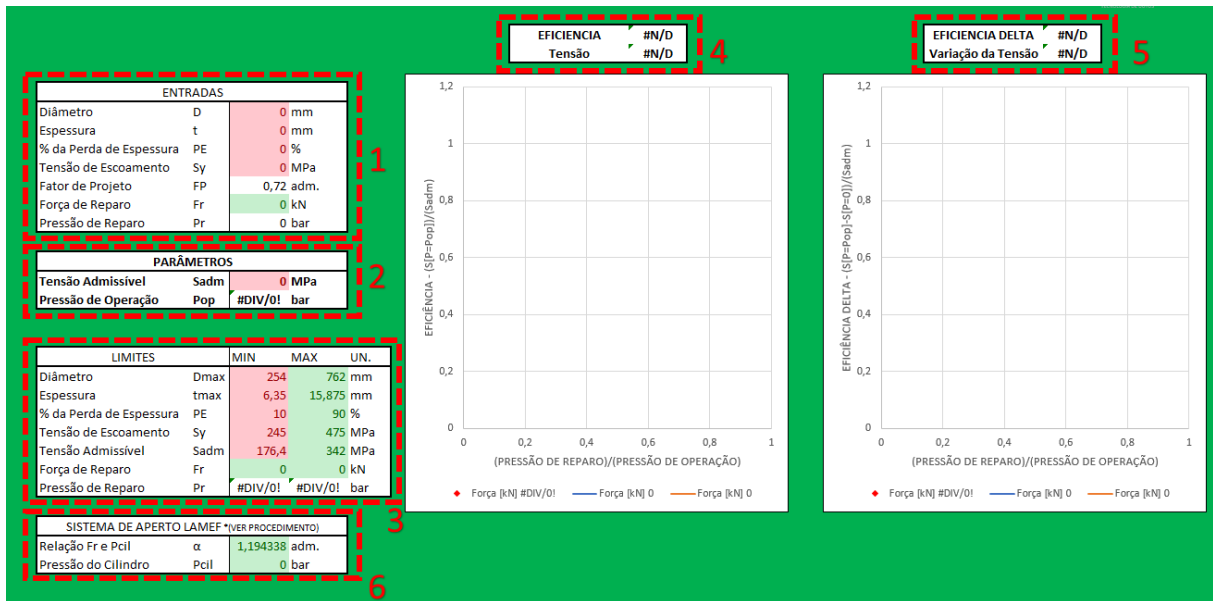
As eficiências dos reparos são calculadas pela planilha de consulta, dividindo a tensão do defeito pela tensão na região íntegra do tubo. Para que seja considerado um reparo válido para os critérios estabelecidos nesse estudo, o valor deve ser igual ou menor que 1,00.

Obs.: Perda de espessuras acima de 50% da parede do tubo podem resultar em reparos menos eficientes, ou seja, no local do defeito pode apresentar valores de tensões maiores que na região íntegra do tubo. Por isso, para severidades a partir de 50%, recomenda-se analisar os valores das tensões resultantes informadas pela planilha e fazer uma avaliação mais criteriosa da aplicação do reparo.

Exemplo:

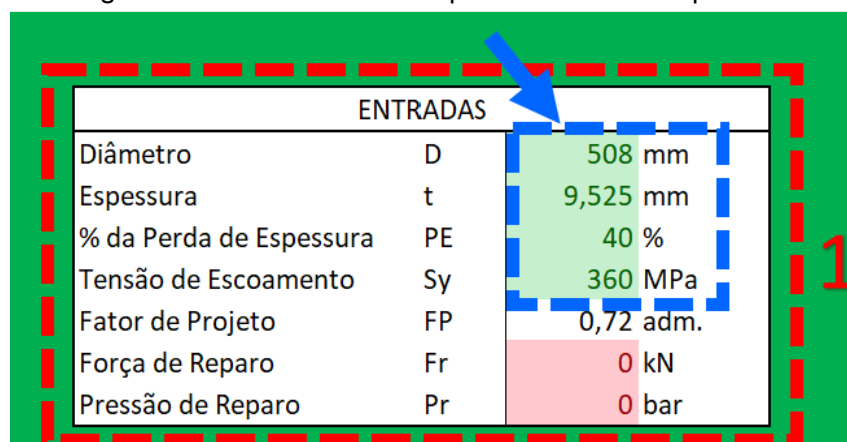
A Interface da planilha é apresentada na Figura 81, onde estão destacados, dentro das caixas vermelhas, as 6 áreas da ferramenta de consulta.

Figura 81 - Interface da planilha de definição de parâmetros de reparo



Na área 1, devem ser inseridos os dados de geométricos do tubo e do defeito: diâmetro do duto (em milímetros), espessura do duto (em milímetros) e o percentual de perda de espessura (% que compromete a espessura original). Além disso, deve-se informar o valor de tensão de escoamento do material (em Mega Pascal), conforme o exemplo da Figura 82. Após o preenchimento da área 1, a planilha fornecerá os valores os de tensão admissível e pressão de operação máxima do tubo íntegro na região da área 2. Os valores são calculados a partir do fator de projeto definido na área 1.

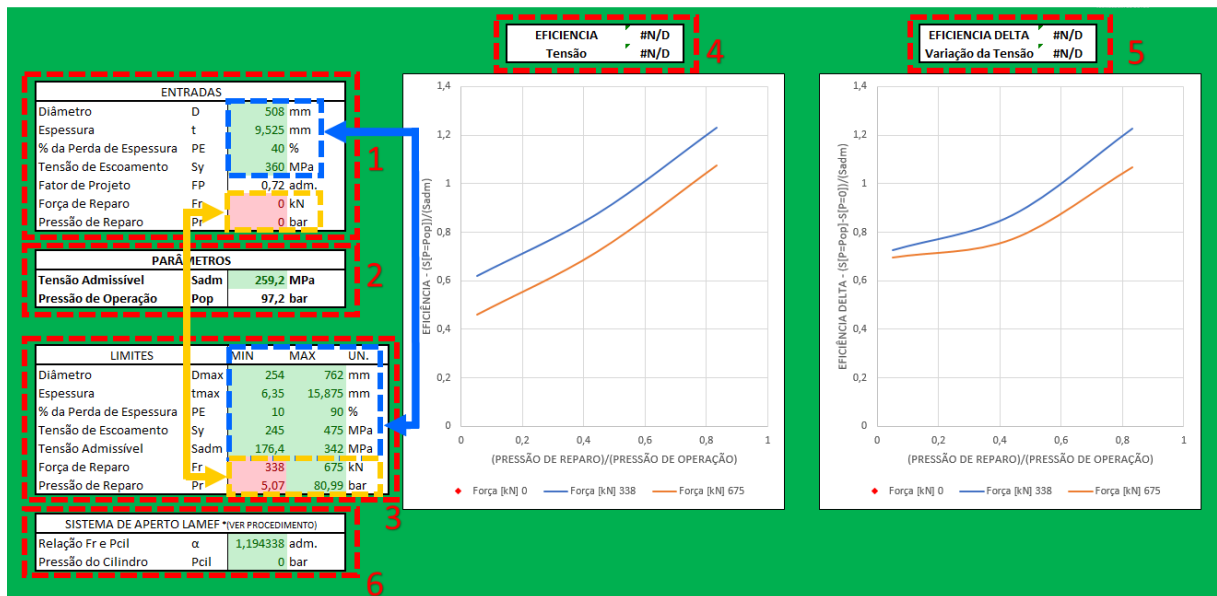
Figura 82 - Dados iniciais de preenchimento na planilha



A área 3 da planilha apresenta os limites que contemplam a análise desse reparo, e ao preencher esses campos iniciais a região 3 da planilha fica verde nos

campos correspondentes, observar a Figura 83, pois os valores estão dentro dos limites. Como a Força de Reparo (Fr) e a pressão de Reparo (Pr) ainda não foram preenchidas e estão zeradas, a região 3 continua destacando esses campos em vermelho até que os campos correspondentes a elas sejam preenchidos na área 1, e que seus valores estejam dentro dos limites indicados na área 3 (Fr entre 338 e 675 kN e Pr entre 5,07 e 80,99 bar).

Figura 83- Resultados após o preenchimento dos dados iniciais de na planilha

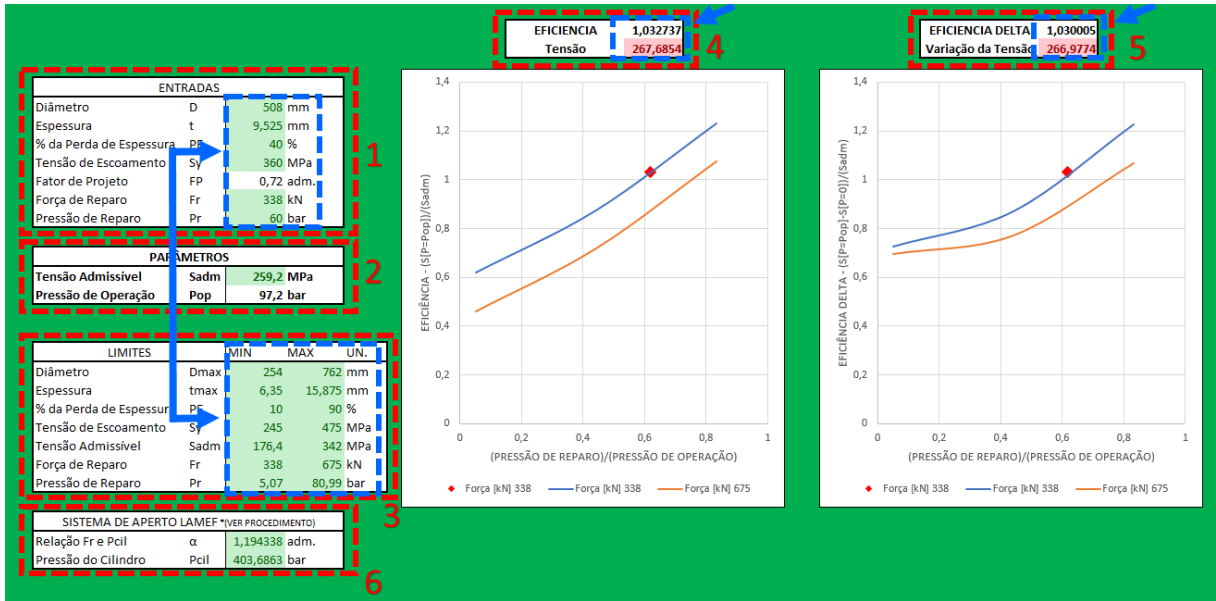


Assim que preenchido todos os campos de entrada na área 1, as células dessa região e da área 3 ficarão verdes, se os valores inseridos estiverem dentro dos limites da ferramenta, e as regiões 4 e 5 vão fornecer como resultado o valor de tensão máxima circunferencial trativa no defeito e o valor da variação total das tensões (Delta). Além disso, nas regiões 4 e 5 também mostram o fator de eficiência do reparo com os valores de força de aperto e pressão de reparo definidos na área 1, conforme indicado na Figura 84.

Nota-se na Figura 84 que as células que apontam tensão (área 4 e 5) ficaram destacadas em vermelho, pois os valores de eficiência ficaram acima do limite definido em 1,00.

Para obter um valor de Eficiência que atenda os critérios de validade desse método de reparo, pode-se variar os parâmetros de entrada de Força de aperto e Pressão de reparo, na área 1.

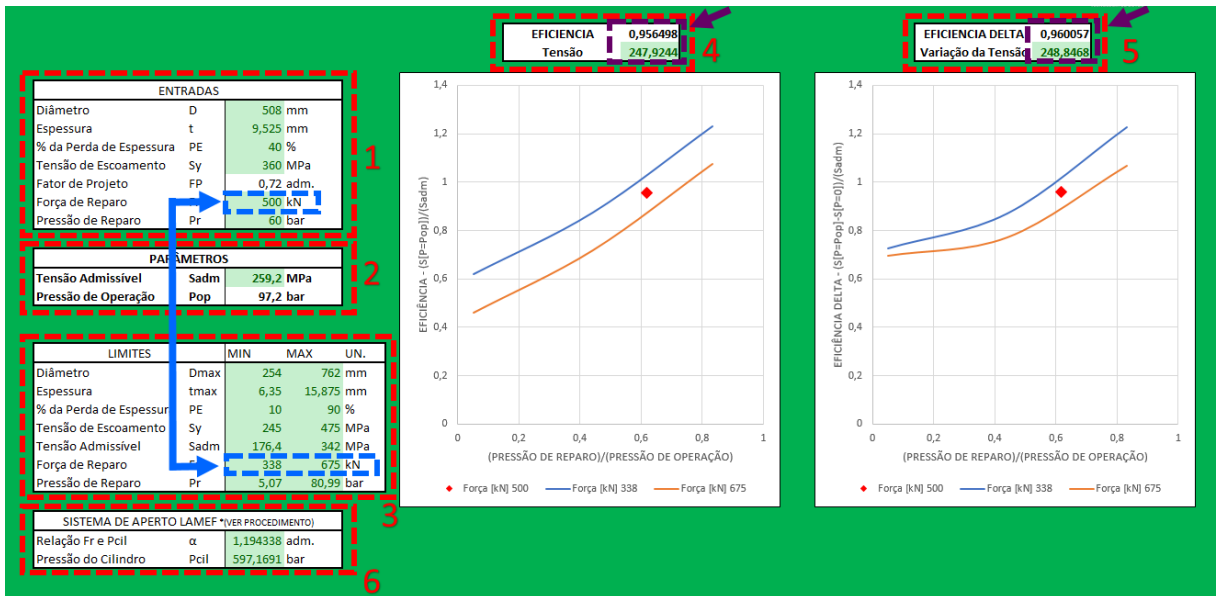
Figura 84 - Resultado com o preenchimento de todos os campos de entrada na área 1



Para esse exemplo, foi mantida a Pressão de Reparo inserida inicialmente e aumentado o valor de Força de Aperto (na área 1). Importante lembrar que o novo valor deve estar dentro dos limites descritos pela área 3.

Considerando o aumento da Força de aperto para 500 kN, os novos valores de Eficiência ficaram abaixo de 1,00 (verdes), como mostrado na Figura 85.

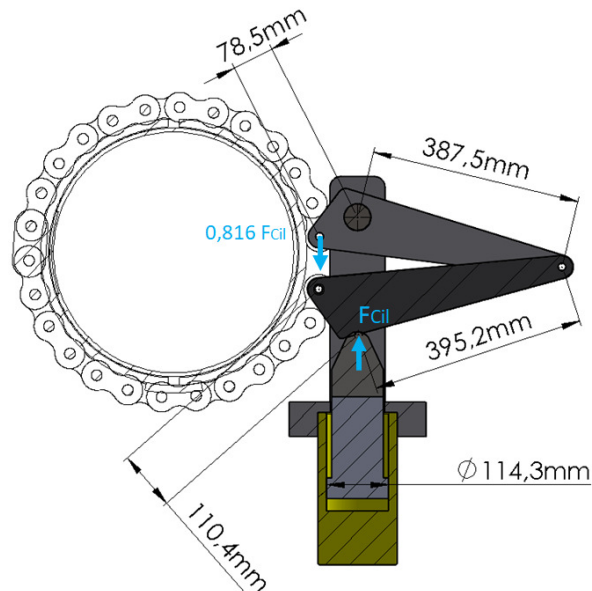
Figura 85 - Resultado com o preenchimento de todos os campos de entrada na área 1 e Eficiência dentro do limite



Para a reprodução do parâmetro de força no dispositivo de aperto das calhas, a planilha de cálculo fornece na área 6 a conversão do valor de força de aperto para pressão interna dos cilindros do dispositivo (P_{cil}). O valor de força é convertido para pressão em bar e corresponde a pressão que deve ser utilizada no dispositivo, qualquer outro dispositivo de aperto que tenha dimensional diferente do dispositivo fornecido, deve ter o cálculo de conversão revisto.

A P_{cil} sugerida na planilha de consulta está vinculada ao dispositivo de aperto cujo as relações geométricas estão apresentadas na Figura 86.

Figura 86 - Relações Geométricas do Dispositivo de Aperto do LAMEF



Quando todos campos da ferramenta de consulta estão sinalizados em verde, indica que as combinações dos parâmetros de reparo informados pelo consultante, na área 1, resultam em um reparo eficiente.

6 CONCLUSÕES

A presente análise desenvolveu a aplicação de um método de reparo por dupla calha tipo A, conforme (PRCI, 2008), em dutos com defeitos do tipo perda de espessura. Para isso, foi necessário desenvolver um procedimento de reparo o qual garantisse a aplicação de tensões circunferenciais compressivas na região do defeito, de forma eficiente e com repetibilidade. Para tal, foram realizados ensaios experimentais e desenvolvido modelos numéricos, possibilitando a avaliação da influência dos parâmetros de reparo (força de aperto e pressão interna do tubo) sobre as tensões circunferenciais na região do defeito, onde foram avaliados diversos tamanhos de tubos e criticidades do dano. Os resultados obtidos mostram uma excelente efetividade na redução das tensões na região do reparo e, a partir dos resultados obtidos nas análises é possível concluir que:

- A eficiência do reparo é diretamente proporcional à força de aperto e inversamente proporcional a pressão interna da linha no momento do reparo. A análise estatística mostrou que o fator mais importante nessa influencia é a pressão da linha no momento do reparo, a severidade do dano e a força aplicada nas correntes;
- A aplicação de resina em toda interface entre calha e tubo é fundamental para que o reparo seja efetivo. A resina tem a função de corrigir imperfeições geométricas, distribuindo os esforços entre calhas e tubo. Se for aplicada em comprimento menor, pode gerar pontos de concentração de tensões acima do permitido;
- Para testes hidrostáticos, o reparo por dupla calha tipo A foi efetivo em todas as amostras com perda de espessura pois o reparo devolveu o limite de pressão de ruptura original dos componentes;
- O método desenvolvido calcula a eficiência do reparo em tubos com defeito tipo perda de espessura abrangendo dimensões de diâmetro entre 10 e 30 polegadas, espessura entre 6,35 e 15,875 mm, perda de espessura entre 10% e 90% e materiais com tensão de escoamento entre 245 e 475 MPa, permitindo ao operador a seleção do melhor parâmetro de reparo para cada combinação;

- Tubos com perda de espessura de até 50% podem ser reparados recuperando a integridade da linha original, caso sejam selecionados os parâmetros de reparo adequados. A variação de tensão na região reparada pode ficar igual ou menor que no duto íntegro;
- O reparo em tubos com perda de espessura maior que 50% diminui a variação de tensão no defeito (quando comparado com o tubo com defeito não reparado). Entretanto, a variação da tensão continua sendo maior do que no duto íntegro;
- A geometria das calhas e das talas tem muita influência sobre a eficiência do reparo devendo, ambos, acompanharem a curvatura da amostra, para que não gerem concentradores de tensão.

É importante salientar que o procedimento desenvolvido, seguiu as orientações do Pipeline Repair Manual (PRCI, 2008), que ainda especifica que a redução da pressão de reparo deve considerar as condições locais do dano (L52047 - PR-186-0324 PRCI Manual de reparação de condutas).

Assim, o método de reparo tipo A se mostrou eficiente na recuperação da integridade estrutural de tubos danificados, e pode ser incorporado pelo setor de petróleo como um método de reparo disponível para esse tipo de defeito. O desenvolvimento do procedimento de aplicação do reparo detalhado na seção 4.1.2, permite às empresas replicarem os reparos realizados e, conseqüentemente, os resultados obtidos. Os resultados desse estudo podem trazer maior confiabilidade na aplicação do reparo tipo A e, junto, a redução dos custos relacionados a manutenção, uma vez que esse método não necessita a parada onerosa de produção para substituição de trechos danificados.

7 TRABALHOS FUTUROS

O modelo de reparo analisado conta com o acoplamento de duas calhas bipartidas que envolvem a região defeituosa do duto, sendo então aplicada uma força de tensão compressiva circunferencial sobre as calhas, que são unidas e mantidas através da soldagem de talas de fixação. Uma análise desse método pode ser estudada sem a aplicação das talas de fixação e sim com solda tipo topo para unir as calhas, ambos os estudos ainda com a aplicação de solda apenas sobre as calhas e não sobre o duto.

Conforme mencionado anteriormente, o defeito de redução de espessura de parede causada pelo processo corrosivo é o modo de falha mais comum detectado nas manutenções do sistema. Esse trabalho tem como objetivo principal recompor integralmente a resistência mecânica do duto nas regiões com danos do tipo perda de espessura na parede externa, através do reparo da área danificada pelo método de Reparo por Dupla Calha, tipo A. Assim, outra questão importante que poderá ser abordada é a aplicação do método aqui desenvolvido, para defeitos do tipo perdas de espessura interna das amostras.

Também sabendo que, após observar esse estudo, os sistemas de transporte por dutos operam geralmente em ambientes hostis e mesmo que a construção dessas dutovias sigam normas internacionais e frequentes inspeções, esse modal de transporte é constantemente ameaçado por defeitos que ocorrem inevitavelmente durante sua vida útil em serviço, ficando susceptíveis a danificações de diferentes naturezas, até mesmo por processos de ordem natural, como os defeitos por corrosão. Portanto, fica aqui sugerido que uma proposta futura vise avaliar o benefício em recobrir a área de reparo com revestimentos protetores, para evitar que água fique acumulada nos vãos da região reparada.

REFERÊNCIAS

- ANHUI HENG SHENG GROUP. **Pipe quick repair clamp**. [S. l.], 2022. Available at: http://en.ahhengsheng.com/product_er.php?class_id=102. Acesso em: 21 mar. 2022.
- ANTT, A. N. de T. T. **Dutovias**. [S. l.], 2022. Available at: <https://portal.antt.gov.br/dutovias>. Acesso em: 1 abr. 2022.
- CRUZ, A. SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA PARA PREVISÃO DA PRESSÃO DE FALHA DE DUTOS CORROÍDOS COM REPARO POR MATERIAL COMPÓSITO SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA E CARREGAMENTO TÉRMICO. **Ayaç**, [s. l.], v. 1, n. 5, p. 76, 2019.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2006.
- BENJAMIN, A. **Avaliação Estrutural de Dutos Corroídos: Notas de Aulas**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.
- BENJAMIN, A. C. et al. BURST TESTS ON PIPELINE CONTAINING INTERACTING CORROSION DEFECTS. **24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, [s. l.], n. Halkidiki, p. 15, 2005. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1049.4946&rep=rep1&type=pdf>
- BORING, M.; PORTER, N.; LAMORTE, C. R. Advanced Welding Repair And Remediation Methods For In-Service Pipelines. [s. l.], p. 1–288, 2007. Available at: <https://primis.phmsa.dot.gov/matrix/FilDown.rdm?fil=2968&s=4D9300043B9F4D62808FEE4E31343165>
- EGIG. **Gas pipeline incidents**. [S. l.], 2019.
- EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A, EPL. Iniciativa Abastece Brasil para a Malha Dutoviária no Brasil. [s. l.], 2019. Available at: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/abastece-brasil/resolucao-cnpe-no-12-2019/contribuicoes-dos-interessados/logum/reuniao-abastece-brasil-livre-concorrencia-2019-08.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2022.
- FREIRE, JOSE LUIZ DE FRANÇA. **Engenharia de Dutos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2009.
- GONG, C.; ZHOU, W. Importance sampling-based system reliability analysis of corroding pipelines considering multiple failure modes. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 169, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.08.023>
- GUIMARÃES, A. **Avaliação Simplificada da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos**. Curitiba: [s. n.], 2005.
- JPNL. **SECTIONAL REPLACEMENT OF 12” PIPELINE AT EVWRENI DELIVERY LINE TO UPS**. [S. l.], 2022. Available at: <https://jerry piping.com/>. Acesso em: 21 mar. 2022.
- KOCH, Gerhardus H. Historic congressional study: corrosion costs and preventive

strategies in the united states, 2002. p. 3.

MÁS, R.; PINTO, J. A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes. **Optimization and Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 1–2, p. 23–64, 2003. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1021808313306>

MME. **MME viabiliza investimentos da ordem de R\$ 110 milhões em dutovias para a movimentação de combustíveis**. [S. l.], 2021. Available at: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-viabiliza-investimentos-da-ordem-de-r-110-milhoes-em-dutovias-para-a-movimentacao-de-combustiveis>. Acesso em: 24 set. 2021.

MOSQUEN, A. et al. **Finite Element Analysis of Repair Technique on In-Service Pipeline with Dent**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2013.

NAHAL, M.; CHATEAUNEUF, A.; SAHRAOUI, Y. Reliability analysis of irregular zones in pipelines under both effects of corrosion and residual stress. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 98, p. 177–188, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.01.081>

OTEGUI, J. L. *et al.* Influence of multiple sleeve repairs on the structural integrity of gas pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 79, n. 11, p. 759–765, 2002. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00063-7)

PALMER-JONES ANDREW PALMER, R.; PAISLEY, D. 4 th International Pipeline Rehabilitation and Maintenance Conference. [s. l.], 2000.

PETROBRAS. **Gasoduto Brasil-Bolívia: Trecho Sul**. [S. l.], 2020. Available at: <https://petrobras.com.br/pt/busca/#?cludoquery=trecho-sul&cludopage=1&cludorefurl=https%3A%2F%2Fpetrobras.com.br%2Fpt%2F&cludorefpt=Página Inicial %7C Petrobras&cludoinputtype=standard>. Acesso em: 24 set. 2021.

PETROBRAS. N-2737 Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre. [s. l.], p. 19, 2014a.

PETROBRAS. **Petrobras Distribuidora assina contrato para transporte dutoviário de etanol**. [S. l.], 2014b. Available at: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-distribuidora-assina-contrato-para-transporte-dutoviario-de-etanol.htm>. Acesso em: 24 set. 2021.

PIPELINE TECHNOLOGY JOURNAL. **Corrosão em dutos externos**. [S. l.], 2016. Available at: <https://www.pipeline-journal.net/news/phmsa-says-external-pipeline-corrosion-fault-last-springs-santa-barbara-oil-spill>. Acesso em: 20 out. 2021.

PRCI. Pipeline Repair Manual. [s. l.], 2008.

RAJABIPOUR, A.; MELCHERS, R. E. A numerical study of damage caused by combined pitting corrosion and axial stress in steel pipes. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 76, p. 292–301, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2013.07.002>

ROOSTER FABRICATION. **Pipeline Construction & Repair**. [S. l.], 2022. Available at: <https://roosterfab.com/oilfield-services/pipeline-construction-repair/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

SKPS. **COMPOSITE ENGINEERING SERVICES**. [S. l.], 2022. Available at: <https://skps.com/our-services/composite-engineering-services/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

TORRES, A. S. G. Soldagem de reparo em dutos de transporte pressurizados e em operação. [s. l.], 2016. Available at: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BDXFM5/1/ayrontorres_monografia_final.pdf

TRANSPETRO. **Roubo de Combustíveis**. [S. l.], 2021. Available at: https://www.roubonosdutos.com.br/?gclid=CjwKCAjwqvyFBhB7EiwAER786bjNCww7Sx0yZ8SXtDsaA1gjVPfe4Z3wdbPmZglfJ0I4r3Mw4M2BPRoC0JoQAvD_BwE. Acesso em: 24 set. 2021.

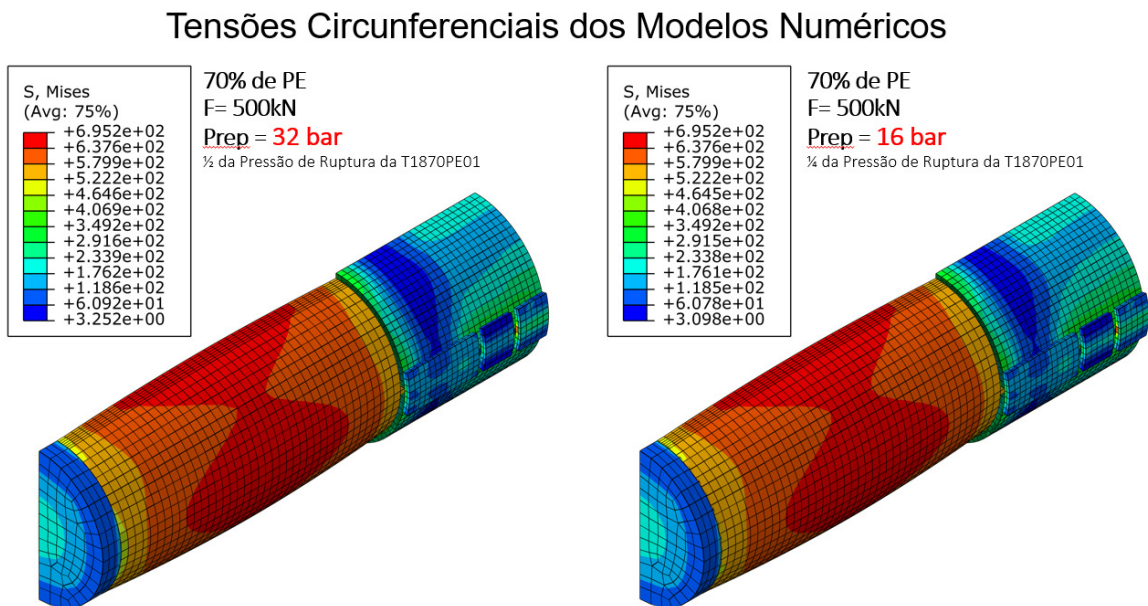
ZHOU, W. System reliability of corroding pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 87, n. 10, p. 587–595, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.IJPVP.2010.07.011>

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REPARO DOS TUBOS DE 18 POLEGADAS E COM O DEFEITO TIPO PERDA DE ESPESSURA

Para a definição dos parâmetros de reparo a serem aplicados, foi utilizado o modelo numérico de reparo de um tubo com as mesmas características do corpo de prova T1870PE01 (tubo de aço API 5L X65, com diâmetro nominal de 18 polegadas, espessura de 7,14 mm e comprimento de 2.500 mm e espessura das calhas com duas vezes a espessura do tubo) com 70% de severidade do dano, porém reparado.

Essa simulação foi avaliada para os valores de pressão interna durante o reparo iguais a 32 bar e 16 bar (Figura 87), relativos aos valores de $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da pressão de ruptura do tubo T1870PE01 (64 bar, conforme Figura 59 - Ensaio hidrostático de explosão - T1870PE01 – Sem Reparo).

Figura 87 - Tensões circunferenciais no modelo numérico com pressão interna durante o reparo de 32 bar e 16 bar

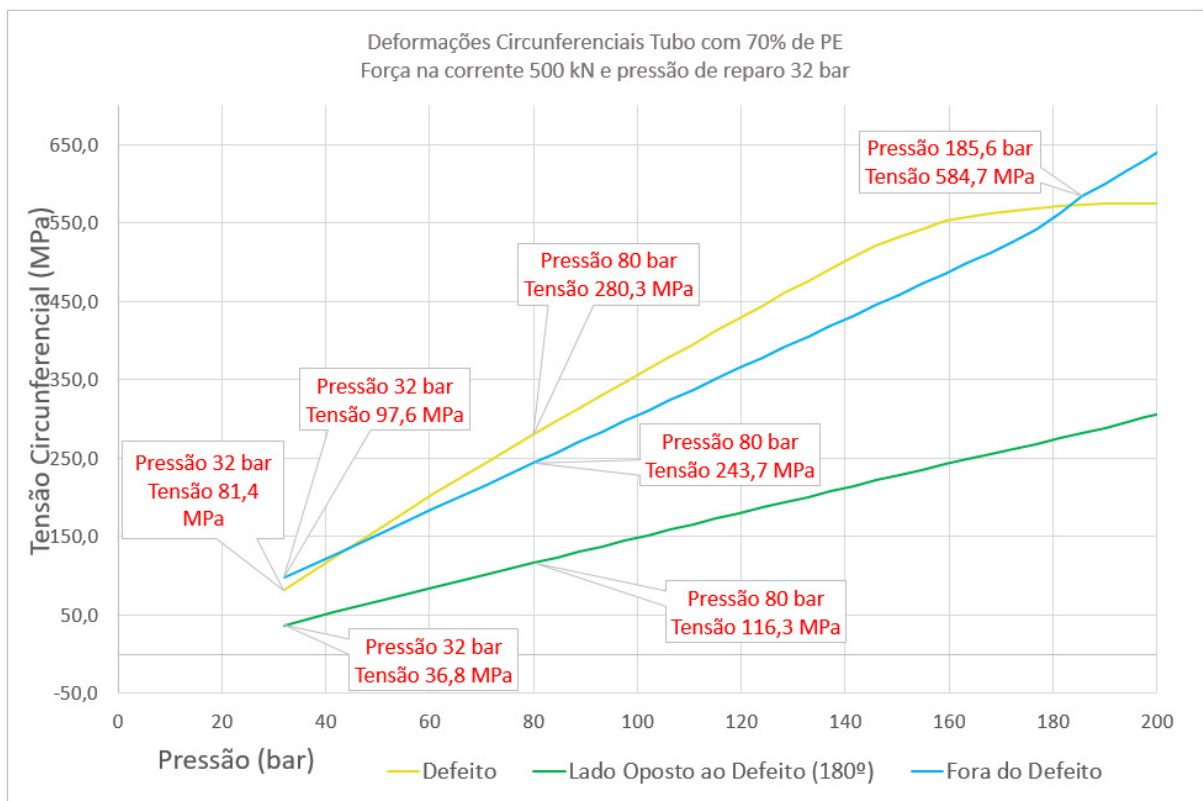


A avaliação dos resultados foi feita a partir das análises das tensões circunferenciais, obtidas em 3 locais diferentes: defeito, lado oposto ao defeito (defasagem de 180°) e fora do defeito; ilustrados na Figura 47 - Regiões de aquisição de dados durante os reparos) e o critério de aceitação do parâmetro simulado foi o de menor valor da tensão circunferencial na região do defeito quando o tubo reparado estivesse na pressão de operação (80 bar). Ou seja, quando a tensão circunferencial

da região do reparo foi menor que à tensão circunferencial do duto íntegro na Pop (parte externa ao reparo, região sem a presença do defeito).

A Figura 88 apresenta o gráfico das tensões circunferenciais pela variação da pressão interna de um tubo com 70% de PE, reparado nas condições de 32 bar de pressão interna durante o reparo e 500 kN de força de aperto.

Figura 88 - Gráfico da tensão circunferencial pela pressão interna de um tubo reparado nas condições de 32 bar de pressão interna e 500 kN de força de aperto.



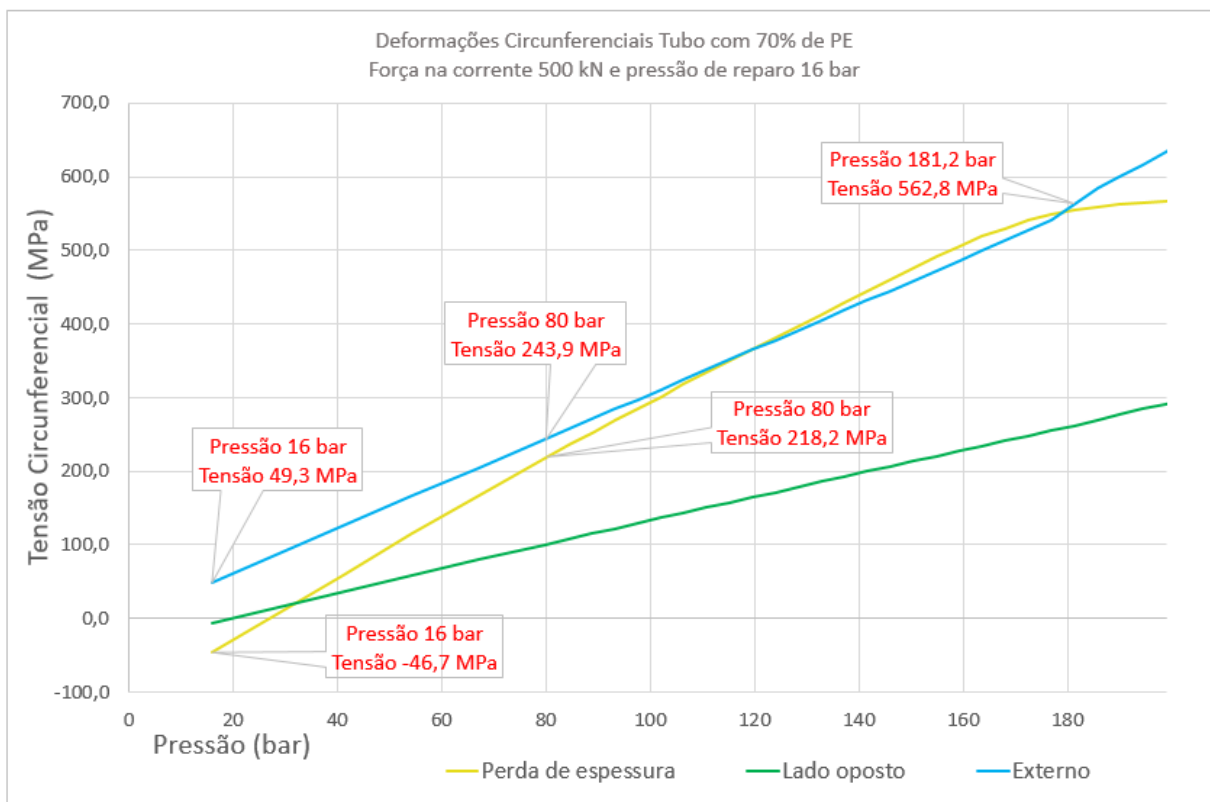
Analisando cada uma das 3 curvas, é possível identificar que cada uma das regiões tem sua tensão circunferencial aumentada a uma taxa diferente da outra. O gráfico inicia em 32 bar e, nesse ponto, no centro do defeito há uma tensão igual a 81,4 MPa, no lado oposto a tensão é de 36,8 MPa e na região fora do defeito a tensão é igual a 97,6 MPa. Porém, a partir de 40 bar as curvas que representam a região medida no defeito (curva amarela) e fora do defeito (curva azul) se cruzam e a partir disso os valores de tensão para a região externa são menores que na região com defeito. De frente a isso, na pressão de operação do tubo (80 bar) a região do defeito registra uma tensão maior do que a região fora do defeito de 280,3 MPa e 243,7 MPa, respectivamente. Nesse momento a região oposta ao defeito apresenta uma tensão

de 116,3 MPa. As curvas do defeito e fora do defeito voltam a se cruzar em aproximadamente 186 bar, onde logo após é registrada uma tensão de 584,7 MPa na região fora do defeito, o que mostra a tendência de falha dessa região em um ensaio hidrostático.

Portanto, o parâmetro de reparo com 500 kN de força de aperto e 32 bar de pressão interna foi descartado perante o critério proposto, uma vez que em 80 bar a região do defeito apresenta uma tensão maior do que a região fora do defeito.

Entretanto, para a condição de reparo com $\frac{1}{4}$ da pressão de ruptura do tubo sem reparo (16 bar), apresentado na Figura 89, foi possível obter um valor de tensão circunferencial na região de defeito menor que a tensão na região íntegra do tubo na pressão de operação.

Figura 89 - Gráfico de tensão circunferencial pela pressão interna de um tubo reparado nas condições de 16 bar de pressão interna e 500 kN de força de aperto.



Observando a Figura 89 na pressão de operação (pressão interna no tubo de 80 bar), nota-se que a tensão na região do defeito ficou em torno de 218,2 MPa enquanto que fora da região do defeito a tensão foi de 243,85 Mpa. Além disso, analisando as curvas, é possível verificar que somente a partir da pressão de 120 bar é que as tensões no defeito passam a ser mais altas que as tensões na região íntegra

do tubo. As mesmas curvas voltam a se cruzar em 180 bar onde a tensão fora do defeito é igual a aproximadamente 562,8 MPa.

Assim, a partir dos resultados da simulação do tubo com 70% de perda de espessura, ficou definido que, por segurança, os ensaios experimentais dos reparos dos tubos seriam realizados com $\frac{1}{4}$ da pressão de ruptura e força de aperto de 500 kN (correspondente à 600 bar nos cilindros). Essa condição foi utilizada tanto nos tubos com 70% e 90% de PE.