



Jonathan Strefling Aguiar

**Avaliação de Reparos Compósitos na Restauração da
Integridade Estrutural de Dutos com Corrosão Externa**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-
Rio.

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro
Outubro de 2021



Jonathan Strefling Aguiar

**Avaliação de Reparos Compósitos na Restauração da
Integridade Estrutural de Dutos com Corrosão Externa**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-
Rio. Aprovada pela comissão examinadora:

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Vitor Eboli Lopes Paiva

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Giancarlo Luis Gómez Gonzáles

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de Outubro de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Jonathan Strefling Aguiar

Engenheiro Mecânico formado na Universidade Federal Fluminense - UFF, 2016.

Ficha Catalográfica

Aguiar, Jonathan Strefling

Avaliação de reparos compósitos na restauração da integridade estrutural de dutos com corrosão externa / Jonathan Strefling Aguiar ; orientador: José Luiz de França Freire. – 2021.

266 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Dutos. 3. Corrosão. 4. Reparo. 5. Compósitos. 6. Ruptura. I. Freire, José Luiz de França. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao longo da minha vida muitas pessoas me ajudaram a atingir meus objetivos e com esse trabalho não foi diferente, o que me deixa muito grato a várias pessoas e instituições que tornaram esse trabalho possível. Portanto, os próximos parágrafos são dedicados a reconhecer essas pessoas.

Em primeiro lugar, sou muito grato à Deus, que provavelmente foi a força motriz principal para o alcance deste resultado e por ter me proporcionado saúde, oportunidade de estudo e o encontro com as pessoas importantes em minha vida.

Agradeço também a toda a minha família, em especial a Mônica, Ricardo e Natasha, por sempre acreditarem em mim, dando-me não só exemplos de vida como também todo suporte emocional, motivacional e material, sempre que necessário.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. José Luiz de França Freire, pelo apoio, tendo paciência para me ajudar a entender os assuntos relacionados a este trabalho, ajudando-me a resolver ao máximo diversos problemas que surgiram ao longo do caminho e oferecendo-me a oportunidade de trabalhar com a pesquisa já em desenvolvimento junto com a Petrobrás.

Este trabalho também é fruto de todos os Professores e associados da PUC-Rio e da UFF que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial o Sr. Jorge Coutinho Diniz, o Dr. Vitor Eboli e o Dr. Giancarlo Gomez Gonzales, pelos conhecimentos passados, pela paciência com meu aprendizado e pelo suporte na pesquisa.

Agradeço também à Sra. Ana Lúcia Fampa Seabra d'Almeida e ao Prof. Ronaldo Domingues, pelo trabalho e sinergia com o desenvolvimento do artigo, juntamente com meu orientador.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos, incluindo ao Luiz César pela companhia e participação motivacional, ao Pedro Domingues por todo o suporte quando precisei e à Larissa Domingues pelo incentivo e apoio inicial à realização deste desafio.

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

Resumo

Aguiar, Jonathan Strefling; Freire, José Luiz de França (Orientador). **Avaliação de Reparos Compósitos na Restauração da Integridade Estrutural de Dutos com Corrosão Externa**. Rio de Janeiro, 2021. 266p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta evidências e visa confirmar as tendências gerais de que reparos feitos de materiais compósitos podem ser utilizados para restaurar completamente a integridade estrutural, desconsiderando efeitos de tempo, de segmentos de dutos que apresentam anomalias (defeitos) de perda de metal em sua superfície externa, causados por corrosão ou erosão. Sete espécimes tubulares de API 5L Gr. B e dez espécimes tubulares de API 5L X65 foram testados até a ruptura por meio de testes hidrostáticos monotônicos, com diâmetro externo nominal de 323,9 mm e espessura nominal de 8,38 mm. Duas amostras testadas não tinham defeitos. Seis espécimes apresentavam defeitos e não foram reparados. Nove espécimes apresentavam defeitos e foram reparados usando três sistemas de reparo de compósito diferentes. Os defeitos continham profundidades variando entre 40%, 55% e 70% da espessura do tubo. Os reparos foram baseados em compósitos de epóxi e fibra de carbono, epóxi e fibra de vidro, e poliuretano e fibra de vidro. (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019)

Para a constatação dos resultados experimentais foram implementadas metodologias analíticas e numéricas. O método analítico utiliza equações normativas semiempíricas (ISO 24817) e da teoria de reparos para dutos (Equação de Equilíbrio). A avaliação numérica consiste no método de elementos finitos para modelagem do problema através do software ANSYS®.

Os sistemas de reparo dos três fornecedores mostraram ser eficazes e que reparos de compósitos podem restaurar completamente a integridade estrutural de dutos com defeito externo, desconsiderando efeitos de tempo, conforme o Fator de Resistência Remanescente (RSF) calculado. Os resultados dos testes mostraram que métodos analíticos e numéricos podem ser usados para compreensão do comportamento mecânico do problema.

Palavras-chave

Dutos; Corrosão; Reparo; Compósitos; Ruptura; Simulação numérica.

Abstract

Aguiar, Jonathan Strefling; Freire, José Luiz de França (Advisor). **Evaluation of Composite Repairs in the Restoration of Structural Integrity of Pipelines with External Corrosion.** Rio de Janeiro, 2021. 266p. Master's Dissertation – Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The present work presents evidence and aims to confirm general trends that repairs made of composite materials can be used to completely restore the structural integrity, disregarding the effects of aging, of pipeline segments that show anomalies (defects) in metal loss on their external surface, as a result by corrosion or erosion. Seven tubular specimens of API 5L Gr. B and ten tubular specimens of API 5L X65 were tested to rupture using monotonic hydrostatic tests, with a nominal external diameter of 323.9 mm and a nominal thickness of 8.38 mm. Two samples tested had no defects. Six specimens were defective and were not repaired. Nine specimens were defective and were repaired using three different composite repair systems. The defects contained depths ranging from 40%, 55% and 70% of the tube thickness. The repair systems were based on composites of epoxy and carbon fiber, epoxy and fiberglass, and polyurethane and fiberglass. (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019)

To verify the experimental results, analytical and numerical methodologies were implemented. The analytical method uses semi-empirical normative equations (ISO 24817 and ASME PCC-2) and repair theory for pipelines (Equilibrium Equation). Numerical evaluation consists of the finite element method for modeling the problem using ANSYS® software.

The repair systems of the three suppliers proved to be effective according to the Remaining Resistance Factor (RSF) calculated, disregarding the effect of aging. The test results showed that analytical and numerical methods can be used to understand the mechanical behavior of the problem and that composite repairs can

completely restore the structural integrity of pipelines with a loss in external wall thickness, avoiding production downtime and reducing the risk of accidents.

Keywords

Pipeline; Corrosion; Repair; Composites; Burst; Numerical simulation.

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Motivações	22
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Revisão Bibliográfica	25
1.3. Organização da Dissertação	26
2 Integridade Estrutural de Dutos	28
2.1. Projeto de Dutos	28
2.2. Corrosão em Dutos e Avaliação de Defeitos	31
2.3. Critérios de Aceitação de Componentes Estruturais	33
2.3.1. Tensão Admissível	33
2.3.2. Diagrama para Avaliação de Falha (<i>FAD</i> - sigla em inglês)	34
2.3.3. Fator de Resistência Remanescente (<i>RSF</i> – sigla em inglês)	34
3 Reparação de Dutos Corroídos através de Material Compósito	36
3.1. Materiais Compósitos	36
3.1.1. Definição, Classificação e Características principais	36
3.2. Reparos de Compósitos para Dutos Corroídos	38
4 Metodologia da Pesquisa – Abordagem Experimental	49
4.1. Projeto e dimensionamento dos espécimes tubulares	52
4.2. Levantamento dimensional dos espécimes	53
4.3. Aplicação do reparo nos espécimes tubulares	56
4.3.1. Reparo do fornecedor 1 (fibra de vidro)	61
4.3.2. Reparo do fornecedor 2 (fibra de vidro)	61
4.3.3. Reparo do fornecedor 3 (fibra de carbono)	62
4.4. Propriedades mecânicas dos materiais compósitos	63
4.4.1. Ensaio de Shearografia	64
4.5. Propriedade mecânica dos aços	65
4.6. Ensaio de Ruptura (Teste Hidrostático)	67
4.6.1. Dutos sem reparo	68

4.6.2. Dutos com reparo	70
5 Metodologia da Pesquisa – Abordagem Analítica	72
5.1. Dados geométricos	72
5.2. Propriedades mecânicas	72
5.3. Dutos corroídos e sem reparo	77
5.4. Dutos reparados	78
5.5. Estimativa da espessura necessária dos reparos	89
6 Metodologia da Pesquisa - Abordagem numérica	91
6.1. Considerações sobre não-linearidades	91
6.2. Considerações sobre propriedades geométricas e propriedades dos materiais	93
6.3. Escolha dos elementos e do contato	97
6.4. Construção do Modelo e Discretização	103
6.4.1. Elaboração da geometria	104
6.4.2. Simplificações pela simetria	105
6.4.3. Imposição das condições de contorno e considerações sobre a configuração de análise	108
6.4.4. Estudo de convergência de Malha	114
7 Resultados e Discussões	118
7.1. Resultados Experimentais	118
7.1.1. Dutos sem reparo	118
7.1.2. Dutos com reparo	122
7.2. Resultados Analíticos	130
7.2.1. Espécimes tubulares sem reparo	130
7.2.2. Espécimes tubulares com reparo	135
7.2.3. Resultado das estimativas de espessura requerida para os reparos	142
7.3. Resultados Numéricos	146
7.3.1. Dutos sem reparo	146
7.3.2. Dutos com reparo	153
7.3.3. Comparações entre métodos	166

8 Conclusão	171
9 Referências Bibliográficas	174
Apêndice I – Resultados Experimentais	178
Apêndice II – Resultados Analíticos	221
Apêndice III – Resultados Numéricos	225
Apêndice IV – Tensões, deformações e critérios de falha aplicados a dutos	261

Lista de Figuras

Figura 1 - Imagem ilustrando a malha de gasodutos das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Fonte: (CBIE, 2019).	21
Figura 2 - Avaliação de defeitos de corrosão externa em duto. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 31).	32
Figura 3 - Classificação dos compósitos quanto a geometria da fase de reforço. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 7).	38
Figura 4 - Duto com defeito corrosivo externo e reparado com camadas de material compósito. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 42).	40
Figura 5 - Curva tensão-deformação bilinear exemplificando o comportamento do material metálico sob elasticidade isotrópica seguida do encruamento (endurecimento) isotrópico linear após o ponto que seria o limite de escoamento.	41
Figura 6 - Espécimes tubulares confeccionados para os testes de ruptura (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	51
Figura 7 - Características dos espécimes tubulares. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	52
Figura 8 - Pontos de medição de diâmetro e posição do rebaixo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	54
Figura 9 - Pontos de medição de comprimento, largura e raios de adoçamento do rebaixo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	54
Figura 10 - Pontos de medição para espessura do tubo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	55
Figura 11 - Medição da espessura ao redor e no fundo dos rebaixos. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	55
Figura 12 - Detalhe do bocal de pressurização do espécime e da válvula de manutenção da pressão. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019, p. 33).	58
Figura 13 - Pontos de instalação dos sensores no metal (figura superior) e das camadas do reparo (figura inferior). Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	59

Figura 14 - Exemplo do diagrama tensão e deformação, obtido na direção das fibras a partir do ensaio de tração nos materiais compósitos dos fornecedores 1, 2 e 3 respectivamente. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	63
Figura 15 - Sistema de shearografia usado pela UFSC. Ensaio realizado no CTDUT. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	64
Figura 16 - Imagens obtidas pelo ensaio de shearografia em dois espécimes reparados. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).	65
Figura 17 - Figura exemplificando um diagrama tensão e deformação típico obtido para a estimativa dos limites de (a) escoamento e (b) ruptura do Gr. B.	66
Figura 18 - Figura exemplificando um diagrama tensão e deformação típico obtido do aço X65 para a estimativa das propriedades.	66
Figura 19 - Exemplo de variação da pressão imposta e do volume de água injetado durante o teste nos espécimes X65 sem reparo (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019, p. 94).	69
Figura 20 - Exemplo do campo de deformações obtidas pelo DIC para o ET04.	70
Figura 21 - Ciclos de carregamento até a pressão de operação, gráfico de pressão interna x tempo.	71
Figura 22 - Carregamento sob pressão de operação por cerca de 1 hora, gráfico de pressão interna x tempo.	71
Figura 23 - Pressão interna e volume de água injetado no espécime com reparo ensaiado à ruptura.	71
Figura 24 - Exemplo de curva tensão-deformação bilinear para o aço, construída a partir da sua curva de engenharia retirada de seu ensaio de tração.	75
Figura 25 - Equilíbrio de forças do sistema duto/reparo/adeseivo de enchimento.	80
Figura 26 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o tubo com defeito sem reparo ao longo do processo de pressurização.	82
Figura 27 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o tubo sem defeito ao longo do processo de pressurização.	83
Figura 28 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o reparo ao longo do processo de pressurização.	84
Figura 29 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o adeseivo de enchimento ao longo do processo de pressurização.	85
Figura 30 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o duto reparado ao longo do processo de pressurização.	86

Figura 31 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para todos os casos citados, permitindo assim a comparação.	88
Figura 32 - Curvas tensão-deformação bi-lineares implementadas no ANSYS® para os aços Gr. B e X65.	95
Figura 33 - Elemento SOLID187. Fonte: https://bit.ly/2V1tB2A . Acesso em: 30/08/2021.	97
Figura 34 - Elemento SOLID186. Fonte: https://bit.ly/2WCyhfN . Acesso em: 30/08/2021.	98
Figura 35 - Contato tipo "bonded". Fonte: https://www.mechhead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/ (modificado). Acesso em: 30/08/2021.	99
Figura 36 – Condição de contato aplicada entre o duto e o reparo.	100
Figura 37 - Na esquerda, as imagens mostram a condição de contato aplicada entre o reparo e o adesivo de enchimento. Nas imagens da direita, a condição de contato aplicada entre o duto e o adesivo de enchimento.	101
Figura 38 - Elemento CONTA174 utilizado para o contato entre os componentes. Fonte: https://bit.ly/38uK1ne . Acesso em: 30/08/2021.	102
Figura 39 - Elemento TARGE170 utilizado para as superfícies “alvo” de contato. Fonte: https://bit.ly/38wuWS6 . Acesso em: 30/08/2021.	103
Figura 40 - Modelo geométrico construído para o ET12, mostrando o sistema duto/reparo/adesivo de enchimento.	104
Figura 41 - Modelo geométrico construído para o ET12 ilustrando o duto sem reparo. Em detalhe o rebaixo na imagem à direita.	104
Figura 42 - Modelo geométrico construído para o ET12 ilustrando o reparo (imagem à esquerda) e o adesivo de enchimento (imagem à direita).	105
Figura 43 - Exemplo do modelo geométrico dos espécimes, mostrando os planos de simetria normais aos eixos cartesianos x e z.	106
Figura 44 - Exemplo das faces, em amarelo (onde ocorreu o corte), onde foi aplicada a condição de simetria perpendicularmente ao eixo cartesiano x.	107
Figura 45 - Exemplo das faces, em amarelo (onde ocorreu o corte), onde foi aplicada a condição de simetria perpendicularmente ao eixo z.	107
Figura 46 - Configuração de análise dos modelos.	108
Figura 47 - Exemplo do método LB aplicado. A figura mostra um exemplo para os resultados de tensão normal, na direção do eixo circunferencial no duto de aço X65, resultando na tensão de resistência do material de 652,3 MPa atingida pela primeira	

vez na análise no instante 8,6119 s, correspondendo à pressão interna de aproximadamente 17,2 MPa.....	110
Figura 48 - Exemplo do método UB aplicado. A figura mostra um exemplo para os resultados de tensão normal, na direção do eixo circunferencial no duto de aço X65 resultando na tensão mínima do material de 652,3 MPa atingida ao longo da espessura na região crítica no instante 9,6933 s, correspondendo à pressão interna de aproximadamente 19,4 MPa.	111
Figura 49 - Exemplo de aplicação da condição de pressão nas extremidades do duto, de forma a representar os tampos soldados.	112
Figura 50 - Exemplo das aplicações das condições de contorno do problema. Nas imagens, as faces vermelhas com as setas indicam as pressões interna e do tampo, e as faces amarelas indicam as simetrias já explicadas.	113
Figura 51 - Exemplo da configuração de malha para o ET01, a qual foi padronizada para todos os espécimes sem rebaixo (tamanho do elemento geral: 15mm).....	115
Figura 52 - Exemplo da configuração de malha para o ET10, a qual foi padronizada para todos os espécimes com rebaixo (tamanho do elemento geral: 10mm; tamanho do elemento das proximidades do rebaixo: 2,5mm).....	116
Figura 53 - Exemplo da configuração de malha para o reparo e o material de enchimento do ET12, padronizados para todos os outros espécimes com reparo (tamanho do elemento do reparo: 6mm; tamanho do elemento do enchimento: 1mm).....	117
Figura 54 - Testes de ruptura nos tubos sem reparo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).....	120
Figura 55 - Deformações medidas por extensometria óptica em tubos X65 e Gr. B sem reparo.....	121
Figura 56 - Deformações medidas por DIC em tubos X65 (valores medidos antes da ruptura dos espécimes).....	122
Figura 57 - Locais onde a ruptura pode ocorrer nos testes de pressão dos dutos reparados.....	123
Figura 58 - Gráfico com os resultados experimentais para o RSF.	124
Figura 59 - Testes de ruptura nos tubos sem reparo. Fonte: relatório do projeto. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).....	125

Figura 60 - ET12: Gráficos resultantes dos 10 ciclos de pressão, da pressurização sob 1 hora na pressão de projeto e do posterior teste de ruptura (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).....	129
Figura 61 - Gráficos de comparação entre os valores de RSF analíticos obtidos para cada espécime e os valores os mesmos experimentais.	132
Figura 62 - Gráficos ilustrando a comparação entre os valores de pressão de ruptura analíticos obtidos para cada espécime e os valores os mesmos experimentais. ..	133
Figura 63 - Gráficos de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental para os ETs sem reparo.....	134
Figura 64 - Gráfico Tensão circunferencial - Pressão interna para o ET12 (Fornecedor 1).	137
Figura 65 - Gráfico dos resultados analítico e experimental para a pressão de ruptura nos ETs com reparo.	138
Figura 66 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental da pressão de ruptura para os ETs com reparo.	139
Figura 67 - Gráfico dos resultados analítico e experimental para o RSF nos ETs com reparo.	140
Figura 68 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental do RSF para os ETs com reparo.	140
Figura 69 - Gráfico de comparação das estimativas para a espessura de reparo de cada método apresentado com as espessuras medidas e projetadas.	144
Figura 70 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados estimados de espessura dos reparos de cada método e as espessuras medidas.	145
Figura 71 - Gráfico de comparação dos resultados de pressão de ruptura obtidos para os ETs sem reparo considerando os métodos LB e UB.....	147
Figura 72 - Gráfico de comparação percentual dos resultados de pressão de ruptura obtidos para os ETs sem reparo considerando os métodos LB e UB.....	148
Figura 73 - Gráfico dos resultados de RSF para os ETs sem reparo considerando os métodos I e II para considerando a avaliação Lower Bond e Upper Bond.	149
Figura 74 - Gráfico de comparação percentual dos resultados de RSF para os ETs sem reparo considerando os métodos I e II para considerando a avaliação Lower Bond e Upper Bond.	149
Figura 75 - Exemplo do ponto de análise imposto no centro dos rebaixos de forma a simular o strain gage e medir as deformações no local.	151

Figura 76 - Gráfico dos resultados obtidos para deformação circunferencial e longitudinal total no centro do rebaixo do ET10.....	153
Figura 77 - Gráfico dos resultados obtidos para a pressão de ruptura numérica dos espécimes com reparo.....	155
Figura 78 - Gráfico de erros percentuais entre os resultados numéricos e experimentais para a pressão de ruptura.....	155
Figura 79 - Gráfico dos resultados obtidos para o RSF dos espécimes com reparo, considerando o Método I e II. Pontos vermelhos representam ruptura numérica no reparo; pontos em verde representam ruptura no duto nominal.	157
Figura 80 - Gráfico de erros percentuais entre os resultados numéricos e experimentais do RSF.....	158
Figura 81 - ET10: vista geral do duto e em detalhe do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método LB.	159
Figura 82 - ET10: vista em detalhe da espessura no centro do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método UB.	160
Figura 83 - ET12: vista geral do duto e em detalhe do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método LB.	160
Figura 84 - ET12: visão geral do reparo e adesivo de enchimento implementados no espécime, considerando o instante de ruptura da análise numérica.	162
Figura 85 - Exemplo da avaliação da espessura do sistema duto/adesivo/reparo referente ao ET12, em detalhe para avaliação das deformações.	164
Figura 86 - Deformações circunferenciais elásticas ao longo da espessura do sistema duto/adesivo/reparo no ET12.	164
Figura 87 - Deformações circunferenciais totais ao longo da espessura do sistema duto/enchimento/reparo no ET12 no instante da ruptura.	165
Figura 88 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura dos espécimes sem defeito.	167
Figura 89 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura e RSF dos espécimes sem reparo.	168
Figura 90 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura e RSF dos espécimes com reparo.	169

Lista de Tabelas

Tabela 1 - 841.114A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).....	30
Tabela 2 - 841.115A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).....	30
Tabela 3 - 841.116A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).....	30
Tabela 4 - Diferentes métodos para a determinação da pressão em dutos com perda de espessuras metálica acentuada na direção longitudinal. (CASTELLANOS, 2014, p. 46).....	33
Tabela 5 - Definições das classes de reparo (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015).....	44
Tabela 6 - Deformações admissíveis para laminados compostos em função da vida útil do projeto de reparo (JOHN STEVEN, FREIRE, <i>et al.</i> , 2014).....	48
Tabela 7 - Relação dos espécimes utilizados e suas aplicações.	50
Tabela 8 - Dimensões nominais dos espécimes com rebaixos (FREIRE, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2019).....	52
Tabela 9 - Características dimensionais dos espécimes tubulares.....	56
Tabela 10 - Características geométricas dos reparos instalados.....	60
Tabela 11 - Principais propriedades mecânicas retiradas dos ensaios de tração nos compósitos utilizados nos reparos.	73
Tabela 12 - Principais propriedades mecânicas retiradas dos ensaios de tração dos aços X65 e Gr. B.	74
Tabela 13 - Tensão e deformação estimados para a proporcionalidade elástica dos aços X65 e Gr. B.	76
Tabela 14 - Propriedades dos aços no ANSYS®.	94
Tabela 15 - Propriedades dos compósitos no ANSYS®.	96
Tabela 16 - Estudo da malha do ET01 (íntegro).	115
Tabela 17 - Estudo da malha do ET12 (rebaixo com 55% de profundidade).	116
Tabela 18 - Estudo da malha para o reparo aplicado no ET12.....	116

Tabela 19 - Resultados experimentais para pressão de ruptura e RSF dos espécimes sem reparo.....	119
Tabela 20 - Resultados experimentais para pressão de ruptura e RSF (efetividade) nos espécimes sem reparo.....	123
Tabela 21 - Deformações medidas durante o teste de pressão de ruptura nos espécimes com reparo.....	130
Tabela 22 - Resultados analíticos para pressão de ruptura e RSF avaliados para cada método normativo no aço X65.	131
Tabela 23 - Resultados analíticos para pressão de ruptura avaliados para cada método normativo no aço Gr. B.	131
Tabela 24 - Resultados analíticos para pressão de ruptura e RSF avaliados para os três métodos utilizados.	136
Tabela 25 - Dados utilizados para as equações de projeto do reparo.	143
Tabela 26 - Espessuras estimadas através dos principais métodos analíticos.	144
Tabela 27 - Resultados numéricos para pressão de ruptura e RSF dos ETs sem reparo, avaliados para os métodos LB e UB.	147
Tabela 28 - Resultados numéricos para o RSF calculado pelo Método II, avaliados para o método LB e UB.	150
Tabela 29 - Resultados numéricos das deformações circunferenciais e longitudinais no centro do rebaixo do ET10.	152
Tabela 30 - Resultados numéricos de pressão de ruptura e RSF para os espécimes reparados.....	154
Tabela 31 - Resultados numéricos do RSF avaliado apenas pelo Método II para os espécimes reparados.	156
Tabela 32 - Erros percentuais entre o RSF numérico e experimental.	157

Lista de Siglas

Nomenclatura

ASTM	American Society for Testing and Materials
CTDUT	Centro de Tecnologia em Dutos
DIC	Digital Image Correlation
DOT	Department of Transportation of United States of America
ET	Espécime Tubular
FAD	Failure Assessment Diagram
LB	Lower Bond
LP	Líquido penetrante
MAOP	Maximum allowable operating pressure
P_d	Pressão de projeto
PM	Partícula magnética
RSF	Remaining Strength Factor
SMUS	Specified Minimum Ultimate Strength
SMYS	Specified Minimum Yield Strenght
S_{flow}	Tensão de escoamento média do material
UB	Upper Bond
L_{DC}	Carga limite ou de colapso plástico da estrutura com defeito
L_{UC}	Carga limite ou de colapso plástico da estrutura sem defeito
ASTM	American Society for Testing and Materials
CTDUT	Centro de Tecnologia em Dutos
DIC	Digital Image Correlation
DOT	Department of Transportation of United States of America
ET	Espécime Tubular
FAD	Failure Assessment Diagram
LB	Lower Bond

1

Introdução

A ascensão da indústria de petróleo, à partir do fim do século XIX, trouxe consigo a motivação de investigar maneiras mais eficazes de transportar produtos resultantes da extração do próprio petróleo e seus derivados, de forma a viabilizar seu deslocamento em grandes quantidades e em longas distâncias com maior segurança, velocidade, eficiência e redução nos riscos de acidentes ambientais (como a diminuição do tráfego de cargas perigosas em transportes terrestres e marítimos).

A solução mais eficaz até hoje encontrada são os dutos, componentes largamente utilizados em diversas indústrias e que se provam bem mais seguros que qualquer outro sistema de transporte de líquidos e/ou gases já conhecido até o momento. Eles estão diretamente ligados a diversas atividades econômicas da sociedade e apresentam enorme importância no cenário industrial, pois sua existência viabiliza inúmeros negócios e possibilita a extração, produção e transporte de diferentes produtos, sejam eles em forma de fluidos, gases ou vapor.

No cenário atual, a malha de gasodutos brasileira completa tem cerca de 45 mil km. Porém temos diferenças nos tipos de dutos. A malha dutoviária para transporte de gás natural é de 9,5 mil km (CBIE, 2019). Vale ressaltar que os dutos são certas vezes classificados pelos produtos que transportam, como por exemplo: gasodutos (gás), oleodutos (petróleo), minerodutos (minério) e até polidutos (diversos produtos).

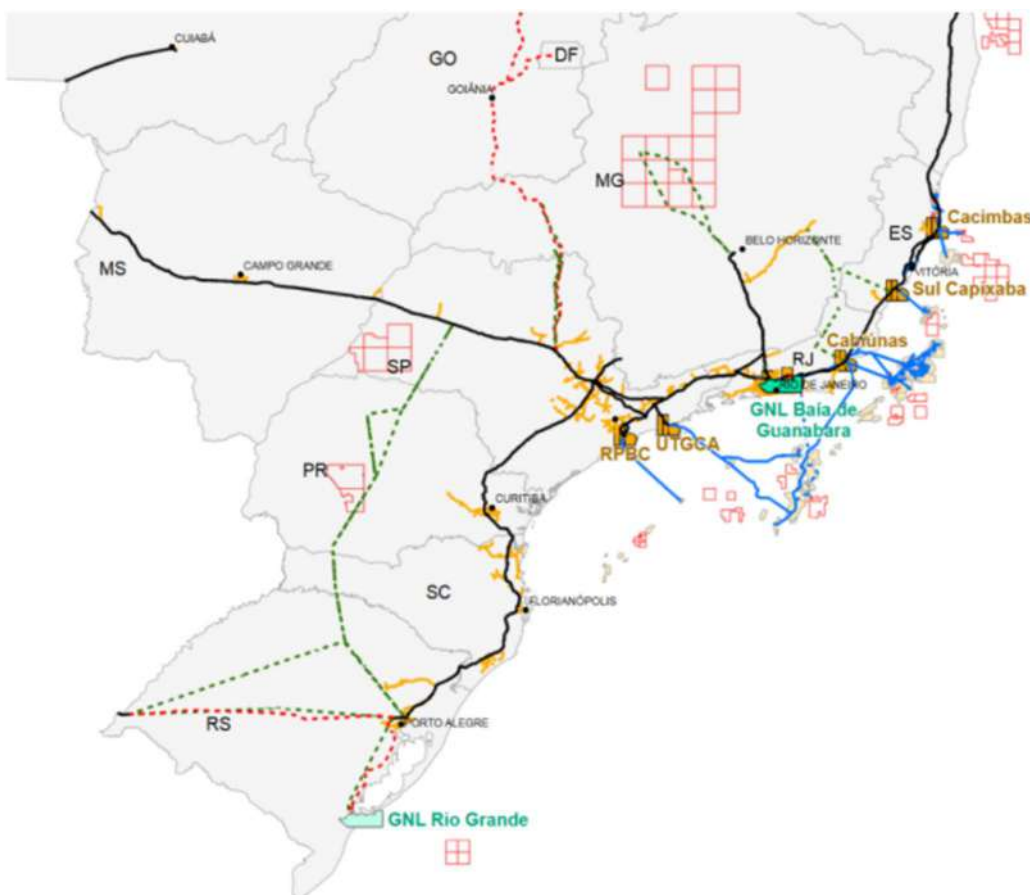


Figura 1 - Imagem ilustrando a malha de gasodutos das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Fonte: (CBIE, 2019).

No que se refere à malha de dutos onshore, isto é, toda linha dutoviária situada ao longo do território nacional, a recorrência de emprego em aplicações industriais é extensa. Os dutos terrestres também estão sujeitos a cargas e ações do meio externo que podem degradar sua integridade estrutural.

Devido às aplicações cada vez mais frequentes, a quantidade de acidentes envolvendo dutos tem aumentado substancialmente ao longo dos anos, podendo haver consequências impactantes ao meio ambiente, como por exemplo a contaminação da água e do solo. Além disso, muitas vezes existem características fortemente explosivas nos produtos transportados nos dutos, o que justifica os intensos esforços que têm sido feitos para a preservação de sua integridade estrutural.

Dito isto, a aplicação do presente estudo é válida para estruturas tubulares simples, com diâmetro externo e interno aproximados e teoricamente constantes ao

longo do comprimento, acarretando razões entre diâmetros e espessuras maior que 20 ($D/t > 20$).

1.1.Motivações

Dados do DOT (Department of Transportation of United States of America)¹, organização americana que compila dados de acidentes envolvendo dutos, mostram que aproximadamente 18% deles foram causados por corrosão entre 1998 e 2017.

“A corrosão constitui cerca de 15% a 30% de todas as falhas nos dutos, sendo a corrosão externa responsável por quase 60% dos casos e as corrosões interna e atmosférica responsável pelo restante das falhas” (FREIRE, RENNÓ, *et al.*, 2009).

Se durante uma inspeção rotineira o duto apresentar anomalias e, após avaliação pertinente, constatar-se que eles podem tornar-se defeitos acarretando uma falha iminente (pela própria corrosão, por exemplo), então o duto deve ser imediatamente reparado a fim de que danos ambientais e prejuízos financeiros sejam evitados. Deve-se averiguar o estado do duto defeituoso e determinar o melhor procedimento a ser seguido, como a substituição do trecho com defeito, a reparação do componente ou alguma estratégia alternativa.

Existem diversas técnicas para reparo de dutos que sofreram defeitos externos do tipo perda de espessura localizada, porém um método que vem ganhando cada vez mais destaque e aplicabilidade na indústria nas últimas décadas é da utilização de reparos feitos com materiais compósitos.

A concepção de materiais novos e com propriedades mais adequadas para cada uso em específico ampliou a possibilidade de aplicação dos compósitos em reparos de dutos defeituosos. Uma dessas técnicas consiste em envolver a região do duto que apresenta o defeito com mantas de material polimérico reforçado por fibras e então realizar o processo de cura, o qual será mais bem detalhado nos capítulos adiante. A outra técnica consiste em envolver essa região do duto com finas camadas de material compósito já curado. Em ambos os casos é importante que o reparo seja instalado de forma que a orientação das fibras do composto se estabeleça na mesma direção da tensão circunferencial, já que esta é a maior e mais relevante tensão a qual a seção transversal do duto deve resistir devido à pressão interna (isto

¹ (DOT, 2018)

é, desconsiderando solicitações externas). Assim, o reforço direcional do compósito é estrategicamente utilizado para incrementar a resistência do duto defeituoso.

Algumas grandes vantagens desse método frente a outras técnicas de reparo é que ele não exige parada de operação, elimina o uso de solda e não requer a confecção de moldes, ocasionando maior segurança e menores tempos e custos de execução.

Pelo fato de haver alta complexidade do comportamento do sistema duto-reparo, a utilização de soluções puramente analíticas para analisar o estado de tensões local se torna complexa de serem resolvidas sem considerações e simplificações substanciais.

Em contrapartida, houve avanços consideráveis nas últimas décadas visando a aplicação de métodos numéricos eficazes na análise de estruturas complexas. O método mais conhecido e utilizado atualmente é chamado de método de elementos finitos. Ele se baseia na subdivisão do domínio (ou seja, da estrutura modelada) em partes menores e interconectadas de alguma forma, a fim de aplicar cálculos numéricos em cada uma dessas partes e obter assim uma solução para o todo. A comparação entre o modelo real e o modelo numérico será tão exata quanto maior for a subdivisão dessas partes (elementos).

Esse método traz vantagens favoráveis, como o fato de poder ser aplicado em estruturas com geometria e características complexas que não podem ser resolvidas tão simplesmente pelo método analítico. Todavia, independentemente do método matemático utilizado para aproximação da solução real, todos os resultados obtidos devem ser testados experimentalmente a fim de confirmar a validação do método.

1.2.Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação e comparação dos métodos experimental, analítico e numérico para avaliar e prever o comportamento estrutural de espécimes tubulares com defeitos em sua superfície externa e reparados com material compósito, através da pressurização interna, gradual e contínua até a ruptura, de forma a desconsiderar os efeitos do tempo (fluência ou relaxação). Os defeitos avaliados são do tipo perda de espessura localizada, os quais simulam defeitos de corrosão contendo diferentes grupos de profundidades.

Na abordagem experimental, após o mapeamento e caracterização completos dos tubos, com medições das espessuras por ultrassom, e as perdas de espessura usinadas por eletroerosão, estes foram submetidos a ensaios hidrostáticos até a ruptura. As pressões e deformações são avaliadas durante este processo. Uma das principais finalidades deste processo é avaliar, de maneira “imediata”, a eficiência de cada material compósito em estudo aplicado para restaurar a resistência mecânica original de um duto com perda de espessura. Assim, os espécimes foram ensaiados e levados até o ponto de ruptura para comprovar a recuperação da resistência original dos componentes íntegros.

Na abordagem analítica, foram utilizados os métodos ASME B31G², *Effective Area*², B31.G Modificado² e DNV RPF-101³, para estimar as condições e pressões de ruptura e compará-las aos resultados reais obtidos no experimento com tubos com defeito e sem reparo. Para os tubos com defeito e com reparo aplicado, foram considerados os métodos de tensão admissível no duto (também denominado substrato) e deformação admissível no reparo, ambos advindo das normas ASME PCC-2⁴ e ISO/TS 24817⁵, além da estimativa realizada através de equações de equilíbrio desenvolvida a partir do equilíbrio de forças no sistema.

Na abordagem numérica, foi escolhido o método de elementos finitos com o programa *ANSYS*[®] para estudar a estrutura dos tubos com e sem reparo em condições similares aos experimentos realizados.

Resumidamente, tubos com defeitos externos, agrupados em diferentes profundidades, foram reparados por diferentes tipos de material compósito com espessuras calculadas e projetadas conforme equações empíricas e levados igualmente até a ruptura. Um modelo de elementos finitos foi elaborado a fim de atestar o comportamento obtido da estrutura através de uma análise não-linear estática. Os resultados teóricos, experimentais e numéricos foram então comparados para fins de verificar a validação dos resultados.

² (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018)

³ (DET NORSKE VERITAS, 2010)

⁴ (ASME PCC-2, 2015)

⁵ (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015)

1.2.1.Revisão Bibliográfica

Trabalhos vem sendo desenvolvidos por diversos pesquisadores na avaliação, investigação e consolidação gradual de mais parâmetros e resultados referentes à integridade estrutural de dutos e sistemas de reparos compósitos.

(LIM, AZRAAI, *et al.*, 2019) puderam realizar um estudo constituído por testes experimentais de ruptura de dutos em grande escala (espécimes com 168,3mm de diâmetro externo e 7,11 mm de espessura de parede) e análises de elementos finitos, onde foram considerados um duto defeituoso (simulando perda de espessura por corrosão externa) e um duto reparado. Os resultados mostram que a pressão de ruptura do tubo reparado por compósito aumentou 23% e experimentou uma deformação significativamente reduzida na região do defeito. Além disto, verificou-se que o modelo de elementos finitos superestimou ligeiramente o desempenho do tubo defeituoso com deformações mais baixas em uma pressão semelhante aplicada quando comparado aos resultados experimentais.

(SAEED, RONAGH e VIRK, 2013) puderam avaliar em seus estudos uma série de cenários de projeto de reparos de dutos (com diferentes profundidades de defeito) através de modelagem utilizando equações analíticas e método de elementos finitos, a fim de avaliar a validade da consideração da P_{live} (pressão interna no instante da instalação do reparo) no cálculo de projeto, onde os resultados indicaram que a espessura do reparo é independente P_{live} e uma proposta de modificação da equação de projeto existente é apresentada.

Outros estudos anteriores focaram principalmente no desempenho do reparo de compósito, em vez do desempenho do material de enchimento, onde informações mais detalhadas do enchimento dificilmente estão disponíveis, como no trabalho realizado por (J.M. DUELL, 2008), no qual testes de ruptura experimentais foram conduzidos e análise de elemento finito realizada em tubos danificados e reparados com compósitos reforçados por fibra de carbono. Defeitos foram usinados na parede do tubo para simular a corrosão externa com um comprimento longitudinal de 152,4 mm e uma profundidade de 50% da espessura da parede. Para o primeiro espécime, o comprimento do defeito da dimensão do arco era de 152,4 mm. Para o segundo espécime, o comprimento do defeito da dimensão do arco era completamente em torno da circunferência (defeito axissimétrico). Seis camadas de reparo composto foram aplicadas para cobrir o defeito, resultando em uma

espessura de reparo de 3,1 mm. As propriedades do tubo, massa e compósito foram obtidas através de testes de laboratório e foram utilizadas para desenvolver modelos de elementos finitos. Duas amostras foram testadas hidrostaticamente até a ruptura neste estudo. O espécime reparado estourou violentamente quando o segmento de reparo composto explodiu com uma rachadura longitudinal em todo o comprimento da região do defeito. A pressão de ruptura registrada para a primeira e a segunda amostras foi de 43,1 MPa e 43,8 MPa, respectivamente. Essas informações foram utilizadas para validar o modelo de elementos finitos desenvolvido, onde os resultados obtidos na modelagem numérica com o ANSYS estão de acordo com os resultados experimentais. Uma comparação da espessura do reparo usando um código de projeto baseado no ASME PCC-2 foi realizada para fins de avaliação. Com base em uma pressão de ruptura de 44 MPa, a espessura mínima de reparo do envoltório de compósito foi calculada como 4,57 mm. Isso é maior do que 3,1 mm de envoltório composto usado no modelo FEA com uma pressão de ruptura prevista semelhante. O autor apontou as possíveis razões para o padrão ASME sobre a previsão da espessura mínima de reparo, dentre as quais o encruamento do aço após o escoamento, a geometria do defeito e a presença do material de enchimento não sendo considerados na solução da equação de projeto. Os autores concluíram que o comprimento do defeito na direção circunferencial teve pouco impacto na pressão de falha sob carregamento monotônico.

1.3.Organização da Dissertação

Serão apresentados aqui os itens considerados relevantes na avaliação de dutos reparados com material compósito em ensaios hidrostáticos.

O Capítulo 2 consiste na revisão teórica e está dividido em 6 seções que apresentam inicialmente os conceitos básicos de integridade estrutural aplicados aos dutos, introduzindo a ideia de tensão, deformação, critérios de resistência e etapas do projeto de dutos. Seguindo, o capítulo apresenta a corrosão evidenciada como um defeito recorrente em dutos e os critérios normativos para avaliação destes defeitos, de acordo com os critérios de aceitação dos componentes estruturais.

O Capítulo 3 aborda o tema da reparação dos dutos corroídos através da utilização de materiais compósitos, dissertando brevemente sobre materiais compósitos e apresentando normas de projeto de reparos.

Já os Capítulos 4, 5 e 6 desenvolvem a metodologia geral empregada na presente pesquisa, ressaltando as diferentes abordagens de avaliação como:

- Capítulo 4: abordagem experimental, explicando a concepção dos testes que foram realizados e o processo de levantamento dimensional dos espécimes, levantamento das propriedades do aço e do reparo de compósito, como também outras características dos ensaios de ruptura.
- Capítulo 5: Abordagem analítica, mostrando todos os cálculos e equações utilizados que foram baseados em normas e padrões industrialmente conhecidos, além de aproximações estabelecidas e particularidades do estudo.
- Capítulo 6: Abordagem numérica, elucidando as características de configuração dos sistemas simulados no software do ANSYS®.

O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos em cada abordagem da pesquisa e estabelece comparações entre elas.

- Por fim, o Capítulo 8 levanta conclusões, discussões e sugestões para trabalhos futuros

2 Integridade Estrutural de Dutos

Conforme cita LOUREIRO (2005), durante a vida de um duto podem vir a ocorrer diferentes danos ou defeitos em sua estrutura, sejam originárias no processo de fabricação (ex.: laminação), no transporte (ex.: ovalização), na montagem (ex.: defeitos na solda) e na instalação (ex.: mossas). Também podem surgir defeitos durante a operação dos dutos (devido a cargas excessivas, corrosão sob tensão, fadiga, terceiros e movimentação de solda, por exemplo).

Enquanto em serviço, os dutos ficam sujeitos tanto a solicitações quanto a ação de outros agentes externos, o que ocorre devido ao contato entre a superfície metálica do componente e o ambiente onde se encontram, o que pode influenciar suas características estruturais em longo prazo em termos de perda resistência mecânica.

. Neste trabalho, a característica fundamental de resistência para os dutos focada para a pressão interna de operação, a qual leva ao surgimento de tensões na própria estrutura do duto e que devem ser apropriadamente consideradas durante seu projeto. Certas regiões da estrutura podem apresentar maiores níveis de tensão do que outros, como será visto mais adiante.

No Apêndice IV desta dissertação pode-se encontrar teoria por trás das tensões, deformações e critérios de falha aplicados aos dutos.

2.1.Projeto de Dutos

Para um tubo íntegro com a presença de tampos nas extremidades e de paredes finas, isto é, com a possibilidade de desprezar a tensão radial por ser muito pequena comparada às outras, o estado de tensão gerado devido à pressão interna é então considerado biaxial, com as tensões circunferencial e longitudinal dadas.

Pode-se notar facilmente que a maior e mais importante tensão a que o tubo pressurizado deve ser capaz de resistir sem falhar é a componente circunferencial, que corresponde à, pelo menos, o dobro da tensão longitudinal.

Inicialmente na etapa do projeto de dutos, é feita uma avaliação geral das suas condições de uso durante a operação. De forma resumida, é preciso primeiro definir as características que envolvem a finalidade do serviço, ou seja, do fluido a ser transportado dentro do componente. Nessa fase, entende-se o escopo do projeto, a particularidade do escoamento e o que se deseja transportar ao longo do duto, como também é realizado o cálculo da vazão e pressão de produção requerida para a aplicação e do diâmetro necessário para permitir essa vazão.

Já a etapa seguinte representa o estudo dimensional e estrutural do projeto. Após serem estabelecidos o diâmetro interno e a pressão capazes de admitir a vazão planejada, é possível realizar o cálculo da mínima espessura admissível.

$$t \geq \frac{PD}{2 \cdot (SMYS)} \quad (1)$$

Na indústria, normalmente é preferível a utilização de dutos com paredes finas por motivos de disponibilidade, resistência dos materiais usados e fatores econômicos de fabricação (custo-benefício entre o preço do duto e a aplicabilidade). O *SMYS* presente na equação 1 acima representa a resistência mínima ao escoamento especificada do material selecionado para o duto.

Na fase de avaliação estrutural é necessário obter os parâmetros reais dos materiais a serem utilizados na fabricação dos dutos, os quais são obtidos através de ensaios mecânicos, objetivando estimar dados importantes como a pressão de projeto (P_d) e/ou a máxima pressão admissível de operação (sigla em inglês “*MAOP*” ou “*MAWP*”). O critério de resistência de Tresca é utilizado para o estabelecimento da relação entre tensão e pressão no duto. Considerando que $\sigma_c = \sigma_1 = \frac{PD}{2t}$, $\sigma_3 \cong 0$ e um fator de segurança para o projeto, tem-se:

$$\sigma_{Tresca} = (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{PD}{2t} = S_y \cdot (fator) \quad (2)$$

O fator mostrado na equação 2 acima sugere um coeficiente de segurança para a operação do duto. É recomendado acessar normas e padrões existentes a fim de analisar apropriadamente as características do escopo de projeto que podem influenciar nos fatores de segurança. A norma B31.8 (AMERICAN SOCIETY OF

MECHANICAL ENGINEERS, 2012) apresenta a seguinte equação para cálculo da pressão de projeto:

$$P_d = \frac{2t \cdot (SMYS)}{D} \cdot F.E.T. \quad (3)$$

No geral, para o projeto nominal estático segundo à norma, existem 3 fatores de segurança importantes para assegurar um sistema seguro ao projetar dutos, que são identificados por F.E.T., cada um levando em consideração aspectos importantes de projeto, conforme as Tabelas 1, 2 e 3 abaixo:

Tabela 1 - 841.114A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).

Classe de localização	Número de construções	F
Classe 1 - div.1	0 – 10	0,80
Classe 1 - div.2	0 – 10	0,72
Classe 2	11 – 45	0,60
Classe 3	46+	0,50
Classe 4		0,40

Tabela 2 - 841.115A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).

Especificação do aço	Classe do tubo	E
API 5L (a norma fornece outras classificações)	Sem costura	1,00
	ERW (Resistance)	1,00
	EFW (Flash)	1,00
	Arco submerso	1,00
	Forno-topo	0,60

Tabela 3 - 841.116A (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018).

Temperatura (°F)	T
< 250	1,000
300	0,967
350	0,933
400	0,900
450	0,867

2.2. Corrosão em Dutos e Avaliação de Defeitos

Dentre os tipos de anomalias (por vezes, também chamadas de “defeitos” na presente dissertação) já mencionados acima, a corrosão constitui uma das principais causas de falha nos dutos usados na indústria, visto que são estruturas majoritariamente fabricadas com aço, que costuma ser um material bastante propenso a sofrer efeitos corrosivos. Pelo fato de estar frequentemente exposto ao ambiente externo em contato com ar, solo, água e/ou produtos potencialmente corrosivos, toda a extensão do duto fica sujeita à aparição de pites de corrosão.

Por isso, é importante que os operadores estejam sempre atentos a inspecionar e localizar quaisquer anomalias que possam surgir ao longo de toda linha dutoviária, a fim de que se possa obter uma detecção prévia e que ações de reparação possam ser tomadas em tempo.

“Considera-se que o modo de falha na estrutura seja controlado pelas tensões devido à pressão interna e à presença de corrosão” (LOUREIRO, 2005).

“É importante compreender que estes fatores não afetam o duto igualmente em todos os locais e que a corrosão não cresce à mesma taxa em toda a sua extensão. Se um operador pode identificar estes defeitos de corrosão que estão ativos ou em crescimento, então um prognóstico de corrosões futuras pode ser realizado e, subsequentemente, as falhas evitadas” (LOUREIRO, 2005).

A corrosão em dutos pode ser interna ou externa, onde a presente pesquisa terá como objetivo o estudo dos defeitos de perda de espessura na superfície externa dos dutos causados por pites de corrosão.

Para os dutos pressurizados e com defeitos de corrosão na parede externa, existem alguns padrões e normas como a conhecida ASME B31G (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1991), que fornece informações necessárias para avaliar a condição de pressão admissível em que um determinado duto pode seguir operando de maneira segura e eficiente na presença de um defeito tipo perda de espessura na parede externa.

De modo geral, a pressão admissível para o duto corroído pode ser dada como

$$P_{defeito} = \frac{2t}{D} S_{flow} \cdot \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \cdot F.E.T. \quad (4)$$

onde S_{flow} corresponde à resistência ao colapso plástico (valor compreendido entre o limite de escoamento e a resistência de ruptura), M é o fator de dilatação ou "bulging factor" ou fator de Folias, A e A_0 correspondem à relação entre a área do defeito e a área sem defeito na mesma região, respectivamente. Por exemplo, para um duto de espessura t com defeito retangular de profundidade d e comprimento l pode-se usar $A = d \cdot l$ e $A_0 = t \cdot l$, sendo a razão nesse caso dada por $\frac{d}{t}$. De fato, a maioria das normas e métodos utilizados para estimar a resistência do duto após a perda de espessura emprega esse tipo de abordagem a fim de obter uma análise mais crítica, ou seja, mesmo em defeitos com formatos aleatórios, é interessante aproximá-lo como se ele tivesse dimensões retangulares (em alguns casos parabólicas). A Figura 2 ilustra essa suposição.

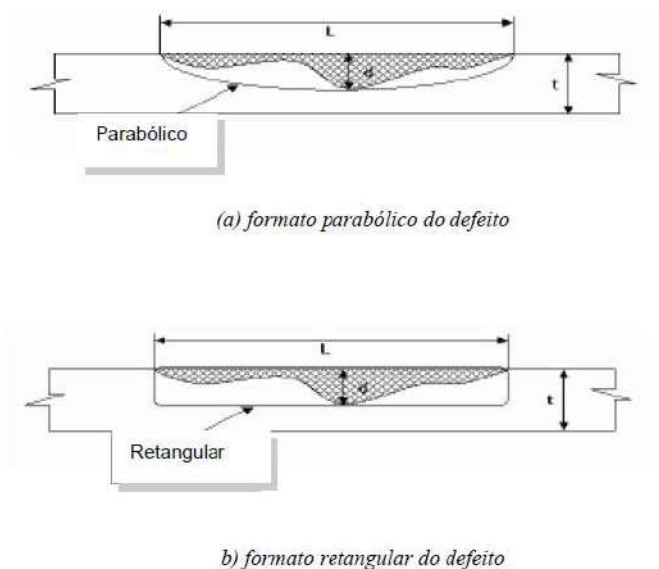


Figura 2 - Avaliação de defeitos de corrosão externa em duto. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 31)

Cada norma apresenta seus estudos e considerações com relação aos dutos com perda de espessura. A Tabela 4 lista algumas dessas principais normas e suas considerações:

Tabela 4 - Diferentes métodos para a determinação da pressão em dutos com perda de espessuras metálica acentuada na direção longitudinal. (CASTELLANOS, 2014, p. 46).

Método	S_{flow}	Formato do defeito	$\frac{A}{A_0}$	M	Fator de projeto
Resistência dos Materiais	$\text{Min} \left\{ \frac{S_y + S_u}{2}, 1, 2S_y \right\}$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	∞	$F.E.T$
ASME B31.G ²	$1,1 \times SMYS$	Aproximação parabólica $l^2 \leq 20Dt$	$\frac{2d}{3t}$	$\sqrt{1 + \left(0,893 \cdot \frac{l}{\sqrt{Dt}}\right)^2}$	$F.E.T$
		Retangular longo $l^2 > 20Dt$	$\frac{d}{t}$	∞	
Effective Area ²	$SMYS + 70MPa$	Área do defeito	$\frac{A}{A_0}$ $A_0 = lt$	$\sqrt{1 + \left(0,893 \cdot \frac{l}{\sqrt{Dt}}\right)^2}$	$F.E.T$
B31.G Modificado (Arco e Kiefner) ²	$SMYS + 70MPa$	Área do defeito com aproximação retangular média	$0,85 \times \frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0,6275 \frac{l^2}{Dt} - 0,003375 \left(\frac{l^2}{Dt}\right)^2}$	$F.E.T$
DNV-RP-F101 ³	S_u ou $SMUS$	Retangular longo	$\frac{d}{t}$	$\sqrt{1 + 0,31 \frac{l^2}{Dt}}$	$\left(\frac{0,9D}{D-t}\right) \cdot F.E.T$

2.3. Critérios de Aceitação de Componentes Estruturais

A norma API 579-1 / ASME FFS-1⁶ se dedica também aos critérios para aceitação de componentes estruturais como tubulações, vasos de pressão e tanques. Segunda ela, existem 3 caminhos distintos para o processo de aceitação: a tensão admissível, os diagramas “FAD” e o fator de resistência remanescente (RSF - sigla em inglês).

2.3.1. Tensão Admissível

Neste critério, todos os carregamentos que atuam no componente são avaliados e os pontos críticos estabelecidos. As tensões críticas atuantes na estrutura são comparadas com a tensão admissível do material, calculada com base em

⁶ (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2000)

normas de projeto, tal qual a tensão limite de escoamento ou tensão de resistência mecânica reduzidas de fatores de segurança.

2.3.2. Diagrama para Avaliação de Falha (*FAD* - sigla em inglês)

Esse critério é usado para avaliar componentes com defeito tipo trinca, consistindo em duas análises:

1. Análise para falha frágil, observando o comportamento na ponta ou raiz de trincas existentes no material;
2. Análise para falha dúctil ou colapso plástico, levando em consideração o esgotamento de plasticidade que ocorre na seção reduzida onde existe a trinca.

2.3.3. Fator de Resistência Remanescente (*RSF* – sigla em inglês)

Este critério é comum para componentes tubulares com defeitos de perda de espessura localizada sujeitos a falhas dúcteis. Conforme definido pela API 579⁶, o *RSF* é definido como a razão entre a resistência à falha do componente com defeito e a resistência à falha sem defeito:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (5)$$

Sendo L_{DC} a carga limite ou de colapso plástico da estrutura com defeito e L_{UC} a carga limite ou de colapso plástico da estrutura sem defeito. Seus valores podem ser obtidos através de ensaios, métodos numéricos ou análises elastoplásticas.

Com o resultado já calculado da perda de resistência que o duto tem após a ocorrência do defeito (quantificado através do *RSF*), deve-se então avaliar se este duto pode seguir operando com a mesma pressão de operação ou se alguma intervenção deverá ser feita no sistema. Essa avaliação é feita pela comparação entre o *RSF* calculado e RSF_a (admissível).

- a) Se $RSF \geq RSF_a$: Nesse caso, o duto tem o respaldo de seguir em operação com as condições de pressão usuais, ou seja, $MAWP_r = MAWP$.

- b) Se $RSF < RSF_a$: Nesse caso, o duto apresenta uma resistência remanescente menor que a admissível, o que o impede de seguir operando normalmente. O responsável pelo projeto deve decidir se haverá reparação do defeito ou se será aplicada uma solução que reduza a severidade da operação, como diminuir a pressão operante fazendo $MAWP_r = MAWP \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right)$.

Em que $MAWP$ é a máxima pressão de operação admissível determinada pelo código do projeto, $MAWP_r$ é a máxima pressão de operação admissível para o componente com defeito e RSF_a é o valor admissível para o RSF , onde geralmente é admitido o valor de 0,90.

É importante ressaltar que o RSF pode ser calculado por meio da equação 6 abaixo, a qual já foi apresentada como um termo incluído na equação 4:

$$RSF_{analítico} = \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \quad (6)$$

3

Reparação de Dutos Corroídos através de Material Compósito

3.1. Materiais Compósitos

Segundo LOUREIRO (2005), a aplicação de compósitos em reparos de dutos é um pouco mais recente. Apenas em 1997, o Gas Research Institute (GRI) reuniu uma equipe de cientistas, engenheiros e pesquisadores especialistas em dutos, a fim de qualificar técnicas alternativas de reparo para complementar métodos tradicionais aprovados pelo Department of Transportation (DOT). Até então, as tradicionais técnicas de reparo consistiam em cobrir a área danificada com uma luva de metal soldada ou cortar o segmento danificado e substituí-lo por um trecho novo através de soldagem.

Esses métodos tradicionais não só custavam muito caro, principalmente devido à necessidade de parada prolongada na produção do duto, como também apresentavam alta periculosidade, já que era necessária a operação de cortes ou soldas em proximidade de hidrocarbonetos e outras substâncias altamente explosivas. Por isso, a equipe foi instruída a determinar a possibilidade de usar materiais compósitos para reparar os dutos de alta pressão, visto que essa alternativa poderia representar uma enorme economia para a empresa operadora.

A execução dessa técnica consiste em envolver a região danificada com a manta de compósito, introduzindo uma pré-compressão sobre a parede do duto e reduzindo a intensidade da tensão circunferencial induzida pela pressão interna, o que, conseqüentemente, previne o avanço da trinca. Vale ressaltar que todo esse processo ocorre enquanto o duto segue operando.

3.1.1. Definição, Classificação e Características principais

A síntese de materiais compósitos consiste na mistura de compostos de naturezas diferentes com o objetivo de estabelecer materiais com novas

propriedades. De maneira resumida, o compósito se baseia na composição macroscópica de dois ou mais materiais distintos.

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o material compósito se trata de uma mistura física de dois ou mais materiais, combinados de maneira a formar um novo tipo material de engenharia, que é útil e possui propriedades distintas aos componentes puros, podendo ser obtidos por combinações de metais, cerâmicas ou polímeros.

Por ser um material multifásico, um compósito vai além das propriedades inerentes de cada constituinte em sua composição, havendo uma perceptível interface entre os componentes. A combinação permite que os constituintes preservem suas identidades originais, o que significa que não há dissolução ou descaracterização completa, ou seja, as propriedades do compósito são diferentes daquelas apresentadas pelos constituintes individualmente.

Dessa forma, é compreensível que exista o interesse de combinar materiais com propriedades diferentes e bem específicas, a fim de se obter uma nova gama de propriedades resultantes da associação de cada constituinte. Logo, normalmente são associados dois tipos de materiais: o aglomerante, que tem a função de manter os reforços unidos; e os reforços, que tem como função suportar esforços que são transmitidos pelo aglomerante. Nessa combinação, frequentemente os compósitos apresentam uma ou mais fases descontínuas (reforços) que são envolvidas por uma fase contínua (matriz).

Em relação à classificação, um dos principais dados a ser considerado é a geometria da fase descontínua, pois as propriedades mecânicas dos compósitos dependem da forma e dimensões do reforço, possibilitando que os materiais compósitos sejam denominados conforme o tipo de reforço utilizado e a sua disposição dentro da matriz, como sugere a Figura 3.

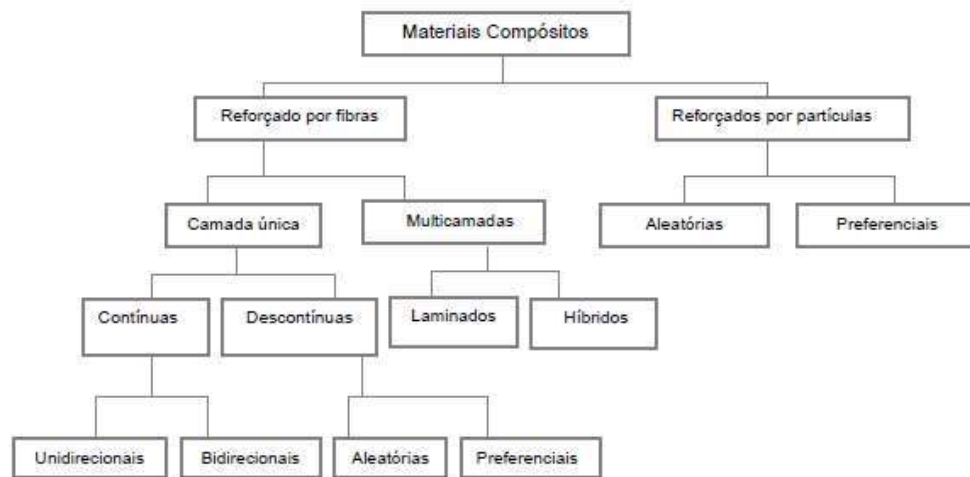


Figura 3 - Classificação dos compósitos quanto a geometria da fase de reforço. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 7).

Como pode-se notar, existem dois tipos de reforços utilizados em compósitos: o reforço por fibras e o reforço por partículas. O reforço fibroso se apresenta em forma de manta ou tecidos, e se caracteriza pela fibra possuir comprimento muito maior que a dimensão de sua seção transversal. Todavia, a relação entre comprimento e diâmetro da fibra, também conhecida com razão de aspecto, pode variar consideravelmente.

Outra característica importante em compósitos é a anisotropia, ou seja, suas propriedades físicas, térmicas, elétricas e mecânicas variam em função da direção analisada, permitindo que a concepção do material seja feita de forma a obter o desempenho requerido de acordo com os diferentes carregamentos aplicados. Esta pode ser uma maneira vantajosa de conceber um novo material com o objetivo de oferecer alta resistência à estrutura na direção onde a máxima tensão ocorra, tornando estratégico o controle do projeto e da fabricação do compósito.

Para maiores informações sobre os compósitos e suas características de fabricação, composição e critérios de resistência, deixa-se recomendado LOUREIRO (2005) como uma ótima referência sobre o tema.

3.2.Reparos de Compósitos para Dutos Corroídos

Existe uma grande demanda de pesquisas com relação à restauração da integridade mecânica de dutos danificados através da utilização de mantas de material compósito com função de reparo da região danificada. Essa técnica é bem

mais promissora e preferível que outras alternativas presentes na indústria, pois invalida a necessidade de cortar a seção corroída substituindo por outra e/ou de praticar soldagem nas proximidades do tubo. O assunto é ainda mais importante quando o setor industrial atesta as qualidades da técnica e investe amplamente em estudos relacionados, como é o caso dessa presente tese.

O reparo de compósito é utilizado tanto para tubulações quanto para dutos que trabalham com altas pressões de operação, os quais seguem códigos de projeto que determinam todas as condições para o duto íntegro operar com segurança, mas ainda mantendo a eficiência. A própria pressão máxima admissível para operação é designada, por exemplo, como a pressão que geraria tensões de 72% ou 80% do limite de escoamento especificado do material para, respectivamente, linhas de transmissão de gás e de líquido.

O estado de tensões usual no duto gerado pela pressão interna se altera quando há perda de espessura devido à corrosão, pelo menos nas regiões de proximidade do defeito e que sofrem influência dele. A distribuição de tensão nessas regiões de proximidade tende a crescer bastante por conta do efeito de concentração de tensão causado pela própria redução geométrica da perda de material (parede mais fina). Logo, um duto danificado operando com a mesma pressão em que ele foi projetado (sem a presença do defeito) possui grandes chances de falhar, podendo escoar mesmo abaixo do seu nível de segurança imposto no projeto.

A fim de tratar esse problema, frequentemente são instaladas mantas sobrepostas de material compósito na região do defeito com o intuito de reforçar a estrutura do duto corroído, impondo a divisão da carga circunferencial entre o aço e o compósito, restringindo a deformação do aço na região mais fina e trazendo as tensões para níveis seguros. A Figura 4 ilustra esse cenário:

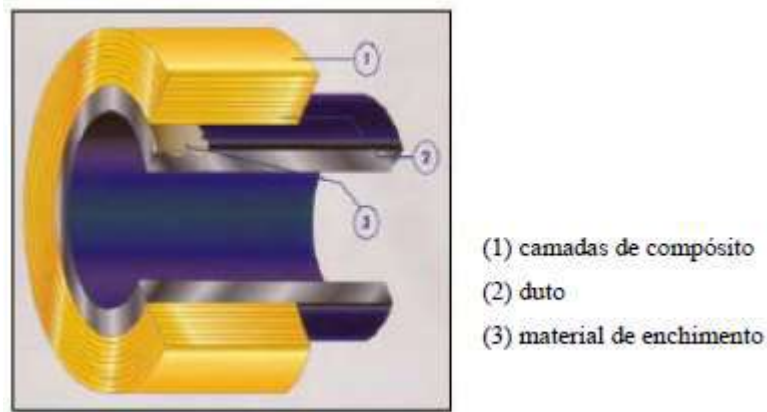


Figura 4 - Duto com defeito corrosivo externo e reparado com camadas de material compósito. Fonte: (LOUREIRO, 2005, p. 42).

Apesar da restrição, ainda é possível que haja escoamento na seção mais fina do aço, porém ele será contido pelo reparo através da manutenção da taxa de escoamento dentro de limites reduzidos e aceitáveis, garantindo a segurança da operação do duto sob a pressão interna de projeto restaurada.

O mecanismo de ação do reparo aplicado se baseia no aumento da espessura na seção transversal que resiste à tensão circunferencial. A espessura incremental do compósito somada à sua resistência mecânica máxima serão determinantes na estimativa do reforço incremental adquirido pelo duto.

De forma resumida, a resistência mecânica do sistema constituído pelo duto mais reparo pode ser quantificada através de equilíbrio de forças, conforme a equação

$$P = \frac{2\sigma_a t_a \cdot (RSF) + 2\sigma_c t_c}{D} \quad (7)$$

onde P é a pressão interna, σ_a e t_a são respectivamente a tensão e a espessura do duto; σ_c e t_c são respectivamente a tensão da estrutura de compósito e a espessura com reparo de compósito; D é o diâmetro externo e RSF é o fator que quantifica a perda de espessura pela corrosão, denominado *Remaining Strength Factor*, como já explicado nas seções 2.5 e 2.6.

Assim, pode-se notar a contribuição nítida tanto do duto de aço quanto do reparo de compósito na composição da resistência mecânica. No instante em que ocorre a pressurização do duto reparado, ambos o duto e o reparo serão tensionados, porém o material mais rígido sustentará maior tensão. Nesse caso, com o aço

apresentando uma maior rigidez mecânica do que o compósito, o próprio duto será tensionado a níveis mais altos.

Outro fato importante é a redução da rigidez relativa do aço a partir do momento em que o duto sofre escoamento, admitindo-se que seu módulo de elasticidade diminui conforme a deformação permanente progride. Isto pode ser traduzido pela diminuição da inclinação da reta no gráfico tensão-deformação, influenciado por um comportamento tal qual o encruamento (endurecimento) isotrópico linear, que é representado pela reta que liga a tensão limite de escoamento com a tensão de ruptura do material. Este comportamento é conduzido pelo módulo de elasticidade (E) e o módulo tangente (E'), e pode ser observado na curva bilinear exemplificada na Figura 5 abaixo:

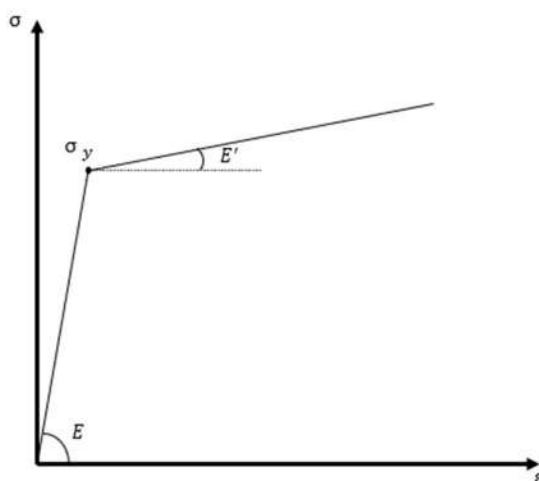


Figura 5 - Curva tensão-deformação bilinear exemplificando o comportamento do material metálico sob elasticidade isotrópica seguida do encruamento (endurecimento) isotrópico linear após o ponto que seria o limite de escoamento.

É possível afirmar então que, a partir desse ponto em que o material do duto avança no escoamento, existe a transferência progressiva do carregamento para o reparo, o qual torna-se uma fonte crítica de resistência para a configuração. Como afirma LOUREIRO (2005), a pressão de ruptura final do conjunto é governada pela resistência à tração tanto do aço quanto do compósito.

A instalação do reparo de compósito visa prover o reforço necessário para o duto com defeito, porém esta reposição estrutural depende diretamente da propriedade mecânica do compósito utilizado, especialmente do módulo de elasticidade (rigidez mecânica). Após a instalação e o aumento da pressão interna, o envoltório de compósito irá restringir a expansão natural da configuração. O que

irá definir o nível de restrição será justamente a rigidez do compósito, ou seja, um reparo que possui um módulo de elasticidade relativamente alto permitirá uma maior divisão do carregamento, aliviando um pouco o esforço atribuído ao duto. Logo, esse reparo será tão mais eficiente quanto melhor for a divisão de carregamento no ciclo de pressão e ainda conseguir ser resistente o suficiente para suportar as tensões internas geradas no processo.

Em contrapartida, a utilização de mantas de compósito com módulo de elasticidade relativamente baixo, como por exemplo borracha, haverá pouca divisão no carregamento, evidenciando a ineficiência desse reparo.

3.2.1.1. Normas Aplicáveis ao Projeto de Reparos Compósitos

No geral, existem duas normas de grande relevância e notoriedade na indústria de dutos que foram desenvolvidas de forma a fornecer regras e orientações para projetos de reparos confiáveis e robustos aplicáveis para dutos defeituosos, incluindo reparos de material compósito. São elas a ISO 24817 e a ASME PCC-2 (Artigos 4.1 e 4.2 Alto e baixo risco - Sistemas de reparo de compósitos não-metálicos para dutos e tubulação).

Essencialmente, as duas normas não possuem diferenças significativas, sendo o desenvolvimento de um código praticamente espelhado no outro no que se refere aos reparos de compósitos. Contudo, uma pequena diferença entre ambas pode acarretar resultados diversificados entre si que poderiam evidenciar o método mais eficiente para estimativas precisas da situação real, dado cada estudo de caso.

Essa diferença pode ser pressuposta na restrição estabelecida pela ASME PCC-2 para a tensão admissível a ser utilizada nas equações de projeto, visto que se considera neste caso como igual à mínima tensão de escoamento especificada do material – SMYS⁷. Já a ISO 24817 deixa em aberto a escolha desse termo de acordo com a casualidade do projeto⁸, podendo-se considerar a máxima tensão admissível do substrato como tanto o seu limite de escoamento quanto o seu limite de resistência mecânica, por exemplo.

O escopo de ambos os códigos cobre os seguintes componentes:

⁷ (ASME PCC-2, 2015, p. 160)

⁸ (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015, p. 16)

- Dutos;
- Tubulações, incluindo: retas, cotovelos, têes, flanges, redutores, corpos de válvula;
- Tanques e vasos incluindo bocais e acessórios;
- As normas também podem atuar como orientação para reparos aplicados a risers e aplicações de reforço estrutural.

Tanto a ISO 24817 quanto ASME PCC-2 não definem o que é um defeito aceitável para ser reparado, mas assumem que uma decisão já foi realizada para reparar um determinado defeito, de acordo com o código relevante, por exemplo. B31G, API 579-1/ FFS-1 usando um reparo composto. A decisão do que constitui um defeito aceitável para o reparo está além da responsabilidade de ISO 24817 e ASME PCC-2.

Os dois tipos genéricos de defeitos que são cobertos pelas normas são:

a) Defeito Tipo A:

- Não atravessa a parede;
- É causado por corrosão externa ou dano mecânico;
- A aplicação do reparo irá deter degradação adicional.

b) Defeito tipo B:

- Atravessa a parede (ou possivelmente deverá atravessar durante a vida útil do reparo);
- É causado por corrosão interna ou erosão;
- A degradação do defeito continuará após a aplicação do reparo.

É estabelecido pela ISO 24817, através de Tabela 5, as definições para as classes de reparos, conforme pode-se observar abaixo:

Tabela 5 - Definições das classes de reparo (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015).

Classe do reparo	Serviço Típico	Pressão de Projeto	Temperatura de Projeto
Classe 1	Serviços de baixa especificação, por exemplo cabeça estática, drenos, meios de resfriamento, água do mar (serviço)	$< 2 \text{ MPa}$	$< 40^\circ \text{ C}$
Classe 2	Água de incêndio / sistemas de dilúvio	$< 2 \text{ MPa}$	$< 100^\circ \text{ C}$
Classe 3	Água e hidrocarbonetos produzidos, fluidos inflamáveis, sistemas de gás. A Classe 3 também cobre as condições de operação mais onerosas do que as descritas acima.	Limitado a reparos projetados em conformidade com esta norma internacional e de espessura equivalente a $t < D/12$	Definido na seção 7.5.3 da norma internacional

Ambas as normas estabelecem metodologias de cálculos para projeto do reparo na presença de defeitos tipo A e tipo B, porém, como o presente estudo objetiva avaliar dutos com defeitos de perda de material local, ou seja, defeitos tipo A, serão consideradas apenas as equações que envolvem estes casos.

Como já mencionado, a ISO 24817 e a ASME PCC-2 assumem que a avaliação da anomalia no duto e da necessidade de reparos já foi realizada através de códigos pertinentes como por exemplo a B31G ou a API 579.

Conforme a semelhança entre as duas normas, os principais casos de abordagens para o projeto dos reparos compósitos, de acordo a ISO 24817, se apresentam da seguinte forma:

1º caso: Quando o defeito não foi previamente avaliado, o projeto de reparo deverá se basear nas deformações admissíveis das mantas de compósito, onde não se considera a contribuição do substrato (duto) na divisão de carga nem dados de entrada da avaliação prévia do defeito. As equações a seguir servem para calcular as espessuras mínimas (t_{min}) requeridas do laminado de reparo para este caso, conforme direções circunferencial e axial sendo respectivamente

$$t_{min,c} = \frac{1}{\varepsilon_c} \cdot \left(\frac{P_{eq} \cdot D}{2} \cdot \frac{1}{E_c} + \frac{F_{eq}}{\pi D} \cdot \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (8)$$

$$t_{min,a} = \frac{1}{\varepsilon_a} \cdot \left(\frac{F_{eq}}{\pi D} \cdot \frac{1}{E_a} - \frac{P_{eq} \cdot D}{2} \cdot \frac{\nu}{E_c} \right) \quad (9)$$

onde:

- E_a é o módulo de elasticidade axial do laminado de reparo, expresso em megapascals;
- E_c é o módulo de elasticidade circunferencial do laminado de reparo, expresso em megapascals;
- D é o diâmetro externo original, expresso em milímetros;
- F_{eq} é a carga axial equivalente, expressa em newtons;
- P_{eq} é a pressão interna equivalente, expressa em megapascal
- ν é o coeficiente de Poisson do laminado de reparo;
- ε_a é a deformação admissível axial do laminado de reparo, expressa em milímetros por milímetro;
- ε_c é a deformação admissível circunferencial do laminado de reparo, expressa em milímetros por milímetro.

Denomina-se P_{eq} e F_{eq} por:

$$P_{eq} = P \left[1 + \frac{16}{(\pi D^2 \cdot P)^2} \cdot \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)^2 \right] \quad \text{para } P \geq \frac{4}{\pi D^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right) \quad (10)$$

$$P_{eq} = P + \frac{4}{\pi D^2} \cdot \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right) \quad \text{para } P < \frac{4}{\pi D^2} \left(F_{sh} + \frac{2}{D} M_{to} \right)$$

$$F_{eq} = \frac{\pi}{4} P D^2 + \sqrt{F_{ax}^2 + 4 F_{sh}^2} + \frac{4}{D} \sqrt{M_{ax}^2 + M_{to}^2} \quad (11)$$

onde:

- P é a pressão interna de projeto requerida, expressa em Megapascal;

- F_{sh} é a carga de cisalhamento aplicada, expressa em Newtons;
- M_{to} é o momento de torção aplicado, expresso em Newton milímetros;
- F_{ax} é a carga axial aplicada, expressa em Newtons;
- M_{ax} é o momento axial aplicado, expresso em Newton milímetros.

Caso o defeito já tenha passado por uma avaliação prévia e/ou os dados confiáveis de inspeção da espessura mínima remanescente da parede do duto ou vaso estiverem disponíveis, deve-se considerar que o substrato contribui para a divisão de carga no sistema duto/reparo. Diante disto, existem duas abordagens para se calcular a espessura mínima requerida de reparo para estes casos, sendo o projeto limitado pela tensão admissível do substrato e o projeto limitado pela deformação admissível do reparo composto.

2º caso: Quando o projeto do reparo é baseado na tensão admissível do substrato (duto), as equações 12 e 13 apresentadas abaixo são utilizadas considerando as direções circunferencial e axial respectivamente. Neste caso, assumindo-se que o substrato é elástico, temos que

$$t_{min,c} = \frac{D}{2s} \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \cdot \left(P_{eq} + \frac{2\nu F_{eq}}{\pi D^2} - P_s \right) \quad (12)$$

$$t_{min,a} = \frac{D}{2s} \cdot \left(\frac{E_s}{E_a} \right) \cdot \left(\frac{2F_{eq}}{\pi D^2} - \nu \frac{E_a}{E_c} \cdot P_{eq} - P_s \right) \quad (13)$$

onde:

- E_a é o módulo de elasticidade axial do laminado de reparo, expresso em megapascals;
- E_c é o módulo de elasticidade circunferencial do laminado de reparo, expresso em megapascals;
- E_s é o módulo de elasticidade do substrato, expresso em megapascals;
- D é o diâmetro externo original, expresso em milímetros;
- F_{eq} é a carga axial equivalente, expressa em newtons;
- ν é o coeficiente de Poisson do laminado de reparo;
- s é a tensão admissível do substrato, expressa em megapascals.

- P_{eq} é a pressão interna equivalente, expressa em megapascais
- P_s é a Máxima Pressão de Operação Admissível (“*MAOP*”) para um duto com a presença de uma anomalia, expressa em megapascal, podendo ser calculada através de normas como as mostradas na Tabela 4.

Caso 3º: Quando o projeto do reparo é baseado na deformação admissível do laminado de compósito, as equações 14 e 15 apresentadas abaixo são utilizadas considerando as direções circunferencial e axial respectivamente. Neste caso, assume-se que o substrato é elástico e só contribui para a divisão do carregamento até sua tensão admissível, sendo

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E_c t_{mín}} \cdot \left(\frac{P_{eq} D}{2} + v \frac{F_{ax}}{\pi D} \right) - \frac{P_s D}{2 E_c t_{mín}} - \frac{P_{live} D}{2 (E_c t_{mín} + E_s t_s)} \quad (14)$$

$$t_{mín,a} = \frac{1}{\varepsilon_a} \cdot \left(\frac{F_{eq}}{\pi D} \cdot \frac{1}{E_a} - \frac{P_{eq} D}{2} \cdot \frac{v}{E_c} \right) \quad (15)$$

onde:

- P_{live} é a pressão interna durante a instalação do reparo, expressa em megapascais;
- ε_c é a deformação circunferencial admissível do laminado de reparo, expressa em milímetros por milímetro;
- ε_a é a deformação circunferencial admissível do laminado de reparo, expressa em milímetros por milímetro;
- t_s é a espessura mínima restante da parede do substrato, expressa em milímetros.

Todas as equações apresentadas nesta seção são válidas apenas quando $t_{projeto} < D/12$.

Valores para ε_c e ε_a aplicáveis às equações 8, 9, 14 e 15 podem ser obtidos através das normas ISO 24817 e ASME PCC-2, as quais apresentam uma tabela de cálculo para estimativa das deformações circunferencial e axial admissíveis em função das classes e do tempo de vida útil do reparo. A Tabela 6 fornece um resumo destes valores específicos para 2, 10 e 20 anos de serviço:

Tabela 6 - Deformações admissíveis para laminados compostos em função da vida útil do projeto de reparo (JOHN STEVEN, FREIRE, *et al.*, 2014).

Módulos	Deformação admissível - Classe 1 (%)			Deformação admissível - Classe 2 (%)			Deformação admissível - Classe 3 (%)		
Vida do reparo (anos)	2	10	20	2	10	20	2	10	20
<i>Para $E_a > 0,5E_c$:</i>									
ε_{c0}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
ε_{a0}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
<i>Para $E_a < 0,5E_c$:</i>									
ε_{c0}	0,4	0,32	0,25	0,35	0,35	0,25	0,3	0,27	0,25
ε_{a0}	0,25	0,16	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Os efeitos de temperatura, podem representar dados relevantes no projeto do reparo composto, visto que o coeficiente de expansão térmica para um laminado de reparo é diferente daquele do substrato, o que resulta na geração de tensões térmicas dentro do laminado de reparo quando a temperatura de projeto é diferente da temperatura de instalação. Logo, para estes casos, este efeito deve ser considerado na avaliação do projeto de forma a buscar a subtração de todas as deformações induzidas termicamente das deformações admissíveis.

Contudo, para a presente pesquisa, serão desconsiderados quaisquer efeitos térmicos e suas consequências a fim de simplificar as avaliações analíticas e numéricas, logo foi considerado:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{c0} &= \varepsilon_c \\ \varepsilon_{a0} &= \varepsilon_a\end{aligned}\tag{16}$$

O resultado do projeto é a espessura e a extensão do reparo. A unidade básica para o projeto é a estrutura combinada: reparo, procedimento de preparação da superfície e substrato.

4 Metodologia da Pesquisa – Abordagem Experimental

O presente projeto de pesquisa inclui em suas etapas experimentais a pretensão e interesse da empresa Petrobrás nos resultados relacionados ao comportamento de dutos sob corrosão externa e reparados por material compósito. A empresa financiou, acompanhou e participou de toda metodologia experimental⁹ do estudo em conjunto com os pesquisadores da PUC-Rio. A utilização do espaço do Centro de Tecnologia em Dutos (CTDUT) foi apropriada para o desenvolvimento dos testes. Os dados gerados foram analisados pelos pesquisadores da PUC. Os resultados encontrados foram aproveitados para as análises, comparações e conclusões da presente pesquisa.

Foram selecionados para os ensaios um conjunto típico de espécimes tubulares (ETs) similares aos dutos empregados industrialmente pela Petrobrás. A estrutura da pesquisa, focada nos testes hidrostáticos até a ruptura e desconsiderando quaisquer efeitos de tempo, foi decidida da seguinte forma: foram projetados e fabricados 17 ETs para serem testados, sendo 10 deles feitos de aço API 5L X65 PSL2 e os outros 7 ETs de aço API 5L Gr. B. Apenas 2 tubos foram ensaiados sem a presença de defeitos, um de cada material. Em todos os outros 15 ETs foram usinados rebaixos na superfície externa com o intuito de simular um defeito de corrosão, com profundidades nominais variando entre 40%, 55% e 70% da espessura, conforme mostrado na Tabela 7. Dentre os tubos feitos de aço X65, 6 foram reparados com compósitos de fibra de vidro, 3 para cada fornecedor; os tubos de material de aço Gr. B, os 3 tiveram reparos de compósito de fibra de carbono de um fornecedor, aplicados na região do defeito.

A existência de um maior número de espécimes feitos do aço X65 se dá pelo fato de haver o interesse em avaliar dois diferentes fornecedores de reparos reforçados por fibra de vidro, os quais serão denominados nessa tese como

⁹ (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019)

“Fornecedor 1” e “Fornecedor 2”. Os reparos para os espécimes feitos de aço Gr. B são todos de fibra de carbono do “Fornecedor 3”.

A Tabela 7 apresenta uma visão geral e clara da identificação de todos os espécimes tubulares utilizados no projeto, os respectivos materiais dos espécimes e dos reparos, as porcentagens de perda de espessura produzidas na superfície externa e os testes para qual foram selecionados:

Tabela 7 - Relação dos espécimes utilizados e suas aplicações.

Espécimes tubulares (ET)	Material do tubo	Rebaixo nominal (% espessura do tubo)	Fornecedor	Tipo de reparo aplicado
ET01	Aço API 5L X65	0%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET03	Aço API 5L X65	40%	Fornecedor 1	Fibra de vidro
ET04	Aço API 5L X65	40%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET05	Aço API 5L X65	40%	Fornecedor 2	Fibra de vidro
ET09	Aço API 5L X65	55%	Fornecedor 2	Fibra de vidro
ET10	Aço API 5L X65	55%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET12	Aço API 5L X65	55%	Fornecedor 1	Fibra de vidro
ET16	Aço API 5L X65	70%	Fornecedor 1	Fibra de vidro
ET18	Aço API 5L X65	70%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET20	Aço API 5L X65	70%	Fornecedor 2	Fibra de vidro
ET23	Aço API 5L Gr. B	0%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET26	Aço API 5L Gr. B	40%	Fornecedor 3	Fibra de carbono
ET27	Aço API 5L Gr. B	40%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET29	Aço API 5L Gr. B	55%	Sem Reparo	Sem Reparo
ET31	Aço API 5L Gr. B	55%	Fornecedor 3	Fibra de carbono
ET33	Aço API 5L Gr. B	70%	Fornecedor 3	Fibra de carbono
ET34	Aço API 5L Gr. B	70%	Sem Reparo	Sem Reparo

Pode-se ver na Figura 6 os espécimes projetados e fabricados para os testes:¹⁰

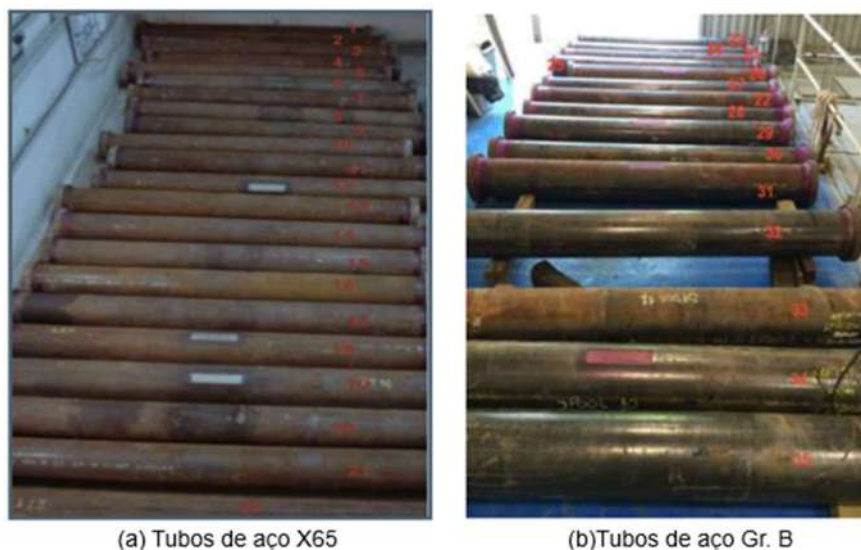


Figura 6 - Espécimes tubulares confeccionados para os testes de ruptura (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Nota-se que foram produzidos rebaixos na superfície externa de cada tubo (exceto ET01 e ET23), alinhados na metade do seu comprimento. Estes rebaixos estão indicados na Tabela 7 como porcentagem nominal da espessura de parede perdida do tubo. Eles foram introduzidos na estrutura através da técnica de eletroerosão, que será melhor explicitada adiante.

A instalação de todos os reparos foi realizada com os tubos devidamente pressurizados, de forma a simular uma situação real de operação. As pressões foram definidas pelo fiscal do projeto, tendo como base a pressão máxima que o ET com 70% de perda de espessura pode suportar sem reparo.

Tanto as propriedades do aço e do compósito quanto as condições de integridade dos reparos compósitos foram obtidas respectivamente através de ensaios de tração em corpos de prova e ensaios shearografia, realizados durante as etapas de projeto e apresentadas mais adiante.

¹⁰ A pesquisa também trabalhou com espécimes confeccionados para avaliação durante longo prazo para conhecer a influência do tempo na resistência dos espécimes reparados. Este conjunto de resultados não está contemplado na presente dissertação.

4.1. Projeto e dimensionamento dos espécimes tubulares

Conforme definidos para o projeto, a Figura 7 abaixo mostra a geometria nominal dos espécimes tubulares e a respectiva Tabela 8 indica suas dimensões nominais:

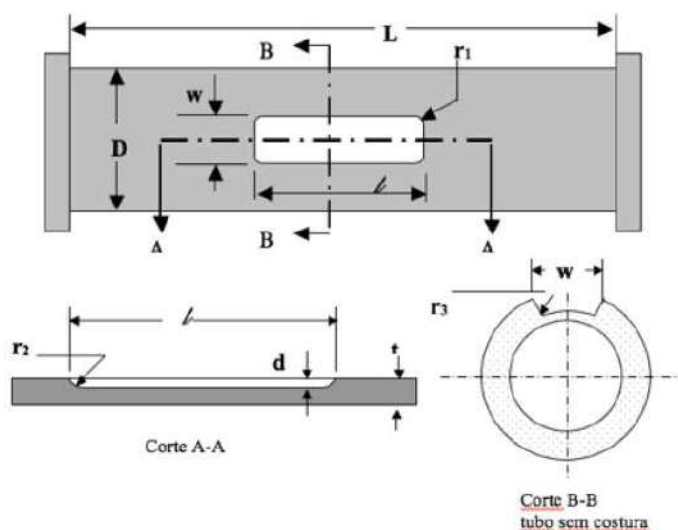


Figura 7 - Características dos espécimes tubulares. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Tabela 8 - Dimensões nominais dos espécimes com rebaiços (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Descrição	Dimensão	Valor (mm)
Diâmetro externo do tubo	D	323,9
Espessura de parede do tubo	t	8,38
Comprimento nominal do espécime	L	2900
Profundidade do rebaixo para 40% de perda de espessura	d	3,35
Espessura remanescente no rebaixo para 40% de perda de espessura	$t - d$	5,03
Profundidade do rebaixo para 55% de perda de espessura	d	4,61
Espessura remanescente no rebaixo para 55% de perda de espessura	$t - d$	3,77
Profundidade do rebaixo para 70% de perda de espessura	d	5,87
Espessura remanescente no rebaixo para 70% de perda de espessura	$t - d$	2,51
Largura do rebaixo	w	80
Comprimento do rebaixo	l	320
Raio de adoçamento da aresta radial do rebaixo	r_1	7
Raio de adoçamento da aresta circunferencial do rebaixo	r_2	7
Raio de adoçamento da aresta longitudinal do rebaixo	r_3	7

Os rebaixos foram introduzidos nos 15 tubos através do processo de eletroerosão para gerar um rebaixo na superfície externa que simula um defeito corrosivo longitudinal.

Após a confecção dos rebaixos, os tubos eles foram fechados e soldados nas extremidades com tampos planos circulares feitos de aço A-36. Essas juntas soldadas foram construídas e depois submetidas a ensaios não-destrutivos para serem avaliadas na raiz e na face da solda. O projeto dos tampos é realizado de forma a garantir que a ruptura dos testes de pressão ocorra fora da região dos tampos, isto é, no próprio corpo do tubo, que é a região de interesse para o estudo.

Por fim, foram usinados furos roscados de $\frac{3}{8}$ NPT em um dos tampos para permitir o processo de pressurização do espécime.

4.2. Levantamento dimensional dos espécimes

O levantamento dimensional dos espécimes tubulares fabricados para os ensaios será abordado nessa seção e possui relevância não só para a validação dos procedimentos experimentais, mas também para a realização dos cálculos que serão realizados nas etapas analítica e numérica, de forma a haver uma congruência entre as medidas geométricas em cada método de análise.

Todo trabalho e método utilizado para levantar as dimensões dos tubos foram transcritos em dois relatórios com abordagens similares, respectivamente para os espécimes de aço Gr. B, em (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019) e outro para aço X65, (VIEIRA, 2014).

As Figuras 8 - 11 sequenciadas a seguir ilustram os procedimentos esquemáticos efetuados para a obtenção das medições de cada grandeza desejada.

- i. Medição do diâmetro, do comprimento e da posição do rebaixo do espécime tubular:

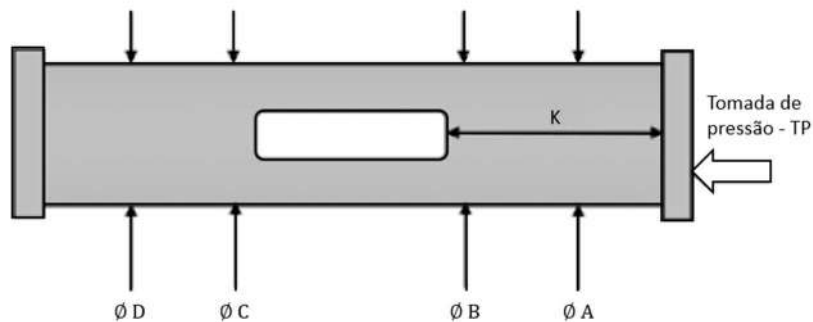


Figura 8 - Pontos de medição de diâmetro e posição do rebaixo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Realizadas medições do diâmetro externo (D) do tubo através da medição do seu perímetro externo (P), onde $P = \pi D$.

Realizada medição da distância do rebaixo com relação à extremidade do tubo onde há o tampo com tomada de pressão (K).

Realizadas medições do comprimento total do tubo (L).

- ii. Medição do comprimento, largura e raios de adoçamento do rebaixo:

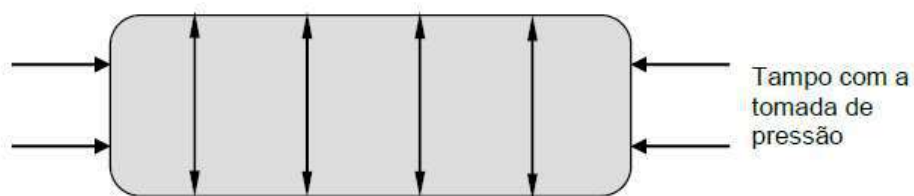


Figura 9 - Pontos de medição de comprimento, largura e raios de adoçamento do rebaixo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Realizadas medições da largura e comprimento dos rebaiços usinados, bem como os raios de adoçamento r_1 , r_2 e r_3 que foram mencionados na Figura 7.

iii. Medição da espessura do tubo:

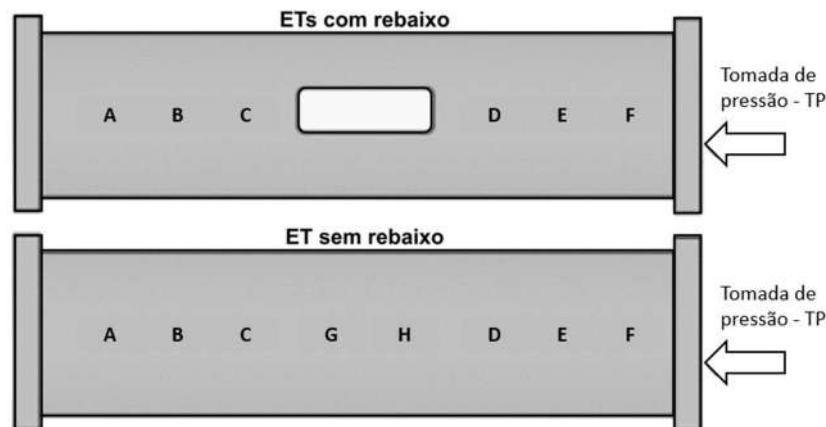


Figura 10 - Pontos de medição para espessura do tubo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Realizadas medições através da técnica de ultrassom da espessura dos tubos em cada ponto indicado na Figura 10.

iv. Medição da espessura ao redor e no fundo dos rebaiços:

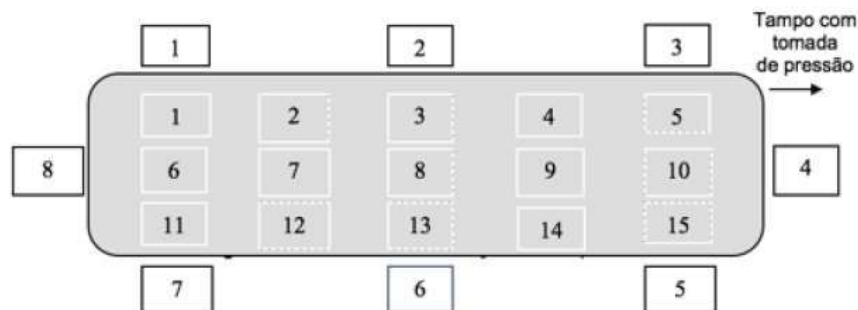


Figura 11 - Medição da espessura ao redor e no fundo dos rebaiços. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Realizadas medições das espessuras nos diversos pontos destacados na Figura 11, tanto na região do rebaiço quanto ao seu redor.

Após todo o levantamento dimensional dos espécimes, verificou-se a efetividade do processo de fabricação no que se refere à aprovação de suas dimensões nominais requeridas para os testes, ainda levando em consideração as variações existentes e as incertezas dos instrumentos de medição.

As principais dimensões levantadas nas aferições geométricas de cada espécime tubular são apresentadas na Tabela 9 abaixo de forma a representar seus valores médios:

Tabela 9 - Características dimensionais dos espécimes tubulares.

ET	Diâmetro externo D (mm)	Comprimento total L (mm)	Espessura do duto t (mm)	Rebaixo (%)	Profundidade do rebaixo d (mm)	Espessura remanescente t_s (mm)	Comprimento do rebaixo l_d (mm)	Largura do rebaixo w_d (mm)
ET01	325,9	2988	8,62	0,0%	0,00	8,62	0,00	0,00
ET03	326,1	3028	8,36	41,9%	3,50	4,86	320,25	80,00
ET04	326,1	2903	8,43	39,0%	3,29	5,14	320,75	79,90
ET05	327,0	2919	8,52	41,4%	3,53	4,99	320,00	80,10
ET09	326,0	2986	8,40	51,9%	4,36	4,04	320,00	79,78
ET10	326,0	2932	8,67	50,8%	4,40	4,27	320,75	80,35
ET12	326,1	2899	8,64	55,4%	4,79	3,85	320,00	80,20
ET16	325,9	2984	8,46	68,7%	5,81	2,65	320,75	80,43
ET18	326,1	2903	8,51	66,4%	5,65	2,86	320,25	81,20
ET20	326,1	3002	8,54	68,7%	5,87	2,67	321,00	80,10
ET23	325,5	2870	8,40	0,0%	0,00	8,40	0,00	0,00
ET26	325,2	2871	8,59	39,5%	3,39	5,20	318,00	79,75
ET27	324,9	2963	8,32	41,9%	3,49	4,83	318,00	79,98
ET29	325,2	2962	8,43	52,9%	4,46	3,97	319,00	79,88
ET31	324,8	2860	8,48	53,2%	4,51	3,97	319,00	79,80
ET33	325,1	2861	8,32	68,0%	5,66	2,66	320,00	80,70
ET34	324,9	2961	8,88	61,0%	5,42	3,46	320,00	80,63

A finalização deste processo possibilitou o agrupamento de espécimes com características dimensionais mais semelhantes entre si e a devida seleção de cada um deles para seus respectivos ensaios.

4.3. Aplicação do reparo nos espécimes tubulares

O dimensionamento e a aplicação dos reparos em cada tubo foram realizados pelos fornecedores, os quais seguem critérios estabelecidos por seus próprios procedimentos e nas normas ISO 24817 e ASME PCC-2, onde foram considerados defeitos que não atravessam a parede do tubo (tipo A), ausência de vazamentos e temperatura ambiente de operação e de instalação (Apêndice C da norma não é aplicável). A norma fornece os cálculos para a espessura mínima de reparo necessária para dividir e suportar a carga proveniente da pressão interna em

conjunto com o aço (por vezes, nesse sistema, o duto de aço também é chamado de substrato).

A pressão de entrada que foi usada para calcular a espessura de reparo requerida para aplicação no duto defeituoso, considerando a situação experimental e utilizando a norma ISO 24817, foi a pressão de projeto dada pela equação 3, onde os fatores de projeto (*F.E.T.*) são iguais à 0,72. Sabendo-se que *SMYS* corresponde à mínima tensão de escoamento especificada do aço que compõe o duto, isto é o mesmo que calcular a pressão interna que causaria 72% dessa tensão limite de escoamento na estrutura do duto íntegro. Com isto, as pressões calculadas para o projeto dos reparos foram 16,7 *MPa* para o duto de aço X65 e 9,1 *MPa* para Gr. B. As espessuras dos reparos instalados serão apresentadas mais à frente na tese.

Como já dito anteriormente, por requisição da Petrobrás todos os reparos foram aplicados enquanto os tubos estavam pressurizados a fim de reproduzir a situação real de serviço de um duto em campo. Para o procedimento de instalação, a pressão interna precisa ser reduzida de forma a considerar uma pressão segura para um duto com perda de espessura. Isto foi feito utilizando o procedimento descrito na norma ASME B31G-2012 nível 1 através da equação 4, considerando defeito retangular longo, de forma a obter $P_{defeito}$ e aplicar o fator de segurança de 1,25 da seguinte forma:

$$P_{seguro} = \frac{P_{defeito}}{fator} = \frac{P_{defeito}}{1,25} \quad (17)$$

Através desse cálculo, chegou-se aos seguintes resultados de pressões máximas que os tubos devem ter durante o serviço de reparo:

Rebaixo	X65	Gr. B
	P_{seguro} (MPa)	P_{seguro} (MPa)
40% de espessura	12,29	6,69
55% de espessura	9,22	5,02
70% de espessura	6,15	3,35

Tendo como base o caso mais crítico, ou seja, o valor obtido da pressão máxima a ser suportada pelo espécime tubular com 70% de perda de espessura com e sem reparo, foi então definido pelo fiscal da Petrobrás que fosse introduzida uma pressão durante o serviço de reparo de 4,0 MPa para os tubos de X65 e 2,5 MPa para os tubos de Gr. B, independente do rebaixo (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019, p. 33).

A pressurização ocorreu através do bocal que existe em um dos tampos de cada espécime tubular, onde foi feita a conexão de uma mangueira acoplada ao sistema que controla a injeção da água pressurizada. A Figura 12 abaixo apresenta o tampo com a tomada de pressão do espécime, onde pode-se verificar a presença de uma válvula instalada para garantir a pressão. É válido ressaltar que essa pressão é confirmada por meio de um manômetro montado no espécime, que permite inclusive apurar a pressão no instante da ruptura do espécime.



Figura 12 - Detalhe do bocal de pressurização do espécime e da válvula de manutenção da pressão. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019, p. 33).

Juntamente à aplicação do reparo nos tubos foram também instalados sensores de deformação de fibra óptica (extensômetros) pelos pesquisadores da PUC-Rio. Estes sensores medem a deformação de acordo com a direção em que são instalados e foram montados tanto na superfície metálica do espécime quanto nas diferentes camadas de reparo, o que permite a apuração das deformações não só em

pontos estratégicos do espécime como também no mapeamento do grau de deformação ao longo da espessura dos reparos. Após o reparo e toda a instrumentação do tubo instalados, foi feita a verificação de cada um dos sensores ópticos para constatar sua integridade e eficiência operacional.

No total, seis sensores de fibra óptica foram instalados em cada um dos espécimes tubulares reparados: 1 na região afastada do rebaixo (direção circunferencial), 2 na região do rebaixo (direção circunferencial e longitudinal) e 3 entre as primeiras camadas do reparo (direção circunferencial). A instalação dos extensômetros nos reparos vai variar de acordo com a profundidade do defeito em cada espécime. A Figura 13 ilustra bem a situação descrita acima.

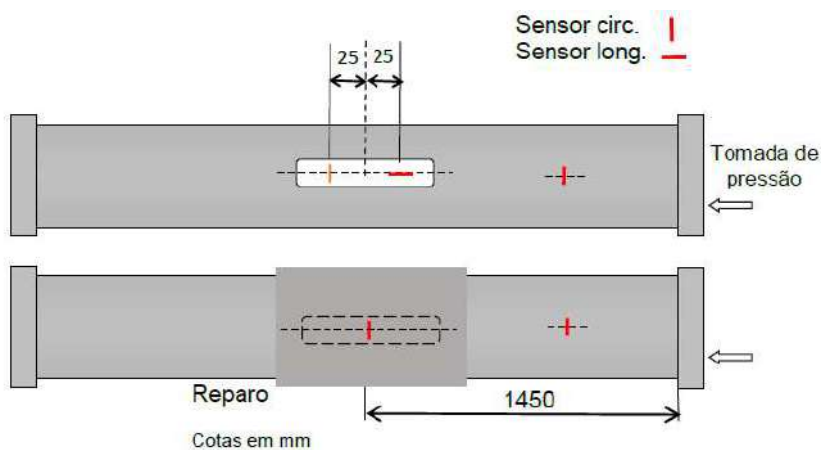


Figura 13 - Pontos de instalação dos sensores no metal (figura superior) e das camadas do reparo (figura inferior). Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

A estratégia escolhida para instalar estes sensores se estabeleceu dessa maneira para facilitar a análise das diferentes deformações presentes no processo de pressurização do tubo até a ruptura. Tendo como base a relação entre tensão e deformação das equações constitutivas, uma estimativa válida seria de que os sensores instalados na superfície metálica na região do rebaixo (circunferencial e longitudinal) são os que provavelmente medirão as maiores deformações, devido a um campo elevado de concentração de tensões causado pela irregularidade geométrica local, o qual, por sua vez, influencia diretamente a ocorrência das deformações plásticas na região. Contudo, tal ocorrência não pode ser afirmada de fato pois depende do nível de eficácia do reparo em dividir a tensão com o aço, o que pode simplesmente impedir um grau excessivo de deformação na região do defeito a ponto de provocar a ruptura do tubo nas regiões fora do reparo. Logo, o

material utilizado para o reparo certamente exercerá influência na condição de distribuição da carga entre ambos os componentes.

Sendo assim, intuitivamente, o extensômetro instalado na região nominal do espécime, ou seja, longe do rebaixo, não deve sofrer qualquer influência expressiva com relação às tensões e deformações pelo fato de estar distante o suficiente da zona irregular. Assim, a região nominal se torna interessante pois viabiliza a comparação relativa e mensura a diferença, em termos de tensão/deformação, entre ambos os pontos de medição causada pelo aumento gradativo da pressão interna.

As medidas de deformação obtidas nas diferentes camadas de mantas de compósito aplicadas na região do defeito permitem avaliar o quanto o reparo como um todo pôde resistir, em termos de deformação medida, aos ensaios submetidos. Neste caso, devido à distância radial, espera-se que as primeiras camadas apresentem maiores deformações, evidenciando um decrescimento ao longo da espessura do reparo.

A Tabela 10 a seguir estabelece a relação das espessuras estimadas dos reparos instalados em cada um dos 9 espécimes destinados ao ensaio de ruptura. As medidas foram tomadas pelos pesquisadores da PUC-Rio após a aplicação feita pelos fornecedores. Através da subtração das medições dos perímetros nos tubos metálicos e dos perímetros nas regiões centrais dos reparos compósitos, pôde-se obter medidas da espessura em diferentes pontos do reparo e calcular o valor médio obtido entre eles.

Tabela 10 - Características geométricas dos reparos instalados.

ET	Rebaixo	Reparo	Espessura média (mm)	Comprimento (mm)
ET03	40%	Fornecedor 1	23,6	534
ET05	40%	Fornecedor 2	22,3	600
ET09	55%	Fornecedor 2	29,9	600
ET12	55%	Fornecedor 1	27,1	534
ET16	70%	Fornecedor 1	34,4	534
ET20	70%	Fornecedor 2	35,3	600
ET26	40%	Fornecedor 3	22,3	709
ET31	55%	Fornecedor 3	23,9	769
ET33	70%	Fornecedor 3	33,1	809

4.3.1.Reparo do fornecedor 1 (fibra de vidro)

Este tipo de reparo consiste basicamente em composto de resina poliuretana reforçada por fibra de vidro e foi instalado pelo Fornecedor 1 em nove espécimes de aço X65 com rebaixo (3 destinados para teste de ruptura e 6 para teste de relaxação). Conforme visto na seção anterior, a instalação precisou ser feita com os tubos pressurizados a 4,0 MPa.

O processo de reparo feito pelo Fornecedor 1 utiliza tecnologia desenvolvida pela Strongback™. Inicia-se com a limpeza da região onde os sensores de deformação são instalados. Cada sensor é colado no metal e protegido com uma camada de epóxi. Em seguida, as camadas de fibra de vidro são montadas e sensores extras são colocados à medida que outras camadas vão sendo aplicadas. O próprio adesivo (matriz) do compósito ajuda com a fixação dos sensores. O reparo é concluído quando é alcançada a espessura previamente projetada pelo fornecedor. De acordo com o fornecedor, a cura do reparo é completada em média após 30 dias. Uma regra prática informada pelo fornecedor indica que a cura se completa em um número de dias igual ao número de camadas (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

A fim de alcançar as espessuras indicadas na Tabela 10, foram instaladas 22 camadas de compósito para o espécime com 40% de perda de espessura, 30 camadas para o com 55% e 38 camadas para o com 70%. Com relação ao comprimento axial do reparo que, de acordo com a Strongback, é independente da profundidade do defeito, foi utilizado o valor nominal de 534 mm conforme também indicado na Tabela 10, representando uma sobra lateral de cerca de 107 mm para cada lado do defeito na direção longitudinal.

4.3.2.Reparo do fornecedor 2 (fibra de vidro)

Este tipo de reparo é composto por uma matriz polimérica de resina epóxi impregnada em um tecido bidimensional de fibra de vidro através do processo de laminação manual (adesivo entre camadas), sendo o reparo aplicado pelo fornecedor 2 em nove espécimes de aço X65 (3 destinados para teste de ruptura e 6 para teste de relaxação). Este material também foi instalado com os tubos pressurizados a 4 MPa para atender aos requisitos do projeto.

Os sensores de fibra óptica foram instalados pela PUC-Rio seguem a mesma disposição mencionada na Figura 13. Ao longo da espessura total dos reparos foram

instalados circunferencialmente três sensores na 3^a, 20^a e 34^a camadas, respectivamente. A espessura e o comprimento axial de cada reparo também estão listados na Tabela 10 (lembrando que tanto a espessura quanto comprimento do reparo são dados resultantes de equações da normativas de projeto).

Seguindo-se a memória de cálculo apresenta pelo fornecedor, cada camada de compósito aplicado possui espessura de 0,3 mm. Logo, baseado no projeto do reparo calculado, estimou-se que o fornecedor 2 aplicou em torno de 71, 97 e 124 camadas para o ET05, ET09 e ET20 respectivamente.

O processo de reparo do Fornecedor 2 denominado PIPEFIX™ inicia com a limpeza da região onde o sensor de deformação será instalado. O sensor é colado no metal e protegido com uma camada de epóxi. Em seguida as camadas de fibra de vidro, imersas em adesivos entre camadas, são montadas e sensores extras são colocados à medida que mais camadas vão sendo aplicadas. O reparo é concluído quando é alcançada a espessura previamente especificada pelo fornecedor, o qual informa o tempo de cura de 12 horas.

4.3.3.Reparo do fornecedor 3 (fibra de carbono)

O Fornecedor 3 fornece reparos de material compósito de fibra de carbono e resina epóxi, que foram instalados em nove espécimes de aço Gr. B nas instalações do CTDUT (3 destinados para teste de ruptura e 6 para teste de relaxação). Os tubos de aço Gr. B se mantiveram pressurizados à 2,5 MPa durante a instalação dos reparos.

Novamente, os sensores de fibra óptica foram instalados pelos pesquisadores da PUC-Rio, obedecendo a disposição já apresentada. Para esse material, 9 camadas do material foram aplicadas aos tubos com 40% de perda de espessura, 12 para os com 55% e 14 para os com 70%, com cerca de 2mm cada camada, a fim de chegar nas espessuras ideais. Os três sensores instalados diretamente no reparo ficaram dispostos na primeira, terceira e sexta camada de cada espécime. Nesse caso, o comprimento axial dos reparos varia conforme a perda de espessura do espécime, sendo 709 mm, 769 mm e 809 mm para os tubos com porcentagem perdida da espessura de 40%, 55% e 70% respectivamente. Esses valores também estão indicados na Tabela 10.

O processo de reparo do fornecedor 3, denominado Belzona SuperWrap IITM, inicia com a limpeza da região onde o sensor de deformação é instalado. O sensor é colado no metal e protegido com uma camada de epóxi. Em seguida as camadas de fibra de carbono, imersas em adesivos entre camadas, são montadas e sensores extras são colocados à medida que mais camadas vão sendo aplicadas. O reparo é concluído quando é alcançada a espessura previamente projetada pelo Fornecedor 3.

4.4. Propriedades mecânicas dos materiais compósitos

Foram conduzidos ensaios de tração no material compósito do reparo feito por cada um dos três fornecedores. Para cada um deles, foram considerados testes longitudinais (paralelos à direção que possui a maior concentração de fibras), testes transversais (perpendiculares à direção que possui a maior concentração de fibras) e testes a 45° (na direção inclinada num ângulo de 45° com a direção de maior concentração de fibras). Dessa maneira, é possível mensurar o comportamento mecânico de cada reparo frente às solicitações que fogem do eixo principal, levando em conta que a direção de interesse é a direção das fibras. A Figura 14 mostra exemplos típicos do resultado obtido para os diagramas tensão e deformação de cada material, de modo a obter o módulo de elasticidade e a tensão de resistência máxima nas diferentes condições de carregamento.

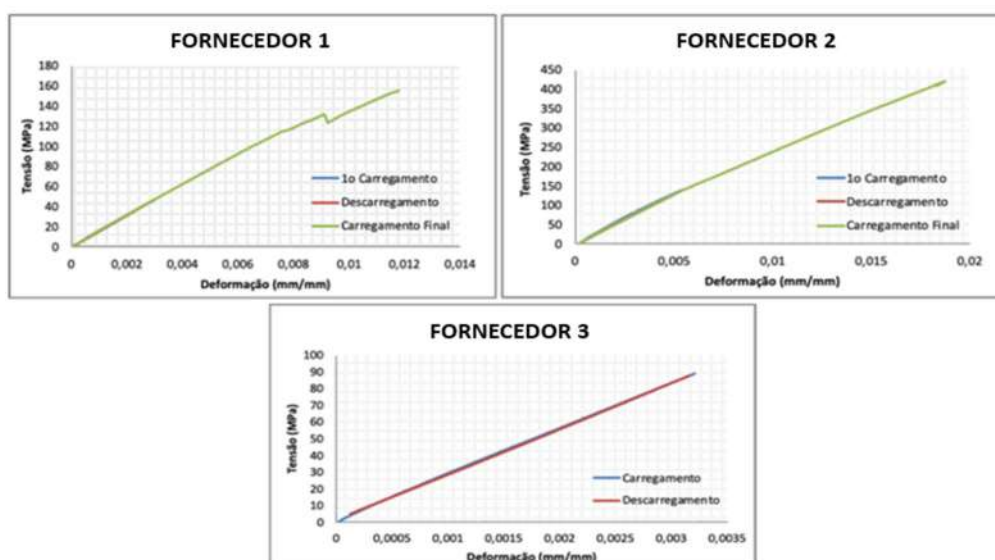


Figura 14 - Exemplo do diagrama tensão e deformação, obtido na direção das fibras a partir do ensaio de tração nos materiais compósitos dos fornecedores 1, 2 e 3 respectivamente. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

4.4.1. Ensaios de Shearografia

Foram realizados também ensaios de shearografia nos 27 espécimes com reparo. O objetivo do ensaio é detectar defeitos introduzidos nos reparos durante a sua fabricação, ou seja, identificar as regiões com falhas de adesão entre as camadas de material compósito e entre ele e a superfície metálica.

O sistema de shearografia levado a campo é apresentado na Figura 15 e consiste dos módulos de iluminação, de visão, de comando e potência e de excitação. Este último é responsável por aplicar a variação de pressão nos tubos que induz um campo de deformações no material analisado. Quando o reparo apresenta boa aderência ao metal não existe descontinuidade no campo de deformações obtido pela shearografia.

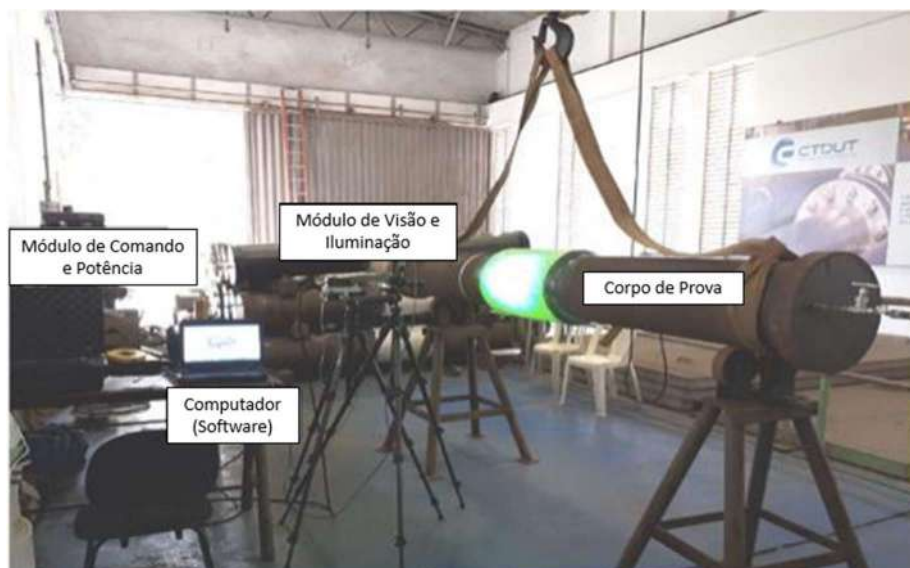


Figura 15 - Sistema de shearografia usado pela UFSC. Ensaios realizados no CTDUT.

Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Os típicos resultados desse tipo de teste são mostrados nas Figura 16a e 16b. O retângulo azul da imagem indica a região do rebaixo nos ETs. Na Figura 16a é observada a imagem que sugere a presença de defeitos, apontados pelas elipses amarelas, situação em que ocorre o descolamento entre as camadas do próprio reparo ou entre as camadas do compósito e o metal. Na Figura 16b é representada a imagem que mostra a ausência de defeito.

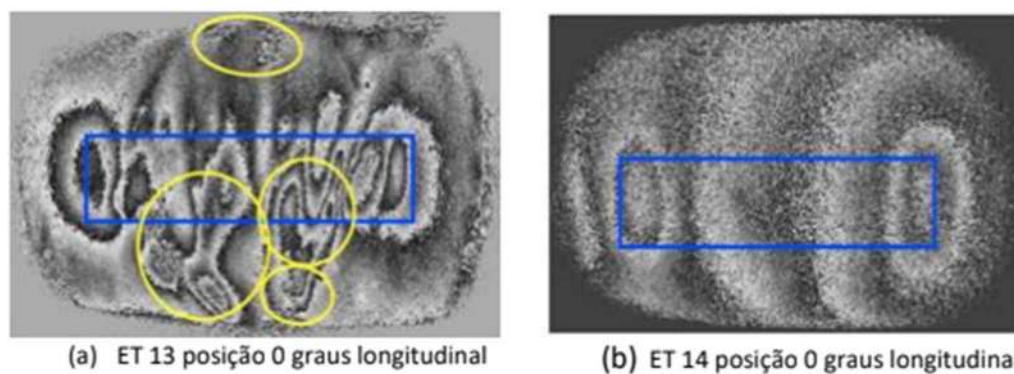


Figura 16 - Imagens obtidas pelo ensaio de shearografia em dois espécimes reparados.

Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

De acordo com Relatório técnico do projeto de pesquisa (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019), em geral os reparos feitos pelo Fornecedor 1 foram os que apresentaram a maior quantidade de descolamentos entre as camadas. Os realizados pelo Fornecedor 3 também apresentaram descolamento. Entretanto, como as características construtivas do reparo usando fibra de carbono podem gerar resultados falso-positivos, a avaliação da shearografia foi prejudicada. Por outro lado, os reparos do Fornecedor 2 tiveram boa aderência entre as camadas do próprio reparo e entre elas e o metal base.

É importante destacar que a não adesão entre camadas não é uma característica suficiente para determinar a eficácia de um dado tipo de reparo. Apenas os testes de pressão propostos podem aferir essa característica.

4.5. Propriedade mecânica dos aços

As propriedades mecânicas fundamentais dos espécimes tubulares concebidos para este projeto foram determinadas por meio de ensaios de tração realizados em 16 corpos de prova de aço Gr. B retirados do material de fabricação dos 13 espécimes. A Figura 17 mostra um diagrama tensão e deformação típico do material, onde pode ser observado como foram determinados os limites de escoamento e de ruptura.

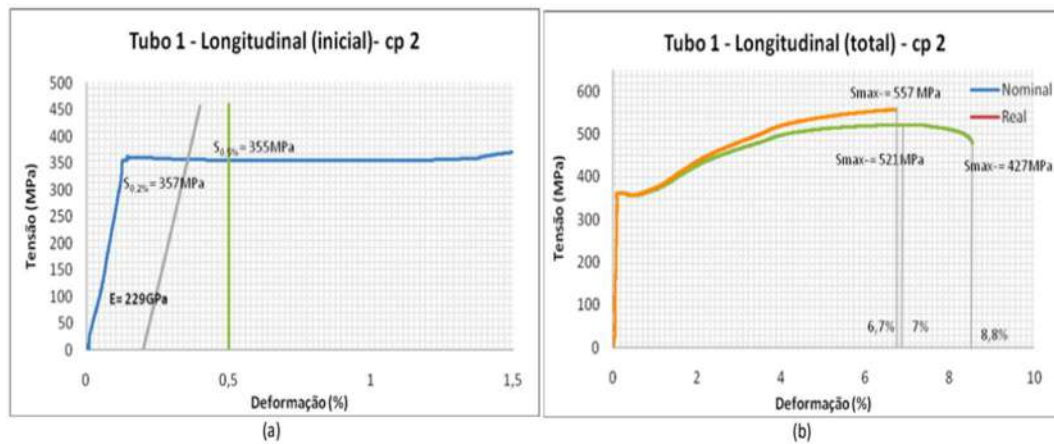


Figura 17 - Figura exemplificando um diagrama tensão e deformação típico obtido para a estimativa dos limites de (a) escoamento e (b) ruptura do Gr. B.

Por impossibilidade de avaliar o lote de material aço X65 utilizado para o projeto da presente pesquisa, as propriedades mecânicas dos espécimes tubulares de aço X65 foram retiradas do relatório de ensaio de tração realizado. Estes ensaios foram conduzidos em materiais retirados de 15 tubos confeccionados com aço X65 para o antigo projeto denominado “Ensaio para estudo da durabilidade de reparos de material composto em dutos”. A Figura 18 a seguir mostra a curva tensão e deformação típica de engenharia para o aço X65, as quais foram utilizadas para determinação das propriedades.

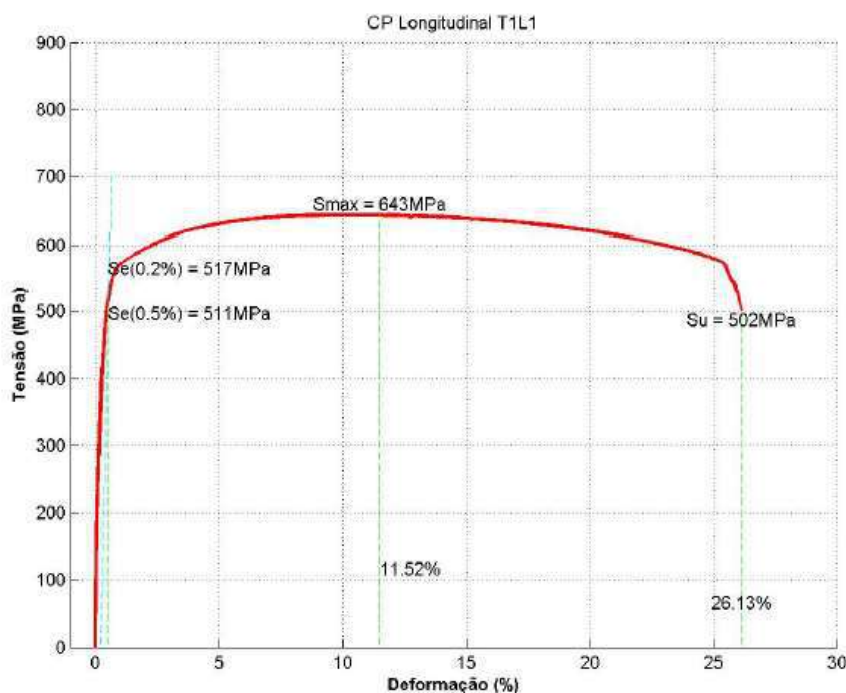


Figura 18 - Figura exemplificando um diagrama tensão e deformação típico obtido do aço X65 para a estimativa das propriedades.

4.6. Ensaio de Ruptura (Teste Hidrostático)

O ensaio de ruptura ao ar nada mais é do que a realização de um teste hidrostático nos tubos de modo em que a pressão interna é lentamente elevada até que ocorra a ruptura, instante onde é possível registrar a resistência mecânica do componente. Normalmente, os testes hidrostáticos possuem o intuito de validar a resistência e integridade do duto e verificar a existência de possíveis vazamentos através do enchimento completo, lento e incremental do líquido a ser pressurizado.

Como se pode verificar na Tabela 9, foram considerados para o teste de pressão à ruptura um total de 17 espécimes tubulares de geometria controlada, com e sem defeito, para a situação em que a pressão interna é elevada através da injeção de água e, conseqüentemente, a tensão circunferencial aumenta paulatinamente de forma a atravessar todo o processo de escoamento do aço até chegar em sua falha no rompimento. Para o caso especificamente dos dutos com reparo, foram aplicados 10 ciclos na pressão de operação (0 – 167 *bar*) previamente aos testes de ruptura, como será mostrado mais adiante.

No caso dos espécimes reparados, mesmo após o escoamento, o rompimento do sistema pode vir a ocorrer primeiro no reparo, evidenciando uma provável falha na reconstituição da integridade do duto (não se considera, no entanto, uma regra).

Para antecipar e clarificar o processo de interpretação dos resultados que será discutido nos capítulos posteriores, é válido salientar os possíveis resultados que se pode obter nos testes de ruptura dos tubos:

- i. Primeiro, existe o caso em que o sistema duto/reparo romperá longe do reparo, ou seja, na região nominal do duto. Este caso pode sugerir a reconstituição da integridade original do tubo e eficiência do reparo, levando-se em conta que a pressão necessária para romper o espécime na região nominal deve ser pelo menos a pressão de ruptura do mesmo espécime íntegro.
- ii. Segundo, existe o caso em que o sistema duto/reparo romperá na região do rebaixo sob o reparo. A depender da pressão que acarretou a ruptura, este caso pode sugerir tanto a eficiência (pressão de ruptura do tubo reparado similar ao do tubo íntegro) quanto ineficiência (pressão de ruptura do tubo reparado relativamente menor que do tubo

íntegro) da funcionalidade do reparo, visto que permitiu níveis elevados de tensão no rebaixo à ponto de ocasionar ruptura.

- iii. Terceiro, existe o caso em que o sistema duto/reparo romperá inicialmente no reparo, o que muito provavelmente acarretará a consequente ruptura do tubo na região do rebaixo por causa das maiores tensões concentradas. Como no caso anterior, este caso pode sugerir tanto a eficiência quanto a ineficiência do reparo, dependendo da pressão que causou a ruptura do reparo.

4.6.1.Dutos sem reparo

De acordo com o planejamento dos testes, oito espécimes tubulares sem reparo foram ensaiados até a ruptura, onde quatro desses foram fabricados de aço X65 e quatro de aço Gr. B. Assim, os espécimes de aço X65 utilizados foram ET01 (sem rebaixo), ET04 (rebaixo de 40%), ET10 (rebaixo de 55%) e ET18 (rebaixo de 70%). De forma análoga, os espécimes de aço Gr. B foram ET23 (sem rebaixo), ET27 (rebaixo de 40%), ET29 (rebaixo de 55%) e ET34 (rebaixo de 70%).

A pressurização é monitorada até a ruptura pelo manômetro e sensores instalados. É possível ver na Figura 19 um exemplo dos diagramas para essas medidas para os tubos X65 com rebaiços. Informações adicionais sobre os ensaios são encontradas nos Apêndices ao final da tese.

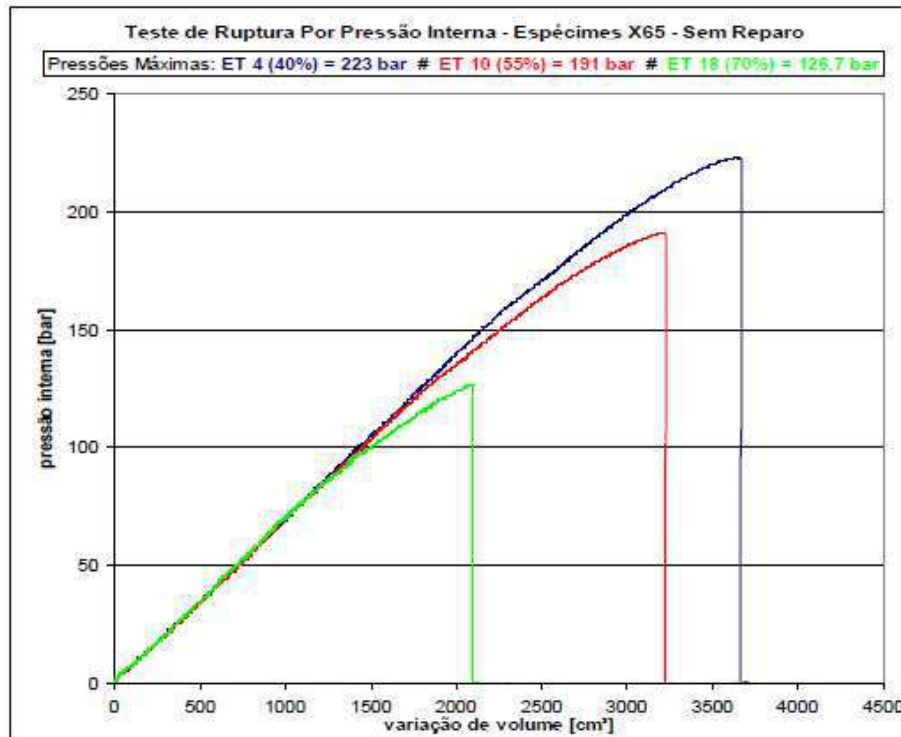


Figura 19 - Exemplo de variação da pressão imposta e do volume de água injetado durante o teste nos espécimes X65 sem reparo (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019, p. 94).

Além da determinação das deformações através da extensometria usada em todos os espécimes, também foi utilizada a técnica de correlação digital de imagem (DIC) nos tubos ET04, ET10 e ET18 de aço X65 e ET 34 de aço Gr. B. A aquisição das imagens foi obtida até um valor de pressão inferior à ruptura do duto. Com isto, evitou-se que os equipamentos do sistema DIC (sistemas de câmeras, computador etc.) fossem danificados em decorrência das condições de rompimento da estrutura.

O DIC fornece a informação do campo completo de deformação na área de interesse. O ponto escolhido para plotagem dos diagramas pressão versus deformação foi aquele onde se obteve a máxima deformação na última imagem capturada do ensaio. Como mostrado no exemplo da Figura 20 para o ET04, nem sempre esse ponto coincide com a posição da do sensor da fibra óptica.

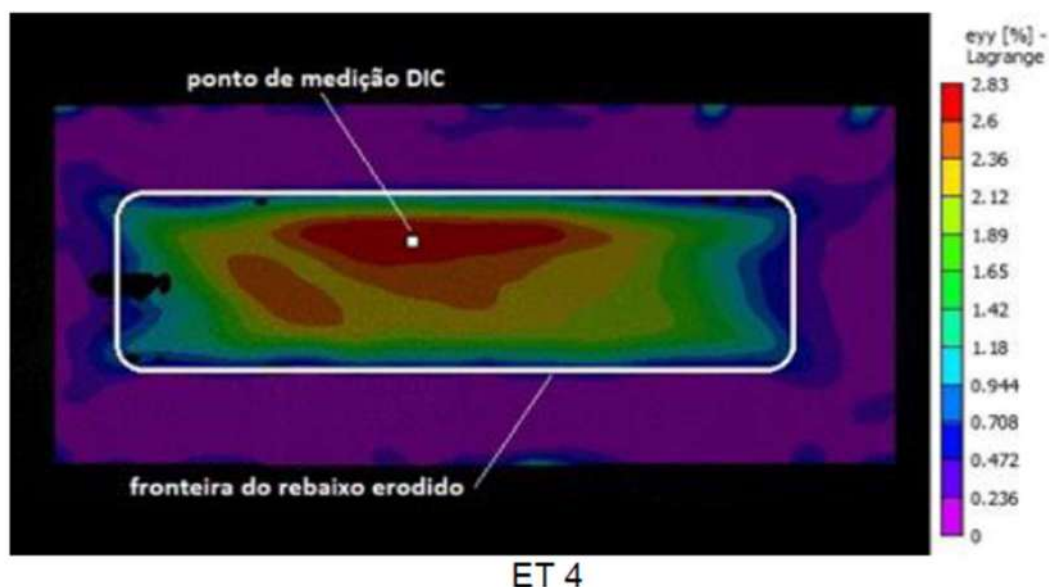


Figura 20 - Exemplo do campo de deformações obtidas pelo DIC para o ET04.

4.6.2.Dutos com reparo

Conforme já apresentado, foram testados à ruptura um total de 9 espécimes reparados e com rebaiços variando de 40%, 55% e 70% da espessura. Os tubos foram pressurizados com água, também sendo monitorados os valores de pressão em função do volume de líquido injetado até a ruptura. Os testes foram conduzidos na seguinte sequência: inicialmente são aplicados 10 ciclos na pressão de operação (0 - 167 bar), depois é descarregada a pressão de operação para então ser novamente imposta e mantida por 1 hora, período no qual são verificadas se ocorrem variações de pressão interna e deformações (indicativos de possíveis vazamentos, falhas no sistema de monitoramento ou aumento de deformação devido ao tempo de carregamento). Por fim, a pressão é finalmente aplicada de forma lenta e gradual até a ruptura do espécime. O tempo médio de pressurização desses testes foi de 35 a 40 minutos.

As Figuras 21, 22 e 23 exemplificam essa sequência do teste no ET12. Os resultados para os outros espécimes estão nas Figuras do Apêndice I.

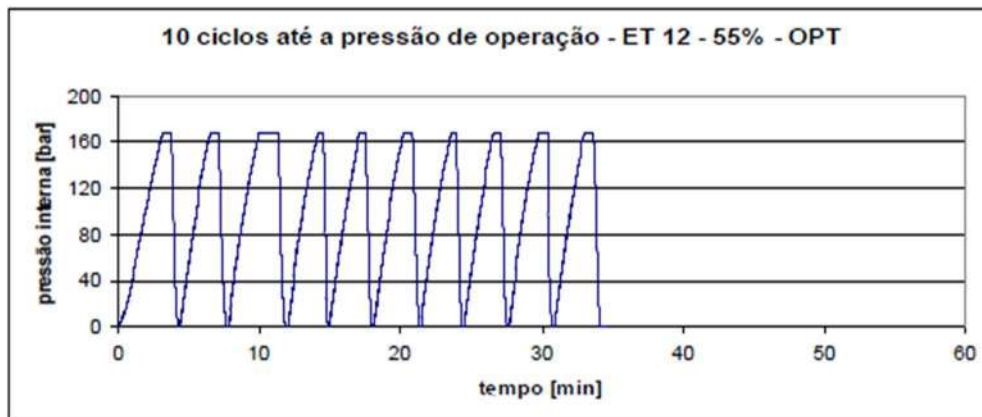


Figura 21 - Ciclos de carregamento até a pressão de operação, gráfico de pressão interna x tempo.

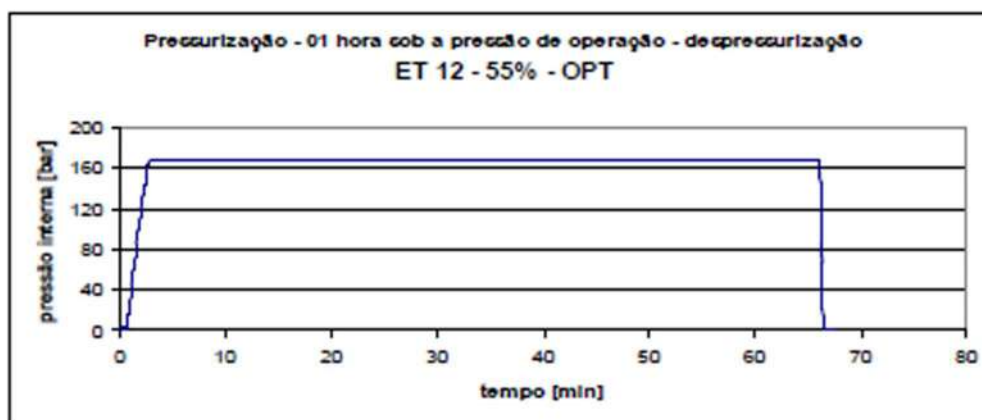


Figura 22 - Carregamento sob pressão de operação por cerca de 1 hora, gráfico de pressão interna x tempo.

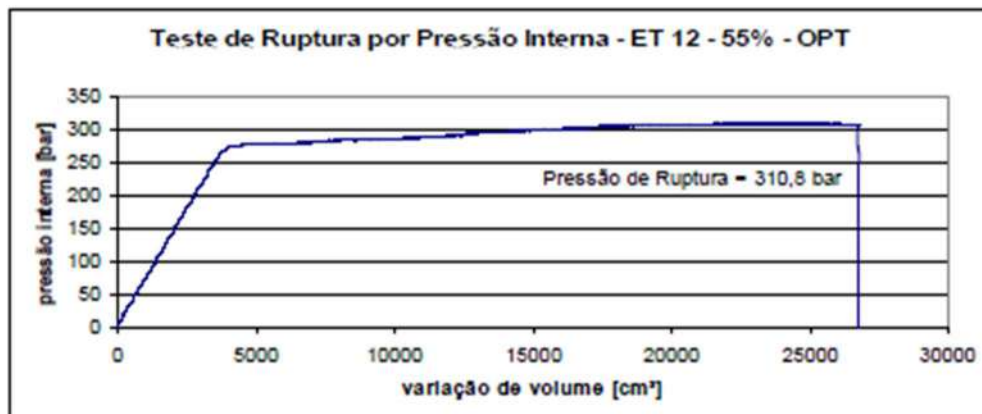


Figura 23 - Pressão interna e volume de água injetado no espécime com reparo ensaiado à ruptura.

As deformações na região central dos rebaixos são obtidas por meios de sensores ópticos instalados no metal e nas diferentes camadas do reparo, conforme discutido na subseção 4.1.3. Para esses casos não foram obtidas deformações por correlação de imagem digital (DIC).

5 Metodologia da Pesquisa – Abordagem Analítica

A avaliação realizada na etapa analítica consiste basicamente na utilização de equações provenientes de normas e teorias da mecânica de reparos, objetivando sua validação por comparação com os resultados obtidos nos ensaios de ruptura conduzidos em campo. Da mesma maneira em que foram testados experimentalmente até a ruptura dutos sem e com reparo, igualmente se procedeu na análise teórica, onde métodos analíticos semiempíricos advindos de códigos como ASME B31.G, B31.G modificado, Área Real e DNV-RP-F101 foram aplicados para os dutos corroídos; e outros métodos analíticos como ASME PCC-2 e ISO 24817 foram considerados na avaliação dos dutos reparados com material compósito.

5.1.Dados geométricos

As primeiras considerações e simplificações a serem feitas aqui são relacionadas à geometria dos espécimes e de seus respectivos reparos instalados, quando presentes. Conforme mostrado nas Tabelas 9 e 10, referentes aos dados geométricos retirados das medições em campo dos tubos e dos reparos, respectivamente, os valores selecionados para utilização nos cálculos teóricos são baseados na média aritmética obtida para cada dimensão, demonstrando pouca variabilidade no geral em relação ao valor médio.

O procedimento empregado para medição das principais dimensões dos espécimes tubulares já foi explicado na seção 4.1.2. As espessuras dos revestimentos compósitos foram estimadas através de medições dos perímetros dos tubos metálicos e dos perímetros das regiões centrais dos reparos.

5.2.Propriedades mecânicas

De forma análoga, as principais propriedades mecânicas utilizadas nas equações também foram definidas com base nos valores médios calculados,

apresentados na Tabela 11 referente aos compósitos e na Tabela 12 referente aos aços, as quais são mostradas adiante no texto. Com isso, garante-se um padrão na metodologia do estudo que, por sua vez, proporciona uma estimativa consistente dos resultados.

A Tabela 11 exibe os resultados dos valores médios do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de resistência à tração obtidos do ensaio de tração uniaxial, na direção longitudinal de acordo com as fibras, para os três materiais compósitos do projeto:

Tabela 11 - Principais propriedades mecânicas retiradas dos ensaios de tração nos compósitos utilizados nos reparos.

Reparo de Compósito	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson	Resistência à tração (MPa)
Fornecedor 1	15,3	0,12	162
Fornecedor 2	27,9	0,18	418
Fornecedor 3	27,3	0,24	254

Conforme os relatórios de ensaio de tração realizados para ambos os materiais de aço, as principais propriedades foram estimadas através de seu valor médio considerando todos os corpos de prova utilizados e levando em conta a isotropia dos aços. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 12 - Principais propriedades mecânicas retiradas dos ensaios de tração dos aços X65 e Gr. B.

Material	Aço API 5L X65	Aço API 5L Gr. B
Resistência nominal ao escoamento $\varepsilon_{0,2\%}$ (MPa)	525	346
Resistência nominal ao escoamento $\varepsilon_{0,5\%}$ (MPa)	526	348
Resistência nominal à tração (MPa)	652	497
Deformação total referente à resistência à tração (%)	11%	12%
Módulo de elasticidade (GPa)	200 ¹¹	209

Outra consideração importante se trata do comportamento mecânico do aço com a linearidade isotrópica elástica e do encruamento isotrópico linear, ou seja, a implementação da curva tensão-deformação bilinear dos aços. Para tanto, é necessário o estabelecimento de um coeficiente referente à etapa de encruamento isotrópico linear (também denominado módulo tangente E'), o qual irá simular um escoamento linear do material até a ruptura através deste valor previamente estabelecido.

Um exemplo típico de curva tensão-deformação nominal para o aço já foi apresentado na Figura 18. Pode-se utilizar uma curva semelhante para a construção da curva bilinear, conforme ilustrado na Figura 24 abaixo:

¹¹ Os dados de módulo de elasticidade do aço X65 não foram disponibilizados no relatório dos ensaios de tração, portanto foi considerado o valor de 200 GPa para este material.

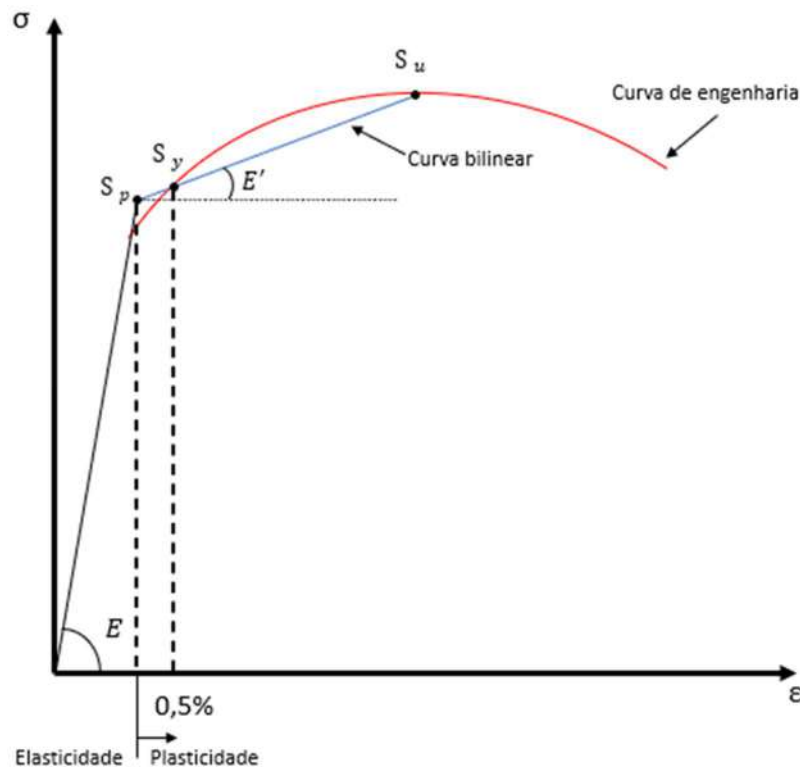


Figura 24 - Exemplo de curva tensão-deformação bilinear para o aço, construída a partir da sua curva de engenharia retirada de seu ensaio de tração.

Percebe-se pelo gráfico que a linha vermelha representa a curva tensão-deformação de engenharia, a qual apresenta os pontos de tensão limite de escoamento (S_y) e de tensão limite de resistência (S_u) do material. Para a construção da curva bilinear é necessário estabelecer uma reta entre estes dois pontos de tensão, a qual deverá caracterizar o módulo de encruamento linear do material (E'), que por sua vez pode ser calculado através da equação

$$E' = \frac{S_u - S_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (18)$$

sendo S_u e S_y as tensões limite de resistência e de escoamento (calculada pela deformação total de 0,5%) do aço, ε_u e ε_y as deformações na tensão limite de resistência mecânica e de escoamento (0,5%), respectivamente, obtidas nos ensaios de tração.

A linha em azul representa a curva tensão-deformação bilinear, onde a primeira reta sai desde o ponto inicial do ensaio, caminhando sob o mesmo coeficiente angular do módulo de elasticidade, até o ponto de encontro com a reta

traçada que corresponde ao encruamento linear. Pode-se notar na figura que a interseção entre as retas corresponde ao ponto chamado de tensão limite de proporcionalidade (S_p).

Logo, para os cálculos, também foi feita a consideração de que o escoamento do aço teve início no ponto anterior ao limite de escoamento estimado ($S_{y-0,5\%}$), isto é, o aço começa a plastificar no ponto correspondente à tensão limite de proporcionalidade (S_p), o qual pode ser calculado da seguinte forma.

Sabendo-se que

$$S_{max} = S_u = S_p + E'(\varepsilon_u - \varepsilon_{y-0,5\%}) \quad (19)$$

logo

$$S_p = S_u - E'(\varepsilon_u - \varepsilon_{y-0,5\%}) \quad (20)$$

Sendo que

$$\varepsilon_p = \frac{S_p}{E} \quad (21)$$

Considerando os valores de 200 *GPa* e 208,8 *GPa* respectivamente para o aço X65 e Gr. B, pode-se obter os valores correspondentes ao ponto de proporcionalidade conforme Tabela 13:

Tabela 13 - Tensão e deformação estimados para a proporcionalidade elástica dos aços X65 e Gr. B.

Aço	Tensão limite de proporcionalidade (MPa)	Deformação no limite de proporcionalidade (%)
X65	523	0,26
Gr. B	344	0,16

5.3.Dutos corroídos e sem reparo

Após a definição dos dados de entrada referentes à geometria e aos materiais nas equações normativas para avaliação de defeitos em dutos (Tabela 4), pode-se prosseguir com os cálculos para a pressão de ruptura dos tubos com base nos diferentes códigos apresentados e suas respectivas considerações. A pressão calculada por cada método deve ser comparada às pressões de ruptura reais obtidas nos ensaios dos espécimes a fim de se avaliar o grau de exatidão. A equação da pressão de avaliação de defeitos é apresentada novamente abaixo, sem os fatores de projeto, visto que o objetivo aqui é prever a ruptura.

$$P_{defeito} = \frac{2t}{D} S_{flow} \cdot \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 \cdot M}} \right) \quad (22)$$

Onde cada termo já foi explicado na seção 2.5, inclusive o outro termo essencial para este estudo é o fator de resistência remanescente (RSF). Seu valor varia necessariamente entre 0 e 1, o que quantifica a resistência que permanece no duto após a ocorrência do defeito, ou seja, é um valor que traduz em termos práticos o quanto de pressão um duto corroído pode suportar comparado ao seu estado íntegro (sem corrosão). Valores próximos de 1 se referem a pequenas perdas de espessura no defeito, enquanto valores mais aproximados de 0 representam maiores perdas de espessura. Por isso, é de se esperar que o menor e o maior RSF ocorram nos espécimes com 70% e 40% de rebaixo respectivamente, a depender do comprimento l_d dos rebaixos que influenciam o fator M da equação 22.

Embora o conceito geral de RSF apresentado acima retratar a divisão entre a pressão de falha do duto defeituoso e a pressão de falha do duto sem defeito, pode-se considerar como RSF analítico, neste caso, o valor obtido do último termo da equação 22, conforme também mencionado na seção 2.5. Este termo tem o papel análogo de reduzir a pressão de projeto ($\frac{2t}{D} S_{flow}$) por um fator proporcional à profundidade do defeito de corrosão.

Logo, a primeira etapa da metodologia analítica propõe calcular as pressões de ruptura e fatores RSF para dutos defeituosos através dos diferentes códigos apresentados, para que possam ser comparados aos resultados obtidos

experimentalmente e possa ser evidenciada a exatidão de cada método. Após os cálculos, o método mais exato será selecionado para prosseguir nas equações de análise dos dutos com defeito reparados com compósito, como será mostrado a seguir.

5.4.Dutos reparados

Antes de prosseguir com a etapa de avaliação dos dutos reparados, é necessário primeiramente selecionar o método de avaliação de defeito mais exato dentre os apresentados na Tabela 4, em termos de previsão da ruptura e RSF, através da comparação com os ensaios experimentais correspondentes. Esta seleção é fundamental para que se possa inserir como dado de entrada nas equações apresentadas na seção 3.2.1.1 referentes à ISO 24817 e ASME PCC-2, o resultado mais eficiente obtido para a pressão de ruptura em tubos com defeito sem reparo, o qual é representado nestas equações pelo termo P_S (também denominado pelas normas como pressão máxima de operação admissível–MAOP, calculada através dos códigos relevantes para avaliação de defeito). Podem ser encontrados na literatura exemplos de cálculos de projeto do reparo que consideram apenas a espessura remanescente na construção deste termo, ou seja, $P_S = 2s \cdot t_s/D$. Contudo, visando progredir no estudo dos métodos normativos para esta pesquisa, foi definida a utilização da pressão calculada pelo método de avaliação de defeito com os menores erros, como será mais bem explicado no capítulo voltado para apresentação de resultados.

Conforme já explicado na seção 3.2.1.1, as equações semiempíricas estabelecidas pelas normas ASME PCC-2 e ISO 24817 fornecem fórmulas para calcular a espessura e o comprimento do reparo de compósito necessários para suportar as condições operacionais do projeto original. Em alternativa, estas equações podem ser manipuladas para fornecer o valor estimado da pressão necessária para romper hidrostaticamente o sistema duto/reparo. Para esta análise, foram consideradas as duas abordagens principais das normas: a ruptura limitada pela tensão admissível no substrato (aço) e a ruptura limitada pela deformação admissível no reparo (compósito). Tendo em vista que as normas concedem equações para projetar o reparo para operação, é necessário considerar as

propriedades de ruptura do material para prever o rompimento do sistema através das equações normativas.

Para este cálculo, foram priorizadas as equações referentes à ISO 24817 considerando a direção circunferencial, visto que apresentam os resultados mais críticos do projeto, conforme estabelecido pelos próprios fornecedores.

O método da tensão admissível no substrato da ISO se baseia na máxima tensão que o material do duto pode admitir para o projeto, sendo o aço do duto caracterizado como o substrato do sistema. A equação correspondente a este método, após a manipulação e simplificação com os termos P_{eq} e F_{eq} , é dada por

$$P_u = \left[\frac{4t_c \cdot S_u}{D} \cdot \left(\frac{E_c}{E_s} \right) + 2P_s \right] \cdot \left(\frac{1}{2 - \nu} \right) \quad (23)$$

onde:

- P_u é a pressão de ruptura, expressa em MPa;
- t_c a espessura do reparo, expressa em mm;
- S_u a tensão limite de resistência do aço, expressa em MPa;
- P_s a pressão máxima de operação admissível–MAOP, expressa em MPa;
- ν o coeficiente de Poisson.

O método da deformação admissível no reparo da ISO se baseia na máxima deformação que o material compósito do reparo pode admitir para o projeto. A equação voltada para a previsão da ruptura correspondente a este método é dada por

$$P_u = \frac{2\varepsilon_c E_c t_c}{D} + P_s + \frac{P_{live} E_c t_c}{E_c t_c + E_s t_s} \quad (24)$$

na qual os termos já foram apresentados.

Além dessas duas equações, foi considerado outro método analítico alternativo para previsão da pressão de ruptura, o qual é baseado nas equações de equilíbrio do sistema duto/reparo (equilíbrio de forças) e que considera o rebaixo com comprimento l_d infinito ($M \rightarrow \infty$). A Figura 25 ilustra este conceito:

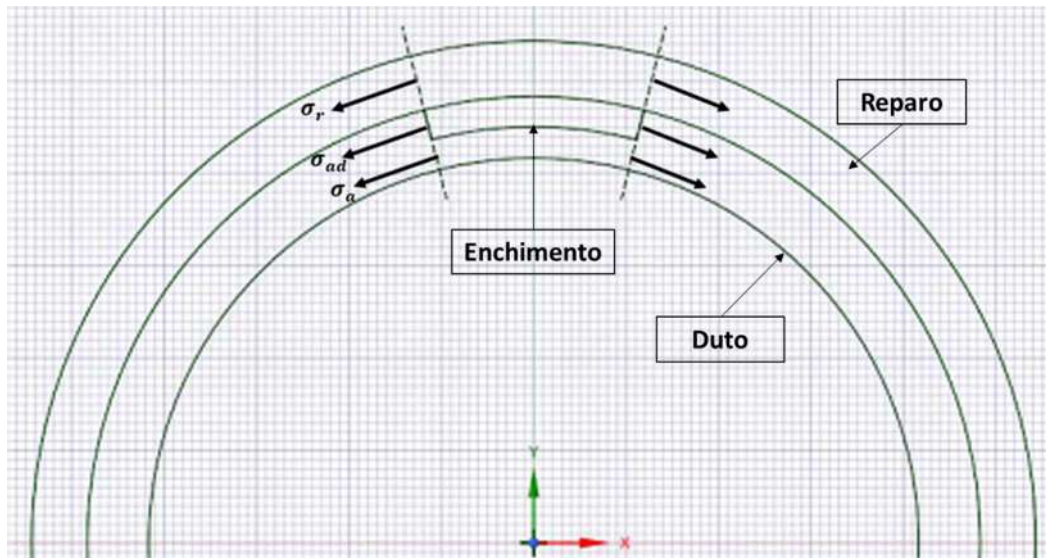


Figura 25 - Equilíbrio de forças do sistema duto/reparo/adesivo de enchimento.

Como pode-se observar na figura, a equação de equilíbrio leva em conta o equilíbrio entre a pressão interna e o somatório das forças ao longo da espessura, o que contabiliza a composição do aço (na espessura remanescente no defeito), do adesivo de enchimento (na espessura faltante) e do reparo aplicado em sua própria espessura. A equação que mostra esta condição é

$$\frac{PD}{2} = \sigma_a t_s + \sigma_r t_r + \sigma_{ad} t_{ad} \quad (25)$$

onde P é a pressão interna, D o diâmetro externo, σ_a a tensão no aço, σ_r a tensão no reparo, σ_{ad} a tensão do adesivo de enchimento, t_s a espessura remanescente, t_r a espessura do reparo e t_{ad} a espessura do adesivo de enchimento (equivalente à profundidade do defeito).

A partir desta equação de equilíbrio, pode-se formular 3 limitantes a fim de avaliar cada etapa do processo de pressurização do duto reparado, desde o ponto inicial, passando pelo ponto em que o aço começa a escoar até o instante em que ocorre a ruptura, a qual pode ocorrer no reparo ou no duto.

a) Limite de proporcionalidade P_y

Denominado P_y , é a pressão onde considera-se o início da plasticidade no duto, considerando a deformação circunferencial igual para os componentes e correspondente à deformação no limite elástico do aço ε_p , pode-se então calcular:

$$P_y = \frac{2}{D} (t_s E + t_r E_r + t_{ad} E_{ad}) \cdot \varepsilon_p \quad (26)$$

b) Ruptura do reparo $P_{u,r}$ (caso o duto com defeito não rompa antes)

Outro limitante ocorre na pressão que causa ruptura do reparo, caso o tubo com defeito não rompa antes. Nessa ocasião, a equação já contabiliza a soma da força correspondente à pressão do ponto de início até o escoamento (limite de proporcionalidade) com as forças em cada componente ao longo do escoamento do aço, onde o próprio aço percorre a curva linear conforme o módulo tangente (E'), conforme

$$\frac{PD}{2} = \frac{P_y D}{2} + \Delta \varepsilon_r \cdot (E' t_s + E_r t_r + E_{ad} t_{ad}) \quad (27)$$

sendo que

$$\Delta \varepsilon_r = \varepsilon_{u,r} - \varepsilon_p = \frac{S_{u,r}}{E_r} - \varepsilon_p \quad (28)$$

Com isto, tem-se que

$$P_{u,r} = P_y + \frac{2(S_{u,r} - E_r \varepsilon_p) \cdot (E' t_s + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})}{D \cdot E_r} \quad (29)$$

onde $S_{u,r}$ é a tensão de ruptura do reparo.

c) Ruptura do adesivo de enchimento $P_{u,ad}$ (caso o duto com defeito não rompa antes)

Este caso é mais improvável de ocorrer. Considerando o adesivo de enchimento como parte significativa nas equações, pode-se calcular também a

pressão de ruptura do adesivo caso o tubo com defeito reparado e o reparo não rompam antes.

$$P_{u,ad} = P_y + \frac{2(S_{u,ad} - E_{ad}\varepsilon_p) \cdot (E't_s + E_rt_r + E_{ad}t_{ad})}{D \cdot E_{ad}} \quad (30)$$

Com estes 3 limitantes estabelecidos, pode-se construir um gráfico de tensão circunferencial-pressão correspondente ao duto íntegro, duto com defeito sem reparo, duto com defeito reparado, reparo e adesivo de enchimento. A análise gráfica visa facilitar o estudo do sistema duto/reparo/adesivo de enchimento, e propõe a avaliação comparativa entre as curvas de cada caso, levando em conta os limitantes já mencionados, a pressão linearmente crescente, a geometria dos componentes e as propriedades dos materiais.

I. Tubo com defeito

Sendo S_u a tensão de resistência à tração do duto, a curva tensão circunferencial-pressão do duto com defeito sem reparo é construída através da seguinte equação:

$$\sigma_t(P) = \text{mínimo} \left\{ S_u ; \frac{PD}{2t_s} \right\} \quad (31)$$

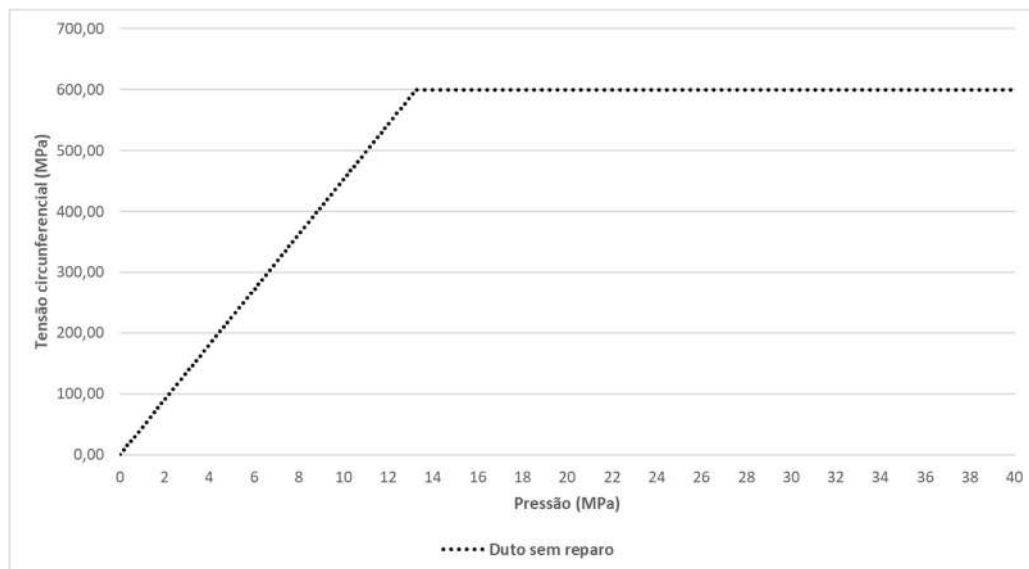


Figura 26 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o tubo com defeito sem reparo ao longo do processo de pressurização.

Denomina-se $\sigma_I(P)$ como a tensão circunferencial do tubo com defeito sem reparo. Nota-se que a partir do momento em que a tensão circunferencial na espessura remanescente alcança a tensão limite de resistência do material, a curva se torna constante mediante o aumento de pressão, indicando a ruptura do tubo.

Pode-se determinar as pressões do início do escoamento $P_{y,I}$ e da ruptura $P_{u,I}$:

$$\begin{cases} P_{y,I} = \frac{2t_s S_p}{D} \\ P_{u,I} = \frac{2t_s S_u}{D} \end{cases} \quad (32)$$

II. Tubo sem defeito

A curva tensão circunferencial - pressão do duto sem defeito (íntegro) é construída através da equação

$$\sigma_{II}(P) = \text{mínimo} \left\{ S_u ; \frac{PD}{2t} \right\} \quad (33)$$

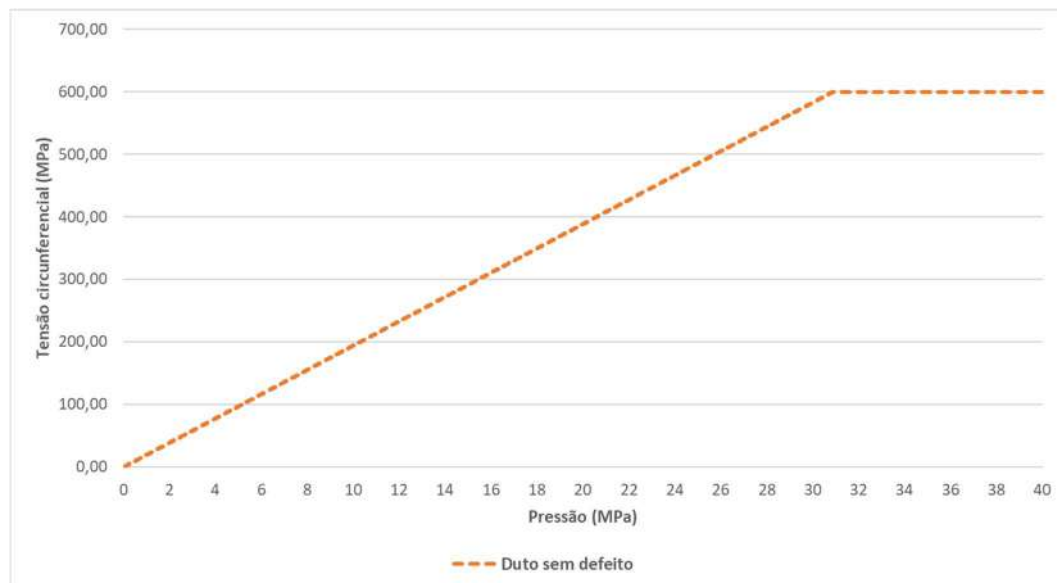


Figura 27 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o tubo sem defeito ao longo do processo de pressurização.

Denomina-se $\sigma_{II}(P)$ como a tensão circunferencial do tubo sem defeito. Nota-se que a partir do momento em que a tensão circunferencial na espessura remanescente alcança a tensão limite de resistência do material, a curva se torna constante mediante o aumento de pressão, indicando a ruptura do tubo.

Pode-se obter as pressões do início do escoamento $P_{y,II}$ e da ruptura $P_{u,II}$:

$$\begin{cases} P_{y,II} = \frac{2tS_p}{D} \\ P_{u,II} = \frac{2tS_u}{D} \end{cases} \quad (34)$$

III. Reparo

A curva tensão circunferencial-pressão do reparo é construída através da seguinte equação:

$$\sigma_{III}(P) = \begin{cases} E_r \cdot \frac{P \cdot D}{2(t_s E + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} & \text{Se } P < P_y \\ \text{mínimo} \left\{ S_{u,r}; E_r \varepsilon_p + E_r \cdot \frac{(P - P_y) \cdot D}{2(t_s E' + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} \right\} & \text{Se } P \geq P_y \end{cases} \quad (35)$$

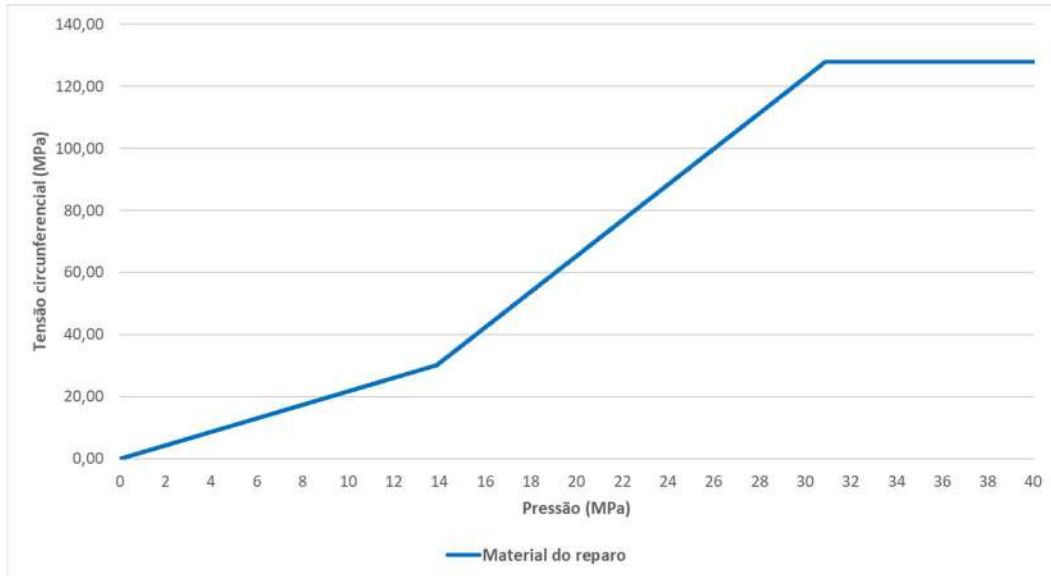


Figura 28 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o reparo ao longo do processo de pressurização.

Denomina-se $\sigma_{III}(P)$ como a tensão circunferencial do reparo. Percebe-se que a partir de um certo momento (neste caso, em torno 14 MPa), o gráfico toma uma inclinação diferente, maior que a anterior. Este instante corresponde ao momento em que o duto reparado começa a plastificar (atinge S_p). A partir de então, a curva mais inclinada indica que o reparo começa a suportar mais o carregamento devido à pressão interna, visto que a espessura remanescente do duto já se encontra em sua

fase plástica sobre o módulo tangente (E'). A curva permanece nesta crescente até que se atinja uma pressão em torno de 31 MPa, a qual corresponderia ao limite que causa o rompimento do sistema duto/reparo. Este limite pode ser a pressão de ruptura do duto $P_{u,a}$ (caso $P_{u,r} > P_{u,a}$) ou a pressão de ruptura no reparo $P_{u,r}$ (caso $P_{u,r} < P_{u,a}$), onde a tensão atingiria o limite de resistência do compósito $S_{u,r}$.

IV. Adesivo de enchimento

Sendo os termos com o sufixo “ad” remetidos ao adesivo de enchimento, a curva tensão circunferencial-pressão do material do adesivo de enchimento é construída através da seguinte equação:

$$\sigma_{IV}(P) = \begin{cases} E_{ad} \cdot \frac{P \cdot D}{2(t_s E + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} & \text{Se } P < P_y \\ \text{mínimo} \left\{ S_{u,ad} ; E_{ad} \varepsilon_p + E_{ad} \cdot \frac{(P - P_y) \cdot D}{2(t_s E' + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} \right\} & \text{Se } P \geq P_y \end{cases} \quad (36)$$

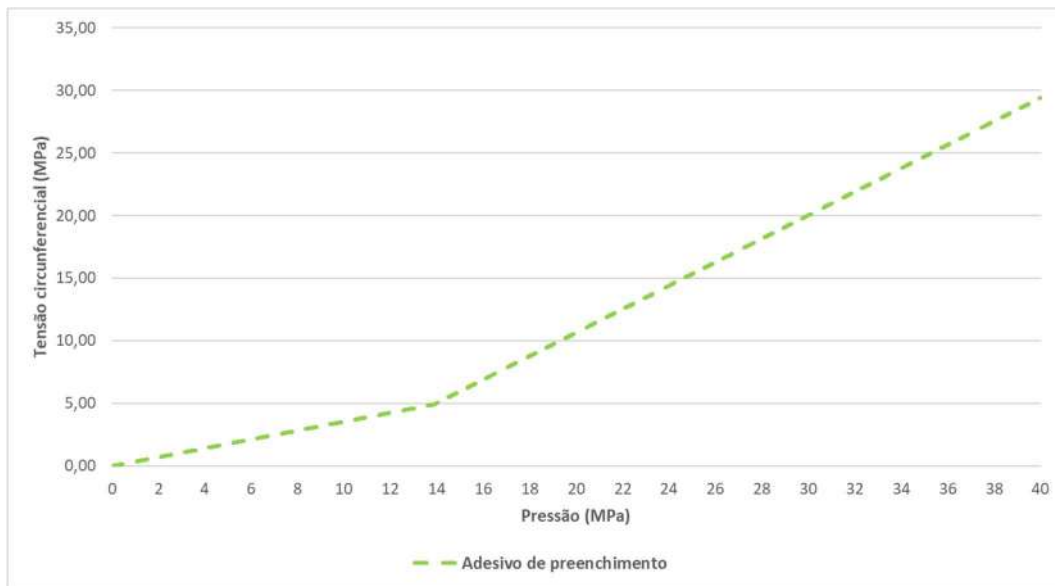


Figura 29 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o adesivo de enchimento ao longo do processo de pressurização.

Denomina-se $\sigma_{IV}(P)$ como a tensão circunferencial do adesivo de enchimento. Esta equação é similar à equação 35 do caso anterior e segue a mesma lógica, apesar de que o adesivo de enchimento representa um fator menos relevante

na análise tendo em vista o menor valor de módulo de elasticidade. Essa condição faz sentido pois o material de enchimento tem como função principal preencher o espaço vazio pela perda de metal no duto e amenizar a descontinuidade do defeito, logo a composição dele para a divisão de carga deve ser relativamente menor que os outros componentes.

V. Duto reparado

Finalmente, a curva tensão circunferencial-pressão do duto reparado, foco principal desta análise, é construída através da seguinte equação:

$$\sigma_V(P) = \begin{cases} E \cdot \frac{PD}{2(t_s E + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} & \text{Se } P < P_y \\ \text{mínimo} \left\{ S_{u,a} ; S_p + E' \cdot \frac{(P - P_y) \cdot D}{2(t_s E' + E_{ad} t_{ad})} \right\} & \text{Se } P \geq P_{u,r} \\ \text{mínimo} \left\{ S_{u,a} ; S_p + E' \cdot \frac{(P - P_y) \cdot D}{2(t_s E' + E_r t_r + E_{ad} t_{ad})} \right\} & \text{Se } P < P_{u,r} \end{cases} \quad (37)$$

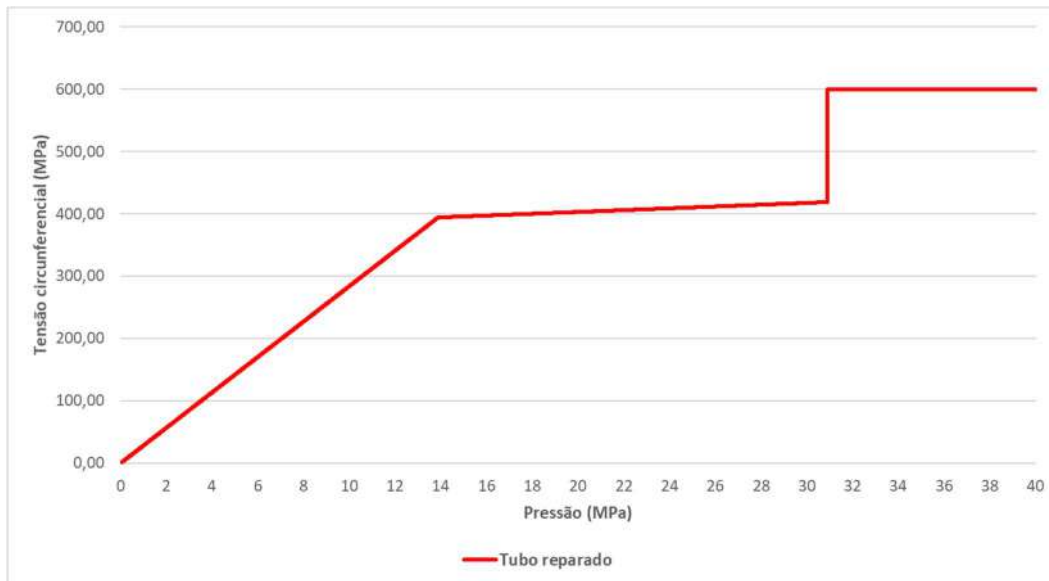


Figura 30 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para o duto reparado ao longo do processo de pressurização.

Denomina-se $\sigma_V(P)$ como a tensão circunferencial no substrato, considerando a influência do reparo compósito e do adesivo de enchimento. Esta equação é a principal da análise gráfica, pois busca contabilizar o reforço conjunto dos componentes. Conforme a curva indica, a tensão cresce linearmente enquanto

a parede remanescente do duto ainda se encontra no regime elástico, reinado pelo módulo de elasticidade E .

Após a pressão alcançar P_y (no gráfico de exemplo isto ocorre em torno de 14 MPa), dá-se início ao escoamento do material do duto e a equação passa a considerar o módulo tangente E' como reinante no processo de divisão de carga, o que reduz a inclinação da reta enquanto a curva do reparo (σ_{III}) aumenta de forma a mostrar a maior influência do reparo na divisão do carregamento nesta etapa.

Por fim, o último “degrau” na curva em torno de 31 MPa indica a ruptura do duto, ou seja, quando a tensão circunferencial alcança a tensão limite de resistência do aço ou do reparo, a depender do caso. A partir deste instante a curva se torna horizontal. Assim, sendo $P_{u,a} = \frac{2t}{D} S_u$ a pressão de ruptura do duto íntegro, tem-se que a pressão de ruptura do duto reparado calculada através deste método deve ser:

$$P_{rup} = \text{mínimo}\{P_{u,r}; P_{u,a}\} \quad (38)$$

Isto significa dizer que a pressão que causa a ruptura do duto reparado corresponde ao menor valor dentre a pressão de ruptura do reparo ($P_{u,r}$) e a pressão de ruptura do duto íntegro ($P_{u,i}$). Caso $P_{u,r} < P_{u,a}$, o sistema romperá no reparo e consequentemente perderá sua resistência adicional e logo romperá no defeito. Caso $P_{u,a} < P_{u,r}$, mesmo o reparo suportando mais pressão, o duto certamente romperá antes. Neste caso pode-se considerar duas possibilidades: rompimento na região do duto fora do reparo, atestando a restauração da integridade original, ou rompimento na região do defeito sob o reparo, o que pode ou não significar a efetividade do reparo a depender do valor de pressão que causou a ruptura. Se esta pressão for semelhante à pressão de ruptura do duto íntegro, então o reparo desempenhou seu papel efetivamente no reforço estrutural.

Conforme os resultados e gráficos obtidos com a utilização das equações apresentadas, é possível avaliar o comportamento do sistema duto/reparo ao longo do processo de pressurização e compreender a eficiência do reparo instalado ou se o projeto foi superestimado. Na Figura 31 pode-se notar a junção de todas as curvas utilizadas como exemplo para este estudo de caso, facilitando a comparação.

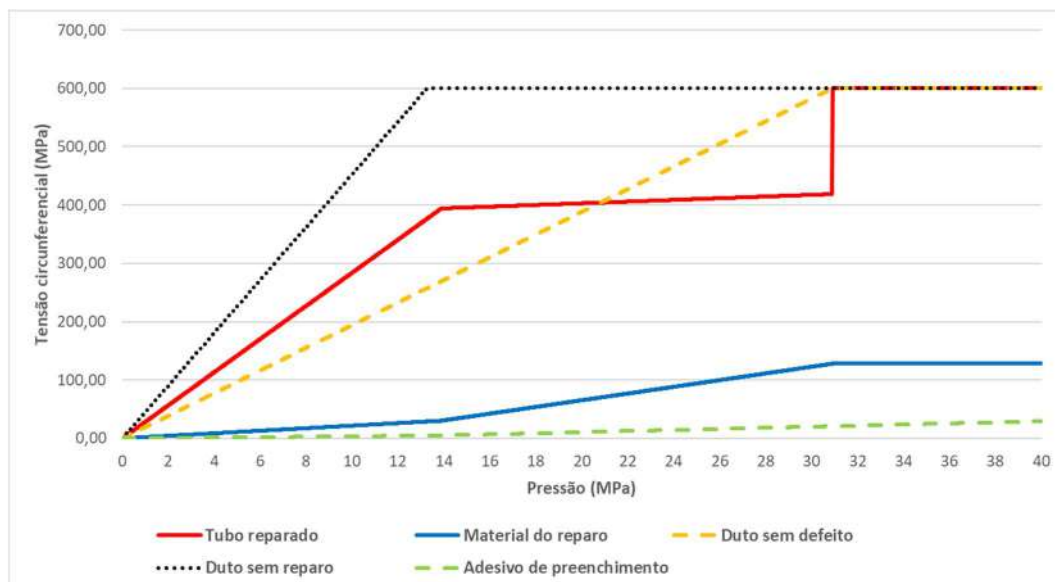


Figura 31 - Exemplo de gráfico de tensão circunferencial-pressão para todos os casos citados, permitindo assim a comparação.

Ressalta-se que o RSF também exerce papel fundamental nos dutos reparados, pois possibilita avaliar efetivamente a eficiência do reparo no que se refere à restauração da integridade original do duto. Como já visto na seção 2.6.3, um duto corroído que apresenta baixo valor de RSF poderá necessitar de reparo a fim de que possa seguir operando seguramente e apresente um novo RSF, correspondente ao sistema duto/reparo, de forma que seja um número adequado, isto é, o mais próximo de 1 possível. Isto significa dizer que houve uma reparação eficiente do duto defeituoso. Casos em que o sistema duto/reparo venha apresentar pressão de ruptura levemente maior que àquela correspondente ao rompimento do duto íntegro, segundo a equação 5 apresentada, acabam por resultar em um valor de RSF teoricamente maior que um, porém na prática o que ocorre é a restauração integral da resistência inicial do tubo e a capacidade do sistema duto/reparo em resistir à pressão original de projeto, visto que o rompimento pode ocorrer tanto na região do reparo quanto fora. Isso revalida a afirmação de que o valor máximo do RSF corresponde à 1.

A estimativa do RSF para os dutos reparados foi realizada através da divisão entre a pressão de ruptura analítica para o espécime reparado, em cada método de norma usado, com a pressão de ruptura analítica para o espécime íntegro.

5.5. Estimativa da espessura necessária dos reparos

Conforme os resultados obtidos, é feita uma estimativa reversa da espessura mínima através de cálculos invertidos para cada espécime utilizando os métodos da equação de equilíbrio e das normas baseadas na ISO 24817 (já apresentados), assim como os métodos utilizados por cada fornecedor. Assim é possível apresentar e estudar a comparação relativa entre cada método utilizado com o projeto original de cada fornecedor para cada espécime tubular.

O Fornecedor 3, do reparo de fibra de carbono, informou em memória de cálculo fornecida ter utilizado as equações 12 e 13 referentes ao método da tensão admissível no substrato da ISO 24817 para projeto do seu reparo.

O método de projeto informado em memória de cálculo pelo Fornecedor 2, de fibra de vidro, foi a deformação admissível no reparo da ASME PCC-2, onde considerou-se a pressão interna no instante da instalação igual a zero ($P_{live} = 0$). Assim, a equação reduzida fica

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_r E_r} \left(\frac{PD}{2} - s \cdot t_s \right) \quad (39)$$

sendo:

- ε_r a deformação circunferencial admissível no reparo;
- E_r o módulo de elasticidade circunferencial do reparo;
- P a pressão de projeto;
- D o diâmetro externo;
- s tensão amissível no substrato (72% do escoamento);
- t_s a espessura remanescente do duto no defeito.

Menos informações foram fornecidas pelo Fornecedor 1 (sem apresentação da memória de cálculo explicitando o método de projeto empregado).

O método da equação de equilíbrio, focado no estudo da espessura de reparo necessária para reparar eficientemente um duto com defeito, também permite projetar o reparo a ser aplicado baseado no equilíbrio resultante das forças do sistema, como já explicado na seção 4.2.4. Neste caso, considerou-se como limitadores do projeto: a tensão circunferencial no duto equivalente à 72% da mínima tensão de escoamento especificada do aço (isto é, $\sigma_{adm} = 0,72 \cdot SMYS$) e a deformação admissível do reparo considerada como $\varepsilon_{adm} = 0,3\%$ conforme as normas orientam para projetos com vida útil de 2 anos (Tabela 6).

Apresentam-se dois casos para a estimativa do reparo, as equações

$$\frac{P_d \cdot D}{2} = t_s \sigma_a + t_r \sigma_r = t_s \cdot 0,72 \cdot SMYS + t_r E_r \varepsilon_{adm} \quad \text{Se } \varepsilon_{adm} \cdot E_a > 0,72 \cdot SMYS \quad (40)$$

$$\frac{P_d \cdot D}{2} = t_s \sigma_a + t_r \sigma_r = \varepsilon_{adm} \cdot (E_a t_s + E_r t_r) \quad \text{Se } \varepsilon_{adm} \cdot E_a \leq 0,72 \cdot SMYS \quad (41)$$

onde P_d é a pressão de projeto e os índices com subscritos “a” e “r” correspondem aos dados do aço e do reparo respectivamente.

Ou seja, a depender do valor de tensão correspondente à deformação admissível ($E_a \cdot \varepsilon_{adm}$) ser maior ou menor que o valor de SMYS do aço, o fator limitante do projeto será governado por $0,72 \cdot SMYS$ do duto (como é o caso da equação 40) ou a deformação admissível de 0,3% (como é o caso da equação 41). Logo, as equações ficam

$$t_r = \frac{1}{E_r \varepsilon_{adm}} \cdot \left(\frac{P_d D}{2} - 0,72 \cdot SMYS \cdot t_s \right) \quad \left| \quad \text{Se } \varepsilon_{adm} \cdot E_a > 0,72 \cdot SMYS \quad (42) \right.$$

$$t_r = \frac{1}{E_r} \cdot \left(\frac{P_d D}{2 \varepsilon_{adm}} - E_a t_s \right) \quad \left| \quad \text{Se } \varepsilon_{adm} \cdot E_a \leq 0,72 \cdot SMYS \quad (43) \right.$$

No caso da presente tese, a equação 42 foi utilizada pois

$$E_a \varepsilon_{adm} = 200000 \cdot 0,003 = 600 \text{ MPa} > 0,72 \cdot SMYS$$

considerando os valores de SMYS para o aço X65 e Gr. B como 448 MPa e 245 MPa, respectivamente.

6 Metodologia da Pesquisa - Abordagem numérica

A abordagem numérica da pesquisa se baseia na utilização do software ANSYS® para a modelagem tridimensional dos espécimes tubulares, sem e com reparo, de forma a simular o processo de pressurização interna até a ruptura através da discretização do domínio e aplicação das condições de contorno pertinentes.

Em outras palavras, através do método de elementos finitos é possível modelar numericamente as dadas geometrias sólidas, substituindo-as por um determinado número de elementos, sendo cada elemento delimitado por nós e cada nó contendo um dado número de graus de liberdade que se relacionam com os deslocamentos admissíveis correspondentes.

6.1.Considerações sobre não-linearidades

Como o principal objetivo dessa pesquisa é a previsão de ruptura dos dutos, os quais certamente excederão à fase plástica e deverão sofrer grandes deformações, inevitavelmente será necessária a realização de uma análise não linear do sistema. Dado que a matriz de rigidez $[K]$ passa a não ser mais constante, já que não é mais função apenas das propriedades elásticas do material, a equação matricial passa a ser resolvida por incrementos, isto é, $[K] \cdot [\Delta u] = [\Delta R]$. Conforme mais pontos atingem o limite elástico, esse desvio da linearidade se espalha pela malha de elementos.

Conforme explica (PEREIRA, 2002), destacam-se dentre as diferentes fontes de não linearidade:

- A não-linearidade física, que decorre do fato do material não apresentar um comportamento elástico linear, ou seja, não possui uma relação tensão-deformação linear (não segue a lei de Hooke). Os efeitos de não linearidade são descritos por matrizes constitutivas não-lineares e/ou equações constitutivas em termos de “taxas” ou “incrementos”. Pode-se obter também não linearidade física nas

relações momento-rotação de conexões semirrígidas ou flexíveis, ou de rótulas inelásticas oriundas de mecanismos de colapso localizados (flambagem, plastificação ou fissuração localizadas em componentes estruturais).

- A não-linearidade geométrica, onde, mesmo que constituída por um material que obedeça à lei de Hooke, uma dada estrutura ainda pode ter um comportamento não linear, que é o caso da ocorrência de grandes deslocamentos. Para valores relativamente elevados de deslocamentos, a deflexão lateral de um membro pode trazer como consequência o surgimento de momentos fletores adicionais (denominados de segunda ordem), em virtude da presença de um esforço normal. Esse tipo de comportamento não-linear é denominado não linearidade geométrica. Neste caso os efeitos da não linearidade estão associados às equações de equilíbrio, que consideram a configuração deformada, e as relações deformação-deslocamento.

A principal fonte de não-linearidade considerada neste estudo, no que diz respeito especificamente ao aço utilizado nos dutos, decorre da plasticidade do material a qual corresponde à uma não linearidade física. Mesmo propondo-se uma curva bilinear, a segunda reta linear reconhece tanto incrementos de deformação elástica (para incrementos de tensões após o limite de proporcionalidade) como também incrementos de deformação plástica.

A análise linear permite determinar o valor do carregamento que irá resultar em uma tensão equivalente igual ao limite elástico do material (nesse caso, a tensão limite de proporcionalidade S_p) no ponto mais solicitado. Dessa forma, obtém-se a solução elástica a partir da qual deformações plásticas são desenvolvidas e a solução incremental é iniciada.

Em outras palavras, à medida que as deformações plásticas são desenvolvidas, o módulo de rigidez local do material é alterado e as propriedades utilizadas para o cálculo em cada incremento de carregamento correspondem às resultantes do incremento anterior. As deformações totais em cada incremento de carregamento são determinadas pelo tensor conforme abaixo:

$$\varepsilon_{t(n)} = \Delta e_{p(n)} + \varepsilon_{t(n-1)} \quad (44)$$

Onde:

- $\varepsilon_{t(n)}$ é o tensor deformação total (elástica + plástica) no incremento de carga n .
- $\Delta e_{p(n)}$ é o tensor incremental de deformação plástica no incremento n .
- $\varepsilon_{t(n-1)}$ é o tensor deformação total no incremento de carga $n - 1$.

Para esta pesquisa foi desconsiderada a não linearidade geométrica, relevante para grandes deslocamentos. Em outras palavras, o comando de análise “*large deflections*” foi configurado para “*off*”. Foi decidida a utilização desta configuração pois os resultados obtidos apresentaram exatidão aceitável com relação aos resultados experimentais, como será visto na seção de resultados. Além disso, a análise numérica com grandes deflexões aumenta excessivamente o tempo de obtenção dos resultados. DINIZ (2002, p. 19 - 21) também apresenta fatos que corroboram com esta escolha.

A utilização dos dados referentes à curva tensão-deformação de engenharia (nominal) também acaba por corroborar com a desconsideração dos grandes deslocamentos nas análises numéricas, pois os valores nominais estão sempre correlacionados com as dimensões originais da estrutura (não-deformadas) e não contabilizam o efeito real de estricção causado pelas grandes deformações da fase plástica.

6.2.Considerações sobre propriedades geométricas e propriedades dos materiais

Para a modelagem tridimensional dos espécimes, dos defeitos e dos reparos foram considerados os valores reais obtidos através das medições em campo explicada na etapa experimental e apresentada nas Tabelas 9 e 10, as quais apresentam o valor médio para cada dimensão.

Como forma de buscar soluções que permitam a comparação junto aos resultados experimentais e analíticos, estabeleceu-se a utilização dos valores

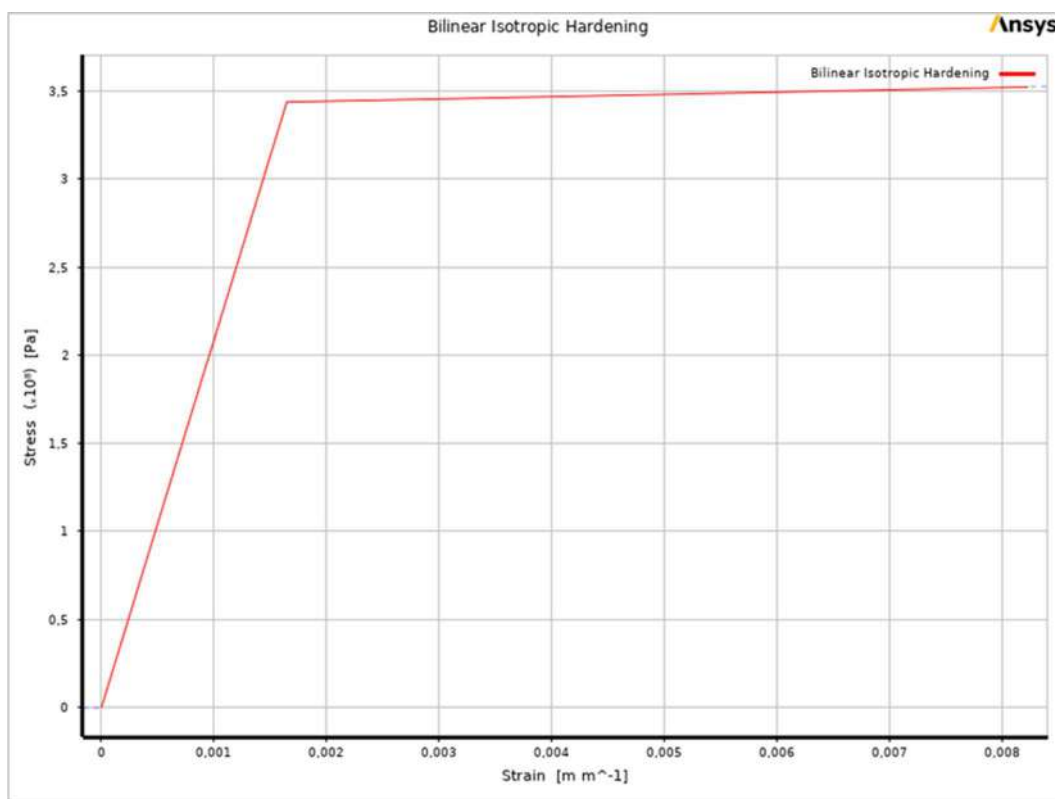
médios para as propriedades mecânicas dos aços e dos compósitos, acompanhando o padrão já mencionado.

As propriedades de ambos os aços X65 e Gr. B foram definidas com base nos valores de tensão e deformação nominais, retirados dos ensaios de tração uniaxiais. De forma análoga ao método analítico, foi considerado para a análise numérica o endurecimento isotrópico bilinear, onde se fez necessário inserir a tensão limite de escoamento (S_p) e o módulo tangente (E') para cada material. Na Tabela 14 pode-se verificar as propriedades de entrada no software para construção da curva bilinear.

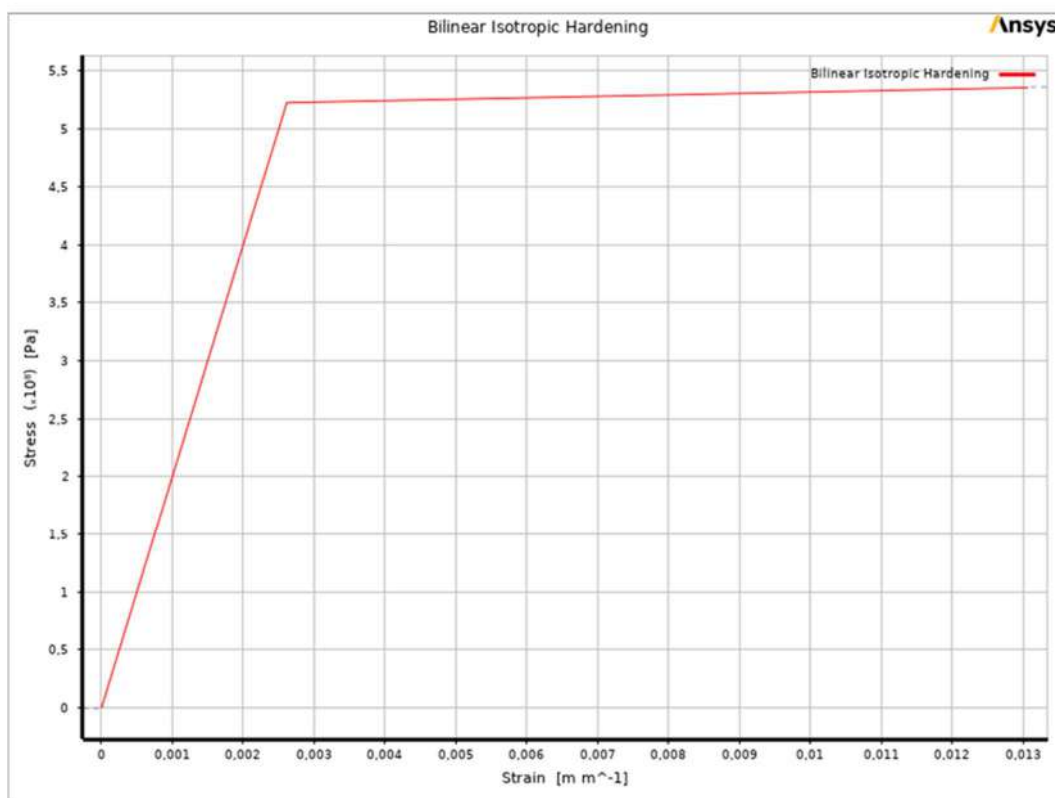
Tabela 14 - Propriedades dos aços no ANSYS®.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência ao escoamento S_p (MPa)	Módulo tangente (GPa)
Aço X65	200	0,3	523	1,24
Aço Gr. B	209	0,3	344	1,29

As imagens da Figura 32 mostram as curvas tensão-deformação inseridas para o aço Gr. B e X65, respectivamente:



a) Aço Gr. B



b) Aço X65

Figura 32 - Curvas tensão-deformação bilineares implementadas no ANSYS® para os aços Gr. B e X65.

Dentre os fatores que contribuíram para a utilização da curva de tensão-deformação bilinear para os materiais de aço nesta análise numérica estão: a ausência de dados reais das curvas dos aços testados na etapa experimental e, conforme objetivo inicial, a implementação de um modelo numérico simplificado que por hipótese ainda fosse capaz de prever os resultados no instante de ruptura dos tubos com exatidão satisfatória em relação aos testes experimentais.

Diferentemente da curva real de tensão-deformação, a utilização da curva bilinear no ANSYS® apresenta pontos de atenção quando à exatidão numérica nos resultados. Com os dados de módulo de elasticidade e tensão de resistência ao escoamento introduzidos no problema, pode-se garantir a exatidão durante a fase elástica até regiões próximas da tensão de escoamento, visto que são dados que correspondem à curva real do material obtida no ensaio de tração. Entretanto, a análise pode apresentar resultados incorretos ou indeterminados após a passagem pela tensão de escoamento especificada, visto que a partir deste ponto a curva bilinear não coincide mais com a curva real multilinear do material.

Esta exatidão volta a convergir ao patamar aceitável quando o gráfico se aproxima da tensão de ruptura do material, a qual é equivalente nas duas curvas. Como o objetivo desta pesquisa se baseia na previsão da condição de ruptura, utilização deste método não implicará em divergências nos resultados.

As propriedades mecânicas relativas aos reparos de compósitos, onde foi considerado a elasticidade isotrópica linear (como aproximação para implementação no software, vide o estudo voltado para a orientação principal na direção das fibras), seguem o padrão conforme os dados da Tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades dos compósitos no ANSYS®.

Compósito	Módulo de elasticidade circunferencial (MPa)	Coefficiente de Poisson
Fornecedor 1	15325	0,12
Fornecedor 2	27866	0,18
Fornecedor 3	27300	0,24

Por fim, também foi considerada a isotropia linear elástica para o material do adesivo de enchimento, onde os dados de entrada para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram respectivamente: 2500 MPa e 0,35.

6.3. Escolha dos elementos e do contato

A geometria utilizada e o tipo de análise a ser realizada corroboram diretamente para a definição do elemento a ser imposto no sistema. O elemento de casca até poderia ser utilizado para a modelagem, visto que a geometria do projeto se trata de um tubo de paredes finas ($D/t \gg 10$). Entretanto, o modelo de elemento sólido foi considerado para as análises, visto que o mesmo possibilita a avaliação do perfil de tensões e deformações ao longo da espessura.

Para a geometria dos dutos com defeito, foi implementado um conjunto de malha tetraédrica devido às irregularidades geométrica causadas pelo rebaixo, assim como para o material de enchimento também. Foi considerado para estes casos o elemento sólido denominado SOLID187.

O elemento SOLID187 é um elemento 3-D de 10 nós de ordem superior que tem um comportamento de deslocamento quadrático e é adequado para modelar malhas irregulares. O elemento é definido por 10 nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x, y e z. O elemento tem capacidade de plasticidade, hiperelasticidade, fluência, rigidez sob tensão, grande deflexão e grande deformação. Ele também tem capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis.

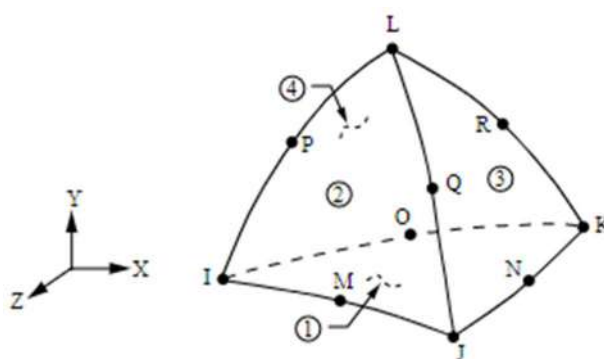


Figura 33 - Elemento SOLID187. Fonte: <https://bit.ly/2V1tB2A>. Acesso em: 30/08/2021.

Para os reparos modelados, assim como para os dutos íntegros ensaiados numericamente, foi implementada uma malha hexaédrica conforme a geometria regular cilíndrica e sem irregularidades. O elemento SOLID186 é um elemento sólido 3-D de 20 nós de ordem superior que exhibe comportamento de deslocamento

quadrático. O elemento é definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó: translações nas direções nodais x , y e z . O elemento oferece suporte a recursos de plasticidade, hiperelasticidade, fluência, rigidez por tensão, grande deflexão e grande deformação. Ele também tem capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis.

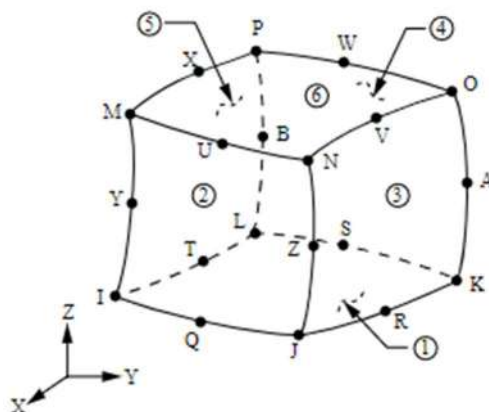


Figura 34 - Elemento SOLID186. Fonte: <https://bit.ly/2WCyhfN>. Acesso em: 30/08/2021.

Quando a simulação inclui diferentes modelos geométricos que possuem alguma interação física entre si, é necessária a definição dos contatos que terão um com o outro. Existem diferentes tipos de contatos que caracterizam diferentes condições de contorno ao problema. Para este estudo, é necessário que o contato tipo “*bonded*” seja estabelecido entre os componentes da análise, isto é, as superfícies de contato das geometrias correspondentes ao duto, ao reparo e ao adesivo de enchimento devem estar “coladas”. Isto significa que as faces onde aplicam-se a condição de contato (“*contact*”) e de alvo (“*target*”), conforme mostra a Figura 35 abaixo, possuem como condição de contorno a impossibilidade de movimento relativo entre si, onde não é permissível a separação das superfícies na direção normal ao plano das faces de contatos nem o deslizamento entre faces na direção tangencial.



Figura 35 - Contato tipo "bonded". Fonte: <https://www.mechhead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/> (modificado). Acesso em: 30/08/2021.

Esse tipo de contato é fundamental para a máxima aproximação possível com as condições físicas reais impostas pelos métodos experimental e analítico, onde também o contato real entre os componentes dificulta a separação e deslizamento entre as superfícies.

Os contatos estabelecidos através do ANSYS® geram elementos específicos para esta aplicação e condição física, os quais fazem parte do sistema de malha geral. Os elementos estabelecidos no contato, por exemplo, foram o CONTA174 para a face de contato do objeto azul ("contato") da imagem 41 e o TARGE170 para a face alvo do objeto amarelo "alvo" da imagem 41. Assim estabeleceu-se o contato tipo "bonded" para o sistema duto/reparo/material de enchimento. As propriedades dos elementos de contato permitem a aplicação das imposições físicas citadas e as imagens das Figuras 36 e 37 ilustram estas condições de contorno aplicadas ao ET12.

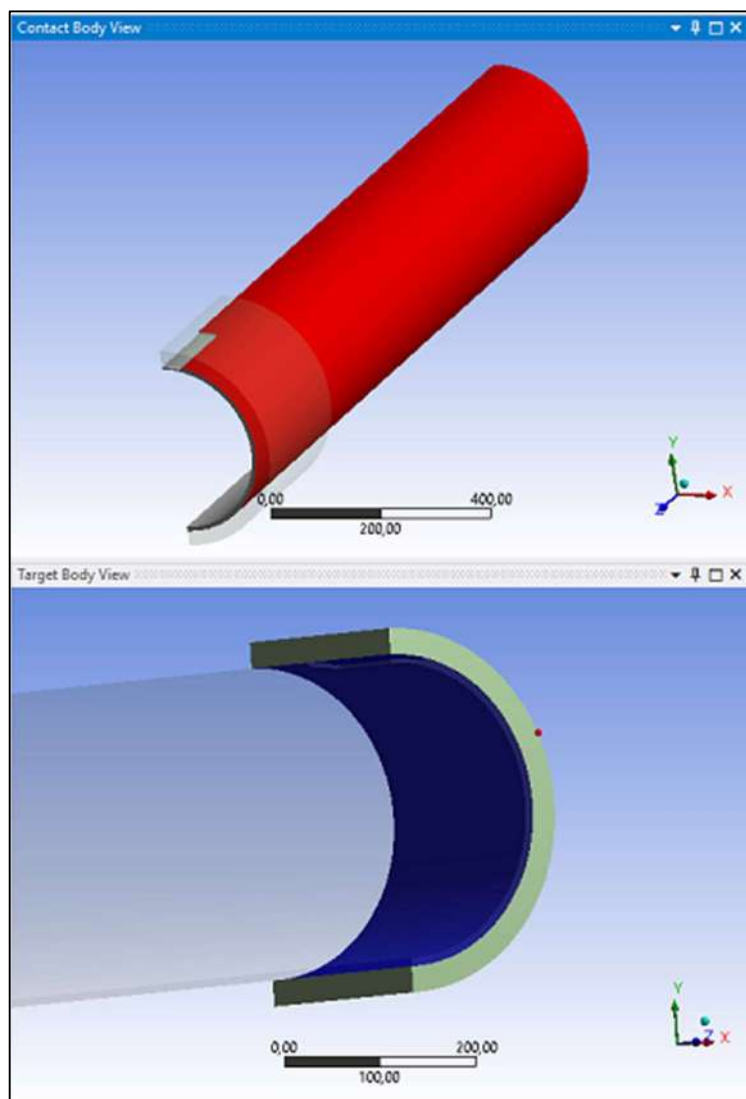


Figura 36 – Condição de contato aplicada entre o duto e o reparo.

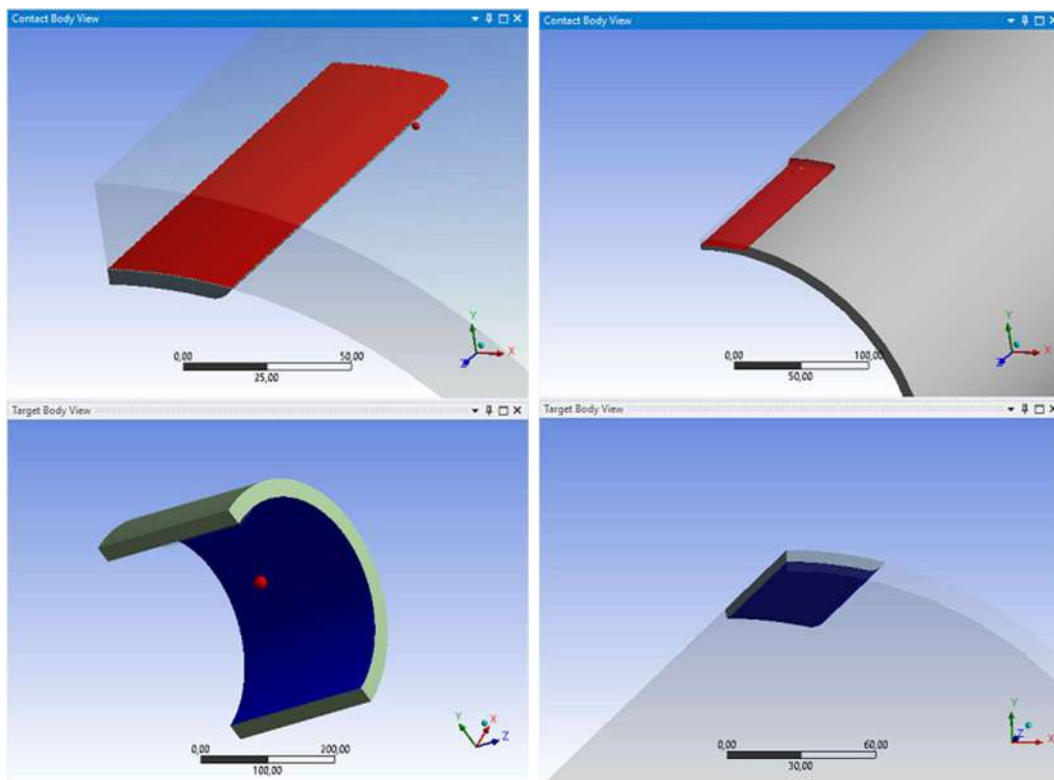


Figura 37 - Na esquerda, as imagens mostram a condição de contato aplicada entre o reparo e o adesivo de enchimento. Nas imagens da direita, a condição de contato aplicada entre o duto e o adesivo de enchimento.

CONTA174 é usado para representar o contato e o deslizamento entre as superfícies alvo 3-D e uma superfície deformável definida por este elemento. O elemento é aplicável a análises 3-D estruturais e de contato de campo acoplado. Ele pode ser usado para contato baseado em pares e contato geral, e sua aplicação na geometria é representada pelas faces vermelhas, correspondentes às imagens de cima das Figuras 36 e 37.

No caso de contato baseado em pares, a superfície alvo é definida pelo tipo de elemento alvo 3-D, TARGE170. No caso de contato geral, a superfície alvo pode ser definida por elementos CONTA174 (para superfícies deformáveis) ou elementos TARGE170 (somente para corpos rígidos).

O elemento tem as mesmas características geométricas da face do elemento sólido ou de casca com o qual está conectado. O contato ocorre quando a superfície do elemento penetra em uma superfície alvo associada.

A Figura 38 ilustra o elemento CONTA174:

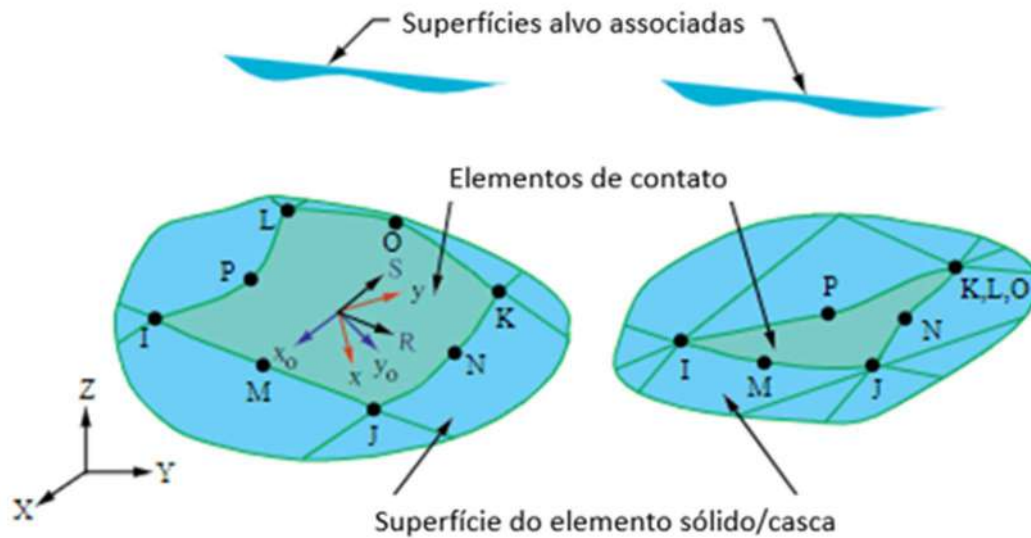


Figura 38 - Elemento CONTA174 utilizado para o contato entre os componentes. Fonte: <https://bit.ly/38uK1ne>. Acesso em: 30/08/2021.

À outra face de contato, também chamada de superfície alvo, é imposto o elemento de TARGE170 que representa o par junto ao elemento de contato (neste caso, CONTA174). TARGE170 é usado para representar várias superfícies "alvo" 3-D para os elementos de contato associados (seja CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 ou CONTA177). Os próprios elementos de contato se sobrepõem ao sólido, casca ou elementos de linha que descrevem o limite de um corpo deformável e estão potencialmente em contato com a superfície alvo, definida pelo TARGE170. A aplicação deste elemento é representada pela faces azuis, correspondentes às imagens de baixo das Figuras 36 e 37.

A Figura 39 ilustra o elemento TARGE170:

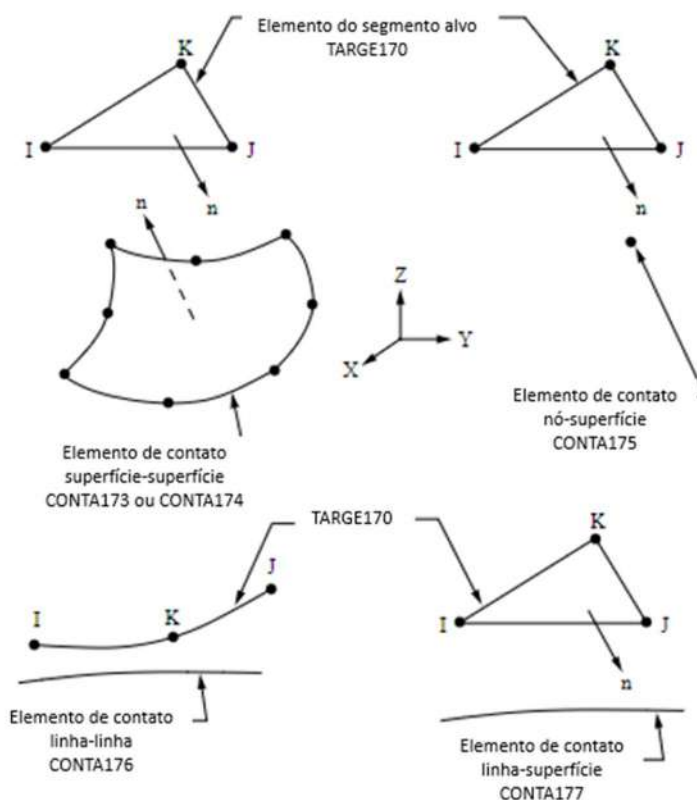


Figura 39 - Elemento TARGE170 utilizado para as superfícies “alvo” de contato. Fonte: <https://bit.ly/38wuWS6>. Acesso em: 30/08/2021.

São também estabelecidos dois outros elementos: SURF154 é um elemento de superfície que é automaticamente aplicado nas faces onde uma pressão é imposta, e o COMBIN14 é um elemento de mola automaticamente gerado pelo programa para as análises estruturais nos materiais envolvidos. Mais adiante no texto serão mostradas as faces onde as condições de pressão foram aplicadas, consequentemente definindo a presença dos elementos SURF154.

6.4.Construção do Modelo e Discretização

Para a construção do modelo, as seguintes etapas foram seguidas:

- Elaboração da geometria com base nos dados das Tabelas 9 e 10;
- Simplificações pela simetria;
- Imposição das condições de contorno e considerações sobre o modelo;
- Estudo de convergência da malha.

6.4.1. Elaboração da geometria

Foi realizada a modelagem geométrica para cada espécime apresentado na Tabela 7, tanto para os ETs sem reparo quanto os com reparo, baseando-se nos valores reais de geometria medidos em campo. A Tabela 9 foi utilizada para a construção dos dutos e a Tabela 10 para construção dos reparos. Com a finalidade de demonstrar o processo geral de modelagem numérica para todos os espécimes, serão mostrados e discutidos, como exemplo, apenas os espécimes ET10, ET12 e ET01, sendo respectivamente o tubo com 55% de perda de metal sem reparo, o tubo com 55% de perda de metal com reparo e o tubo íntegro. A explicação deste processo metodológico será dada pelos 3 espécimes apenas como amostra, porém tem-se em mente que todo o procedimento de modelagem abordado adiante foi utilizado nos outros espécimes também.

As Figuras 40, 41 e 42 demonstram a geometria final obtida para o ET12 (que foi reproduzida de maneira similar para os outros ETs):

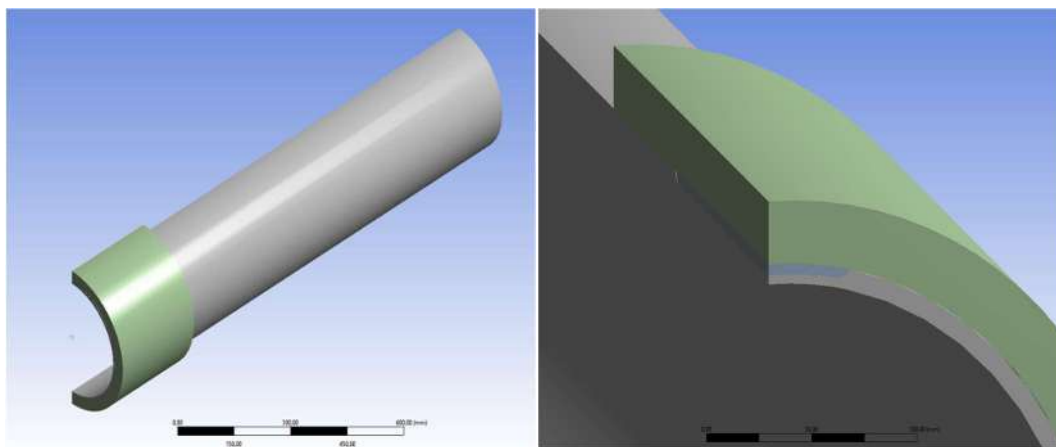


Figura 40 - Modelo geométrico construído para o ET12, mostrando o sistema duto/reparo/adeseivo de enchimento.

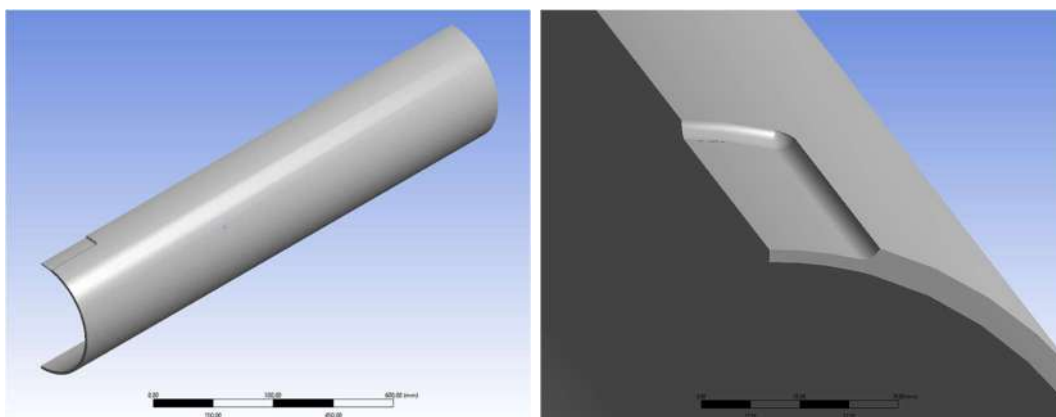


Figura 41 - Modelo geométrico construído para o ET12 ilustrando o duto sem reparo. Em detalhe o rebaixo na imagem à direita.

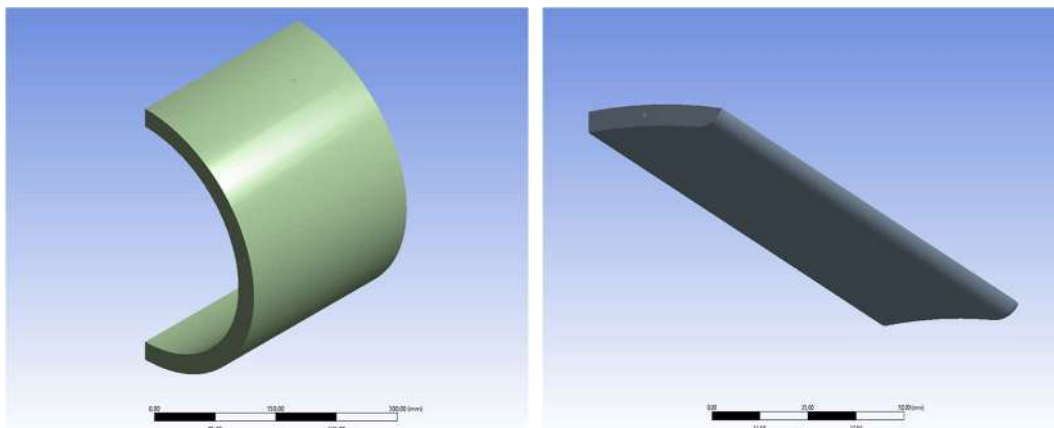


Figura 42 - Modelo geométrico construído para o ET12 ilustrando o reparo (imagem à esquerda) e o adesivo de enchimento (imagem à direita).

Os raios de adoçamento, correspondentes aos cantos do rebaixo, foram construídos com 7 mm cada, conforme indicava o valor nominal na Tabela 8.

Como pode-se observar nas Figuras 40, 41 e 42, os modelos geométricos implementados para a análise são simplificados por cortes em alguns planos por questões de simetria, conforme será visto na próxima seção. Com a geometria pronta, gerada através do software de modelagem, o modelo pode ser importado para a área de análises, onde uma análise estrutural estática é utilizada para o estudo.

Ressalta-se a criação de um sistema de coordenadas cilíndricas para facilitar as considerações e simplificações da análise, onde o eixo x corresponde à direção radial, o eixo y corresponde à direção circunferencial e o eixo z corresponde à direção longitudinal do tubo.

6.4.2. Simplificações pela simetria

À medida que o modelo geométrico é imposto à análise estrutural estática, pode-se dar início às implementações das condições de contorno e considerações de simetria, como forma de simplificar o estudo mantendo a eficácia dos resultados pretendidos.

Pela característica tubular do modelo, foi necessária a criação de um eixo de coordenadas cilíndricas a fim de facilitar a aplicação das condições de contorno e carregamentos.

Nota-se que a geometria construída é bipartida na metade, tanto com relação ao eixo longitudinal do tubo quanto com relação ao plano que passa pelo eixo central do cilindro e divide exatamente ao meio o rebaixo do duto em sua largura (exemplo: imagens 46 - 48). Esta condição foi implementada devido às considerações de simetria, as quais possibilitam reduzir o custo computacional das análises já que que menos nós e elementos são gerados, mantendo-se a física original do problema. Logo, uma simetria de $\frac{1}{4}$ do espécime tubular foi gerada para as análises conforme os planos de corte mostrados na Figura 43 abaixo:

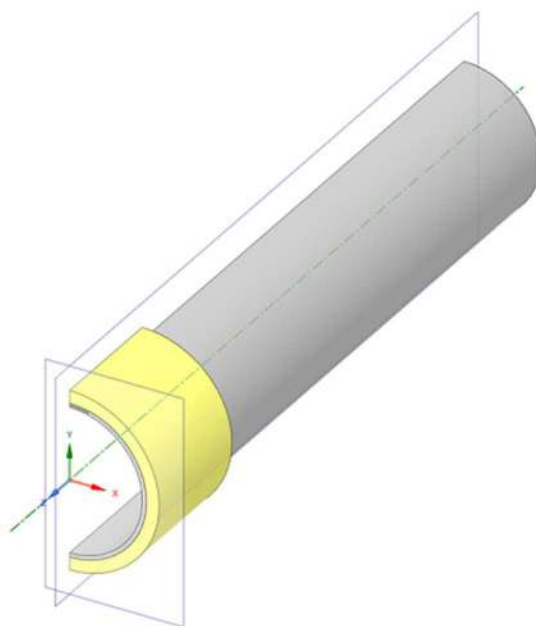


Figura 43 - Exemplo do modelo geométrico dos espécimes, mostrando os planos de simetria normais aos eixos cartesianos x e z.

A condição de simetria geométrica foi imposta aos eixos cartesianos x e z da imagem 49 a fim de simular a continuidade do modelo como se fosse exatamente igual no lado oposto ao plano de corte. Esta condição é imposta nas faces correspondentes do modelo onde se deseja simular a continuidade, através da aplicação da condição de contorno de restrição do deslocamento apenas na direção perpendicular àquela face (deslocamento constante).

Na Figura 44 abaixo pode-se identificar as faces onde foram aplicadas esta restrição na direção circunferencial de acordo com o eixo de coordenadas cilíndricas criado:

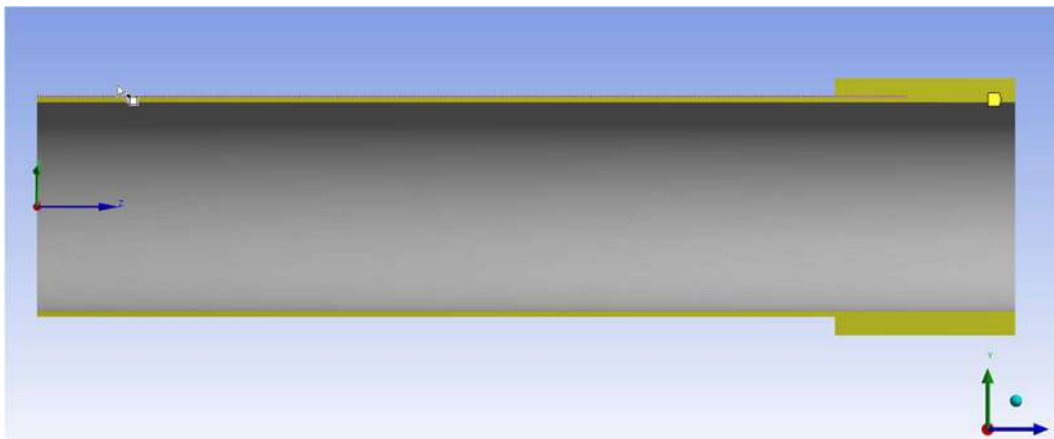


Figura 44 - Exemplo das faces, em amarelo (onde ocorreu o corte), onde foi aplicada a condição de simetria perpendicularmente ao eixo cartesiano x.

Na Figura 45 pode-se identificar as faces onde foram aplicadas esta restrição na direção longitudinal de acordo com o eixo de coordenadas cilíndricas criado:

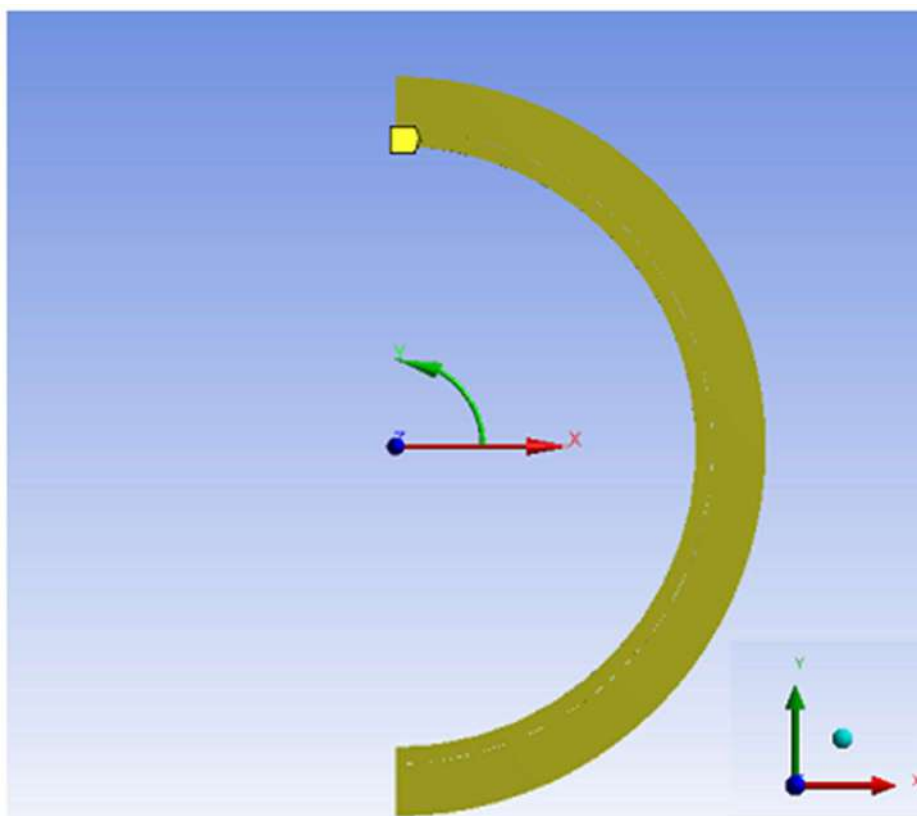


Figura 45 - Exemplo das faces, em amarelo (onde ocorreu o corte), onde foi aplicada a condição de simetria perpendicularmente ao eixo z.

6.4.3. Imposição das condições de contorno e considerações sobre a configuração de análise

Após a implementação das condições de simetria, é necessária a aplicação das condições de contorno no modelo, as quais englobam as solicitações de carga.

Para a realização das análises em todos os espécimes, adotou-se o padrão de configuração do sistema conforme as seguintes considerações importantes:

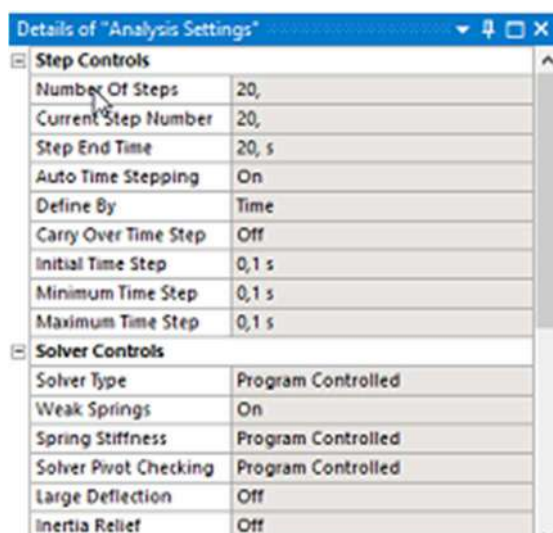


Figura 46 - Configuração de análise dos modelos.

- O número de passos, número do passo atual e tempo do último passo foi configurado para 20 cada, ou seja, análise percorrerá 20 passos até o tempo final de 20s.
- O passo de tempo automático foi ligado em “on” e definido por intervalos de tempo de 0,1s, o que permitiu a avaliação em diversos sub-passos dentre os passos de 20s.
- “*Weak springs*” configurado para “on” para prevenir instabilidades numéricas na obtenção dos resultados e “*Large deflections*” para “off” (explicado na seção 4.3.1).

i. Pressão interna

Dito isto, a primeira imposição feita ao modelo é com relação à pressão interna, parte fundamental do estudo. A pressão é aplicada na face interna do duto de maneira uniforme e normal à superfície. Visando simular o teste hidrostático e levando em consideração os 20 passos configurados para análise, foram

introduzidos no sistema os valores de pressão linearmente crescentes de 0 à 40 MPa em intervalos de 2 MPa, visto que a pressão de ruptura dos espécimes íntegros é da ordem de 31-32 MPa.

Assim, a pressão aplicada certamente excederá o valor de resistência mecânica dos tubos, ultrapassando a condição de rompimento do sistema. Como a curva tensão-deformação de ambos os aços foi introduzida no ANSYS® como bilinear e como o não foi informado ao programa nenhum limitante numérico (por exemplo uma tensão de resistência à tração do material), a análise irá progredir até que se atinja a última pressão especificada, mesmo que o material já tenha teoricamente rompido há uns instantes da rodada.

Por isso, a fim de identificar corretamente a pressão que causou a tensão de ruptura do sistema e atingir os resultados pretendidos, são adotados os seguintes pontos:

- Apesar da análise prosseguir até o último passo indicado ($t_{análise} = 20\text{ s} \rightarrow P_{numéric} = 40\text{ MPa}$), será realizado o “travamento” da simulação num instante específico o qual corresponderá à tensão de ruptura real de algum dos materiais (por exemplo, caso a análise seja “travada” no instante $t_{análise} = 15,5\text{ s} \rightarrow P_{numérica} = 31\text{ MPa}$, a qual corresponderia a uma tensão de 652,3 MPa no tubo de aço X65 equivalente a sua ruptura retirada dos ensaios de tração do material). Por isso foi importante definir os pequenos sub-passos de 0,1s, suficientes para esta avaliação.
- *Considerar que:* $t_{análise} = 2P_{numérica}$, conforme a pressão interna implementada ser proporcional ao tempo de análise.
- O atingimento primário à tensão de ruptura, seja do material do duto ou do reparo, validará a condição de ruptura do sistema e definirá até onde a análise será válida. Isto significa dizer que, após este instante, os resultados numéricos não apresentam validade metodológica devido ao rompimento por hipótese já haver ocorrido. Este instante da ruptura pode ser considerado através de duas diferentes abordagens que serão avaliadas com suas especificidades: o método Lower Bond (LB) e o método Upper Bond (UB).

O método LB, conforme citado em referência (DINIZ, 2002), traduz a condição de rompimento do sistema (e o “travamento manual” da análise) no exato instante da simulação em que o primeiro elemento atingir a tensão de resistência à tração real do material retirado dos ensaios de tração uniaxiais, correspondente ao que ocorrer primeiro entre o aço do duto ou o compósito do reparo. A Figura 47 exemplifica esta situação:



Figura 47 - Exemplo do método LB aplicado. A figura mostra um exemplo para os resultados de tensão normal, na direção do eixo circunferencial no duto de aço X65, resultando na tensão de resistência do material de 652,3 MPa atingida pela primeira vez na análise no instante 8,6119 s, correspondendo à pressão interna de aproximadamente 17,2 MPa.

É válido ressaltar que a obtenção dos resultados de tensão procederá através da tensão normal ao eixo circunferencial relativo ao sistema de coordenadas cilíndricas mencionado ao fim da seção 4.2.4.1, uma vez que o critério de Tresca é considerado à semelhança dos métodos analíticos.

O método UB, também citado (DINIZ, 2002), é aplicado apenas aos materiais de aço devido aos seus efeitos elastoplásticos, e considera a condição de rompimento (e “travamento manual” da análise) como o primeiro instante da simulação onde a tensão mínima obtida ao longo do caminho de espessura em uma determinada região (considerada crítico em termos de tensão) atinge a tensão de ruptura real do material.

Como mostra o exemplo da Figura 48, este método leva em conta que o instante final correspondente à ruptura do sistema ocorre quando o último ponto da linha de espessura da região crítica alcançou a tensão de resistência à tração do aço, enquanto todos os outros pontos ao longo desta linha de espessura já ultrapassaram este limite (devido à curva tensão deformação bilinear e nenhum outro método de travamento automático da análise), representando que foram rompidos em instantes anteriores e, portanto, já obsoletos na análise. Este efeito retrata basicamente um colapso plástico na região crítica.

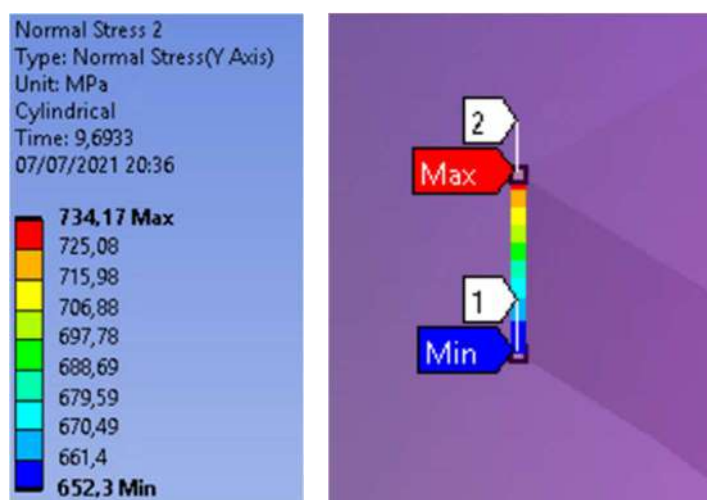


Figura 48 - Exemplo do método UB aplicado. A figura mostra um exemplo para os resultados de tensão normal, na direção do eixo circunferencial no duto de aço X65 resultando na tensão mínima do material de 652,3 MPa atingida ao longo da espessura na região crítica no instante 9,6933 s, correspondendo à pressão interna de aproximadamente 19,4 MPa.

ii. Força longitudinal do tempo

A fim de se simular a física real do problema, ou seja, um espécime tubular de dimensões definidas onde os tampos soldados nas extremidades viabilizam o teste hidrostático tal qual um vaso de pressão, deveria ser oportuno considerar a modelagem dos tampos também. Como os tampos proporcionam um efeito físico de resistir ao aumento da pressão interna, ele acaba por induzir tensão contra a parede do próprio tubo já que está sendo empurrado para fora. Todavia, ao invés de inserir os tampos no modelo geométrico, pode-se simplesmente adicionar uma condição de pressão/tensão normal à superfície onde eles foram soldados nas extremidades de forma a simular a função dos tampos na análise.

É válido ressaltar que o tampo também concede resistência na direção radial e circunferencial, de abertura do tubo, gerando cisalhamento na zona soldada. Contudo, optou-se por apenas implementar a condição de resistência longitudinal dos tampos (citada no parágrafo acima), desprezando-se a resistência radial, visto que isso apenas geraria uma região de altas tensões num local longe da região de interesse. O modelo e as condições de contorno foram aplicados de forma a simular a situação mais próxima do real possível, ao mesmo tempo impondo ao software a área de interesse da análise como sendo a região do defeito, reparo e nominal do duto, assim obtendo-se resultados condizentes e evitando que a tensão máxima seja atingida nas extremidades soldadas aos tampos.

Para a aplicação desta condição de contorno, a tensão foi aplicada à superfície indicada na imagem 55 e está diretamente relacionada com a pressão interna no tubo através da relação abaixo.

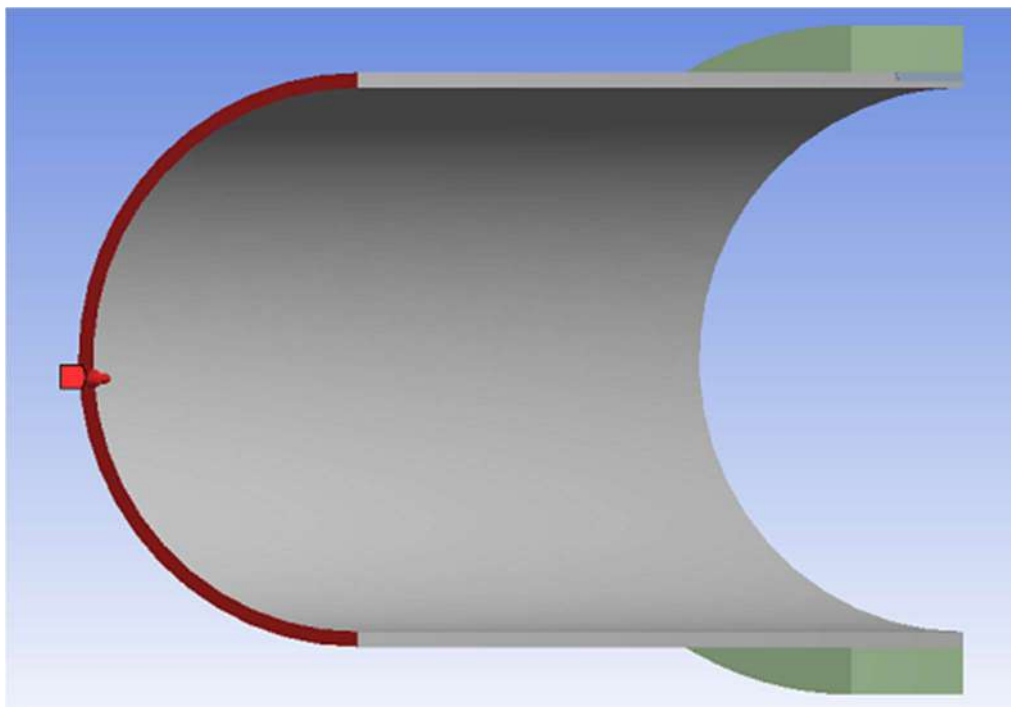


Figura 49 - Exemplo de aplicação da condição de pressão nas extremidades do duto, de forma a representar os tampos soldados.

Sendo F_{tampo} e A_{anel} respectivamente a força normal aplicada pelo tampo à extremidade do duto e a área da seção transversal do duto (anel), tem-se que

$$A_{anel} = \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \quad (45)$$

$$F_{tampo} = P_{int} \cdot A_{int} \quad (46)$$

$$P_{tampo} = \frac{F_{tampo}}{A_{anel}} \quad (47)$$

onde:

- R_{ext} é o raio externo do duto;
- R_{int} é o raio interno do duto;
- A_{int} é a área interna do duto, dada por $A_{int} = \pi \cdot R_{int}^2$;
- P_{int} é a pressão interna aplicada no duto, que varia de 0 à 40 MPa em intervalos de 2 MPa.

Desse modo, a tensão normal correspondente ao tampo irá variar ao longo do tempo de análise, conseqüentemente junto com a pressão interna aplicada. Esta tensão também será diferente para cada geometria dos espécimes tubulares.

A Figura 50 compila na mesma imagem todas as condições de contorno implementadas na geometria e exemplifica o que foi explicado nesta seção.

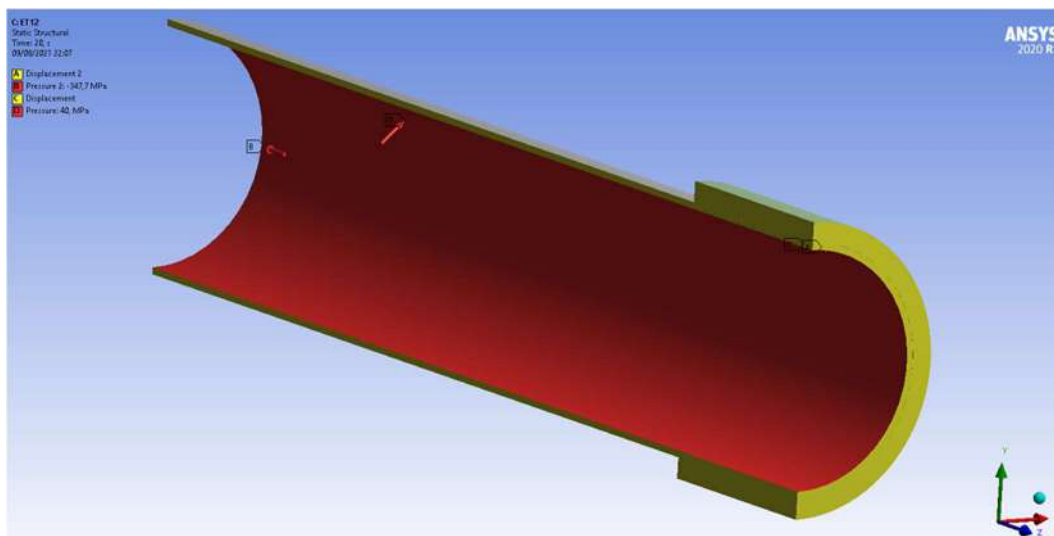


Figura 50 - Exemplo das aplicações das condições de contorno do problema. Nas imagens, as faces vermelhas com as setas indicam as pressões interna e do tampo, e as faces amarelas indicam as simetrias já explicadas.

Além das pressões de ruptura estimadas através das tensões normais circunferenciais, serão apresentados também os resultados das deformações circunferenciais e longitudinais na região do centro do rebaixo, de modo a representar os extensômetros instalados nos espécimes reais. Além destas, serão

avaliadas também as deformações circunferenciais em alguns pontos ao longo da espessura dos reparos, também conforme a instrumentação experimental. Assim, serão comparados os valores de deformação numéricos (elásticos e elastoplásticos) com os resultados experimentais.

Por fim, o RSF poderá ser obtido através do estudo de dois métodos que serão comparados posteriormente:

1. Método I: Divisão entre a pressão de ruptura numérica de um espécime com defeito/reparo e a pressão de ruptura numérica de outro espécime íntegro (ET01 para aço X65 e ET23 para aço Gr. B).
2. Método II: Divisão entre a pressão de ruptura numérica de um espécime com defeito/reparo e a pressão de ruptura numérica do mesmo espécime sem defeito nem reparo, ou seja, a mesma geometria íntegra.

Os resultados de RSF numéricos também serão comparados com os resultados experimentais e analíticos.

6.4.4. Estudo de convergência de Malha

Para obter resultados concisos e confiáveis, é necessário implementar um sistema de malha eficiente e refinado. A prática indica que quanto menor o elemento de malha utilizado, mais proximidade com relação à geometria ideal do modelo e maior o grau de confiabilidade nos resultados obtidos. Entretanto, existe um limiar de convergência nos resultados onde o refino da malha não acarreta mudanças significativas nos resultados e apenas afeta o rendimento da análise devido ao alto custo computacional. Por isso, faz-se necessário o estudo de convergência da malha a fim de investigar a confiabilidade dos resultados e prosseguir nas análises da pesquisa.

O estudo foi feito inicialmente para o duto íntegro e para o duto com rebaixo de 55% de perda de espessura, possibilitando que os resultados de configuração de malha possam ser padronizados para os outros espécimes. Em seguida, o estudo foi realizado para o reparo com o ET12. As Tabelas 16 - 18 mostram os resultados para estes casos:

Tabela 16 - Estudo da malha do ET01 (íntegro).

ET01						
Rodada	Nós	Elementos	Pressão LB (MPa)	Diferença percentual (%)	Pressão UB (MPa)	Diferença percentual (%)
1*	187071	40000	35,6	-	37,2	-
2	279921	60000	35,6	0,016%	37,2	0,000%

Duas rodadas de análise foram executadas, onde o refino da malha foi feito, aumentando o número de elementos. Porém, percebe-se que este aumento não alterou significativamente os resultados de LB e UB, mantendo a diferença percentual bem abaixo de 2%, que é o padrão estabelecido para o controle de malha.

*A linha com valores em negrito representa a configuração de malha selecionada para os espécimes íntegros e a Figura 51 ilustra a malha definida:

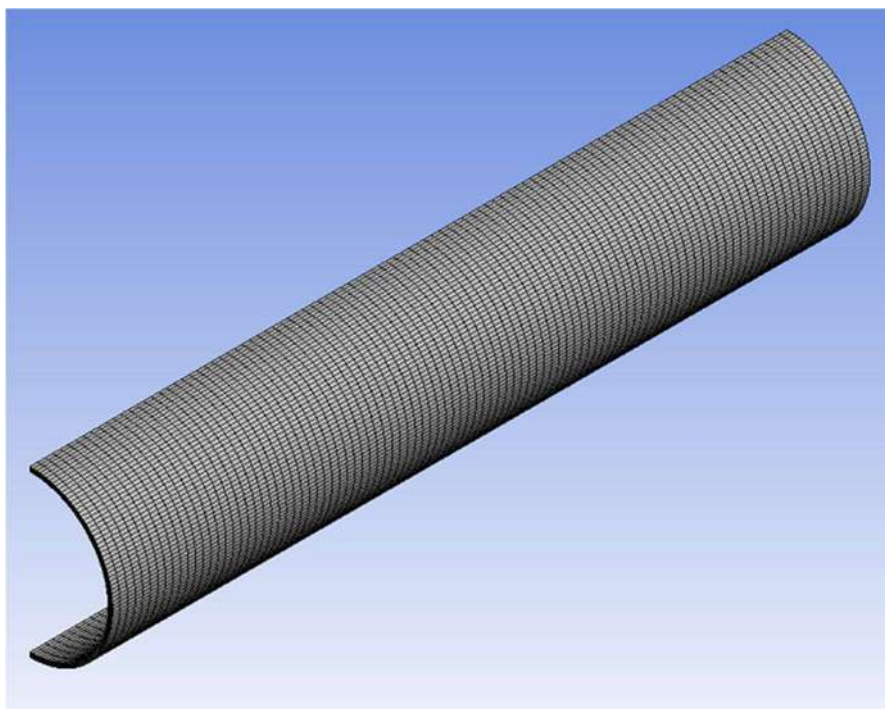


Figura 51 - Exemplo da configuração de malha para o ET01, a qual foi padronizada para todos os espécimes sem rebaixo (tamanho do elemento geral: 15mm).

Tabela 17 - Estudo da malha do ET12 (rebaixo com 55% de profundidade).

ET10						
Rodada	Nós	Elementos	Pressão LB (MPa)	Diferença percentual (%)	Pressão UB (MPa)	Diferença percentual (%)
1	187071	40000	16,4	-	19,5	-
2	114280	61138	17,5	-6,973%	19,3	1,387%
3*	210385	112584	17,2	1,773%	19,4	-0,653%
4	311624	174878	17,3	-0,227%	19,4	-0,111%

*Para este caso foi selecionada a configuração da linha em negrito correspondente à rodada 3, visto que apresentou a diferença percentual menor que 2% com relação ao resultado anterior.

Como pode ser visto na imagem 58, o controle de malha nos espécimes com rebaixo é realizado de modo em que o refino é intensificado nas regiões de proximidade ao defeito, visto que essa é uma região crítica, sensível e estratégica na obtenção dos resultados.

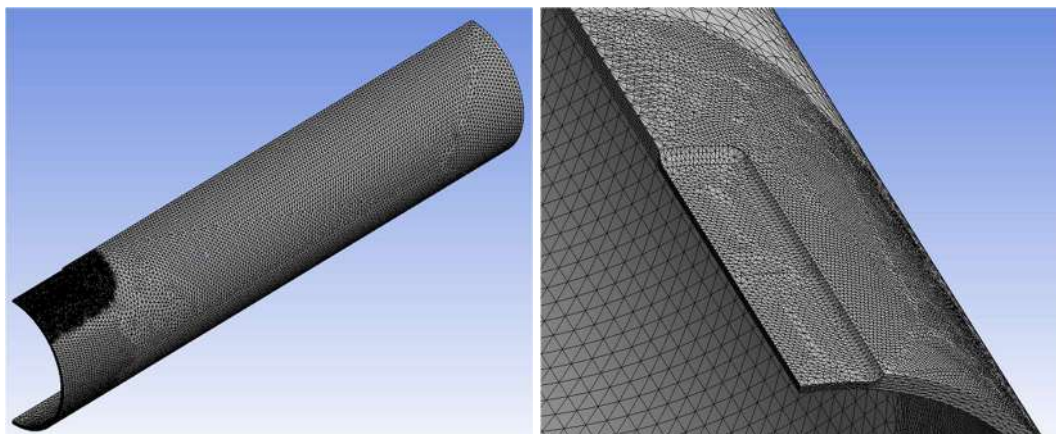


Figura 52 - Exemplo da configuração de malha para o ET10, a qual foi padronizada para todos os espécimes com rebaixo (tamanho do elemento geral: 10mm; tamanho do elemento das proximidades do rebaixo: 2,5mm).

Tabela 18 - Estudo da malha para o reparo aplicado no ET12.

ET12				
Rodada	Nós	Elementos	Pressão LB (MPa)	Diferença percentual (%)
1	669829	410056	33,7	-
2	689332	414196	31,8	5,600%
3*	751746	427561	31,4	1,419%

*Neste estudo de malha, o número de elementos totais do modelo, correspondente a todos os componentes, foi aumentado através do refino exclusivamente do reparo. Três análises foram executadas a fim de avaliar o resultado de pressão de ruptura pelo método LB, sendo a linha da tabela destacada em negrito responsável pela convergência do resultado para o limite inferior à 2%, consequentemente representando a configuração padrão de malha estabelecida para o reparo.

O resultado de UB não foi avaliado para este caso pois o rompimento ocorreu no reparo, como será mais bem explicado no capítulo de apresentação dos resultados. Como o material compósito não apresenta ductibilidade, o primeiro instante da análise em que ocorre a tensão de ruptura no reparo não possibilita um colapso plástico em qualquer região possível do duto, impossibilitando a análise pelo método UB.

O estudo de convergência da malha não foi realizado para o adesivo de enchimento, visto que ele não representa um componente crítico nem oferece resistência relevante ao sistema, tendo como função principal o preenchimento e a continuidade geométrica na região do rebaixo. A malha estabelecida para o adesivo de enchimento, como padrão, foi com um tamanho de elemento de 1mm, a qual demonstrou coerência nos resultados esperados para a deformação ao longo de sua espessura, como será esclarecido mais adiante no texto.

A Figura 53 mostra a configuração da malha aplicada ao reparo e ao adesivo de enchimento:

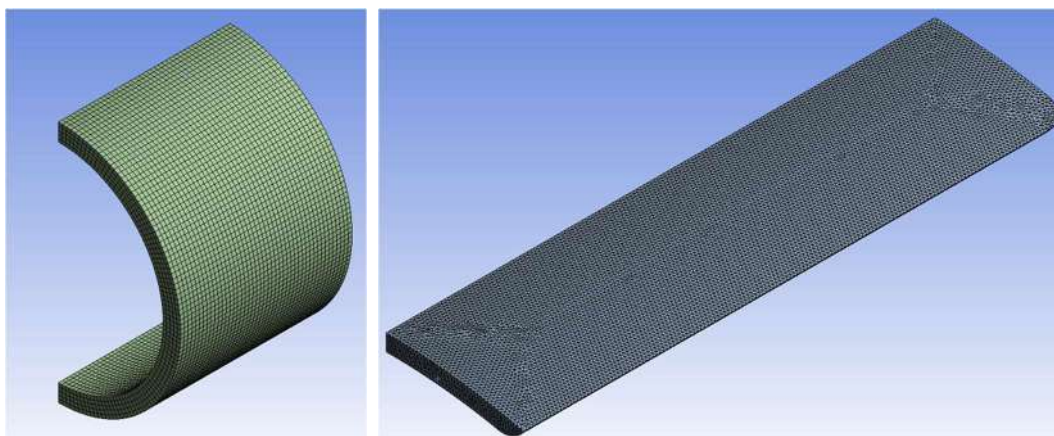


Figura 53 - Exemplo da configuração de malha para o reparo e o material de enchimento do ET12, padronizados para todos os outros espécimes com reparo (tamanho do elemento do reparo: 6mm; tamanho do elemento do enchimento: 1mm).

7 Resultados e Discussões

Este capítulo visa apresentar e debater sobre os resultados obtidos na pesquisa e comparar as diferentes metodologias empregadas, objetivando avaliar a efetividade dos reparos na restauração da integridade original dos dutos e de cada método empregado a fim de prever a condição de ruptura dos tubulares.

Os resultados serão apresentados para as abordagens experimental, analítica e numérica. Posteriormente serão apresentadas as devidas comparações entre elas.

7.1.Resultados Experimentais

Conforme a metodologia explicada no capítulo anterior, ao todo 8 espécimes tubulares sem reparo foram testados até a ruptura, sendo 2 deles íntegros e 6 com rebaixos de diferentes profundidades usinados, variando entre aço API 5L X65 e aço API 5L Gr. B.

Outros 9 espécimes tubulares, também com rebaixos de diferentes profundidades usinados, foram reparados com 3 laminados de materiais compósitos diferentes (variando entre fibras de vidro e de carbono) e testados até a ruptura.

Os ensaios de shearografia citados na seção 4.1.4.1 mostraram que os reparos por fibra de vidro do Fornecedor 2 tiveram a melhor aderência entre as camadas do próprio compósito e/ou entre elas e o metal base. Os reparos do Fornecedor 1 e 3 apresentaram falta de aderência nas primeiras camadas (as mais externas) em quase todos os ETs. Os testes de pressão realizados determinaram a efetividade dos reparos.

7.1.1.Dutos sem reparo

A Tabela 19 mostra os resultados dos testes para as pressões de ruptura e RSF dos oito espécimes sem reparo fabricados com tubos X65 e Gr. B. As pressões são obtidas através dos diagramas de pressão aplicada e volume de água injetado no

tubo, conforme o Apêndice I. Os RSFs foram obtidos através da divisão entre as pressões de ruptura com e sem rebaixo, já explicado anteriormente. Nota-se que o levantamento dimensional dos espécimes mostrou que o ET34 tem espessura média no rebaixo de 3,46mm, o que resulta numa perda real de espessura de 61% e não o valor nominal de 70%.

Tabela 19 - Resultados experimentais para pressão de ruptura e RSF dos espécimes sem reparo.

ET	Rebaixo nominal	Rebaixo real (média)	Material	Pressão de ruptura (MPa)	RSF
1	-	-	X65	31,5	-
4	40%	39,0%	X65	22,3	0,708
10	55%	50,8%	X65	19,1	0,606
18	70%	66,4%	X65	12,7	0,402
23	-	-	Gr. B	25,1	-
27	40%	41,9%	Gr. B	17,0	0,678
29	55%	52,9%	Gr. B	15,4	0,616
34	70%	61,0%	Gr. B	13,4	0,536

Nas imagens da Figura 54 abaixo são ilustrados os aspectos dos seis ETs com rebaixo após o teste de ruptura, onde as pressões que levaram ao rompimento de cada um são dadas na Tabela 19 acima.



Figura 54 - Testes de ruptura nos tubos sem reparo. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

As deformações longitudinal e circunferencial obtidas pela extensometria nos ETs de X65 e Gr. B sem reparo e com rebaixo de 55% (ET10 e ET29) em função da pressão interna imposta são mostradas respectivamente na Figura 55 abaixo. Os diagramas apresentam as deformações medidas até o descolamento de ruptura dos sensores ópticos, o que ocorreu antes das rupturas dos espécimes em todos os casos. Os resultados para os outros ETs são encontrados no Apêndice I.

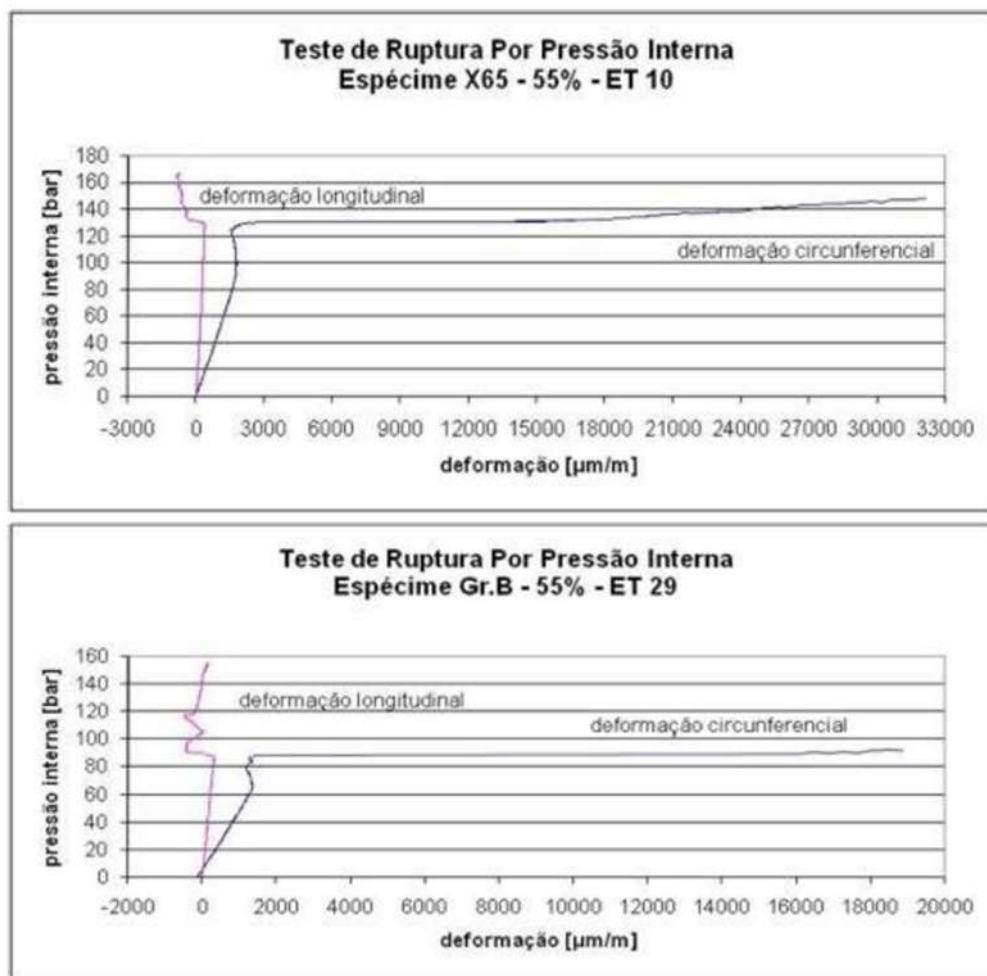


Figura 55 - Deformações medidas por extensometria óptica em tubos X65 e Gr. B sem reparo.

As deformações longitudinal e circunferencial obtidas através do método DIC nos mesmos ETs X65 e Gr. B em função da pressão interna imposta são mostradas na Figura 56. Os diagramas também apresentam as deformações medidas até um valor de pressão inferior à ruptura do duto. Pode-se observar uma comparação bastante coerente entre os resultados da extensometria apresentados acima e do DIC. Os resultados para os outros ETs são encontrados no Apêndice I.

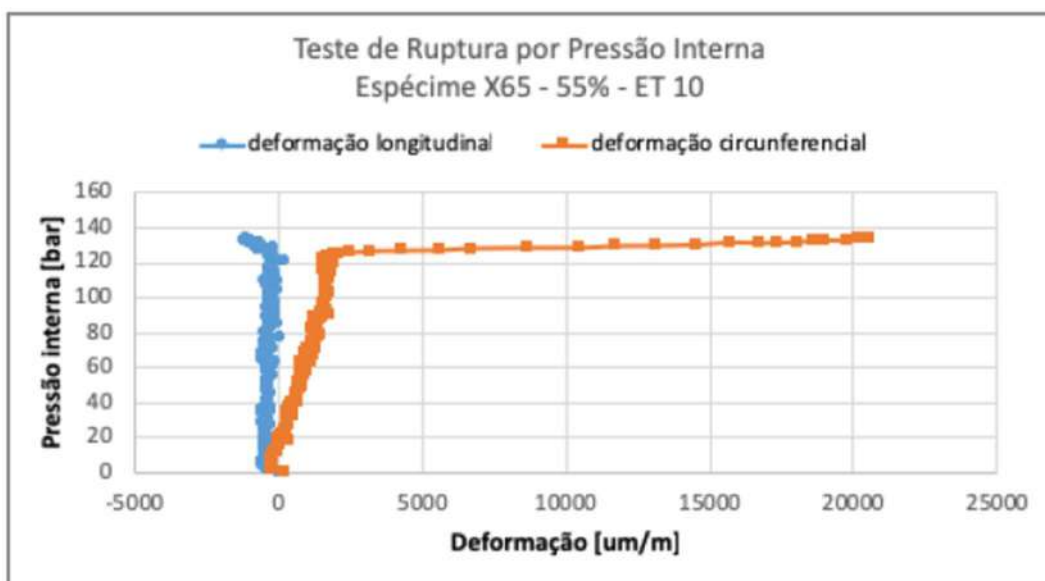


Figura 56 - Deformações medidas por DIC em tubos X65 (valores medidos antes da ruptura dos espécimes).

7.1.2. Dutos com reparo

Na Tabela 20 são apontados os resultados dos testes referentes à pressão de ruptura e efetividade do reparo, quantificada pelo fator RSF, nos ETs com reparo. De forma análoga, as pressões correspondentes são obtidas dos diagramas de pressão aplicada e volume de água injetado no tubo, conforme o Apêndice I.

Tabela 20 - Resultados experimentais para pressão de ruptura e RSF (efetividade) nos espécimes sem reparo.

ET	Rebaixo nominal	Rebaixo real (média)	Material	Pressão de ruptura (MPa)	Local de ocorrência da ruptura	Reparo	Efetividade do reparo (RSF)
03	40%	41,9%	X65	31,7	Defeito sob reparo	Fornecedor 1	1,006
12	55%	41,4%	X65	31,1	Duto região nominal	Fornecedor 1	0,987
16	70%	51,9%	X65	30,2	Defeito sob reparo	Fornecedor 1	0,959
05	40%	55,4%	X65	30,8	Duto região nominal	Fornecedor 2	0,977
09	55%	68,7%	X65	31,2	Duto região nominal	Fornecedor 2	0,989
20	70%	68,7%	X65	31,1	Duto região nominal	Fornecedor 2	0,986
26	40%	39,5%	Gr. B	24,5	Defeito sob reparo	Fornecedor 3	0,975
31	55%	53,2%	Gr. B	23,3	Defeito sob reparo	Fornecedor 3	0,928
33	70%	68,0%	Gr. B	25,4	Defeito sob reparo	Fornecedor 3	1,011

Pode-se observar que os nove ETs reparados e testados apresentaram pressões de ruptura com valores semelhantes àsquelas dos espécimes íntegros correspondentes (31,5 MPa para o ET01 de aço X65 e 25,1 MPa para o ET23 de aço Gr. B). Consequentemente, os valores de RSF próximos de 1 indicam que todos os reparos foram eficazes em restabelecer a resistência original do tubo novo.

O possíveis locais de ocorrência da ruptura dos testes é mais bem ilustrado na Figura 57 abaixo:

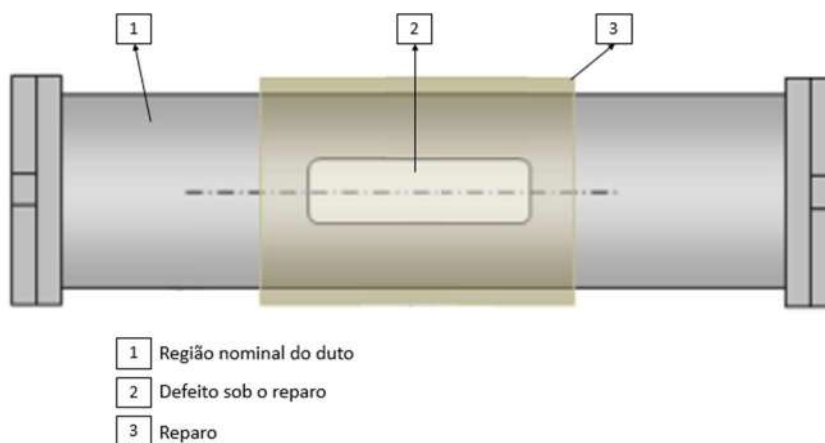


Figura 57 - Locais onde a ruptura pode ocorrer nos testes de pressão dos dutos reparados.

O gráfico da Figura 58 mostra os resultados obtidos para o RSF experimentalmente, onde pode-se reparar a proximidade que os resultados tiveram com o valor 1 representado pela linha preta. Os números acima das barras indicam os locais onde ocorreu a ruptura conforme legenda da Figura 57 acima.

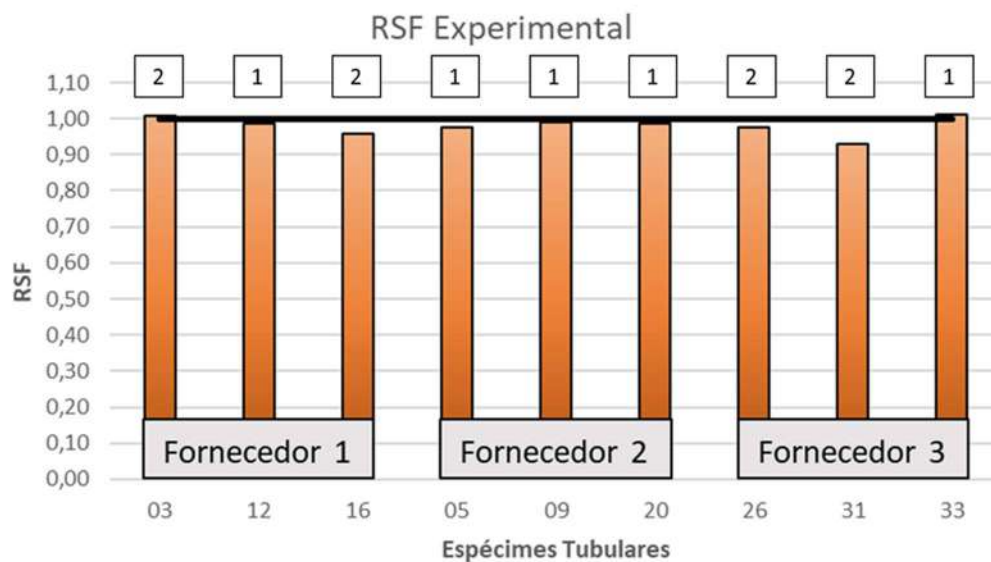


Figura 58 - Gráfico com os resultados experimentais para o RSF.

Nas imagens da Figura 59 abaixo estão ilustrados os aspectos dos nove ETs com reparo após o teste de ruptura com as respectivas pressões.



Figura 59 - Testes de ruptura nos tubos sem reparo. Fonte: relatório do projeto. Fonte: (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

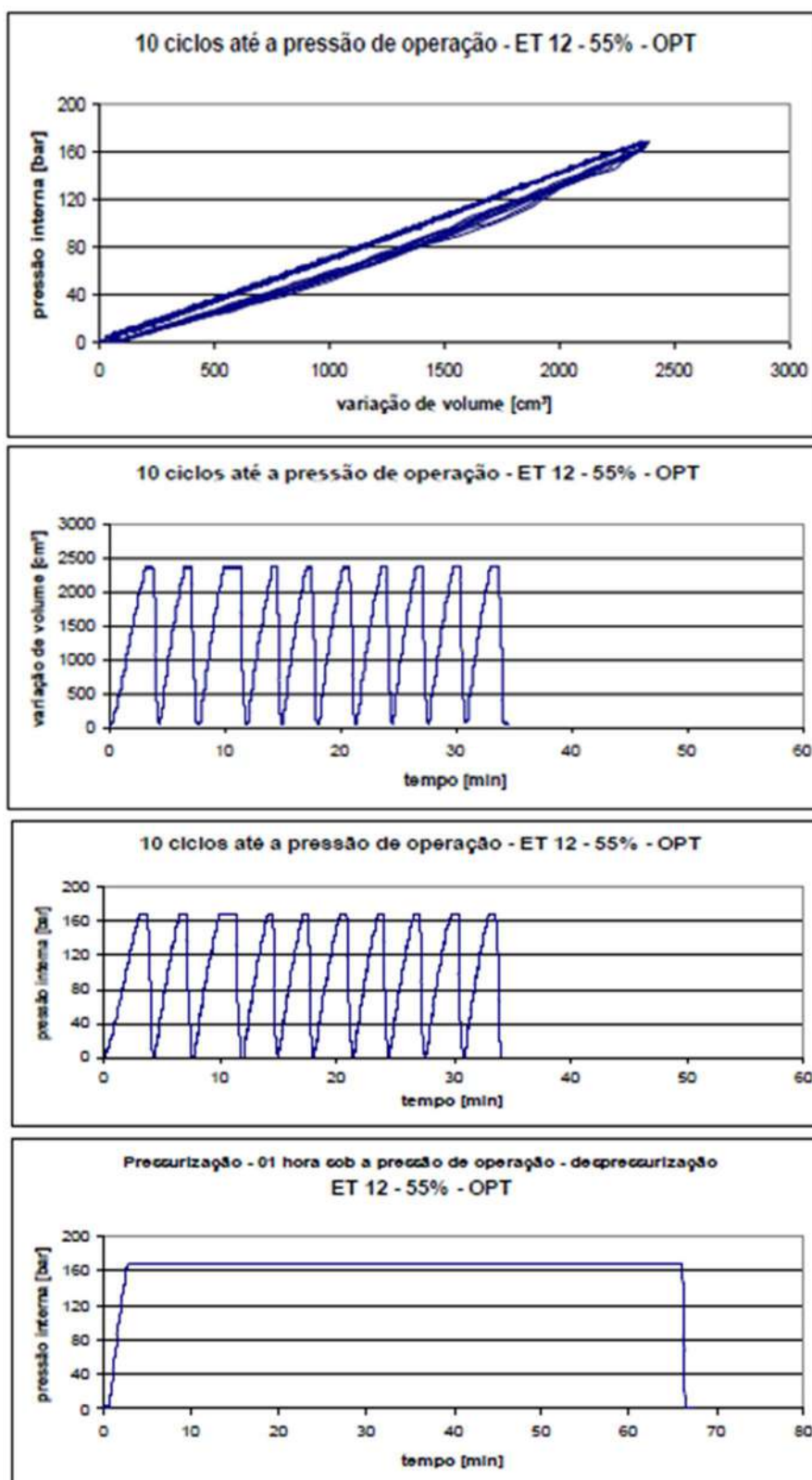
Pode-se identificar nas imagens que o ET03 e ET16 (com 40% e 70% de perda de metal respectivamente), relativos ao Fornecedor 1, romperam na região do defeito sob o reparo, porém sob pressões altas e semelhantes à pressão de ruptura do tubo íntegro. O outro ET do Fornecedor 01 (ET 12 com 55% de perda metálica) apresentou ruptura na região do tubo fora do reparo, indicando o restabelecimento total da resistência original do tubo.

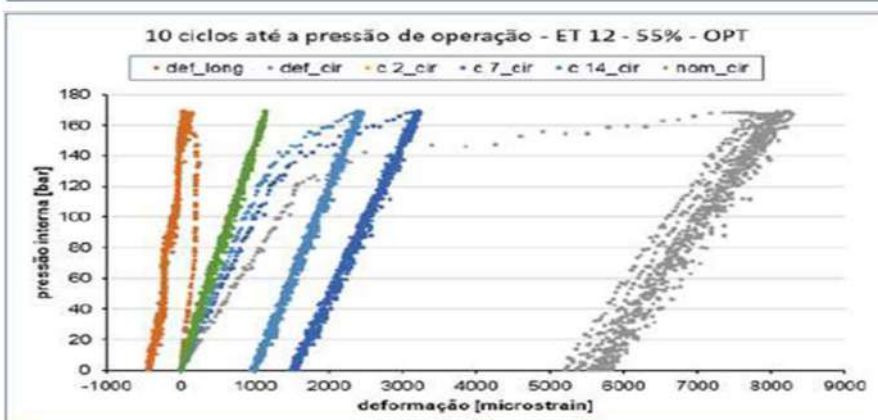
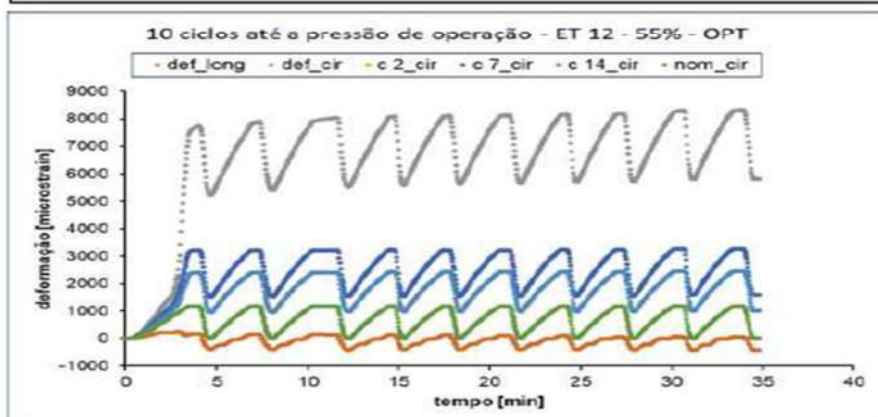
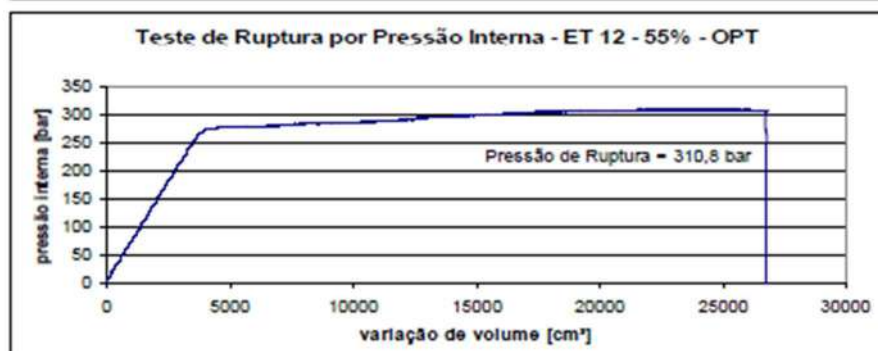
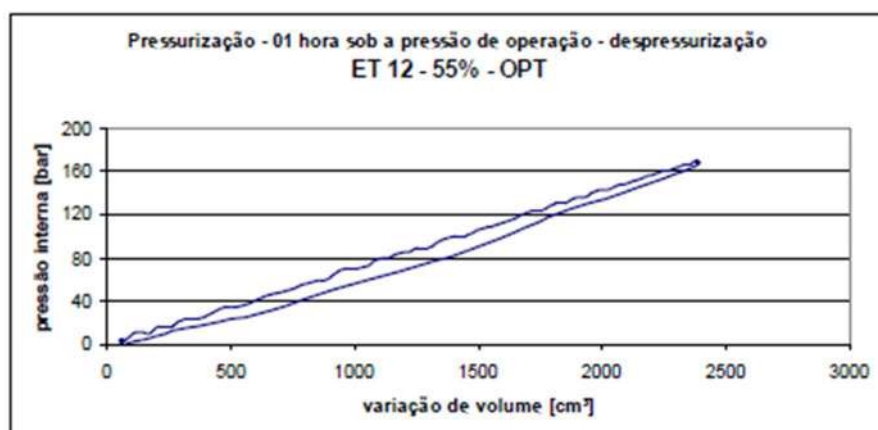
De forma semelhante, dois ETs reparados pelo Fornecedor 3 também obtiveram ruptura na região do defeito sob o reparo, que foram o ET26 e ET31, com respectivamente 40% e 55% de perda de espessura. O ET33 (70% de perda de metal) rompeu no tubo fora do reparo, novamente demonstrando efetividade na restauração da integridade original.

Já os três ETs com reparos do Fornecedor 2 (ET05, ET09 e ET20) romperam todos na região do tubo fora do reparo, o que sugere o restabelecimento total da resistência do tubo novo.

Destaca-se novamente que o valor máximo real do RSF corresponde à 1, mesmo que o reparo por si só tenha a capacidade de resistir à pressões internas maiores. Casos experimentais que indicam valores maiores que 1 podem ser justificados pelo emprego de espécimes minimamente diferentes nos testes de pressão, mesmo que tenham sido projetados igualmente e possuam os mesmos materiais aplicados e valores nominais nas dimensões. Qualquer desvio mínimo deste padrão pode explicar as pequenas variações nos resultados, inclusive para o RSF maior que 1.

A Figura 60 reúne um conjunto de resultados obtidos para o ET12 (55% de perda de espessura), incluindo os gráficos referentes aos 10 ciclos de pressão iniciais, à pressurização mantida sob 1 hora na pressão de projeto e ao teste de ruptura em si. Também é possível observar as deformações longitudinal e circunferencial obtidas através da extensometria óptica em função da pressão interna imposta no teste de ruptura, vide também a Tabela 21 que apresenta os resultados de deformação circunferencial em cada espécime. Esses valores são medidos até onde pôde ser feita a leitura pelos sensores ópticos colados no rebaixo e os montados nas camadas do reparo, por vezes não sendo lidos até o momento da ruptura.





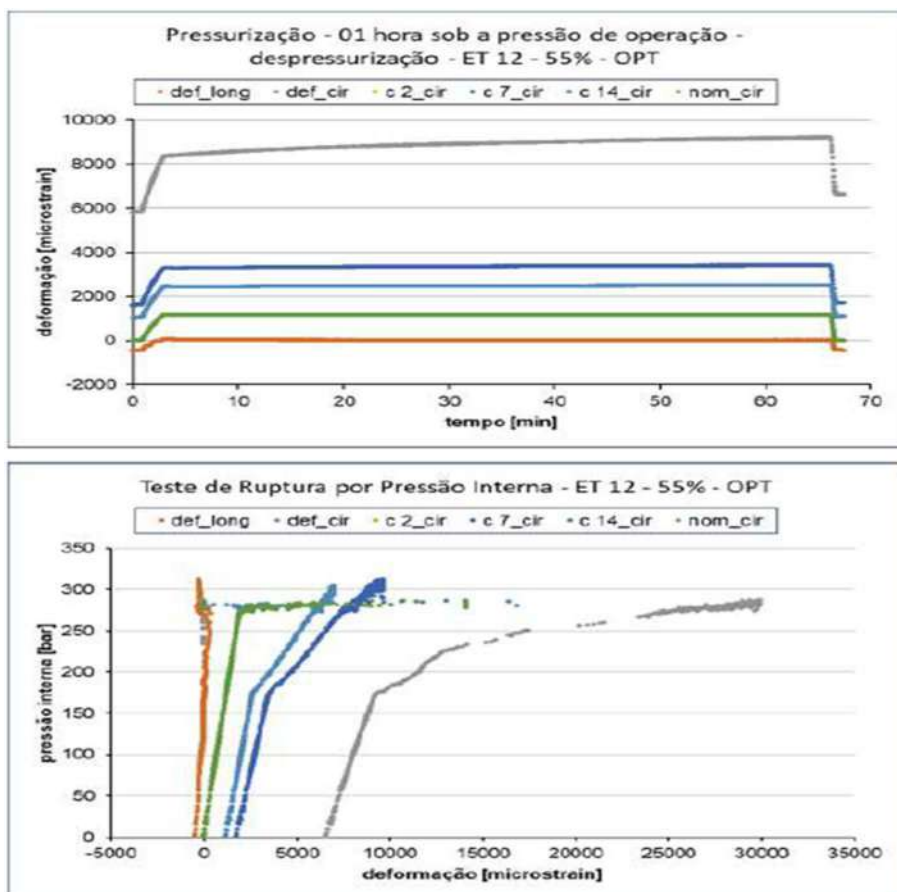


Figura 60 - ET12: Gráficos resultantes dos 10 ciclos de pressão, da pressurização sob 1 hora na pressão de projeto e do posterior teste de ruptura (FREIRE, VIEIRA, *et al.*, 2019).

Nota-se nas imagens que `def_long` e `def_cir` referem-se às deformações longitudinal e circunferencial no defeito, `nom_cir` refere-se à deformação na região nominal do duto e `c2_cir`, `c7_cir` e `c14_cir` são as deformações nas camadas 2, 7 e 14 respectivamente. Este padrão de legenda foi seguido para os outros espécimes conforme gráficos mostrados no Apêndice I.

Tabela 21 - Deformações medidas durante o teste de pressão de ruptura nos espécimes com reparo.

ET	Deformação máxima sob P_{op} [$\mu m/m$]	Deformação máxima até a última pressão de leitura [$\mu m/m$]	Variação da deformação durante 1 hora sob P_{op} [$\mu m/m$]
03	$def_{circ} \approx 1600$ $c2_{circ} \approx 1750$	$def_{circ} \approx 7000$ $c2_{circ} \approx 9500$	Sem variação significativa
12	$def_{circ} \approx 5000$ no 1º ciclo $def_{circ} \approx 8000$ nos demais	$def_{circ} > 30000$	def_{circ} aumento de ≈ 700
16	$def_{circ} \approx 6000$ no 1º ciclo $def_{circ} \approx 13000$ no 10º ciclo	$c2_{circ} > 9000$	def_{circ} aumento $\approx 7000 \mu m/m$ durante os 10 ciclos até P_{op}
05	$c3_{circ} \approx 1500$	$c11_{circ} > 17000$	$c3_{circ}$ aumento de ≈ 50
09	$def_{circ} \approx 1500$ no 1º ciclo $def_{circ} \approx 3600$ nos demais	$c3_{circ} > 5000$	Sem variação significativa
20	$def_{circ} \approx 8000$ no 1º ciclo $def_{circ} \Delta \varepsilon \approx 3000$ nos demais	$def_{circ} > 10000$ $c3_{circ} > 7000$	def_{circ} aumento de ≈ 200
26	$def_{circ} \approx 850$	$c1_{circ} \approx 7000$	Sem variação significativa
31	$c1_{circ} \approx 1000$	$c1_{circ} \approx 6500$	$c1_{circ}$ aumento de ≈ 30
33	$def_{circ} \approx 1800$	$c1_{circ} \approx 7000$	$c1_{circ}$ aumento de ≈ 100

7.2.Resultados Analíticos

7.2.1.Espécimes tubulares sem reparo

O método analítico visa prever os resultados experimentais através de equações provenientes de normas e da mecânica do reparo de dutos. Antes de prever a ruptura dos tubos reparados, primeiro faz-se necessária a avaliação dos defeitos

usinados nos espécimes, de acordo com suas dimensões reais e a integridade remanescente do tubo, com o intuito de buscar o método normativo mais exato em termos de previsão à ruptura de tubos corroídos.

Considerando a pressão de ruptura dos ETs íntegros como $P_u = \frac{2t}{D} s_u$ e com base na equação 4, utilizada junto com as equações da Tabela 4, é possível avaliar a influência da presença de cada defeito nos ETs, obtendo-se os seguintes resultados de pressão de ruptura e RSF:

Tabela 22 - Resultados analíticos para pressão de ruptura e RSF avaliados para cada método normativo no aço X65.

Aço X65	RSF			Pressão de ruptura (MPa)			
Método	ET04 40%	ET10 55%	ET18 70%	ET01 -	ET04 40%	ET10 55%	ET18 70%
Resistência dos materiais	0,610	0,492	0,336	34,5	18,5	15,4	10,3
ASME B31.G	0,610	0,492	0,336	34,5	15,6	12,9	8,7
Área real	0,656	0,542	0,382	34,5	17,6	15,0	10,4
B31.G modificado	0,722	0,630	0,499	34,5	19,4	17,4	13,5
DNV-RP-F101	0,685	0,575	0,414	34,5	23,1	20,0	14,1

Tabela 23 - Resultados analíticos para pressão de ruptura avaliados para cada método normativo no aço Gr. B.

Aço Gr. B	RSF			Pressão de ruptura (MPa)			
Método	ET04 40%	ET10 55%	ET18 70%	ET01 -	ET04 40%	ET10 55%	ET18 70%
Resistência dos materiais	0,581	0,471	0,390	25,6	12,3	10,1	8,8
ASME B31.G	0,581	0,471	0,390	25,6	8,0	6,6	5,7
Área real	0,628	0,521	0,440	25,6	10,1	8,5	7,8
B31.G modificado	0,700	0,612	0,546	25,6	11,3	10,00	9,4
DNV-RP-F101	0,659	0,554	0,473	25,6	16,8	14,3	12,8

Os gráficos das Figuras 61 e 62 ajudam a compreender os resultados analíticos obtidos para os ETs sem reparo em comparação com os mesmos resultados conseguidos experimentalmente, tanto para os espécimes de aço X65 quando para aço Gr. B.

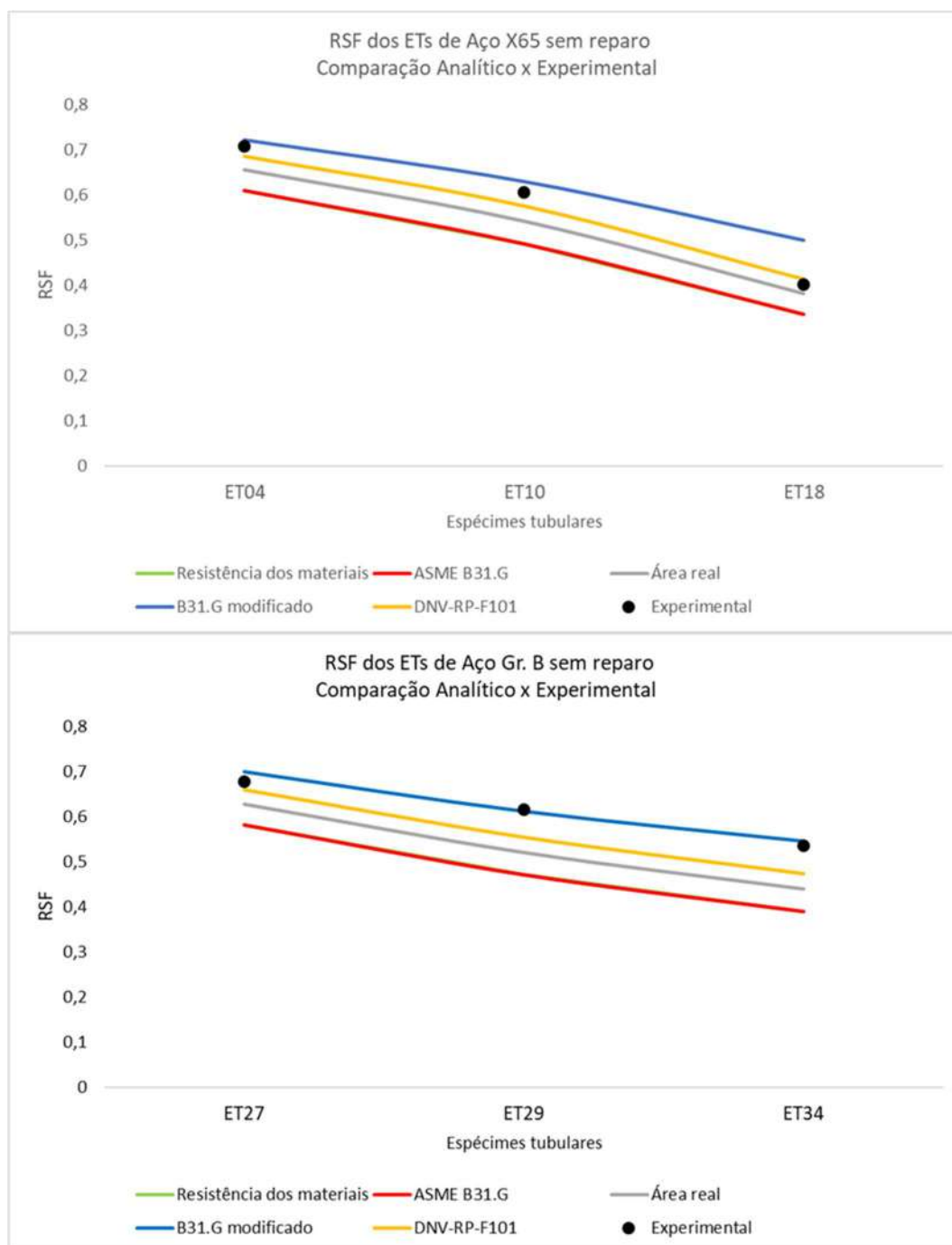


Figura 61 - Gráficos de comparação entre os valores de RSF analíticos obtidos para cada espécime e os valores os mesmos experimentais.

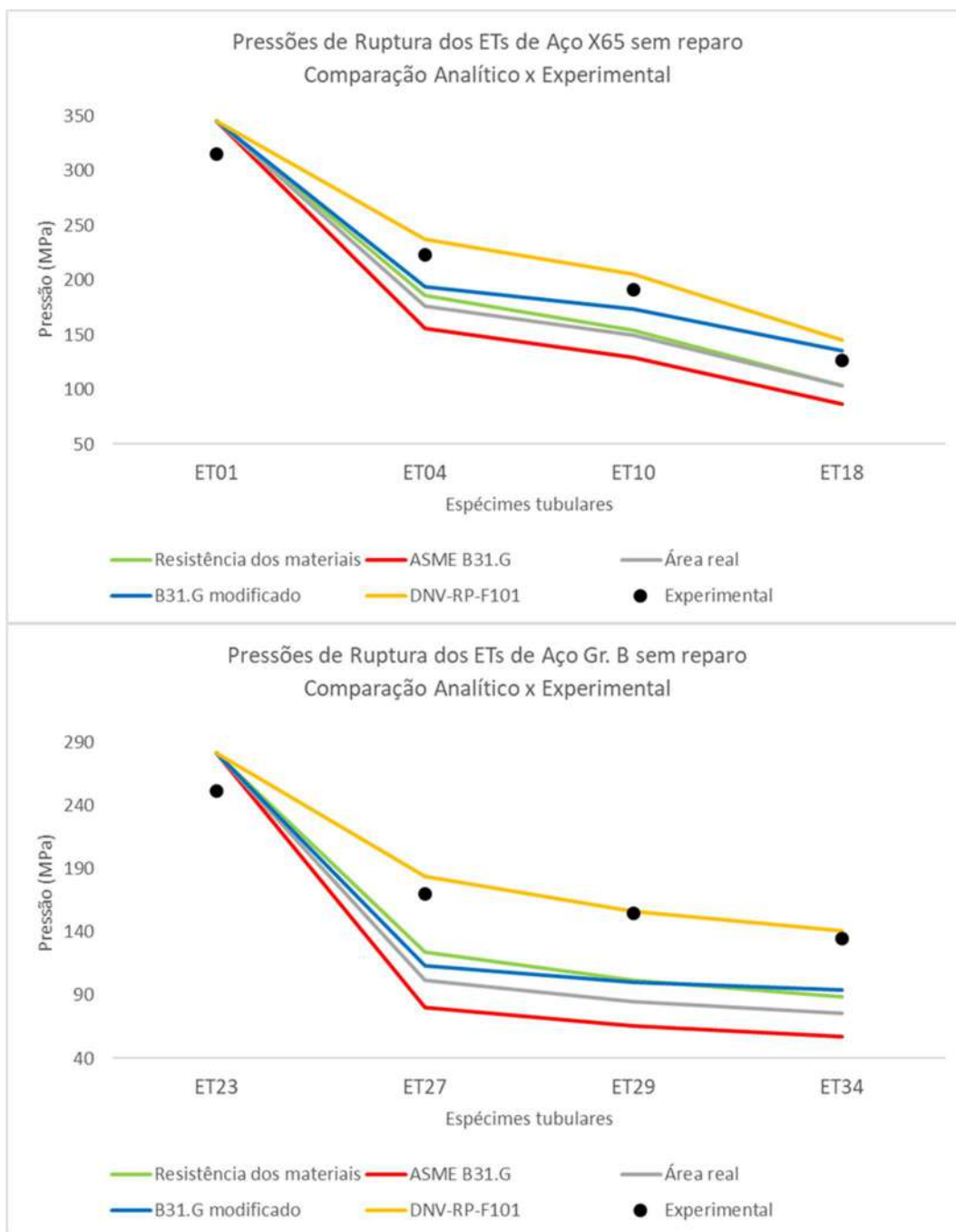


Figura 62 - Gráficos ilustrando a comparação entre os valores de pressão de ruptura analíticos obtidos para cada espécime e os valores os mesmos experimentais.

Pode-se notar que os métodos DNV-RP-F101 e B31.G Modificado possuem a melhor aproximação aos resultados experimentais para os valores de RSF. Já quando se analisa os resultados para a pressão de ruptura nos espécimes, é possível evidenciar a maior exatidão do método DNV, o qual se sobressai com relação aos outros em termos de previsão da ruptura e, portanto, foi escolhido como o método

mais ideal para prosseguimento nos cálculos. Os gráficos da Figura 63 abaixo demonstram esta decisão baseada nos erros percentuais entre os métodos.

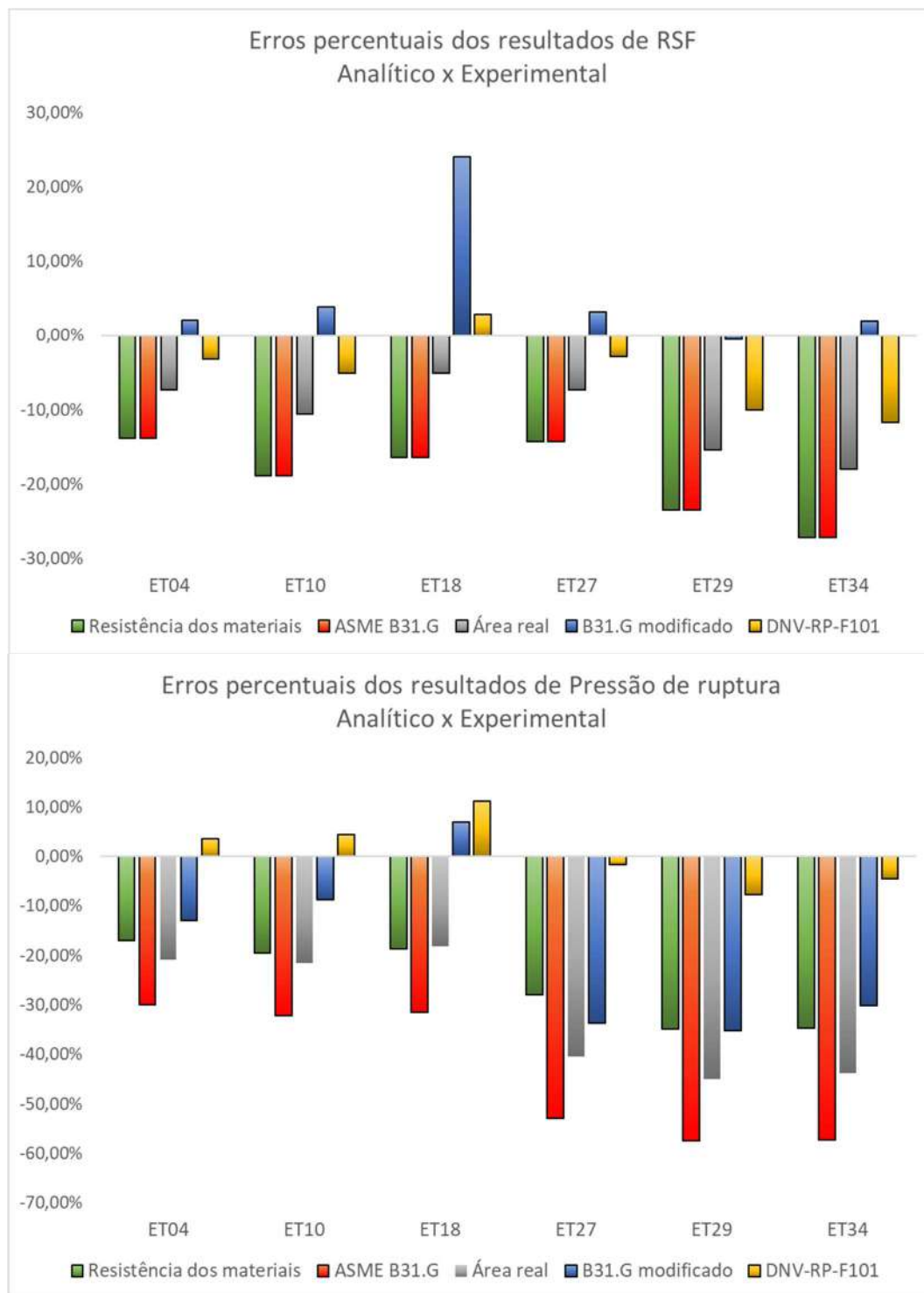


Figura 63 - Gráficos de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental para os ETs sem reparo.

Pode-se reparar nas menores porcentagens que denotam a exatidão do método DNV, visto que considera como S_{flow} as tensões de ruptura do material (S_u ou $SMUS$).

O método B31.G Modificado, que também demonstrou exatidão nos valores calculados, apresentou resultados de RSF mais conservativos, gerando majoritariamente erros percentuais positivos enquanto os outros métodos “erraram” para baixo (com erros percentuais negativos). Os valores obtidos para a pressão de ruptura, no entanto, não seguiram esta regra conservadora.

Analiticamente, os resultados de pressão de ruptura obtidos para os espécimes sem ruptura ET01 e ET23 através da equação $P_u = \frac{2t}{D} S_u$, conforme mostra a Figura 62, demonstraram valores maiores que o experimental da ordem de 9,5% e 2,1% respectivamente.

7.2.2. Espécimes tubulares com reparo

Conforme explicado no capítulo de metodologia, faz-se necessária a aplicação da pressão DNV explicada na seção anterior nas equações de previsão à ruptura dos tubos reparados, vide a necessidade de introduzi-la nas equações das normas. A Tabela 24 fornece os resultados analíticos para a pressão de ruptura dos dutos reparados e sua efetividade avaliada através do RSF. Considerando os dados de geométricos e de materiais apresentados na metodologia, os três métodos utilizados são: ISO 24817 – Seção 7.5.4.1 Tensão admissível no duto (equação 23); ISO 24817 – Seção 7.5.4.2 Deformação admissível no reparo (equação 24) e Equação de Equilíbrio (equações 25 - 38).

Tabela 24 - Resultados analíticos para pressão de ruptura e RSF avaliados para os três métodos utilizados.

ET	Pressão de ruptura (MPa)			RSF		
	Método Tensão adm. no duto	Método Deformação adm. no reparo	Equação de Equilíbrio	Método Tensão adm. no duto	Método Deformação adm. no reparo	Equação de Equilíbrio
ET03	27,3	29,9	33,4	0,817	0,895	1,000
ET12	23,9	27,5	34,6	0,693	0,797	1,000
ET16	19,6	25,1	33,9	0,580	0,740	1,000
ET05	29,8	32,7	34,0	0,878	0,961	1,000
ET09	27,6	32,5	33,6	0,823	0,968	1,000
ET20	22,7	29,6	34,2	0,665	0,866	1,000
ET26	26,8	25,7	25,9	1,022	0,981	0,986
ET31	23,2	22,8	25,6	0,894	0,881	0,986
ET33	21,0	22,0	25,1	0,827	0,865	0,986

Lembrando que para alcançar os resultados da tabela acima utilizando a equação 23, referente à ISO 24817 – Seção 7.5.4.2, foi considerada a deformação admissível do reparo como $\varepsilon_c = 0,3\%$ (conforme Tabela 6 atendendo à dois anos de projeto – classe 3). Esta escolha foi feita devido ao fato de que os reparos aplicados foram projetados com base em 2 anos de vida, além do propósito de prever a ruptura.

A estratégia de avaliação através da equação de equilíbrio possibilita analisar graficamente e comparativamente o comportamento do duto reparado frente à divisão de carregamento em cada componente durante a pressurização do sistema até a ruptura. O método também trabalha com os limitantes que permitem a compreensão das etapas elásticas e elastoplásticas do duto neste processo.

Na Figura 64 é apresentado o gráfico obtido para o ET12 (55% de rebaixo com reparo do Fornecedor 1).

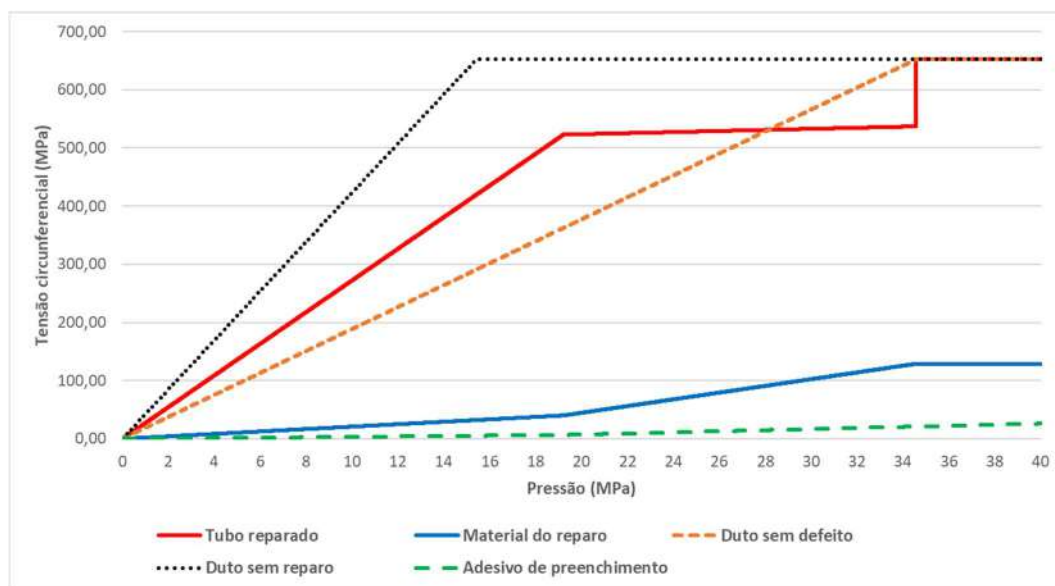


Figura 64 - Gráfico Tensão circunferencial - Pressão interna para o ET12 (Fornecedor 1).

Pelo gráfico pode-se inferir que o reparo do Fornecedor 1 para o espécime de aço X65 com 55% de rebaixo foi eficiente em restaurar a integridade original do tubo, vide o padrão da curva vermelha contínua indicar a ruptura do espécime através do “degrau abrupto” que ocorre na mesma região que a curva laranja tracejada correspondente ao duto sem defeito. De acordo com a equação 35, pode-se constatar que, a depender do reparo aplicado, o ET apenas sofreria ruptura por volta de 40,3 MPa da pressão interna, caso o tubo com rebaixo não rompesse antes. Contudo, conforme a equação 38 mostra, a pressão que ocasionou a ruptura do ET12 foi de 34,6 MPa, equivalente à pressão de ruptura do tubo íntegro ($P_{u,a}$), o que sugere que o rompimento ocorreu no duto e que a reparação do Fornecedor 1 foi eficaz para este caso. A queda de inclinação da curva contínua vermelha corresponde à plastificação que começa a ocorrer a partir da pressão $P_y = 19,2$ MPa na região do defeito.

Neste sistema, a curva preta pontilhada mostra que o duto com defeito e sem reparo romperia à uma pressão de 15,4 MPa, considerando que ele plastificaria a partir de 12,4 MPa. Ou seja, o tubo defeituoso teoricamente rompe à uma pressão interna menor em quase 4 MPa com relação à pressão que causa o escoamento do tubo reparado ($P_y = 19,2$ MPa), mais uma vez legitimando o reforço fundamental adicionado ao sistema através do reparo aplicado.

A curva laranja tracejada indica que o tubo íntegro teria seu rompimento à uma pressão de 34,6 MPa, após dar início à sua plastificação com 27,7 MPa, demonstrando a integridade inicial mais de duas vezes maior que a do tubo reparo.

Finalmente, as curvas azul contínua e verde tracejada equivalem ao comportamento individual do reparo e do adesivo de enchimento respectivamente. Os comportamentos de ambas as curvas são semelhantes, porém com escalas distintas devido à diferença no módulo de elasticidade, onde o módulo de elasticidade do reparo é cerca de 6 vezes maior. A semelhança se dá no comportamento linear elástico (com módulos bem diferentes, conforme já explicado) até o ponto de início do escoamento no duto, onde tanto o reparo quanto o adesivo passam ter a uma curva mais inclinada de modo a indicar uma maior parcela da carga suportada. Após esta etapa, devem retornar à horizontalidade conforme a condição de ruptura chega.

Os outros ETs analisados por este método também obtiveram resultados similares, isto é, com a ruptura teórica sempre ocorrendo do duto e não no reparo, logo sugerindo o quão eficazes seriam os reparos vide a obtenção de RSFs próximos à 1. Os outros resultados estão apresentados no Apêndice II.

Os gráficos das Figuras 65 e 66 a seguir mostram a comparação entre cada um dos 3 métodos analíticos utilizados entre si e com o método experimental, considerando os resultados obtidos para a pressão de ruptura e o RSF em cada ET reparado.

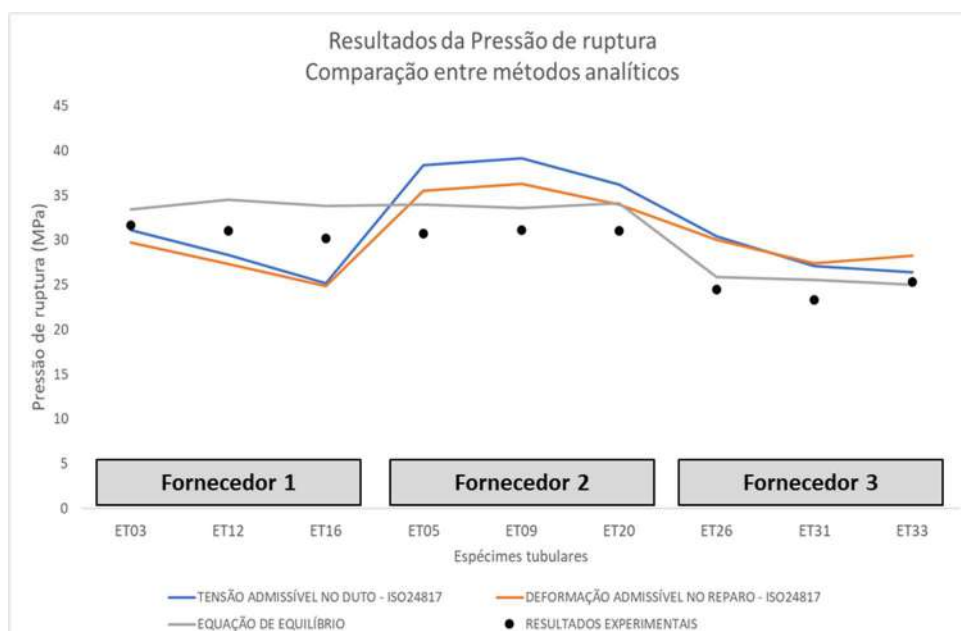


Figura 65 - Gráfico dos resultados analítico e experimental para a pressão de ruptura nos ETs com reparo.

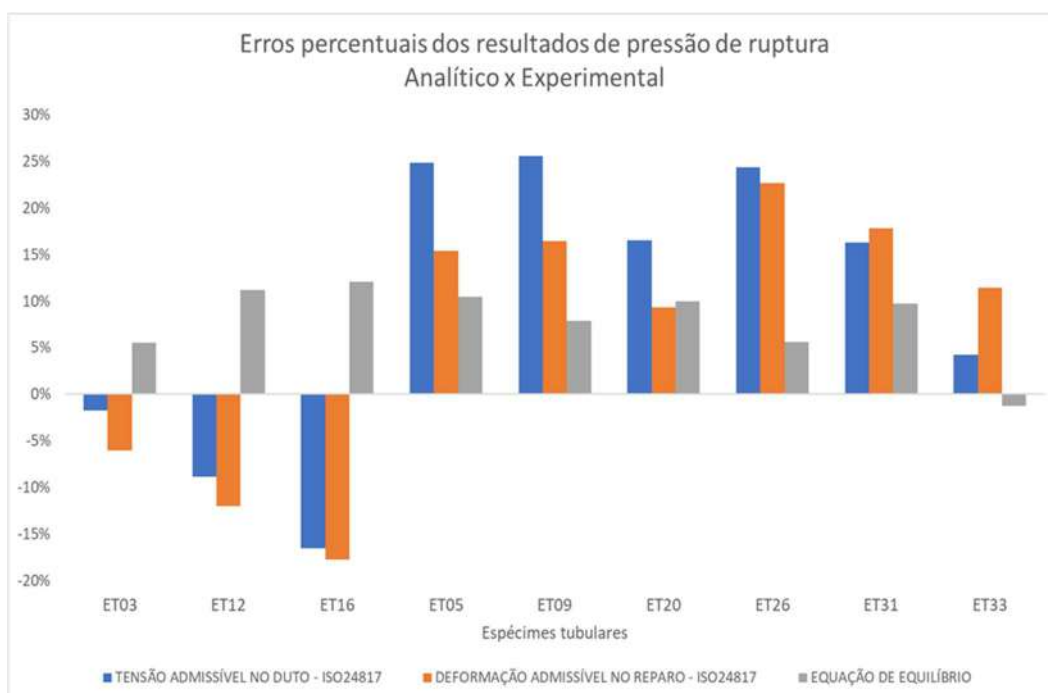


Figura 66 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental da pressão de ruptura para os ETs com reparo.

Nos gráficos pode-se notar, na maioria dos casos, uma aproximação satisfatória entre os resultados analíticos testados e os pontos pretos correspondentes às pressões de ruptura experimentais.

Os três ETs do Fornecedor 1 apresentaram maior divergência principalmente para os métodos normativos, onde ambos os resultados previram pressões de ruptura menores que as reais. Nota-se também um padrão crescente dos erros percentuais conforme a mudança para ETs com maiores profundidades de rebaixo, além de que a equação de equilíbrio apresentou os menores erros gerais.

Os três ETs do Fornecedor 2 apresentaram resultados um pouco mais diversificados entre si. O método da tensão admissível do substrato (S_u) foi eficiente em prever a ruptura dos ETs 05 e 09, com respectivos 40% e 55% de profundidade de rebaixo, onde o ET20 de maior profundidade mostrou um erro de -19,1% com o real. Já os métodos da deformação admissível no reparo (0,3%) e a equação de equilíbrio demonstraram exatidão razoavelmente similar, com erros numa faixa média de 10 – 15%.

Os três ETs do Fornecedor 3 mostraram resultados mais padronizados, porém neste caso com previsões da ruptura indicando pressões maiores que os resultados reais, impossibilitando a conclusão de que o método de tensão admissível no

substrato seria o mais conservativo. Além disso, o método da equação de equilíbrio se mostrou mais eficaz novamente.

Os gráficos da Figura 67 e 68 mostram os resultados obtidos do RSF para cada método analítico em comparação com os resultados experimentais. Pode-se assim comparar quantitativamente a eficiência da reparação aplicada em cada espécime por cada método utilizado.

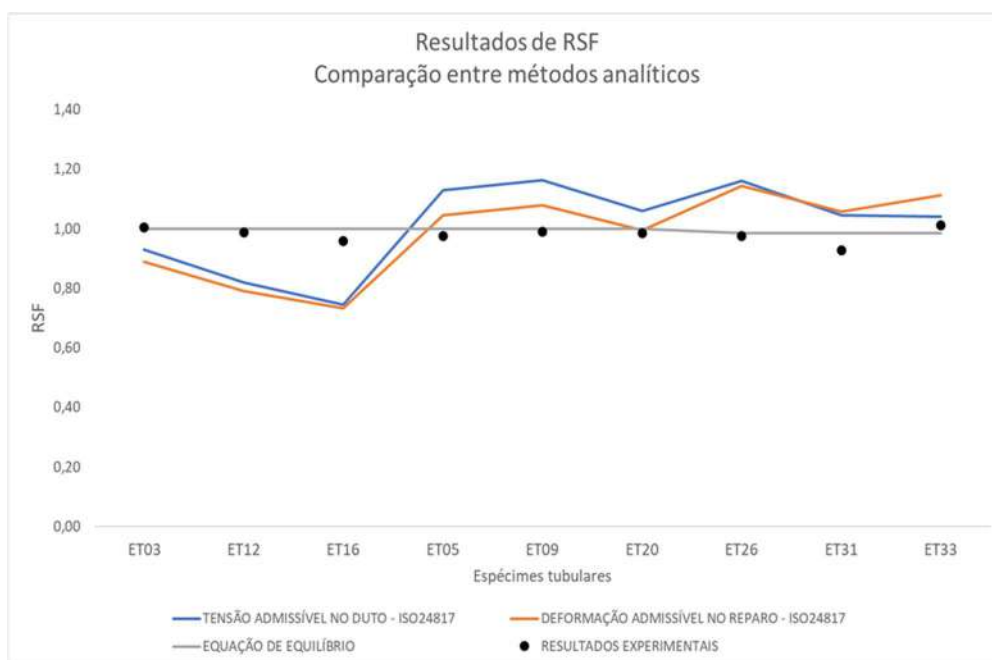


Figura 67 - Gráfico dos resultados analítico e experimental para o RSF nos ETs com reparo.

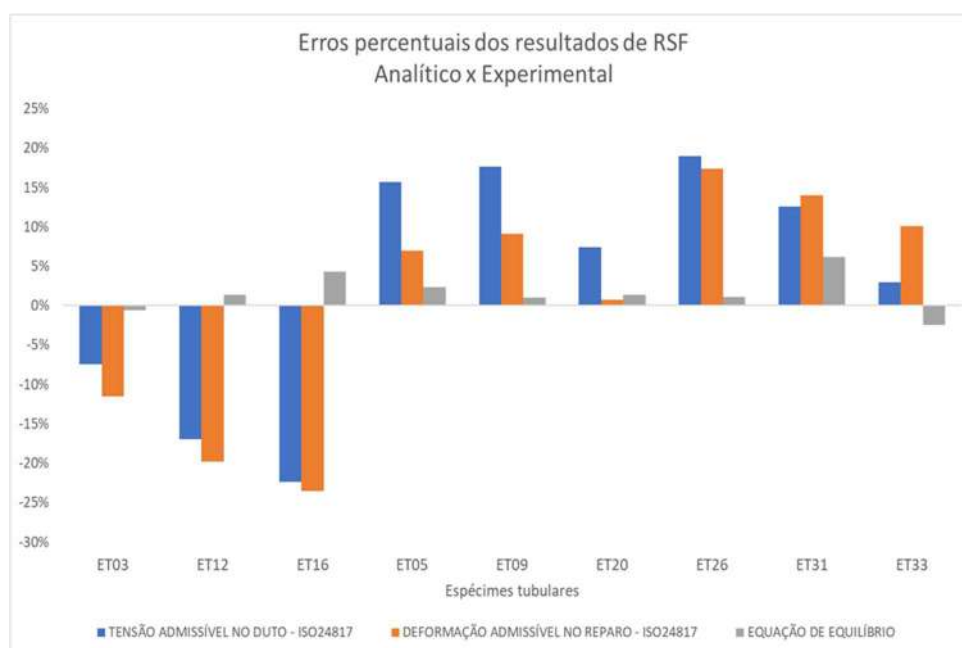


Figura 68 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados analítico e experimental do RSF para os ETs com reparo.

É bastante claro pelos gráficos que o método da equação de equilíbrio apresenta os menores erros, e isto se deve ao fato de que a equação considera a pressão de ruptura analítica como o valor mínimo entre a pressão de ruptura do tubo íntegro e a pressão de ruptura do reparo (caso o tubo não rompa antes). Desta maneira, os resultados sempre se apresentam próximos de 1 tal qual a abordagem experimental, visto que nenhum espécime tubular desta pesquisa rompeu no reparo previamente ao duto em si. Isto caracteriza o estudo da equação de equilíbrio como um método satisfatório na previsão da ruptura real de dutos reparados com compósito.

Já os outros métodos apresentaram resultados com padrões parecidos com os resultados da pressão de ruptura. O RSF analítico considera apenas valor analítico sobre valor analítico para a mesma geometria de duto com e sem defeito, enquanto o experimental considera apenas os valores reais, obtidos dos testes de pressão, para espécimes com geometria levemente distintas (embora o valor nominal de projeto seja o mesmo).

O método da deformação admissível no reparo (onde é válido relembrar que ele considera a pressão de instalação inclusa na equação do problema) se mostrou mais exato que o método da tensão admissível no duto, devido aos menores erros apresentados. Caso seja necessário a utilização de um dos métodos normativos na previsão de condições de rompimento de dutos reparados, pode-se sugerir este método como mais exato, contanto que a pressão P_s utilizada corresponda ao método DNV-RP-F101 para avaliação de defeitos e que a pressão P_{live} não seja ignorada.

Através das conclusões que serão vistas mais adiante nos cálculos da espessura de projeto dos reparos, é possível deduzir que o método da tensão admissível no duto apresenta maior conservadorismo, apesar dos resultados de previsão à ruptura realçarem tal fato apenas para os ETs de aço X65. As divergências podem ter relação tanto com a obtenção das propriedades dos materiais ensaiados para a pesquisa quanto para os dados geométricos utilizados com valores médios.

7.2.3.Resultado das estimativas de espessura requerida para os reparos

Com base nas configurações dos sistemas duto/reparos aplicados, nas metodologias utilizadas por cada fornecedor e nas equações de normas para projeto de reparos compostos para dutos defeituosos, foi realizado um breve estudo para a estimativa de espessura necessária de reparo para a operação segura dos dutos, tendo como base diferentes condições normativas. Serão apresentados a seguir os métodos e dados utilizados por cada fornecedor para cada projeto empregado nos testes de ruptura em campo, sendo feita a comparação dos métodos utilizados com os métodos disponíveis já apresentados para cada caso.

A primeira consideração é com relação aos dados geométricos e de propriedade dos materiais, onde foram considerados, conforme dados advindos dos fornecedores, os valores nominais para os cálculos visando possibilitar a devida comparação. Assim, de acordo com os procedimentos de projeto disponibilizados por cada fornecedor, tem-se os dados de projeto conforme Tabela 25 abaixo:

Tabela 25 - Dados utilizados para as equações de projeto do reparo.

Espécime	ET03 40%	ET12 55%	ET16 70%	ET05 40%	ET09 55%	ET20 70%	ET26 40%	ET31 55%	ET33 70%
Diâmetro (mm)	323,85	323,85	323,85	323,80	323,80	323,80	323,85	323,85	323,85
Espessura do duto (mm)	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38
Espessura remanescente do duto (mm)	5,03	3,78	2,52	5,03	3,77	2,51	5,03	3,77	2,51
Módulo de elasticidade do aço (GPa)	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Tensão limite de escoamento (MPa)	448	448	448	448	448	448	241	241	241
Pressão de operação - duto íntegro (MPa)	16,40	16,24	16,02	16,70	16,70	16,70	9,12	9,12	9,12
Deformação admissível do reparo (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Força axial equivalente (kN)	1351	1338	1319	1375	1375	1375	751	751	751
Módulo de elasticidade circ. do reparo (GPa)	15,3	15,3	15,3	17,0	17,0	17,0	38,6	38,6	38,6
Coefficiente de Poisson	0,12	0,12	0,12	0,28	0,28	0,28	0,26	0,26	0,26
Pressão de instalação do reparo (MPa)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,50	2,50	2,50

As espessuras estabelecidos pelo projeto de cada fornecedor e as espessuras medidas em campo foram comparadas aos métodos já apresentados da tensão admissível no duto e deformação admissível no reparo (ambos por intermédio da ISO 24817, que especifica o termo de pressão de avaliação do defeito P_s nas equações 23 e 24); e a equação de equilíbrio com avaliação inversa, direcionada

agora para a espessura conforme mostrado na metodologia. O intuito principal desta comparação é a possível constatação do que foi empregado no projeto de cada reparo.

A Tabela 26 apresenta as espessuras estimadas por cada método e os gráficos da Figura 69 e 70 mostram as comparações correspondentes:

Tabela 26 - Espessuras estimadas através dos principais métodos analíticos.

Cálculo das espessuras de reparo (mm)					
ET	Equação de Equilíbrio (Equação 42)	Tensão admissível no duto (Equação 12)	Deformação admissível no reparo (Equação 14)	Espessuras projetadas pelos fornecedores	Espessuras medidas em campo
03	22,4	34,7	19,5	19,8	23,6
12	30,6	45,6	26,1	27,0	27,1
16	38,7	56,4	32,3	34,2	34,4
05	21,2	38,3	18,4	21,2	22,3
09	29,2	49,0	24,9	29,1	29,9
20	37,1	59,7	31,0	37,1	35,3
26	5,2	17,4	4,8	18,0	22,3
31	7,1	22,1	6,4	24,0	23,9
33	9,0	26,7	7,8	28,0	33,1

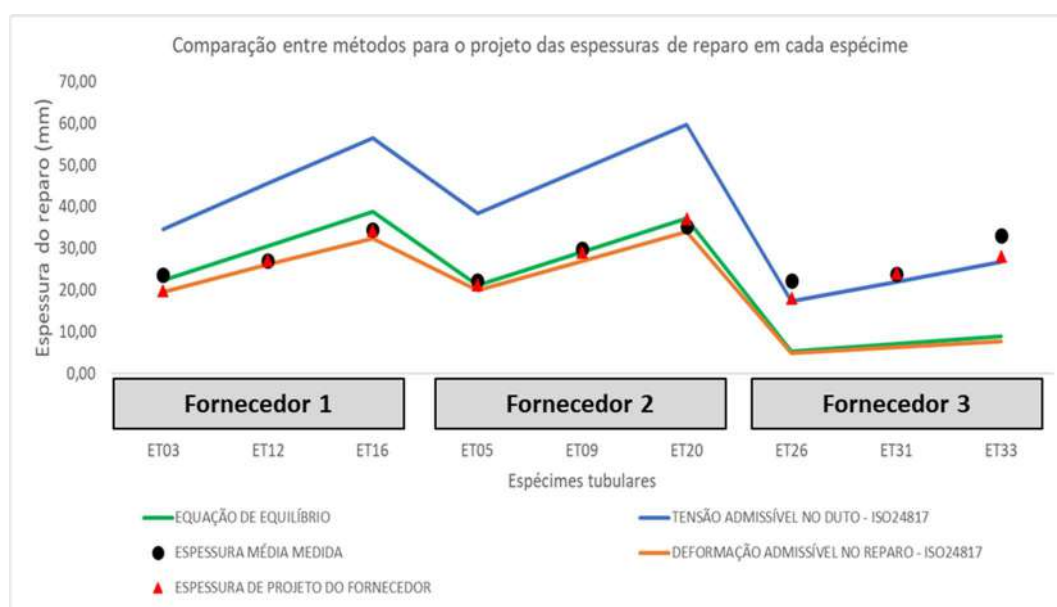


Figura 69 - Gráfico de comparação das estimativas para a espessura de reparo de cada método apresentado com as espessuras medidas e projetadas.

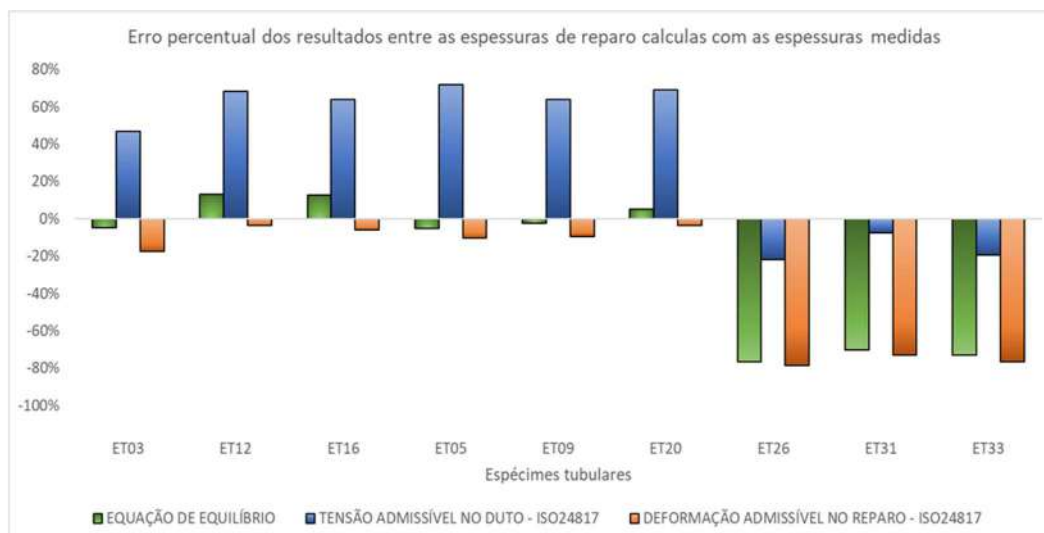


Figura 70 - Gráfico de comparação percentual entre os resultados estimados de espessura dos reparos de cada método e as espessuras medidas.

Vide a pequena diferença entre a espessura projetada pelos fornecedores e as espessuras medidas em campo (valor médio), pode-se notar nos resultados apresentados que o método da deformação admissível no reparo mostrou grande aproximação com relação às espessuras de reparo reais aplicadas nos espécimes de aço X65 (Fornecedores 1 e 2). Considerando que ambos estes fornecedores empregaram o projeto limitado pela deformação no reparo, cada um com suas especificidades, verificou-se que o resultado ficou dentro do esperado. Lembrando que ambos desconsideraram a pressão no momento da instalação.

O método da deformação admissível no reparo aplicado para os ETs de fibra de carbono do Fornecedor 3 resultou em espessuras bem menores que as reais, sugerindo que possivelmente o fornecedor projetou o reparo com alto fator de segurança ou superdimensionou o reparo com uma equação mais conservativa. De fato, para estes espécimes, foi empregado o projeto limitado pela tensão admissível no substrato.

Este padrão, o qual indica certo conservadorismo no projeto dimensional do reparo através do uso da equação normativa baseada no projeto limitado pela tensão admissível no substrato, acaba por replicar nos outros espécimes também além dos reparados pelo Fornecedor 3. Porém nestes casos, como pode-se observar pelos gráficos, os resultados obtidos através deste método apresentaram espessuras consideravelmente maiores que as reais aplicadas, ao contrário do caso anterior. Com estes resultados pode-se inferir que este método proporciona um valor de

espessura maior que os outros, superdimensionando o projeto de reparo de certa forma e promovendo segurança extra na aplicação.

Outro fator para atestar essa teoria é o comportamento similar entre os resultados de deformação admissível no reparo e a equação de equilíbrio, os quais foram sempre menores que o resultado da tensão admissível no substrato e reforçam hipótese de que um projeto com menos camadas de laminados compostos aplicados ao defeito poderia reparar e restaurar eficientemente a integridade do duto.

7.3.Resultados Numéricos

Para os resultados numéricos, serão inicialmente apresentados os valores de pressão de ruptura e RSF obtidos nas análises dos tubos sem reparo, seguidos dos valores de pressão de ruptura e RSF dos tubos com reparo. Por fim, serão mostrados os resultados obtidos para as deformações elásticas e plásticas para cada caso. É válido lembrar que as avaliações numéricas foram baseadas na comparação entre os métodos Lower Bond e Upper Bond, conforme explicado na metodologia, além da realização de comparação entre procedimentos de cálculo para o RSF.

7.3.1.Dutos sem reparo

7.3.1.1.Pressão de ruptura e RSF

Os resultados de elementos finitos obtidos para os ETs sem reparo (incluindo os íntegros), tanto através do método Lower Bond quanto Upper Bond, são apresentados na Tabela 27:

Tabela 27 - Resultados numéricos para pressão de ruptura e RSF dos ETs sem reparo, avaliados para os métodos LB e UB.

ET	Método Lower Bond			Método Upper Bond		
	Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	RSF (Método I)	Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	RSF (Método I)
01	17,792	35,6	-	18,578	37,2	-
04	9,810	19,6	0,551	11,364	22,7	0,612
10	8,612	17,2	0,484	9,693	19,4	0,522
18	5,901	11,8	0,332	6,758	13,5	0,364
23	13,288	26,6	-	13,693	27,4	-
27	7,307	14,6	0,550	8,022	16,0	0,586
29	6,054	12,1	0,456	6,831	13,7	0,499
34	5,243	10,5	0,395	6,339	12,7	0,463

Os gráficos das Figuras 71 e 72 mostram a diferença percentual dos métodos LB e UB para a pressão de ruptura e o RSF com relação aos resultados experimentais fornecidos da Tabela 19. Ressalta-se que este RSF foi calculado pelo Método I explicado ao fim da seção 4.3.4.3, da mesma maneira empregada na metodologia experimental, isto é, dividindo-se a pressão de ruptura obtida para um espécime defeituoso e a pressão de ruptura medida para o espécime íntegro correspondente (mesmo material).

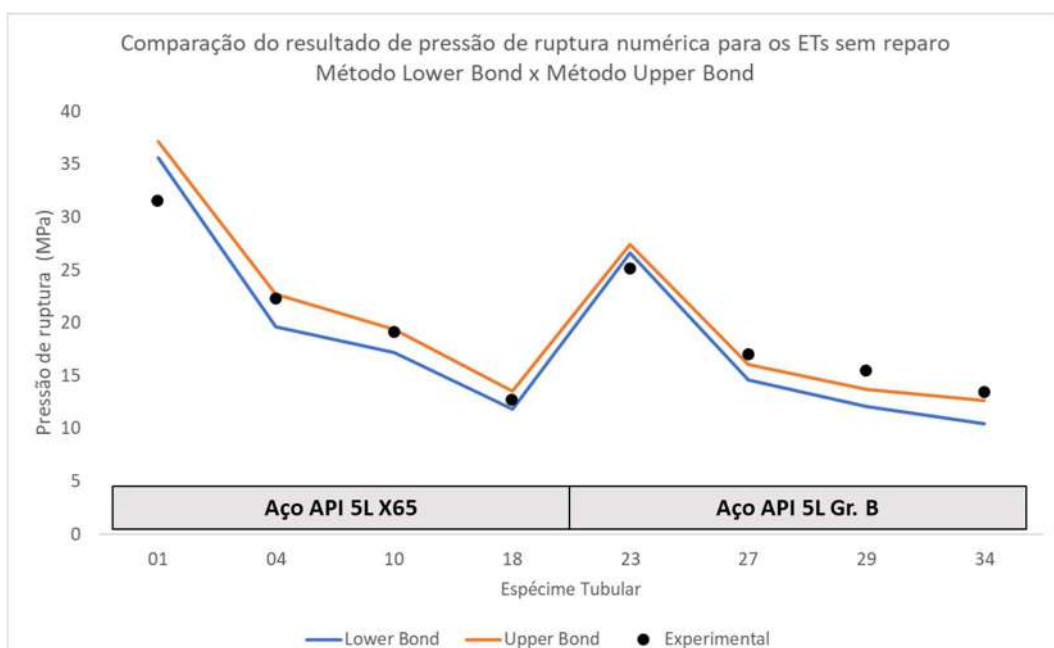


Figura 71 - Gráfico de comparação dos resultados de pressão de ruptura obtidos para os ETs sem reparo considerando os métodos LB e UB.

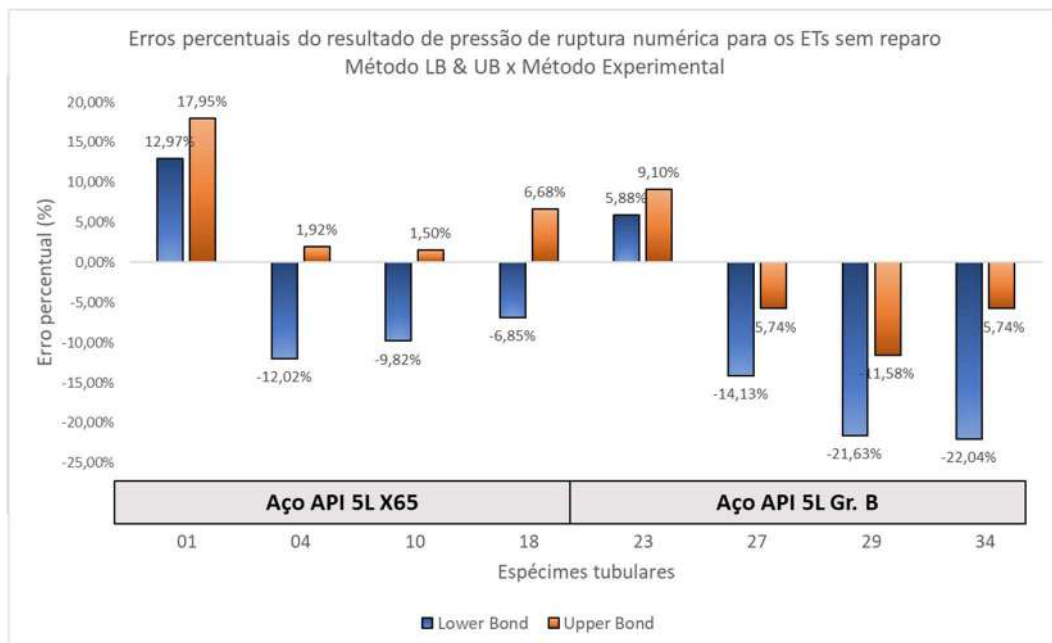


Figura 72 - Gráfico de comparação percentual dos resultados de pressão de ruptura obtidos para os ETs sem reparo considerando os métodos LB e UB.

Pelos gráficos pode-se notar o maior grau de exatidão apresentado pelos resultados do método Upper Bond, o qual considera a condição de ruptura no instante em que a menor tensão circunferencial ao longo da espessura interna do rebaixo equivale à tensão de resistência à tração do material, simulando assim o colapso plástico da região mais solicitada.

Tendo em vista este aspecto, o método UB sempre ocorrerá em um tempo maior de análise do que o método LB, fazendo com que, consequentemente, a pressão interna no instante da ruptura seja também maior. Este fato contribui para o maior grau de exatidão do método Upper Bond para ETs sem reparo, vide os maiores resultados de pressão que o aproximaram dos resultados experimentais.

Apenas os tubos íntegros de cada material apresentaram maiores erros com o método UB, o que pode ocorrer devido à influência de defeitos internos ao material e dimensões reais levemente diferentes. Todavia, como serão vistas nas Figuras 73 e 74, este fator não influenciou negativamente nos resultados do RSF para o UB pois, conforme a estimativa feita entre valores numéricos apenas, isto possibilita que o RSF permaneça mais próximo do real na proporção em que as pressões podem diferenciar.

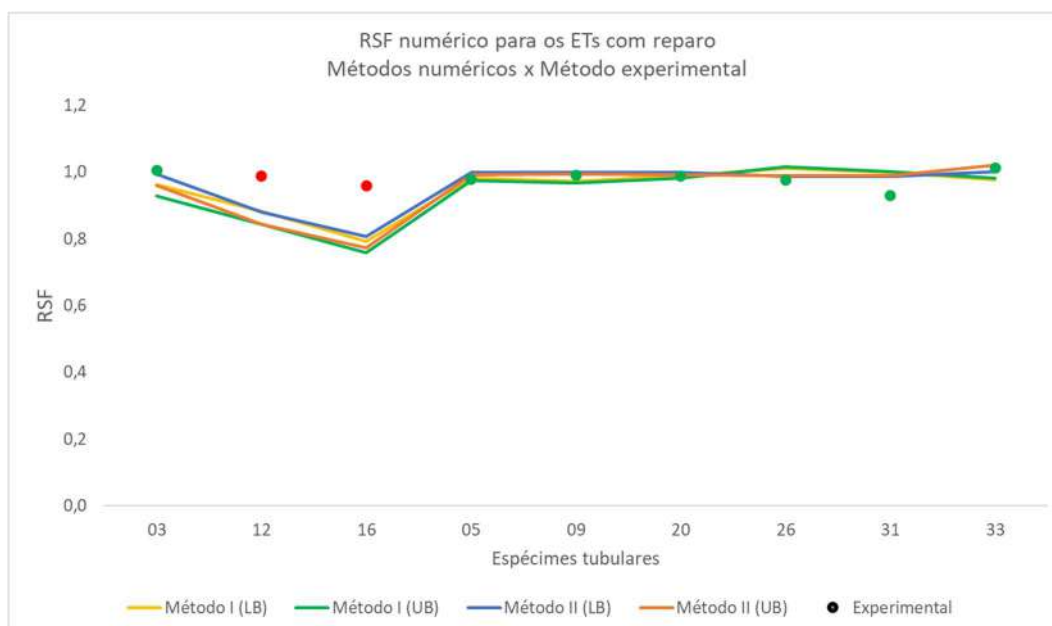


Figura 73 - Gráfico dos resultados de RSF para os ETs sem reparo considerando os métodos I e II para considerando a avaliação Lower Bond e Upper Bond.

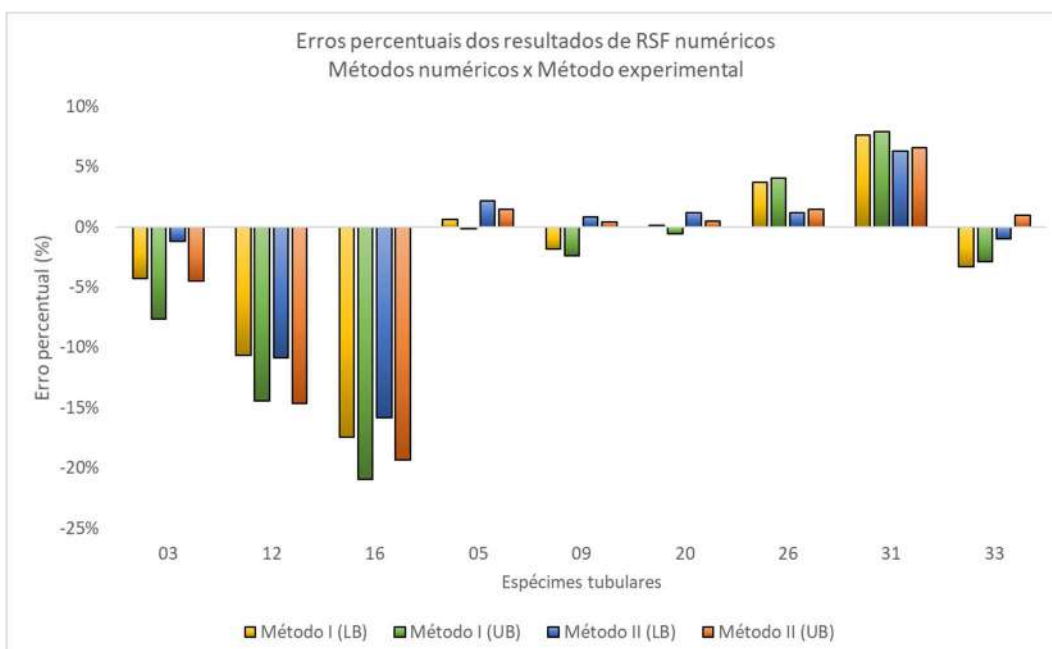


Figura 74 - Gráfico de comparação percentual dos resultados de RSF para os ETs sem reparo considerando os métodos I e II para considerando a avaliação Lower Bond e Upper Bond.

Ressalta-se que todos os resultados de RSF apresentaram-se menores que os obtidos nos experimentos, sugerindo uma perda de resistência mecânica do tubo maior que a apresentada nos testes.

Lembrando que foram realizados testes para uma análise alternativa para a estimativa numérica do RSF, conforme destacado a seguir:

- a) O Método I é o que já foi apresentado na Tabela 27 e leva em consideração a configuração dos testes e cálculos na etapa experimental, ou seja, tendo como denominador da divisão a pressão obtida para o ET01 e ET23, respectivamente para o aço X65 e Gr. B.
- b) O Método II, conforme resultados apresentados na Tabela 28 a seguir, leva em conta no denominador da divisão a pressão correspondente à mesma geometria do ET em avaliação, porém sem a presença dos defeitos.

Tabela 28 - Resultados numéricos para o RSF calculado pelo Método II, avaliados para o método LB e UB.

ET	Método Lower Bond			Método Upper Bond		
	Time display (s)	Pressão de ruptura (s)	RSF (Método II)	Time display (s)	Pressão de ruptura (s)	RSF (Método II)
4	17,377	34,8	0,565	18,126	36,3	0,627
10	17,893	35,8	0,481	18,687	37,4	0,519
18	17,547	35,1	0,336	18,311	36,6	0,369
27	13,182	26,4	0,554	13,580	27,2	0,591
29	13,350	26,7	0,454	13,758	27,5	0,496
34	14,104	28,2	0,372	14,559	29,1	0,435

O gráfico mostra que o Método II, em geral, é mais exato com relação ao RSF experimental do que o Método I. Este resultado já podia ser esperado vide a conformidade com o emprego da mesma geometria dos ETs desconsiderando o reparo e defeito.

7.3.1.2. Deformações

Para a avaliação numérica dos resultados de deformação, foi configurado um ponto de análise exatamente no centro do rebaixo a fim de investigar a deformação

elastoplástica total ao longo de todo o processo de pressurização até a ruptura, simulando o *strain gage* conforme instrumentado na etapa experimental. Estes

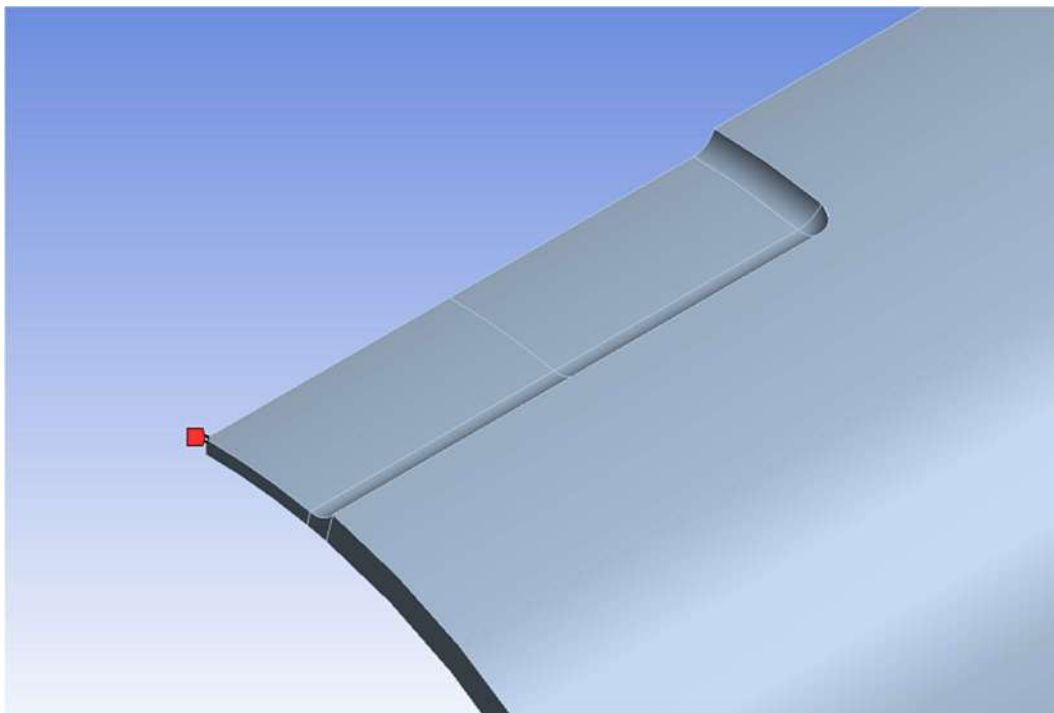


Figura 75 - Exemplo do ponto de análise imposto no centro dos rebaixos de forma a simular o strain gage e medir as deformações no local.

resultados correspondem às direções circunferencial e longitudinal dos tubos e possibilita uma comparação com os resultados experimentais. A Figura 75 abaixo ilustra essa situação:

Serão apresentados abaixo, na Tabela 29 e gráfico da Figura 76, os valores de deformação total circunferencial e longitudinal (em microstrains - $\mu\epsilon$) para o ET10, com 55% de profundidade de rebaixo, até que a pressão interna culmine na pressão de ruptura de aproximadamente 19,4 MPa, a qual corresponde ao método Upper Bond (conforme valores já apresentados na Tabela 27). Os mesmos resultados para os outros ETs podem ser vistos no Apêndice III.

Tabela 29 - Resultados numéricos das deformações circunferenciais e longitudinais no centro do rebaixo do ET10.

Pressão interna (MPa)	Def. Circunferencial ($\mu\epsilon$)	Def. Longitudinal ($\mu\epsilon$)
0,4	96,5	16,4
0,8	193,1	32,7
1,4	337,9	57,2
2,0	482,7	81,8
2,4	579,2	98,1
2,8	675,8	114,5
3,4	820,6	139,0
4,0	965,4	163,5
4,4	1061,9	179,9
4,8	1158,5	196,2
5,4	1303,3	220,7
6,0	1448,1	245,3
6,4	1544,7	261,6
6,8	1641,2	278,0
7,4	1786,0	302,5
8,0	1930,8	327,0
8,4	2027,4	343,4
8,8	2123,9	359,7
9,4	2268,7	384,2
10,0	2413,3	408,8
10,4	2508,9	425,1
10,8	2599,7	441,3
11,4	2696,2	466,1
12,0	2700,1	485,6
12,4	2788,3	501,0
12,8	2865,9	516,3
13,4	2933,3	541,8
14,0	2921,3	563,1
14,4	2889,1	571,3
14,8	2849,9	577,2
15,4	2774,8	590,0
16,0	2931,4	510,2
16,4	5473,7	280,7
16,8	12606,0	55,7
17,4	27564,0	-306,3
18,0	44346,0	-797,4
18,4	55918,0	-1203,5
18,8	67565,0	-1693,1
19,4	84762,0	-2581,4

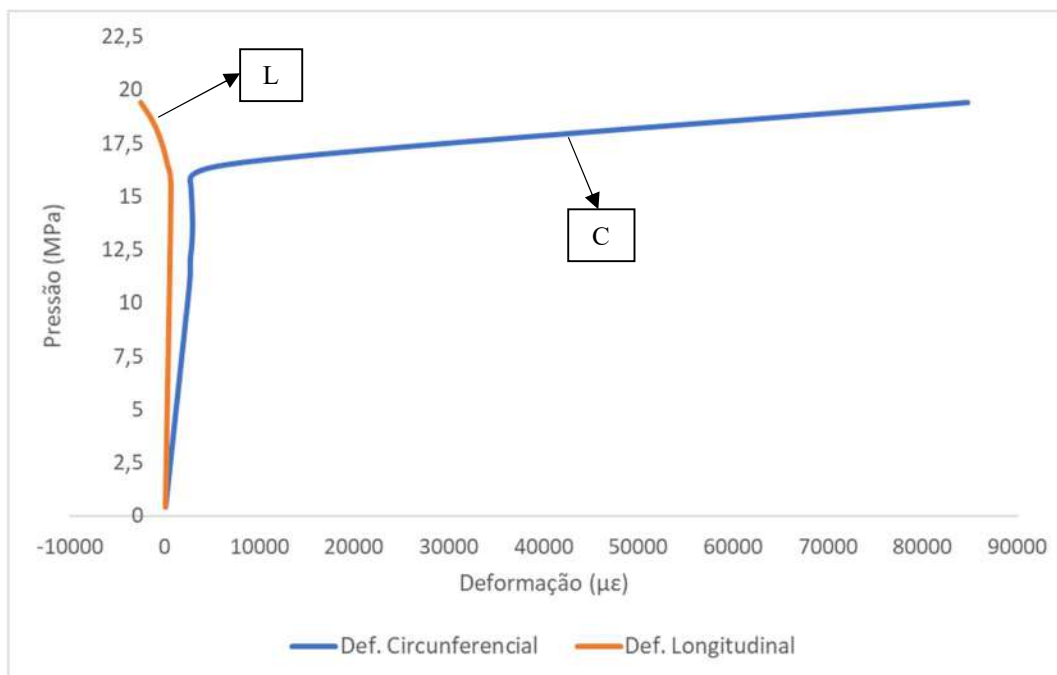


Figura 76 - Gráfico dos resultados obtidos para deformação circunferencial e longitudinal total no centro do rebaixo do ET10.

Os dados obtidos indicam que as deformações permanecem no campo elástico até atingir uma pressão interna aproximadamente 16 MPa, que é quando realmente as curvas começam a divergir e o regime plástico entra em cena.

Pode-se reparar que a curva azul (C), representando a deformação circunferencial, começa a se elevar abruptamente conforme deformações de maiores escalas surgem com o aumento da pressão interna.

Já a curva laranja (L), representando a deformação longitudinal, apresenta um efeito reverso de decréscimo dos valores de deformação a partir do ponto em que o escoamento na direção circunferencial se apresenta. Isto ocorre devido ao início de deformação plástica que ocorre considerando volume constante, com a mudança do coeficiente de Poisson global de 0,3 para 0,5, refletindo a transição do regime elástico para o regime plástico, isto possibilitando que se chegue a valores negativos na direção longitudinal.

7.3.2.Dutos com reparo

7.3.2.1.Pressão de ruptura e RSF

Analogamente aos resultados experimentais e analíticos obtidos, os resultados numéricos para os dutos com defeito reparados também mostraram

grande eficiência nos sistemas de reparos para os três diferentes laminados compósitos utilizados na pesquisa. No geral, valores satisfatórios de pressão de ruptura e RSF foram obtidos, tanto para o método Lower Bond quanto para Upper Bond. Após a apresentação dos resultados alcançados para ambos os métodos, será mostrado um estudo do Método I e Método II para cálculo estimativo do RSF, tal qual apontado na seção anterior.

A Tabela 30 apresenta os resultados atingidos referentes às pressões de ruptura e RSF, para cada ET reparado, dos métodos de análise LB e UB.

Tabela 30 - Resultados numéricos de pressão de ruptura e RSF para os espécimes reparados.

ET	Lower Bond				Upper Bond			
	Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	Local de ocorrência da ruptura	RSF Método I	Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	Local de ocorrência da ruptura	RSF Método I
03	34,246	34,2	Defeito sob reparo	0,962	17,259	34,5	Reparo	0,929
12	31,363	31,4	Reparo	0,881	15,682	31,4	Reparo	0,844
16	28,180	28,2	Reparo	0,792	14,090	28,2	Reparo	0,758
05	34,968	35,0	Duto região nominal	0,983	18,116	36,2	Duto região nominal	0,975
09	34,566	34,6	Duto região nominal	0,971	17,941	35,9	Duto região nominal	0,966
20	35,144	35,1	Duto região nominal	0,988	18,213	36,4	Duto região nominal	0,980
26	26,870	26,9	Duto região nominal	1,011	13,894	27,8	Duto região nominal	1,015
31	26,541	26,5	Duto região nominal	0,999	13,713	27,4	Duto região nominal	1,001
33	25,978	26,0	Duto região nominal	0,978	13,441	26,9	Duto região nominal	0,982

As Figuras 77 e 78 abaixo representam graficamente os resultados obtidos de forma a facilitar o entendimento.

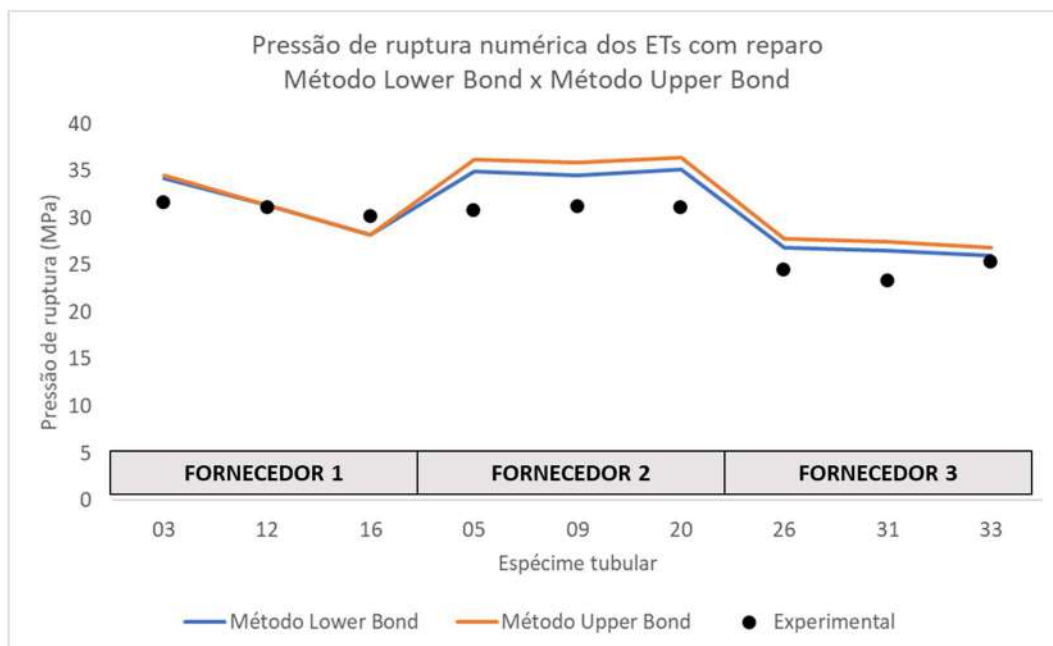


Figura 77 - Gráfico dos resultados obtidos para a pressão de ruptura numérica dos espécimes com reparo.

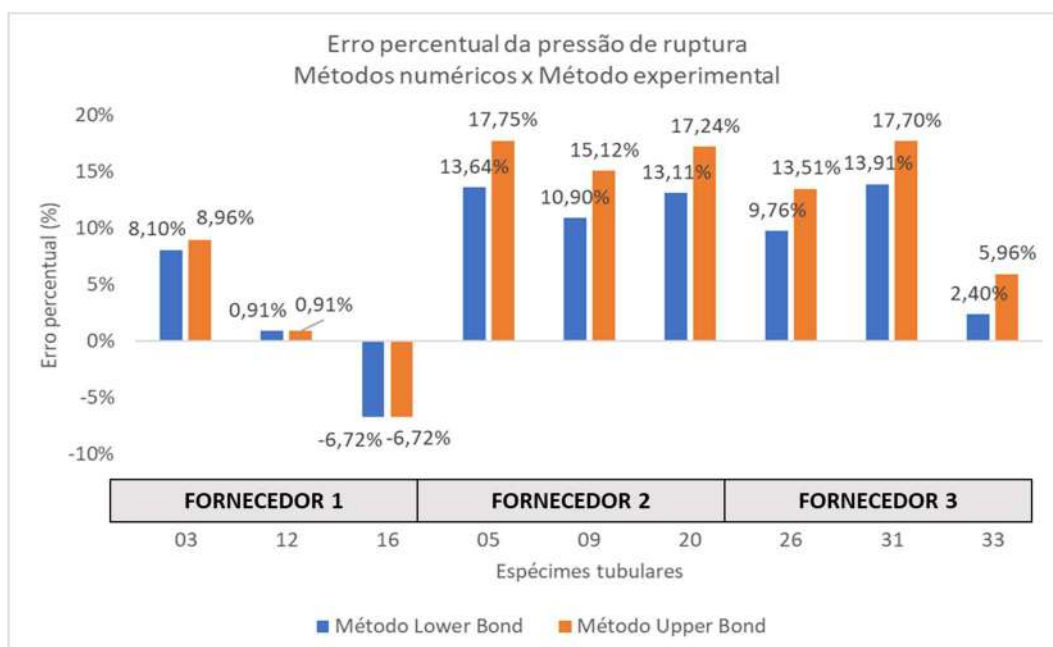


Figura 78 - Gráfico de erros percentuais entre os resultados numéricos e experimentais para a pressão de ruptura.

O gráfico da Figura 77 mostra que os resultados numéricos obtidos seguiram um padrão similar ao experimental, constituindo baixas diferenças. O método LB revelou-se com maior exatidão em prever a pressão de ruptura dos tubos reparados, visto os menores erros indicados no gráfico da Figura 78. Este padrão que é relacionado à pressão interna no instante do rompimento é visualizado em todos os espécimes.

Os ETs de aço X65 reparados pelo Fornecedor 1 apresentaram resultados de pressão com erros percentuais ligeiramente menores que os outros, mesmo que o resultado para o ET16 (70% de perda de espessura) tenha sido o único valor com erro negativo, onde a pressão encontrada pelos elementos finitos foi menor que a real.

Abaixo, na Tabela 31, serão apresentados apenas os valores de RSF calculados através do Método II explicado na seção anterior, tanto para Upper Bond quanto Lower Bond:

Tabela 31 - Resultados numéricos do RSF avaliado apenas pelo Método II para os espécimes reparados.

Lower Bond			Upper Bond		
Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	RSF Método II	Time display (s)	Pressão de ruptura (MPa)	RSF Método II
17,228	34,5	0,994	17,965	35,9	0,961
17,824	35,6	0,880	18,612	37,2	0,843
17,452	34,9	0,807	18,207	36,4	0,774
17,518	35,0	0,998	18,280	36,6	0,991
17,319	34,6	0,998	18,063	36,1	0,993
17,611	35,2	0,998	18,380	36,8	0,991
13,613	27,2	0,987	14,037	28,1	0,990
13,449	26,9	0,987	13,864	27,7	0,989
12,977	26,0	1,001	13,173	26,3	1,020

Abaixo, na Tabela 32, são mostrados os valores de erro percentual obtidos para ambos os métodos:

Tabela 32 - Erros percentuais entre o RSF numérico e experimental.

ET	Erro percentual – RSF numérico x Experimental (%)			
	Método I - LB	Método I - UB	Método II - LB	Método II - UB
03	-4,31%	-7,63%	-1,17%	-4,48%
12	-10,67%	-14,45%	-10,83%	-14,60%
16	-17,43%	-20,92%	-15,81%	-19,31%
05	0,60%	-0,17%	2,17%	1,45%
09	-1,83%	-2,40%	0,85%	0,38%
20	0,13%	-0,61%	1,16%	0,46%
26	3,67%	4,04%	1,20%	1,48%
31	7,59%	7,88%	6,30%	6,55%
33	-3,29%	-2,88%	-0,97%	0,95%

As Figuras 79 e 80 abaixo mostram os resultados numéricos para o RSF obtidos para os ETs com reparo, conforme Tabelas 33 e 34:

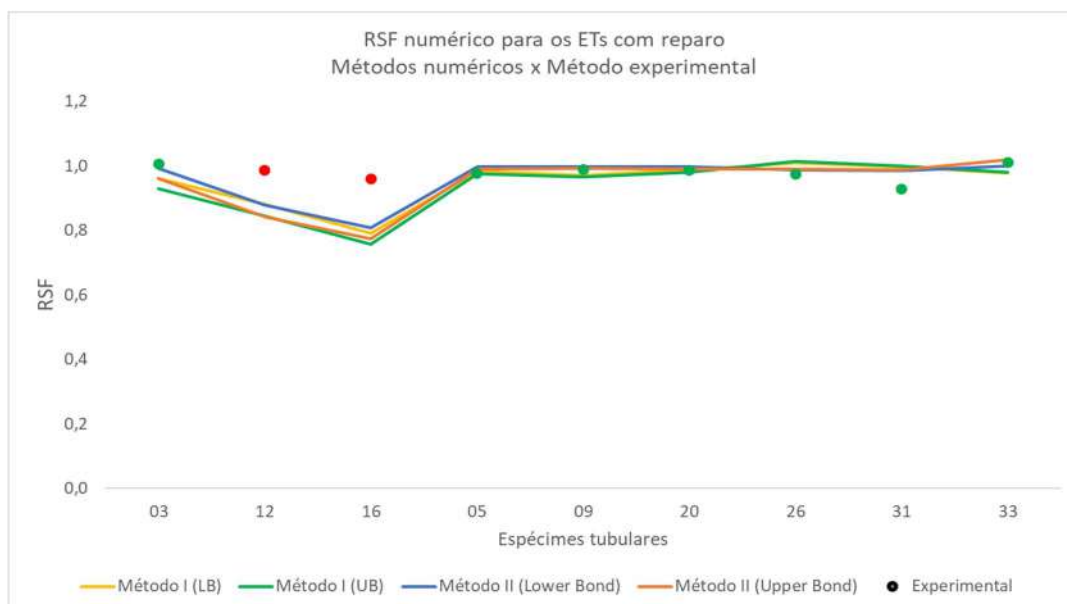


Figura 79 - Gráfico dos resultados obtidos para o RSF dos espécimes com reparo, considerando o Método I e II. Pontos vermelhos representam ruptura numérica no reparo; pontos em verde representam ruptura no duto nominal.

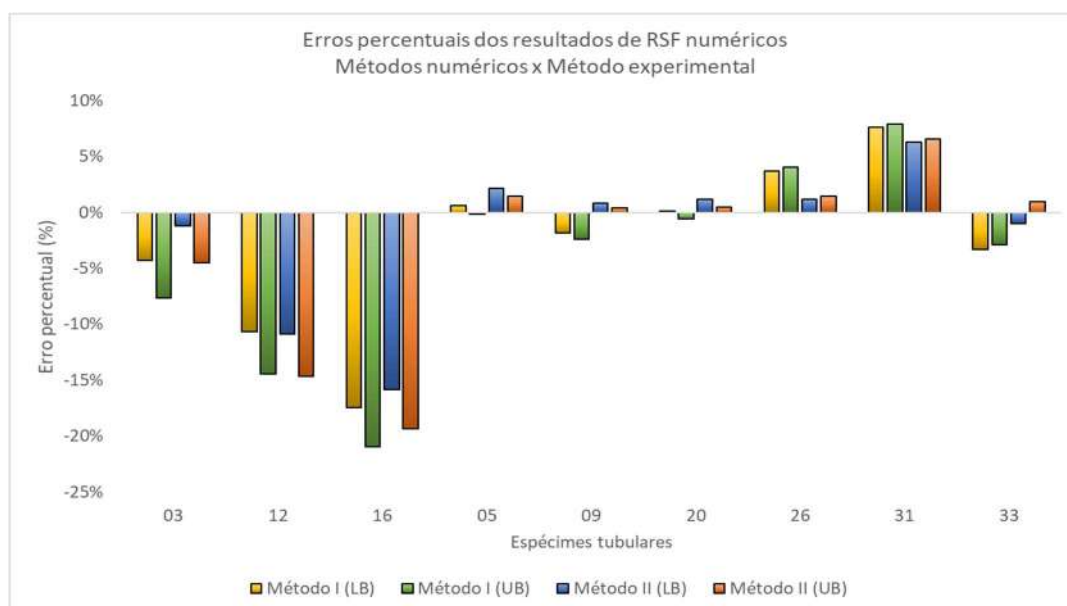


Figura 80 - Gráfico de erros percentuais entre os resultados numéricos e experimentais do RSF.

Os valores de pressão de ruptura influenciam, porém não replicam o padrão obtido para o valor de RSF, visto que este último é uma razão. Sendo assim, pode-se observar nas Figuras 79 e 80 que os resultados de RSF numérico, para ambos os métodos, mostraram um comportamento consideravelmente mais próximo dos dados reais, principalmente através do estudo LB.

A exceção fica por conta do reparo referente ao Fornecedor 1, o que pode ser explicado pelo menor desempenho mecânico deste material com 162 MPa de resistência à tração, a mais baixa entre os três. Neste caso, as rupturas numéricas ocorreram no duto sob o reparo e nos reparos (ET03, 12 e 16 respectivamente), sob pressões razoavelmente próximas às experimentais, porém com valores de RSF numérico bem mais destoantes e menores, o que pode ser explicado pelo local de ocorrência da falha (Tabela 30) ter se localizado no reparo ou no defeito, principalmente os espécimes de 55% e 70% de rebaixo. Não obstante, os valores de RSF para estes dois últimos casos foram os únicos menores que 0,9, sugerindo maior ineficiência deste material composto.

Pelo gráfico da Figura 79 e a Tabela 32, nota-se um padrão semelhante entre os resultados, como era de se esperar. O Método II aproximou levemente os resultados de RSF do ETs do Fornecedor 1 com os resultados experimentais.

Na prática, de acordo com a diferença percentual para com os resultados reais, o Método II aplicado para os ETs com reparo não se mostrou conclusivo, vide os

resultados da Tabela 31 mostrarem que houve certa melhoria na exatidão dos resultados para alguns espécimes e piora para outros. Todavia, ainda assim é interessante constatar que o Método II apresentou menores diferenças percentuais no geral, o que é coerente com a lógica da utilização da própria geometria do duto, porém desconsiderando defeitos.

Abaixo apresentam-se as Figuras 81 a 83 com os resultados obtidos no ANSYS® para os espécimes com 55% de perda de espessura: ET10 (sem reparo) e ET12 (com reparo). As figuras mostram o instante da ruptura e contemplam os resultados de tensão obtidos através dos métodos LB e UB:

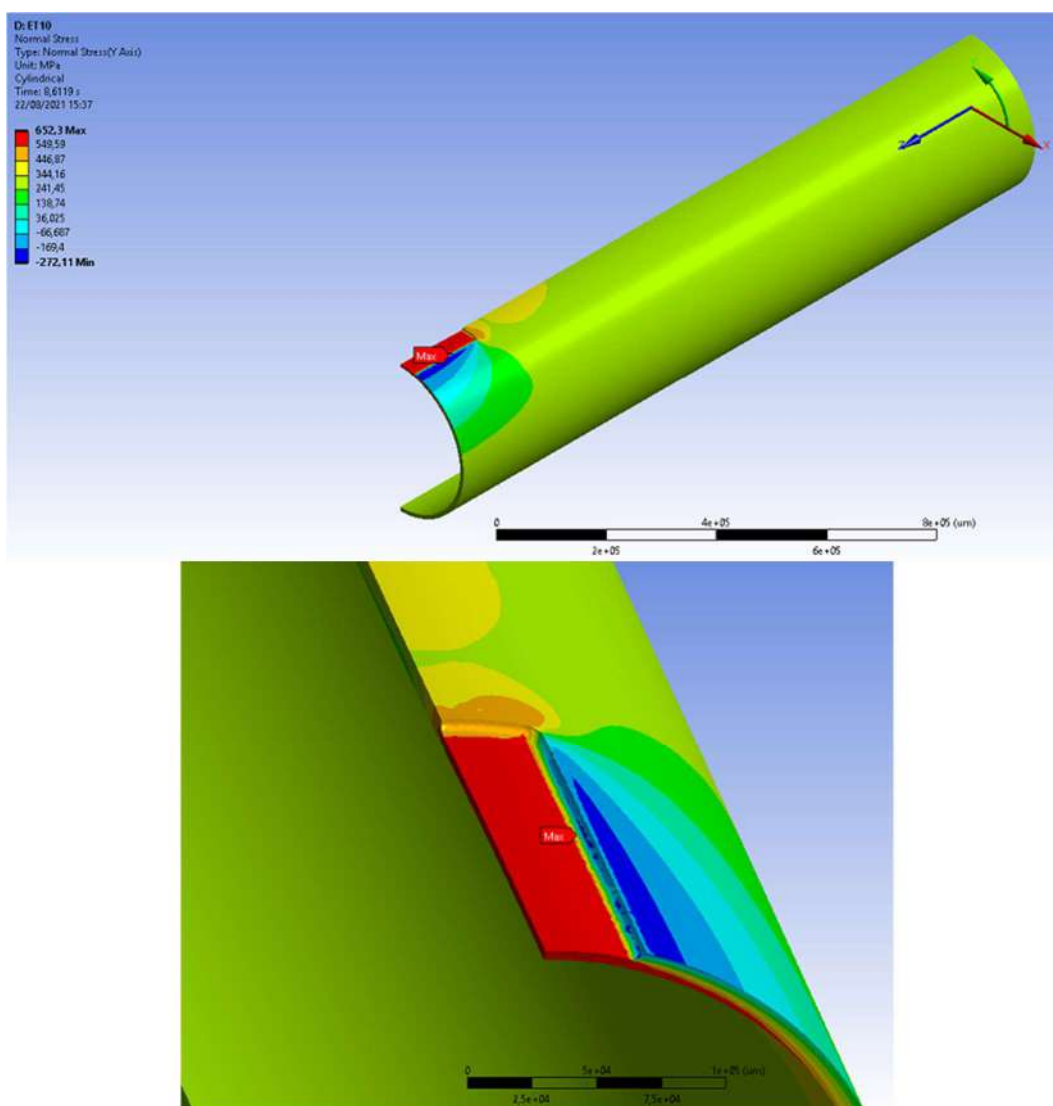


Figura 81 - ET10: vista geral do duto e em detalhe do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método LB.

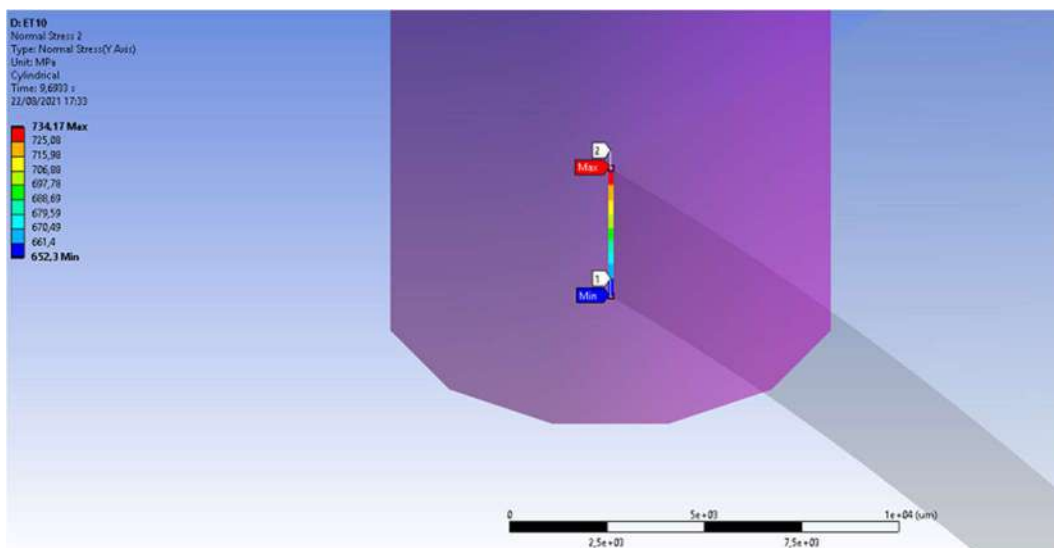


Figura 82 - ET10: vista em detalhe da espessura no centro do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método UB.

As imagens reforçam o conceito de que o rebaixo provoca uma concentração de tensão no duto e corresponde à zona mais crítica, vide a região avermelhada indicando maiores tensões. Em específico na Figura 82, pode-se observar o descrito na metodologia, sendo a linha que traça o caminho da espessura na região do rebaixo é avaliada para a tensão circunferencial, onde o ponto de mínima tensão (na superfície interna do duto) corresponde à tensão de ruptura 652,3 MPa e o resto dos pontos já ultrapassaram esse limite, indicando o colapso plástico na região.

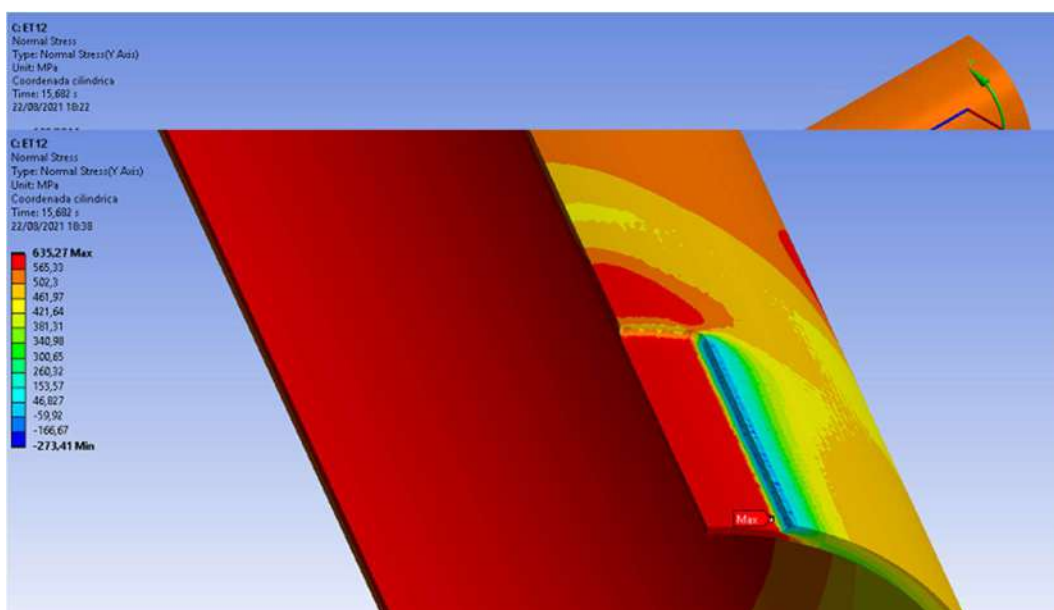
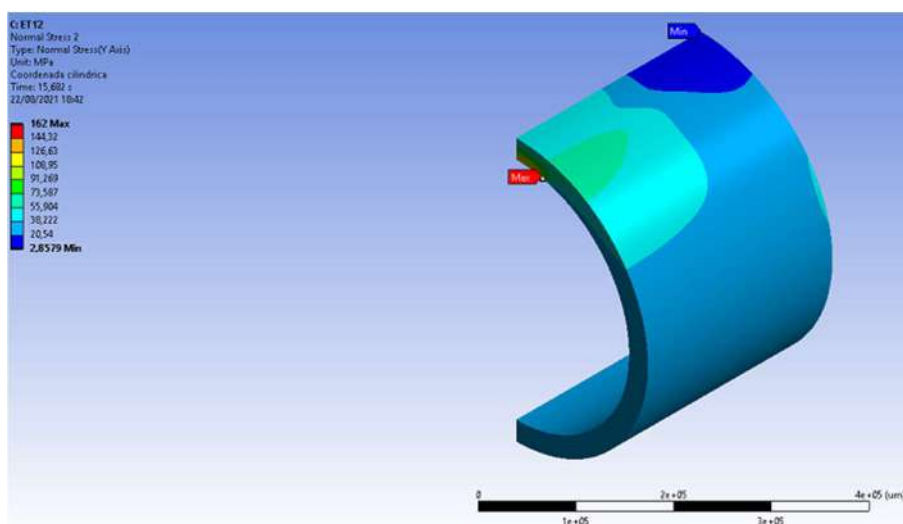


Figura 83 - ET12: vista geral do duto e em detalhe do defeito no instante de ruptura da análise numérica através do método LB.

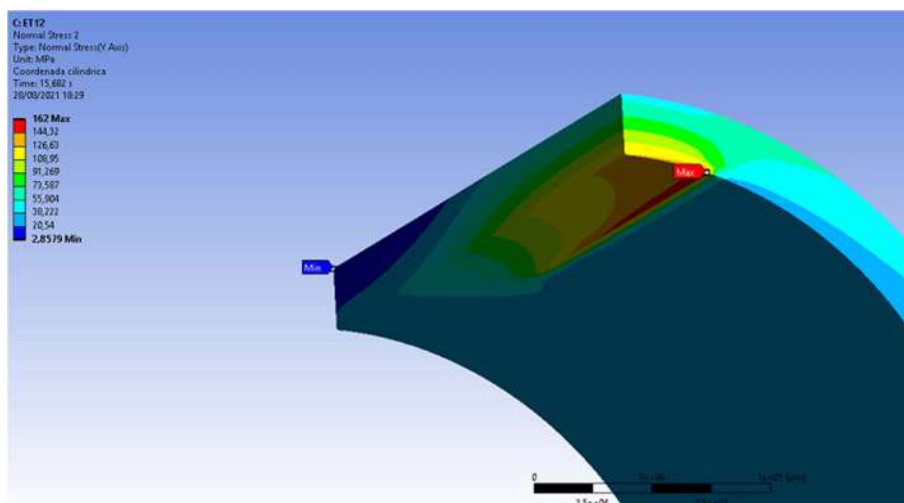
Como mencionado na Tabela 30, o ET12 sofreu rompimento no próprio reparo, que foi o limitante da análise. Neste caso, pode-se observar nas imagens que elevados valores de tensão obtidos tanto na região nominal do duto quanto na região do defeito, indicando menor proporção de divisão da carga pelo reparo no momento da ruptura. Além disso, percebe-se que a maior tensão encontrada no duto foi de 635,27 MPa, ou seja, 120,84% da tensão de escoamento do material e 97,39% da tensão de ruptura. Isto demonstra que a região crítica do defeito já havia escoado e estava próxima de sua ruptura quando o reparo veio a romper antes, o que provavelmente faria o duto romper em seguida no próprio defeito.

Ressalta-se que as tensões na região nominal se encontravam na faixa de 580 MPa, o que novamente constata a região crítica na zona do defeito e a baixa efetividade deste reparo no processo de divisão da carga suportada. Isso não foi observado nos espécimes reparados pelos outros fornecedores e pode ser observado nos resultados apresentados no Apêndice III.

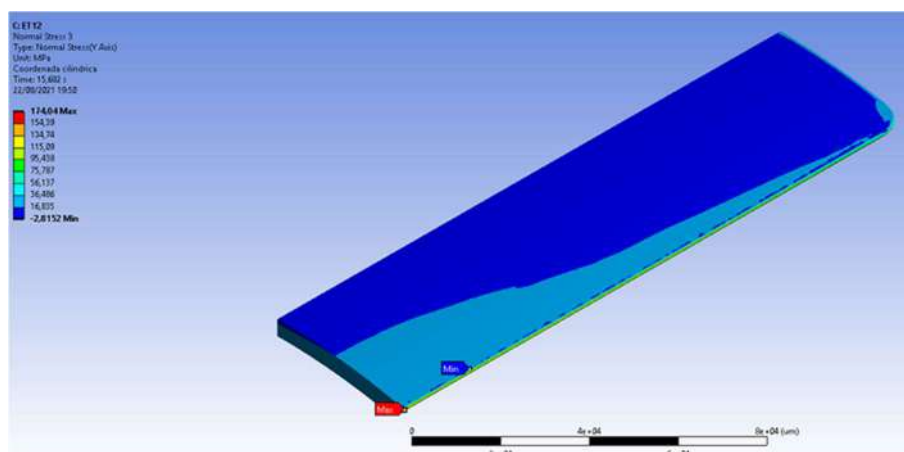
As imagens da Figura 84 mostram o comportamento resultante para o reparo e adesivo de enchimento no mesmo instante de ruptura:



a) Vista perfil do reparo



b) Vista em detalhe do reparo em sua região mais afetada



c) Vista perfil do adesivo de enchimento

Figura 84 - ET12: visão geral do reparo e adesivo de enchimento implementados no espécime, considerando o instante de ruptura da análise numérica.

As imagens a) e b) da Figura 84 esclarecem os resultados iguais de pressão de ruptura obtidos pelos métodos LB e UB para este espécime, devido à ocorrência do rompimento na região do próprio reparo ($S_{u, \text{reparo}} = 162 \text{ MPa}$) que não possui plasticidade, logo não havendo a possibilidade de colapso plástico nem de avaliação num instante numérico posterior.

Além disso, a imagem b) apresenta em detalhe a região de maior intensidade de tensões no instante da ruptura, a qual corresponde justamente à zona em

proximidade do defeito no duto, o que indica a maior exigência local do reparo no sustento da carga gerada e do escoamento na parede remanescente do duto.

Caso a ocorrência da tensão máxima no reparo fosse em outro local distante do rebaixo, isto poderia indicar seu melhor desempenho na divisão do carregamento imposto por retardar o escoamento no duto, assinalando, por exemplo, tensões maiores causadas pela expansão da região nominal do tubo (resistida pelo próprio reparo) ao longo do processo de pressurização.

Já a imagem c) ilustra o adesivo de enchimento utilizado para preencher o defeito e prover a continuidade geométrica necessária para a devida distribuição das tensões entre os componentes.

7.3.2.2. Deformações elásticas

Foram avaliados os valores de deformações totais na fase elástica e elastoplástica (instante da ruptura) em todos os espécimes com reparo. Neste caso, não só as deformações circunferencial e longitudinal no centro do rebaixo foram obtidas, como também as deformações da direção circunferencial das fibras ao longo da espessura do sistema, isto é, desde o diâmetro interno do tubo até o diâmetro externo do reparo.

Serão mostrados abaixo os resultados obtidos para o ET12, novamente de forma a avaliar como exemplo um espécime de profundidade de rebaixo média e retratar o padrão de valores. Os resultados para os outros espécimes podem ser vistos no Apêndice III.

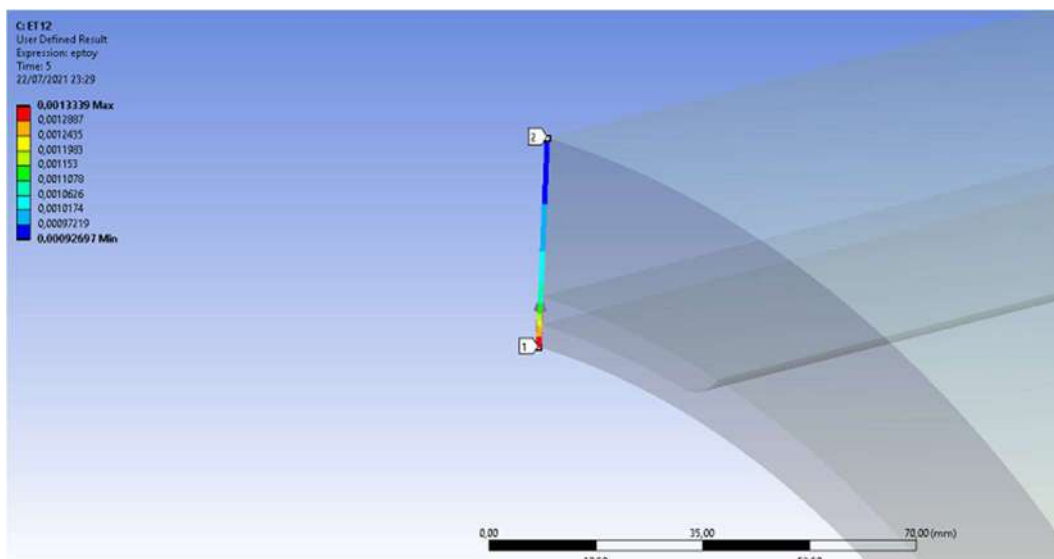


Figura 85 - Exemplo da avaliação da espessura do sistema duto/adesivo/reparo referente ao ET12, em detalhe para avaliação das deformações.

A Figura 85 mostra, conforme era de se esperar, que as deformações circunferenciais decrescem paulatinamente conforme o diâmetro aumenta, ou seja, a maior deformação deve ocorrer nos pontos mais internos ao diâmetro do tubo e a menor vai levemente decaindo ao longo do adesivo de enchimento, ainda mais quando passa para o reparo. Sendo este o padrão teórico, é de se esperar que os extensômetros 1, 2 e 3 (equivalente aos 3 pontos de medição na análise numérica) devem registrar deformações decrescentes na respectiva sequência. Este resultado pode ser confirmado através da Figura 86 abaixo, onde pode-se observar com clareza as deformações circunferenciais medidas no instante de 10 MPa (ainda na fase elástica) ao longo da espessura do sistema.

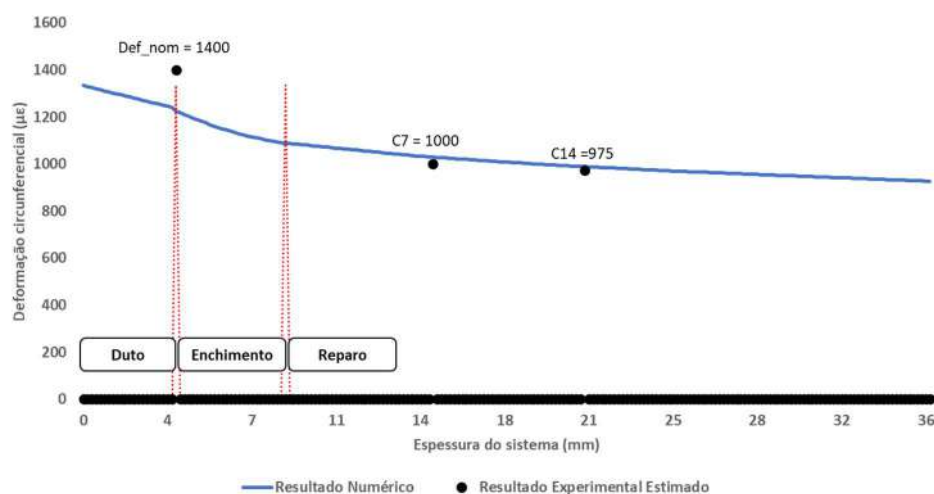


Figura 86 - Deformações circunferenciais elásticas ao longo da espessura do sistema duto/adesivo/reparo no ET12.

Através dos gráficos percebe-se pelos pontos pretos, os quais representam os resultados experimentais estimados de cada extensômetro aplicado no sistema, que os resultados numéricos coincidem em grande parte. Para o caso deste espécime (como em alguns outros também, conforme pode ser visto no Apêndice I), apenas três extensômetros puderam ser avaliados porque o outro faltante (que corresponderia ao que foi aplicado na camada 2 de reparo) sofreu danos durante a pressurização em ciclagem. O primeiro ponto preto na imagem, de 1400 $\mu\epsilon$, equivale ao extensômetro circunferencial instalado no centro do defeito. O segundo e o terceiro da imagem representam os extensômetros circunferenciais instalados nas camadas 7 e 14 de reparo aplicados.

Os resultados experimentais da imagem 82 referente à etapa elástica foram retirados de estimativas gráficas para o instante de 10 MPa dos resultados experimentais apresentados no Apêndice I. Estes gráficos correspondem aos ciclos de pressão aplicados nos espécimes antes do teste de ruptura.

7.3.2.3. Deformações elasto-plásticas

Figura 87 é apresentado o resultado para as deformações obtidas no instante de ruptura:

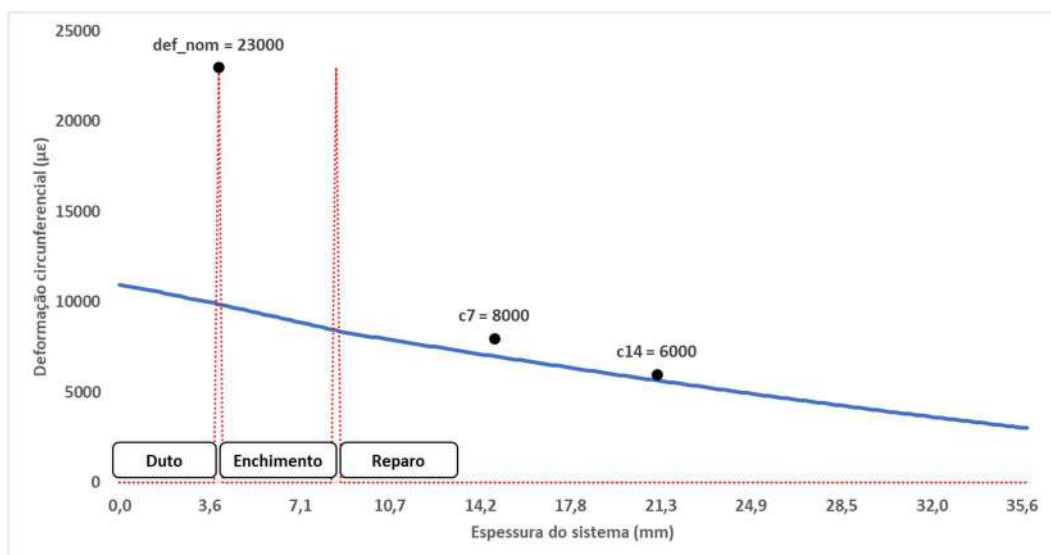


Figura 87 - Deformações circunferenciais totais ao longo da espessura do sistema duto/enchimento/reparo no ET12 no instante da ruptura.

A comparação com o experimental pode ser feita através da Figura 55, onde observa-se uma elevada deformação circunferencial no centro do defeito de cerca de 23000 $\mu\epsilon$, mais elevada que a obtida experimentalmente pelo *strain gage* que parou de fazer medições devido à sua limitação de medição de deformação. Mesmo que a Tabela 21 e o gráfico da Figura 55 indiquem a deformação máxima da ordem de 30000 $\mu\epsilon$, é preciso ainda reajustar o valor absoluto medido pois sua curva não se origina do zero, vide os 10 ciclos de pressão implementados anteriormente. As deformações experimentais de c7 e c14 apresentaram resultados mais próximos, com respectivamente 8000 $\mu\epsilon$ e 6000 $\mu\epsilon$, estimados graficamente. Como neste caso a ruptura numérica ocorreu no reparo, denota-se uma deformação máxima necessariamente menor ou igual à 8000 $\mu\epsilon$.

Os resultados para os outros espécimes podem ser vistos nos Apêndice III.

7.3.3.Comparações entre métodos

7.3.3.1.Dutos sem reparo

Nesta seção serão apresentados graficamente os resultados obtidos para o método experimental, analítico e numérico, baseado nos valores mais exatos atingidos individualmente por cada metodologia abordada conforme aproximação com as condições reais.

Para os dutos sem defeito, conforme pode-se observar na Figura 88, são considerados o método analítico através da fórmula de Barlow ($S_u = \frac{PD}{2t}$) e o método numérico Lower Bond:

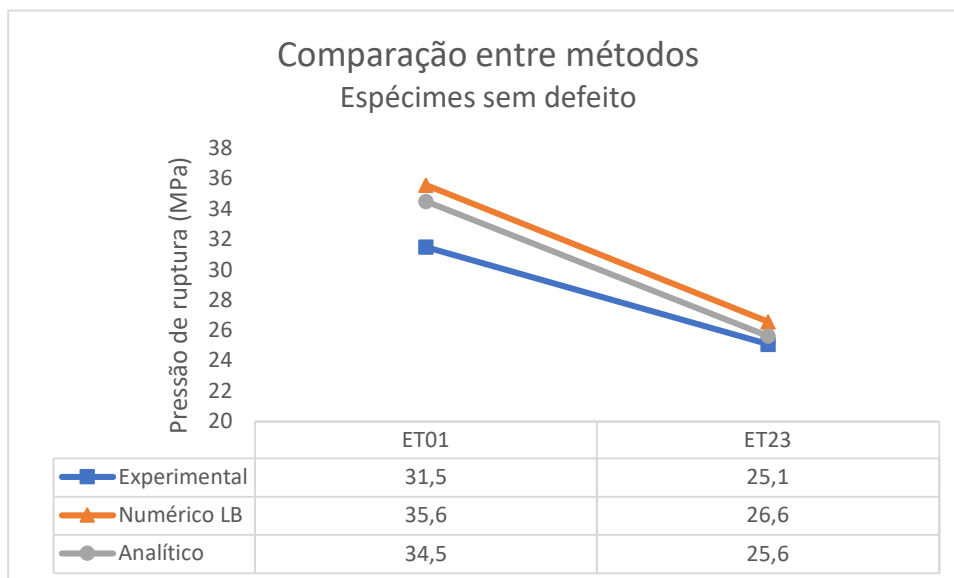
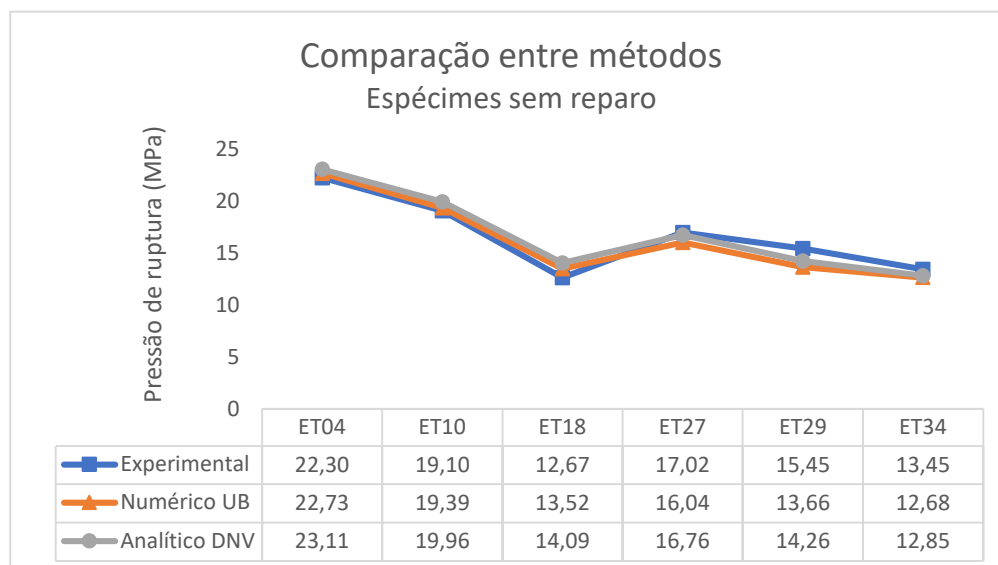


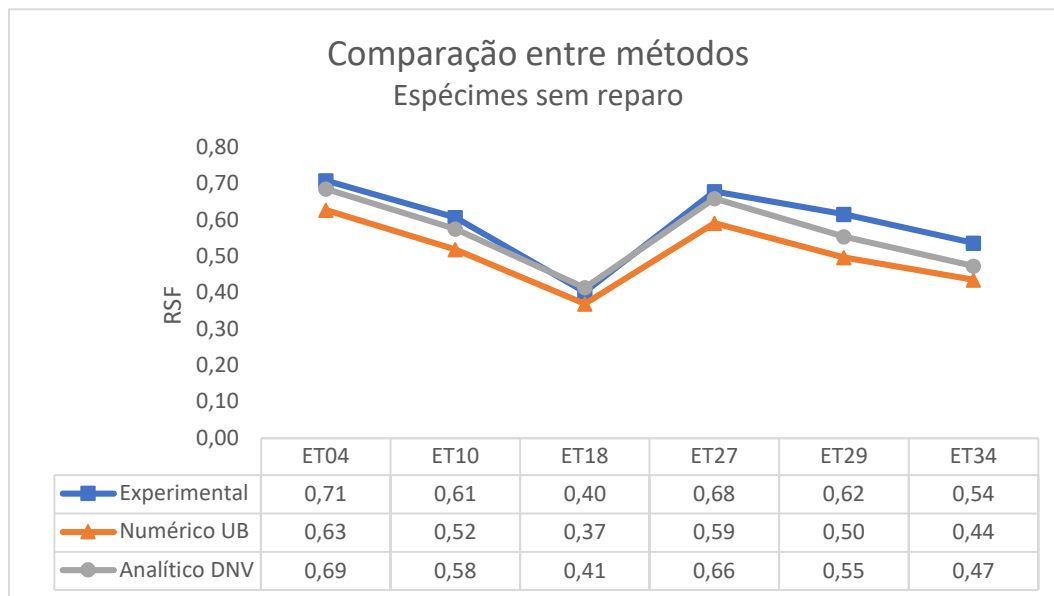
Figura 88 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura dos espécimes sem defeito.

Conforme a Figura 88, a comparação entre métodos demonstrou bastante proximidade entres os resultados, indicando boa aplicabilidade para a previsão da ruptura em dutos sem defeito, ainda que para o ET01 de aço X65 tenha apresentado pressão real de ruptura ligeiramente menor que os métodos analítico e numérico.

Para os dutos com defeito, conforme pode-se observar na Figura 89, são considerados o método analítico da DNV-RP-F101 e o método numérico Upper Bond (Método II), os quais apresentaram maior grau de exatidão à situação experimental dentre as alternativas mostradas:



a) Resultados de pressão de ruptura

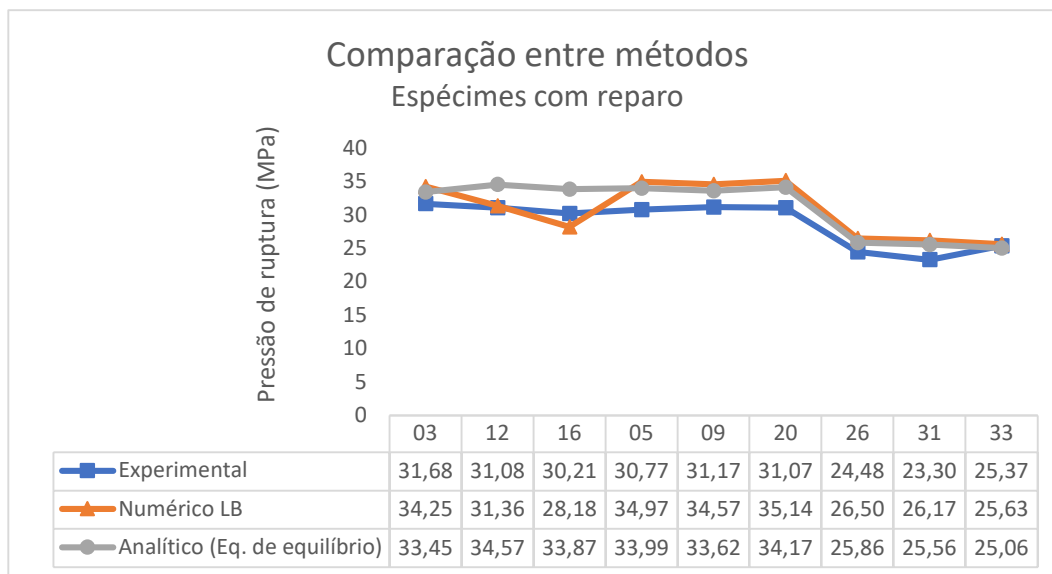


b) Resultados de RSF

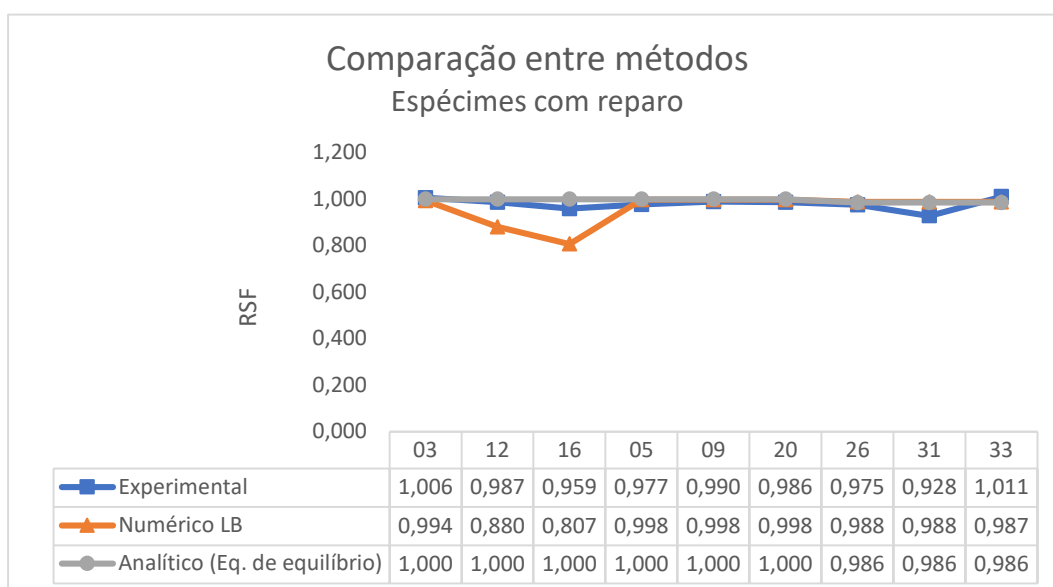
Figura 89 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura e RSF dos espécimes sem reparo.

Os gráficos indicam exatidão satisfatória e coerência nos resultados, os quais seguem o mesmo padrão apresentado na situação real dos experimentos dos testes de pressão em campo. A previsão das pressões de ruptura demonstra resultados mais aproximados do que a previsão do RSF, entretanto, ainda aplicabilidade satisfatória de utilização dos métodos em prever uma ruptura real.

Para os dutos com reparo, conforme pode-se observar na Figura 90, são considerados o método analítico da equação de equilíbrio e o método numérico do Lower Bond (Método II), os quais apresentaram, para este caso, o menor grau de variabilidade com relação ao experimental, dentre as alternativas mostradas.



a) Resultados de pressão de ruptura



b) Resultados de RSF

Figura 90 - Comparação entre métodos experimental, analítico e numérico para os resultados de pressão de ruptura e RSF dos espécimes com reparo.

Neste caso em específico, nota-se novamente um padrão assertivo de previsão à ruptura na maioria dos espécimes, seguindo-se um padrão de resultados similar entre os métodos considerados. Todavia, o caso peculiar dos resultados numéricos do ET12 e ET16, reparados pelo Fornecedor 1, onde eles apresentaram valores menores do que o esperado de acordo com os padrões verificados. Isto se deve ao fato de que estes dois resultados numéricos terem indicado a ocorrência do rompimento no reparo e o tempo final de análise ter sido fixado neste mesmo

instante, de acordo com menor tensão máxima de resistência do compósito aplicado por este fornecedor.

Por outro lado, o método analítico avaliado também demonstrou resultados coerentes com o padrão estabelecido experimentalmente, porém ligeiramente maiores. Isto sugere, possivelmente, que através da equação de equilíbrio pode-se estimar conservadoramente a pressão de ruptura do duto reparado, além da vantagem já explicada de facilitar o estudo das etapas de pressurização para os componentes.

Mesmo prevalecendo-se do propósito de estimar as condições de rupturas de tubos com defeito e com reparo, é válido ressaltar que as comparações foram realizadas com as simplificações apresentadas no capítulo de metodologia, onde as condições experimentais podem apresentar variabilidades com relação a geometrias, propriedades mecânicas e até defeitos de fabricação e de materiais, mesmo que padrões de avaliação equivalentes sejam adotados, como foi o caso.

O presente trabalho propôs a avaliação de sistemas de reparo, desconsiderando efeitos de tempo, para dutos com defeitos de corrosão externa utilizando três diferentes materiais compósitos. A avaliação foi realizada através de equações semi-empíricas advindas de normas e do equilíbrio de forças e de simulações numéricas utilizando o software de elementos finitos chamado ANSYS®. Estes métodos visavam estimar analiticamente e numericamente as pressões de ruptura e fatores de resistência remanescente dos espécimes tubulares testados experimentalmente até a ruptura,

Conforme os resultados apresentados, pôde-se constatar que a equação da DNV-RP-F101, utilizada para a estimativa da pressão de ruptura e do RSF do duto com defeito e sem reparo, representa a melhor alternativa dentre os métodos de avaliação de defeitos avaliados.

O método de elementos finitos aplicado para os dutos sem reparo, conforme as simplificações e modelagens consideradas, resultou numa metodologia coerente para a previsão das condições reais de ruptura dos espécimes.

No geral, com relação especificamente às estimativas da pressão de ruptura em cada espécime reparado, o método analítico da equação de equilíbrio pôde prover os melhores resultados e ainda conceder uma melhor interpretação das etapas do processo de pressurização e das divisões de carga entre os componentes. Os resultados previstos por este método mostraram mais exatos quando comparados aos resultados experimentais, embora em alguns casos apresentando pressões de ruptura levemente superiores às alcançadas nos testes.

A utilização das equações das normas ISO 24817 e ASME PCC-2 podem proporcionar uma estimativa coerente, porém com menos assertividade. Ambos os métodos não proporcionaram um padrão nítido nos resultados, por vezes sendo conservadores e outras vezes não sendo conservadores, embora com diferenças relativamente pequenas aos resultados experimentais. Sugere-se para trabalhos futuros a ampliação do número de amostras para a investigação apropriada do uso

dos métodos normativos para a situação de ruptura dos dutos reparados. O método ISO que levou em consideração a deformação admissível igual à 0,3% no reparo e uma tensão admissível no substrato igual à resistência à tração (equação 23) forneceu melhores resultados que o método ISO que usa a tensão admissível no duto igual à sua resistência à tração (equação 24).

Com relação às estimativas do projeto dos reparos para cada fornecedor, a partir das equações de normas apresentadas e da equação de equilíbrio, pôde-se verificar que a abordagem da deformação admissível no reparo e a equação de equilíbrio prevaleceram na obtenção de resultados de espessura similares às aplicadas experimentalmente para os ETs do Fornecedor 1 e 2, e com coerência entre si, seguindo padrões semelhantes. Para o Fornecedor 3, verificou-se que ambos estes métodos promoveriam espessuras de reparos menores do que o aplicado, sugerindo que a abordagem da norma através da tensão admissível no substrato usada pelos 3 fornecedores apresentou mais conservadorismo.

Puderam-se obter resultados numéricos coerentes e satisfatórios para a previsão da condição de ruptura dos espécimes com reparo instalado, tanto nas estimativas da pressão de ruptura e RSF quanto dos valores de deformação. Os desvios percentuais entre os resultados numéricos com os resultados reais dos experimentos em campo raramente ultrapassaram 20%, onde nesse caso o método Upper Bond prevaleceu com melhores estimativas. No geral, para a estimativa do RSF em específico, deve-se utilizar os mesmos dados geométricos dos tubos com defeito e sem defeito (Método II da análise numérica).

Para trabalhos futuros, pode-se recomendar o aprimoramento na modelagem do problema no software de elementos finitos com a implementação da curva tensão-deformação multilinear para o material do duto em busca de avaliar possíveis melhorias em termos de exatidão dos resultados durante toda a etapa plástica, bem como a condição de “travamento automático” da análise conforme atingimento da ruptura do sistema.

Outra sugestão, tanto para a abordagem analítica quanto numérica, seria o entendimento mais aprofundado dos dados geométricos do sistema duto/reparo/adeseivo de enchimento, e não apenas a consideração dos valores médios, tal como o emprego da dimensão mínima medida para a espessura remanescente no defeito ou o mapeamento e modelagem real da dimensão.

Portanto, conclui-se que o trabalho e as resoluções obtidas possuem uma correlação coerente entre os padrões de resultados analíticos e numéricos com os experimentais, com diferentes graus de exatidão aplicados nas variáveis envolvidas no problema. O emprego de materiais compósitos para reparação de dutos com defeitos superficiais externo pode restaurar devidamente a integridade do duto original, apresentando convergência satisfatória em análises analíticas, numéricas e experimentais.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Recommended Practice 579, Fitness For Service**. API. [S.l.]. 2000.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER. **ASME Code Section VIII**. Division 1. [S.l.]. 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, A supplement to ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping**. New York. 1991.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.4: Pipeline Transportation System For Liquids Hydrocarbons And Other Liquids**. [S.l.]. 1998.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.B Manual For Determining The Remaining Strength Of Corroded Pipelines**. [S.l.]. 2012.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Gas Transmission and Distribution Piping Systems ASME Code for Pressure Piping, B31.8**. New York. 2018.

ASME PCC-2. **Repair of Pressure Equipment and Piping**. New York. 2015.

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS. Department of Applied Mechanics. **SOLID186 Element Description**. Disponível em: <<https://bit.ly/2WCyhfN>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS. Department of Applied Mechanics. **SOLID187 Element Description**. Disponível em: <<https://bit.ly/2V1tB2A>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS.
Department of Applied Mechanics. **TARGE170 Element Description**. Disponível em: <<https://bit.ly/38wuWS6>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS.
Department of Applied Mechanics. **CONTA174 Element Description**. Disponível em: <<https://bit.ly/38uK1ne>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

CASTELLANOS, J. S. **Análise de componentes de dutos com perdas de espessura e reparos com materiais compósitos**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio). Rio de Janeiro. 2014.

CBIE. Quantos quilômetros de dutos temos no Brasil hoje?, 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3yCvgt3>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

COSTA, L. D. B. **Avaliação do Envelhecimento de Reparos Estruturais Constituídos de Materiais Compostos**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio). Rio de Janeiro. 2010.

D'ALMEIDA, A. L. F. et al. **COMPOSITE REPAIRS TO RESTORE THE STRUCTURAL INTEGRITY OF TUBES WITH EXTERNAL CORROSION**. 5th Conference on Composite Materials - BCCM 5. São Carlos: [s.n.]. 2020. p. 6.

DET NORSKE VERITAS. **Recommended Practice DNV-RP-F101 Corroded**. [S.l.]. 2010.

DINIZ, L. C. J. **Resistência de Dutos com Defeitos Usinados**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio). Rio de Janeiro, p. 116. 2002.

DOT. **U.S. Department of Transportation**, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3kGLvk3>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

FREIRE, J. L. D. F. **Notas de aula, Integridade de dutos**. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2018.

FREIRE, J. L. D. F. et al. **Effectiveness of Composite Repairs Applied to Damaged Pipelines**". Experimental Techniques. [S.l.], p. 59 - 66. 2007.

FREIRE, J. L. D. F. et al. **Engenharia de Dutos**. Rio de Janeiro: ABCM, 2009. 528 p.

FREIRE, J. L. D. F. et al. **Use of FBG Strain Gages on a Pipeline Specimen Repaired with a CFRE Composite**. Rio de Janeiro, p. 10. 2012.

FREIRE, J. L. D. F. et al. **Relatório de Projeto: Avaliação da Eficiência de Longa Duração de Reparos de Material Composto em Espécimes Tubulares com Perda de Espessura por Corrosão**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 110. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24817:2015 - Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Composite repairs for pipework — Qualification and design, installation, testing and inspection**. [S.l.]. 2015.

J.M. DUELL, J. M. W. M. R. K. **Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system**. International Journal of Pressure Vessels and Piping. [S.l.], p. Pages 782-788. 2008.

JOHN STEVEN, C. et al. Reparos com materiais compósitos de conexões de dutos com defeitos tipo perda metálica. **CONAEND&IEV2014 – 091, XXXII – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 18a IEV – Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales**, 2014.

LIM, K. S. et al. **Behaviour of steel pipelines with composite repairs analysed using experimental and numerical approaches**. [S.l.], p. Pages 321-333. 2019.

LOUREIRO, S. M. N. A. **APLICAÇÃO DE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA PREVISÃO DE REPAROS DE DUTOS COM MATERIAL COMPÓSITO**. Dissertação de Doutorado (UFRJ). Rio de Janeiro, p. 183. 2005.

MENICONI, L. C. M. et al. Análise do desempenho de sistemas de reparo de dutos por materiais compostos. **Revista Abende**, p. 35-39, Março 2005.

ÖZGÜN. Ansys Contact Types and Explanations, 2021. Disponível em: <<https://www.mechhead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

PAIVA, E. L. V. **Simulação de tensões residuais de soldagem e seu alívio por teste hidrostático**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio). Rio de Janeiro, p. 275. 2015.

PEREIRA, A. **Projeto ótimo de pórticos planos jeto ótimo de pórticos planos**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio). Rio de Janeiro. 2002.

ROSAS, M. A. P. **Avaliação de Modelos do Comportamento de Reparos do Tipo Luva em Dutos com Defeitos de Perda de Espessura**. Dissertação de Doutorado (Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio). Rio de Janeiro, p. 196. 2010.

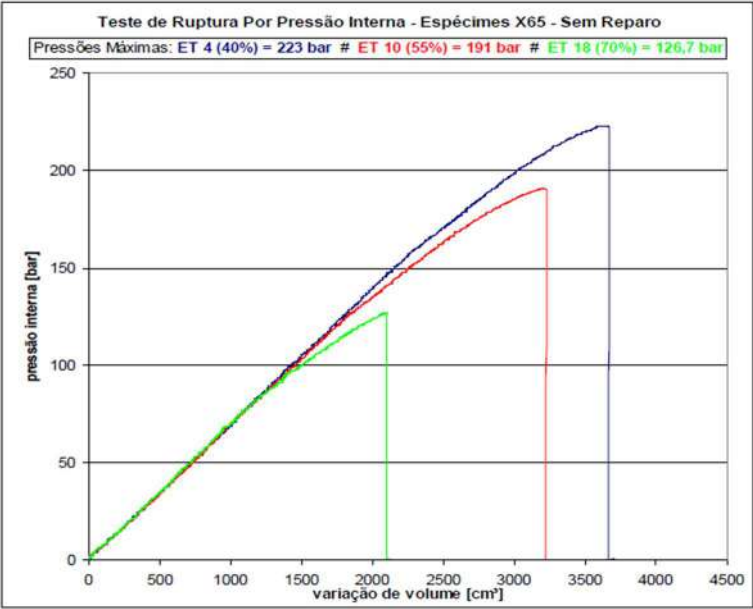
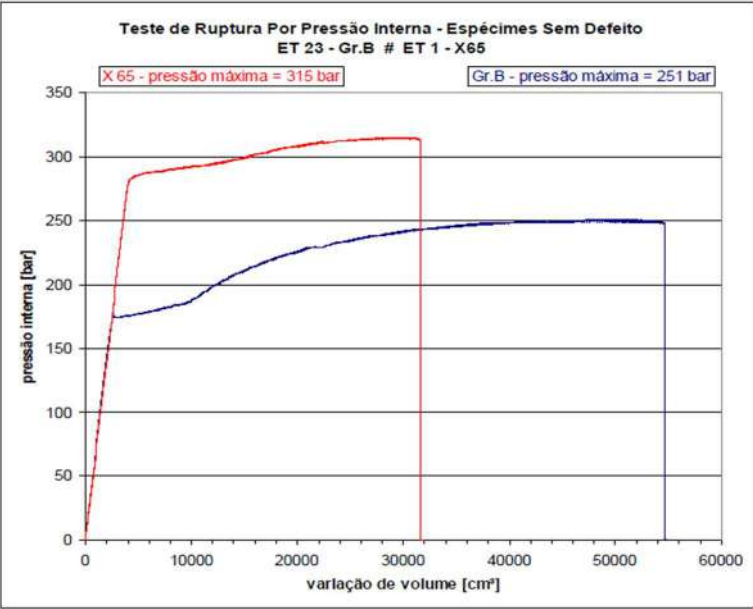
SAEED, N.; RONAGH, H.; VIRK, A. **Composite repair of pipelines, considering the effect of live pressure-analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2**. Composites Part B: Engineering. [S.l.], p. Pages 605-610. 2013.

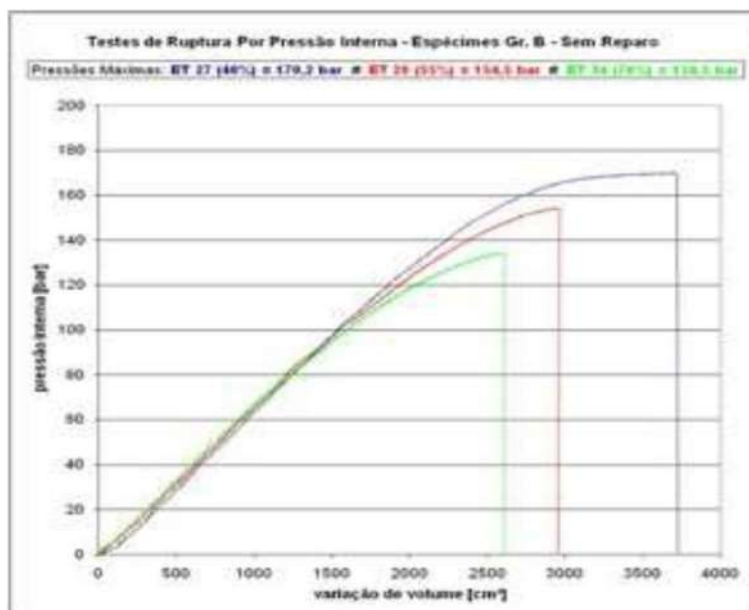
VIEIRA, R.. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REPAROS EM ESPÉCIMES TUBULARES RETOS COM PERDA DE ESPESSURA POR CORROSÃO**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 20. 2014.

YOOSEF-GHODSI, N.; ZHOU, J.; MURRAY, D. W. **A SIMPLIFIED MODEL FOR EVALUATING STRAIN DEMAND IN A PIPELINE SUBJECTED TO LONGITUDINAL GROUND MOVEMENT**. 7th International Pipeline Conference. Alberta, Canada: [s.n.]. 2008. p. 8.

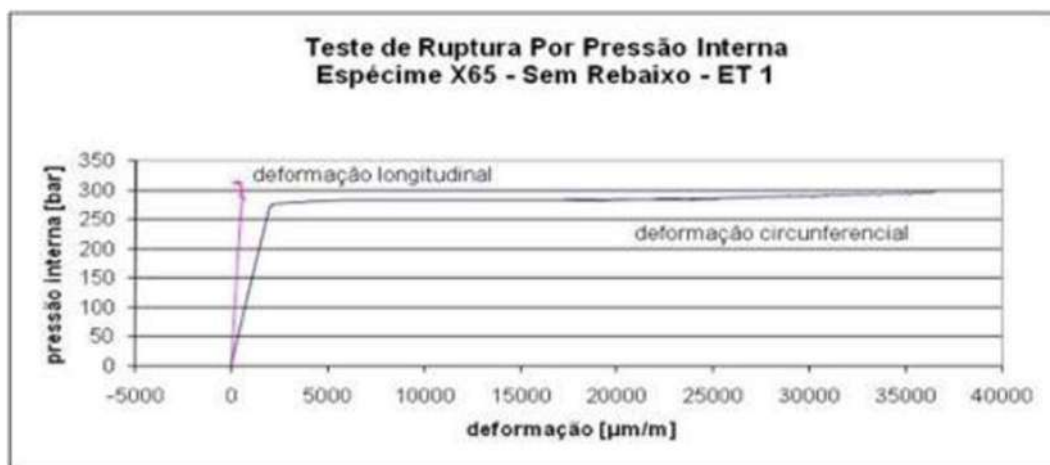
Apêndice I – Resultados Experimentais

As três figuras abaixo mostram os resultados dos ensaios de ruptura nos tubos com rebaixo em termos da pressão interna e do volume de água injetado nos tubos X65 e Gr. B íntegros e com rebaixos.

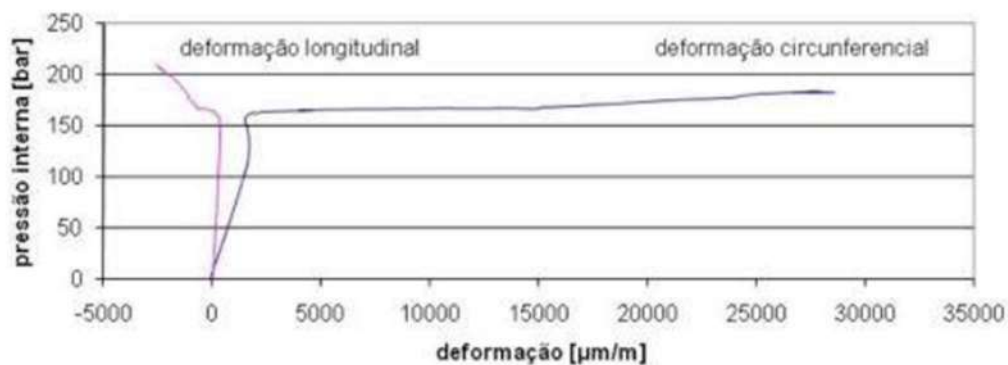




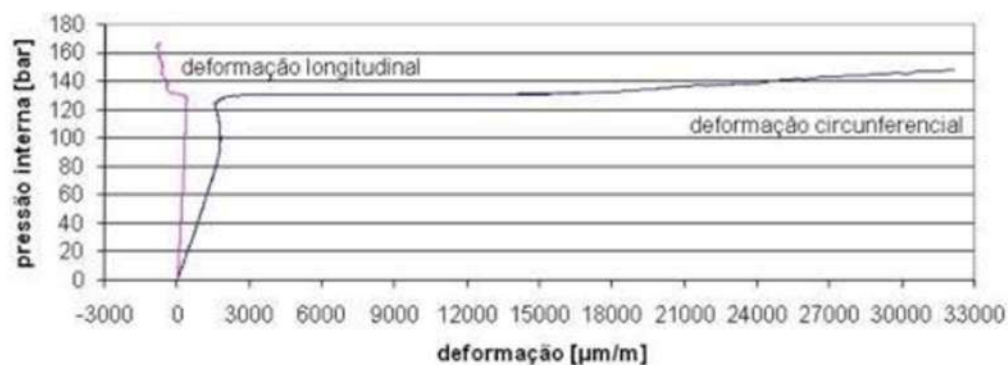
As deformações obtidas por extensometria óptica em função da pressão interna aplicada nos tubos X65 e Gr. B com rebaiços e íntegros podem ser vistas a seguir. As deformações são obtidas até o descolamento ou quebra dos extensômetros ópticos, o que em todos os casos ocorreu antes das rupturas dos espécimes.



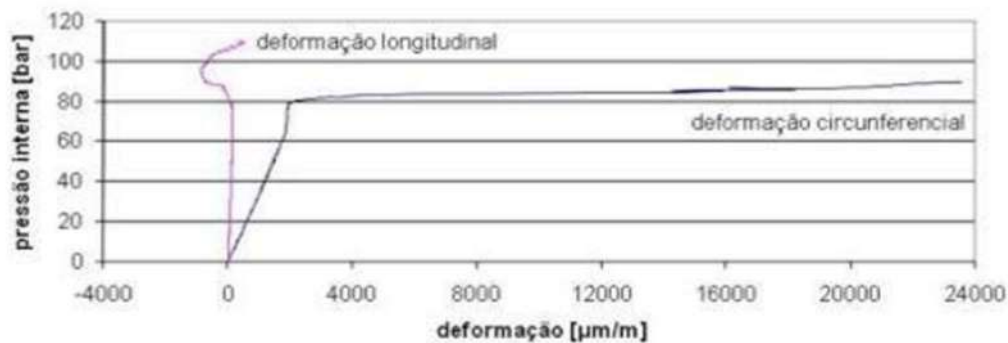
Teste de Ruptura Por Pressão Interna Espécime X65 - 40% - ET 4

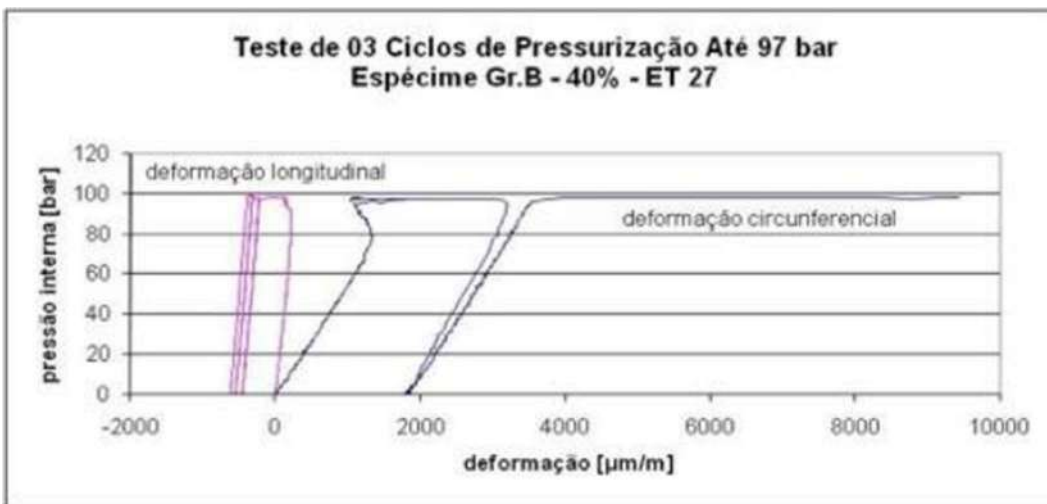
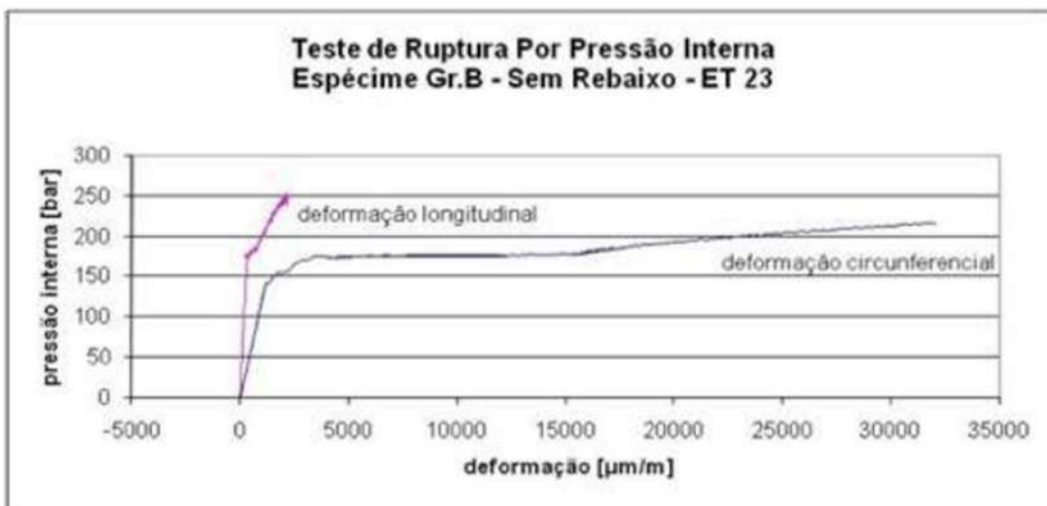


Teste de Ruptura Por Pressão Interna Espécime X65 - 55% - ET 10

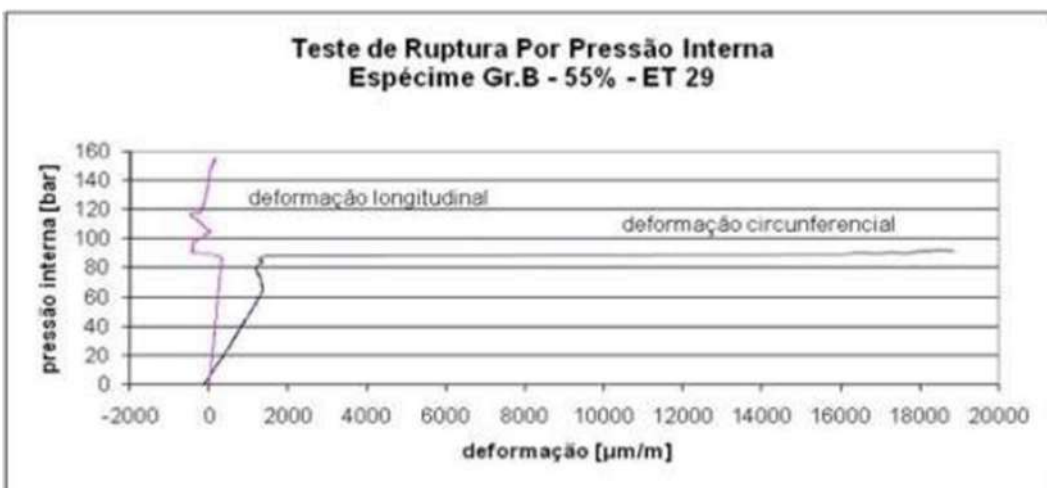


Teste de Ruptura Por Pressão Interna Espécime X65 - 70% - ET 18

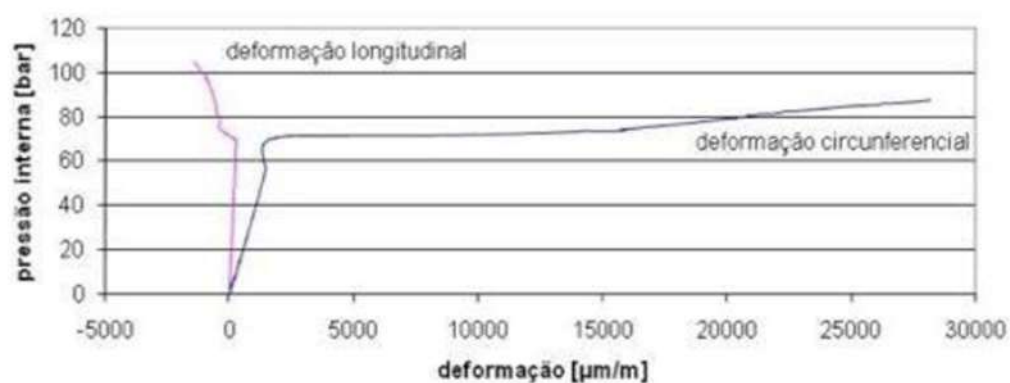




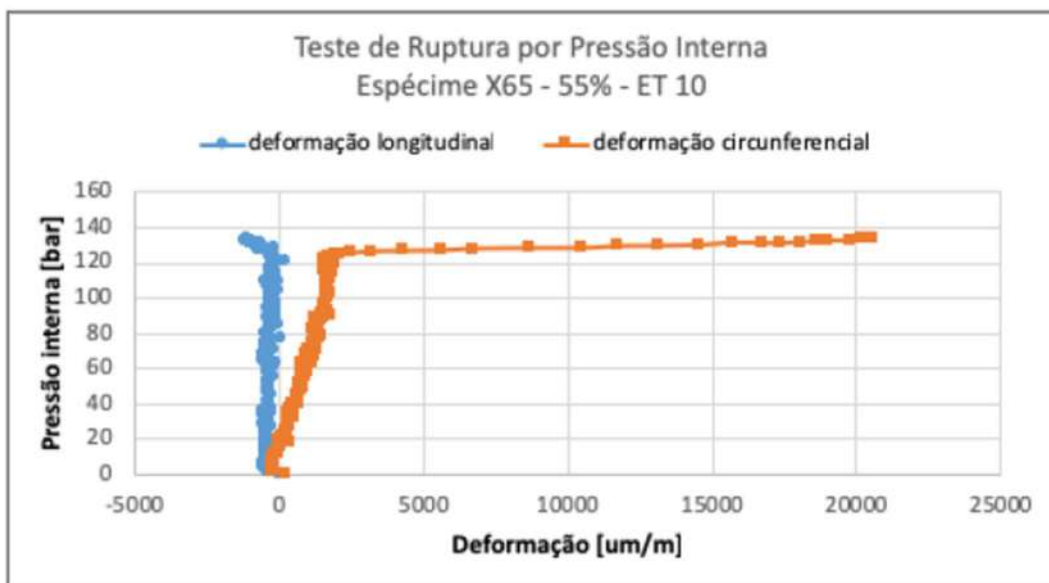
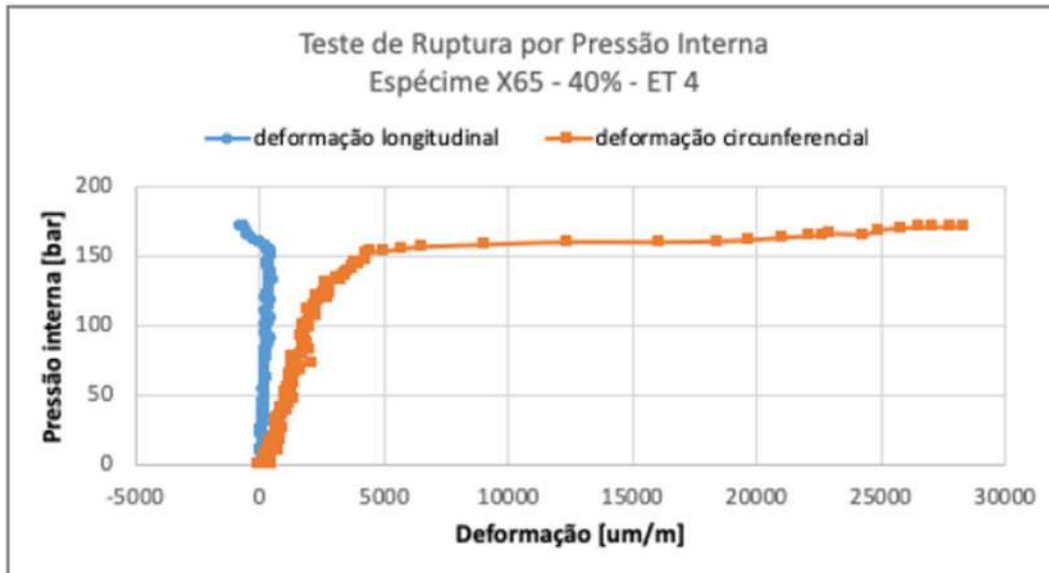
O diagrama acima, referente ao teste de ruptura do espécime ET 27, mostra as deformações medidas no ET 27 através da medição por correlação de imagem digital durante os três ciclos de pressurização até 97 bar, visto que os sinais de deformação por extensometria óptica foram corrompidos.

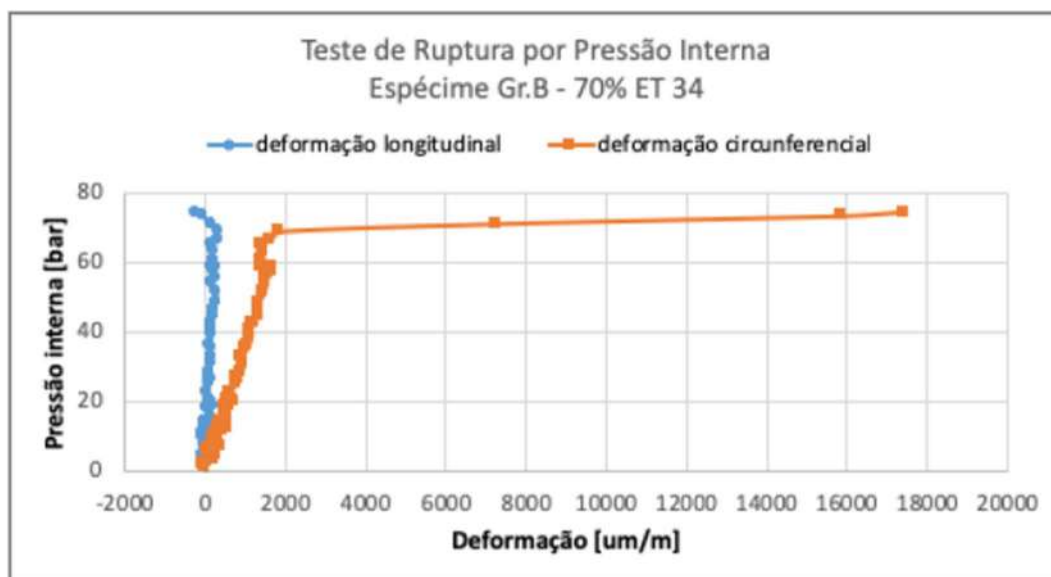
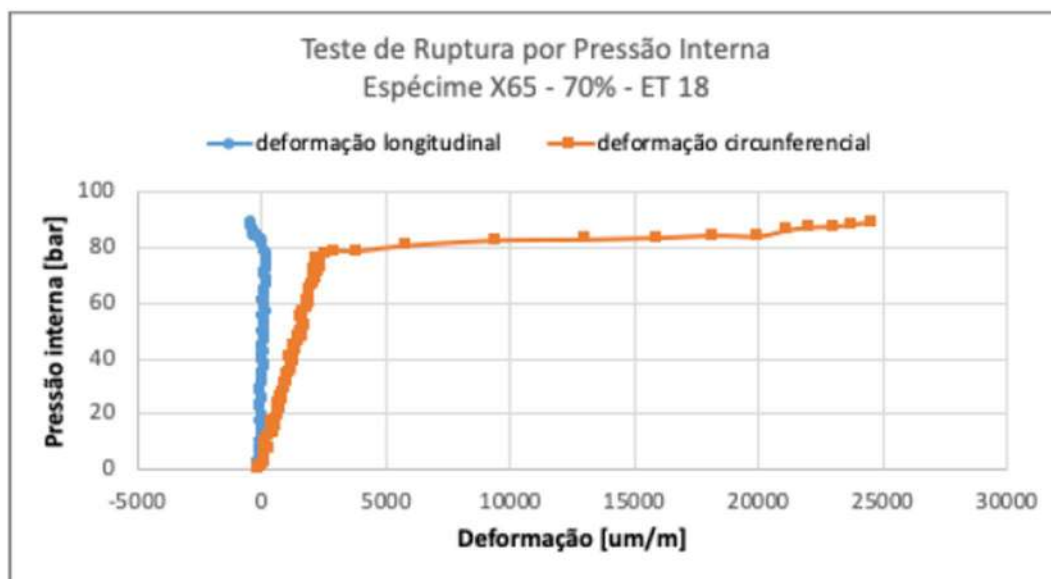


Teste de Ruptura Por Pressão Interna
Espécime Gr.B - 70% - ET 34



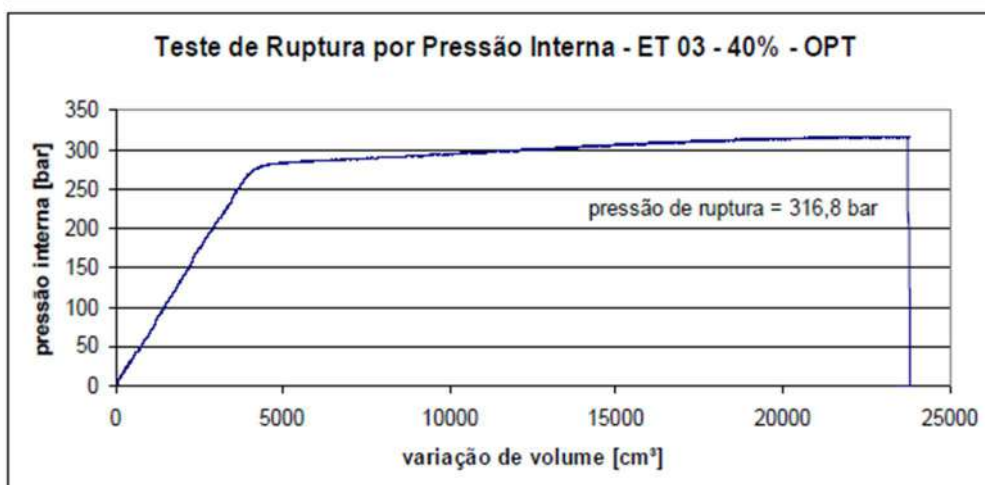
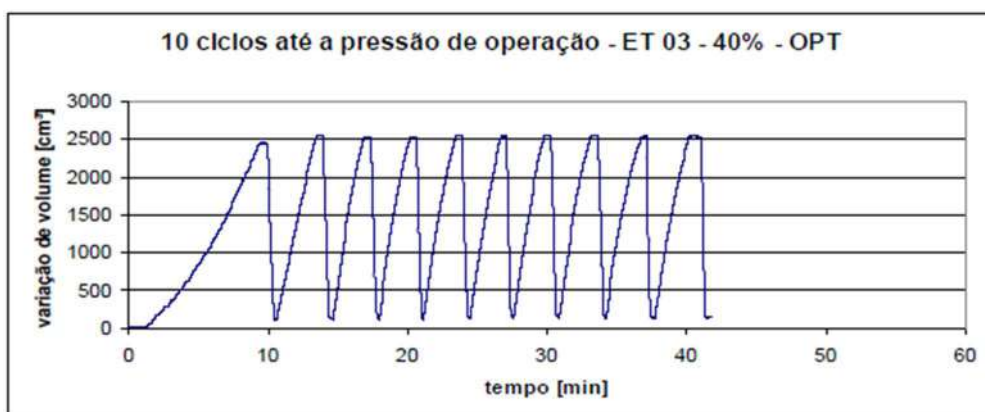
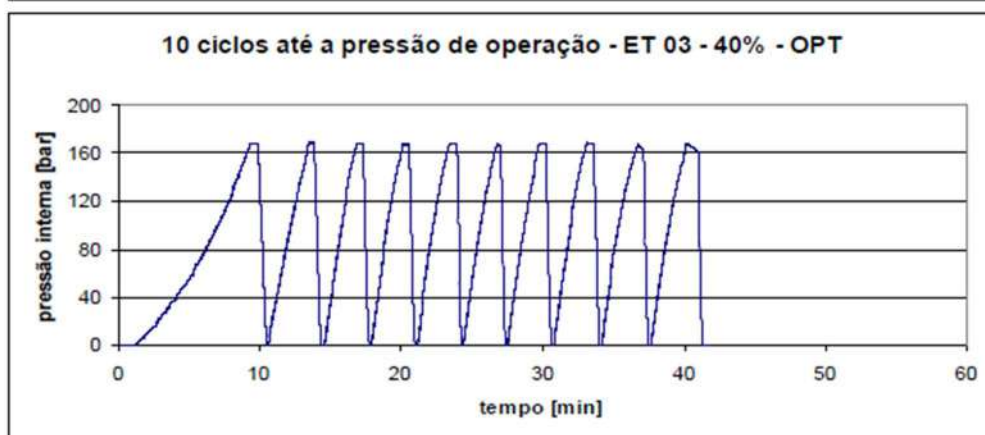
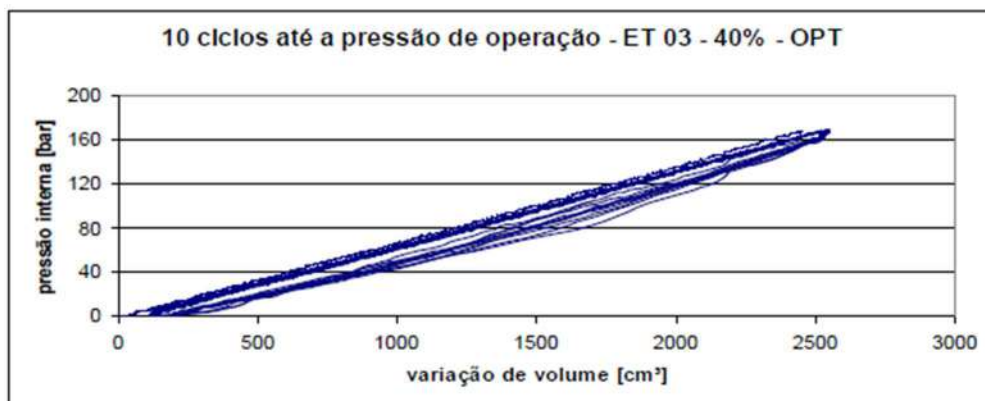
As deformações longitudinal e circunferencial determinadas por correlação de imagem digital (DIC) em função da pressão interna aplicada foram determinadas para os ETs 4, 10 e 18 dos tubos X65 e ET 34 dos tubos Gr. B. Os resultados são mostrados nas quatro figuras apresentadas a seguir.

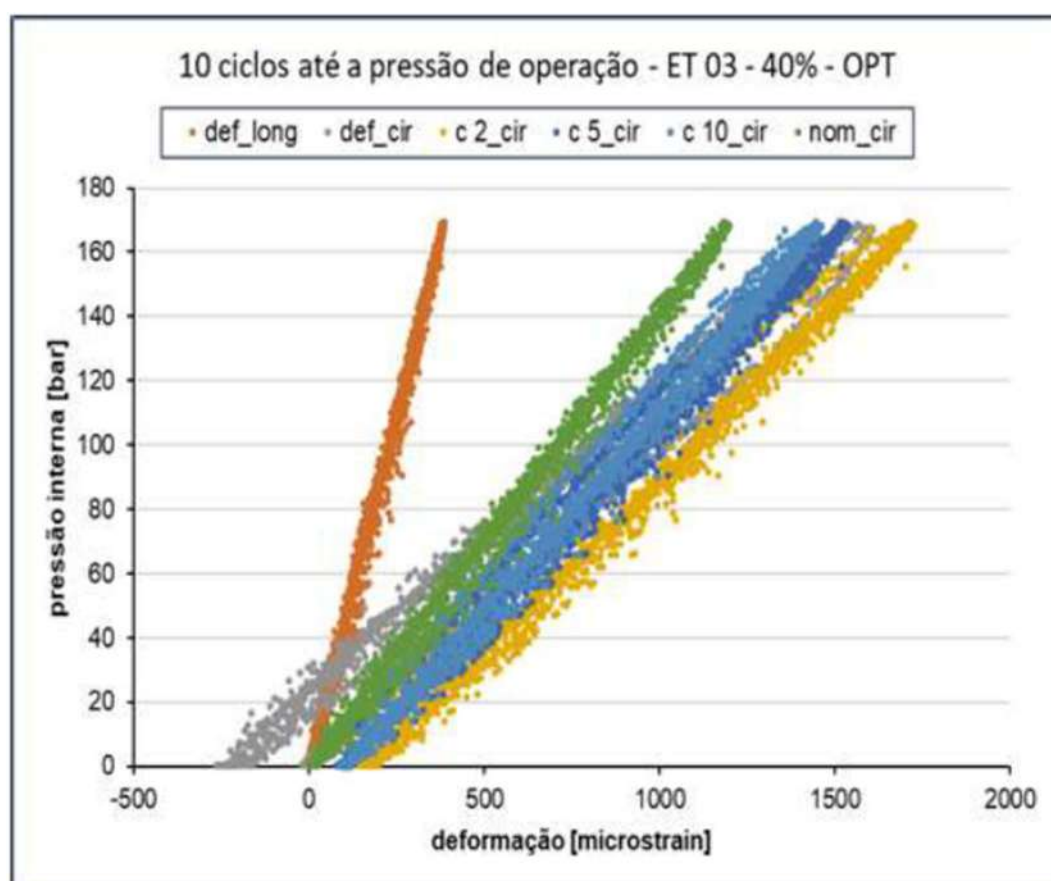
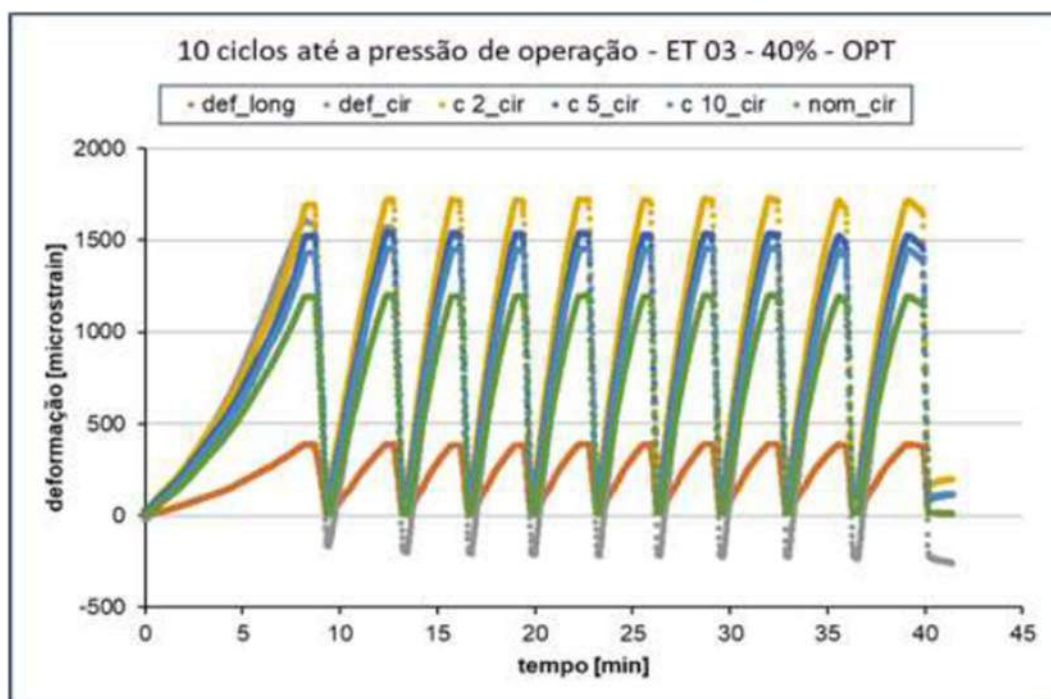


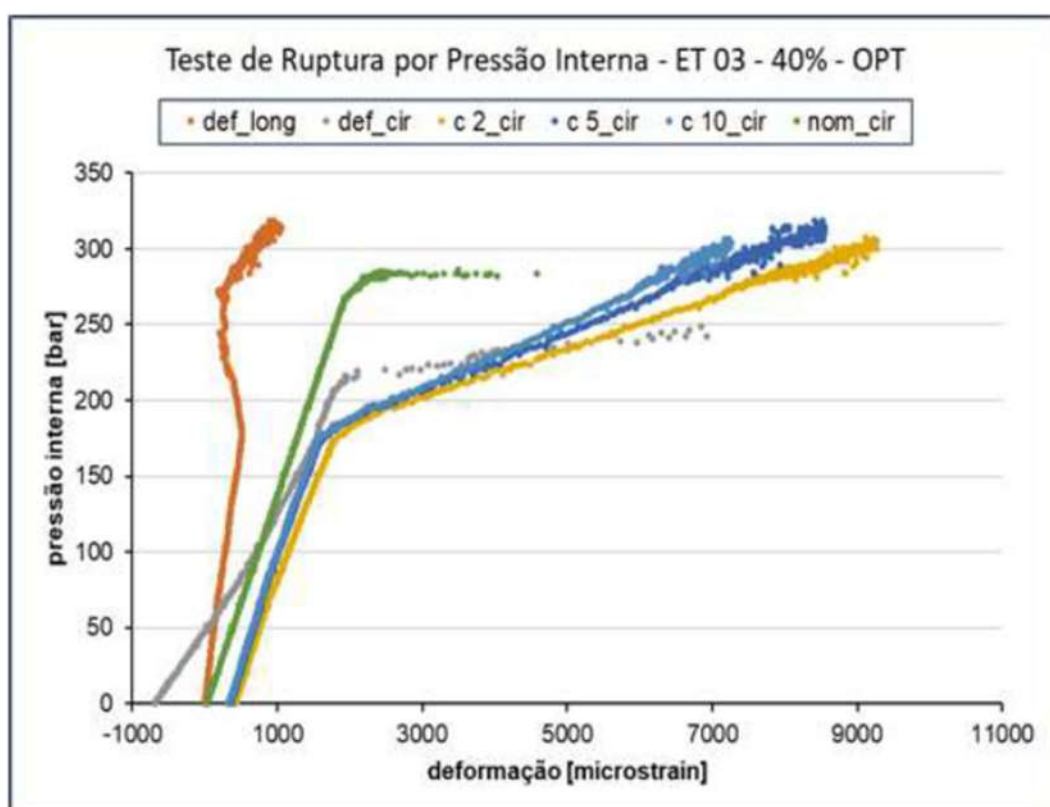
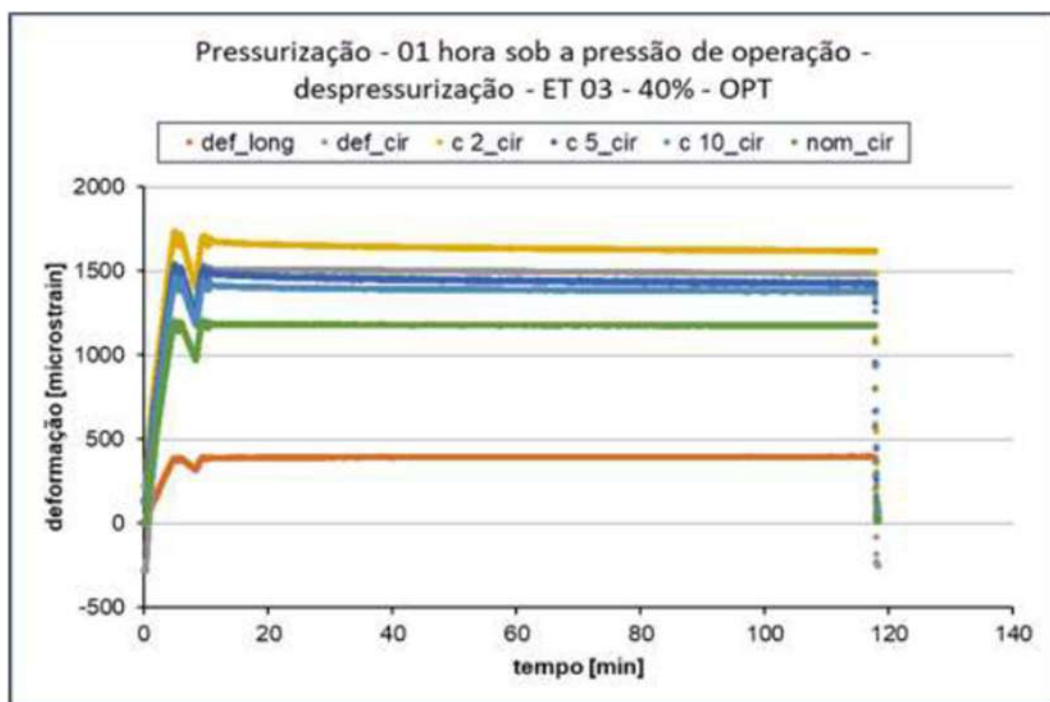


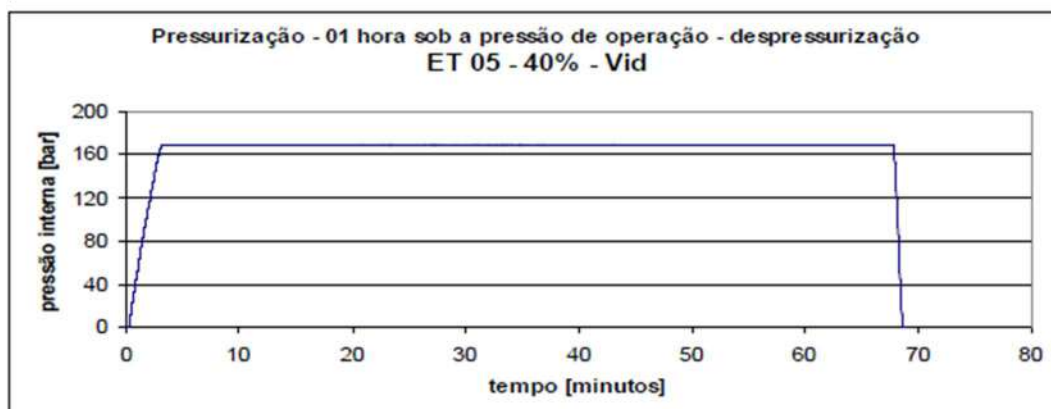
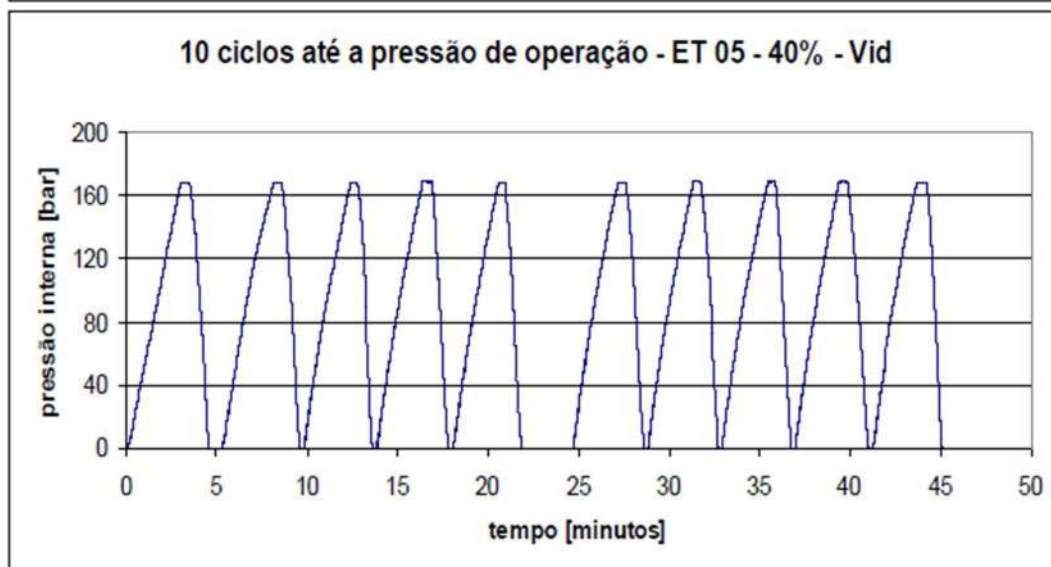
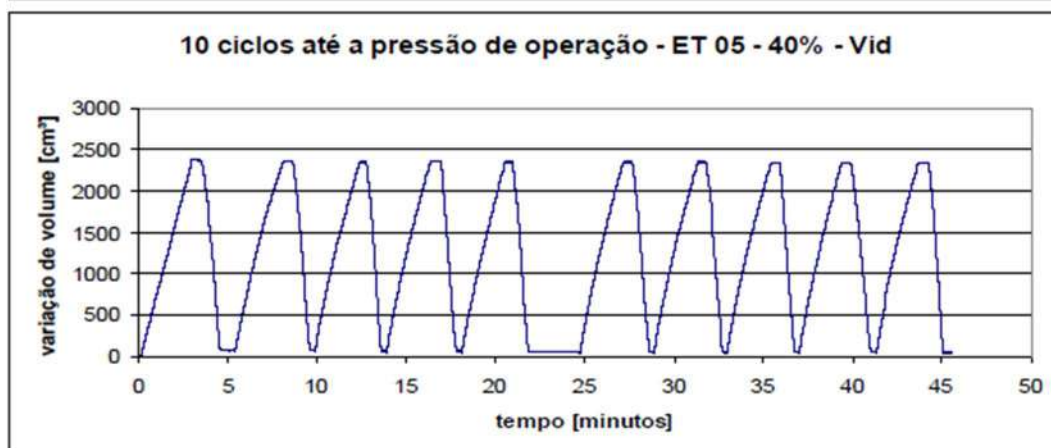
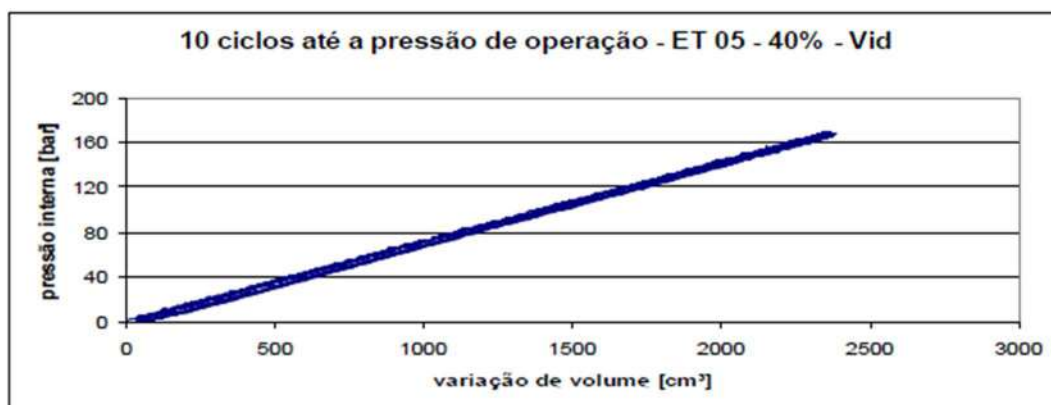
Como já explicado, as deformações são obtidas por extensômetros de fibra óptica colados na região central dos rebaixos erodidos, um na direção longitudinal e outro na circunferencial. As deformações nas camadas do reparo e na região afastada do defeito (deformação nominal) foram medidas na direção circunferencial. A identificação dos extensômetros é feita no conjunto de Figuras que mostram os resultados para cada espécime. As Figuras representam os seguintes testes:

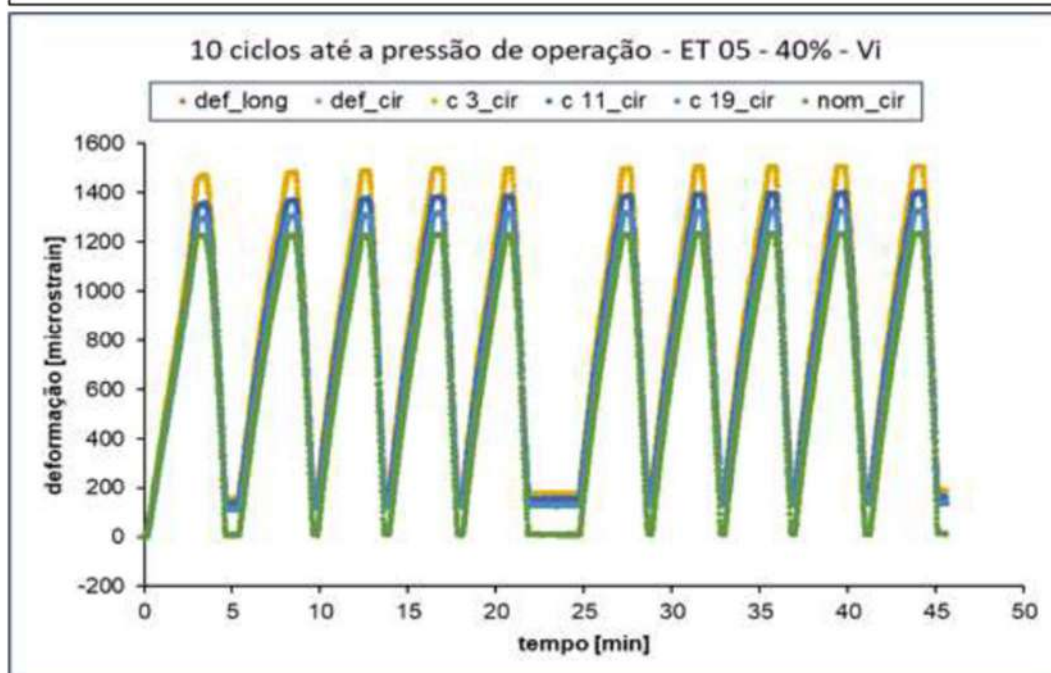
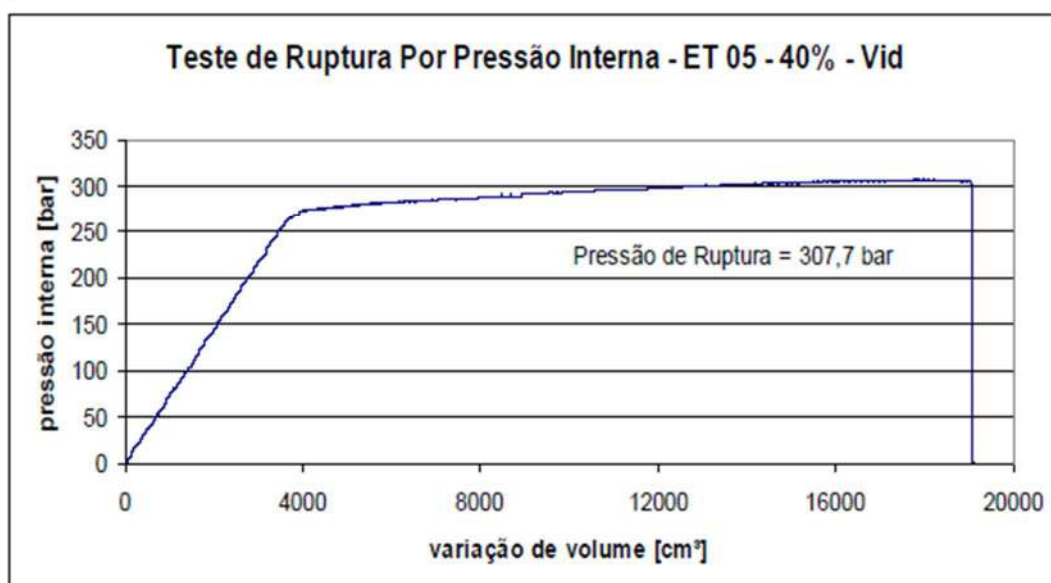
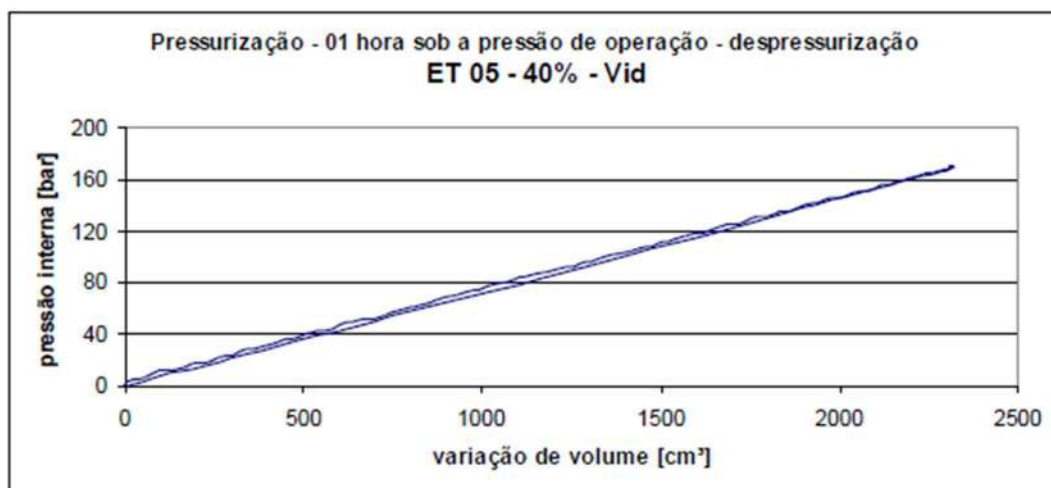
- Pressão de operação e volume de água injetado durante 10 ciclos
- Histórico da pressão de operação durante 10 ciclos
- Histórico da variação do volume de água injetado durante 10 ciclos
- Pressão até a ruptura e volume de água injetado
- Histórico de deformações durante 10 ciclos
- Pressões e deformações durante os 10 ciclos de pressurização
- Histórico de deformações sob pressão de operação: manutenção por 1 hora
- Pressões e deformações durante o teste de ruptura



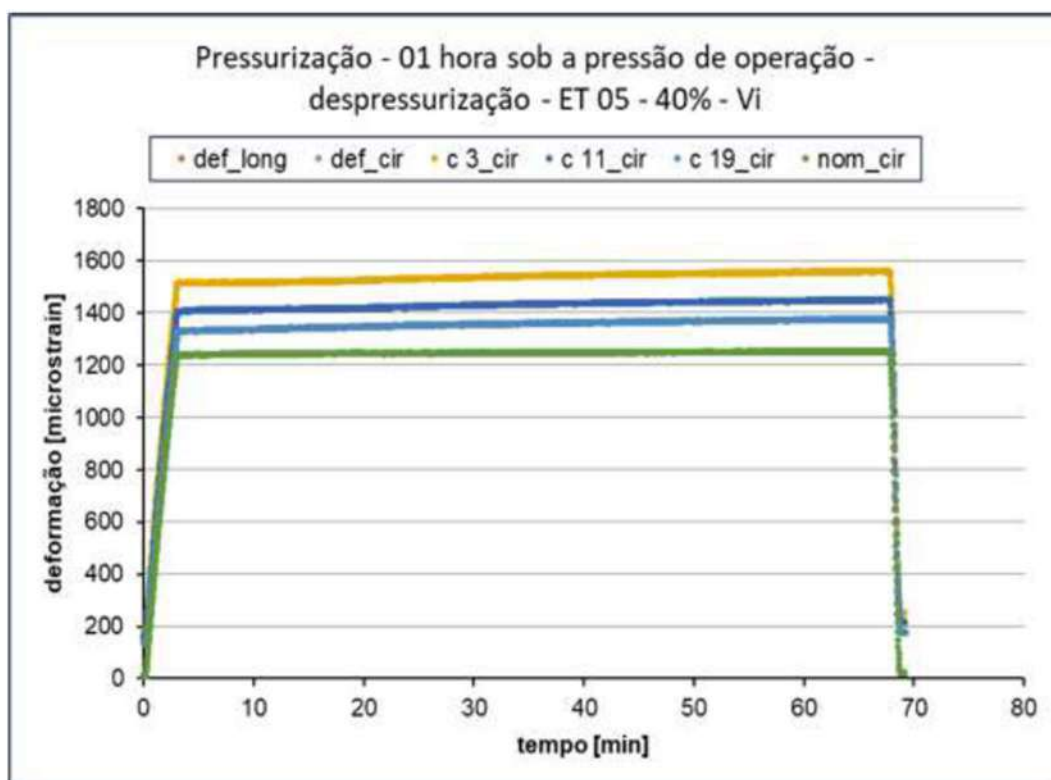
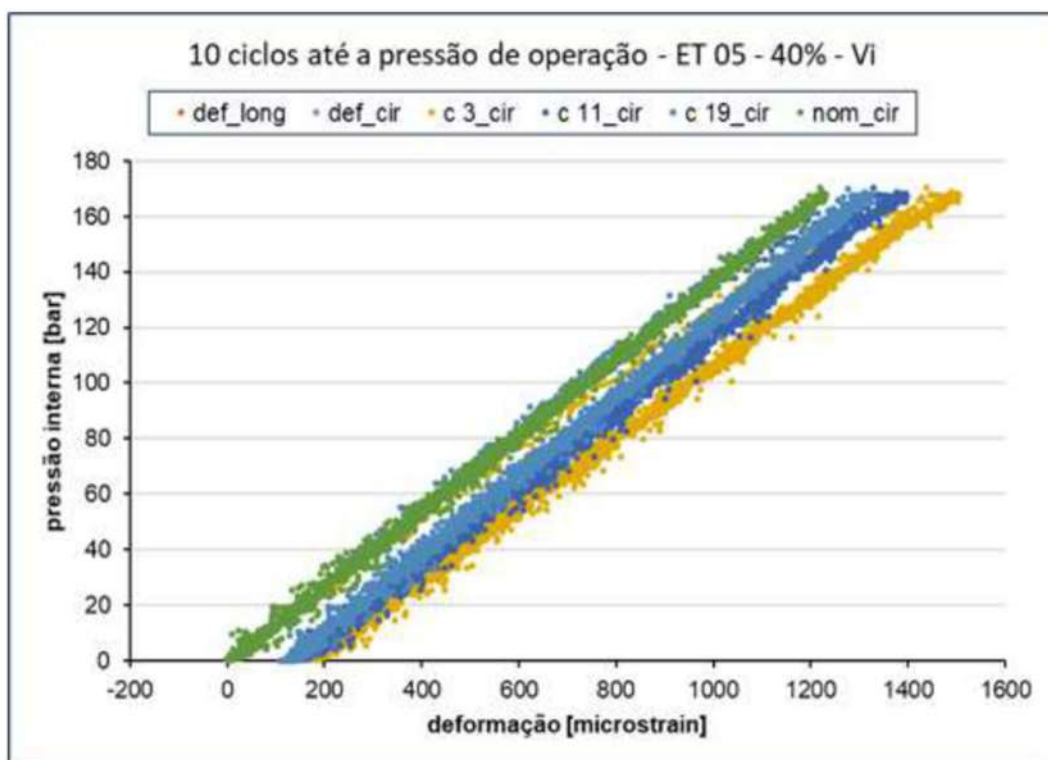


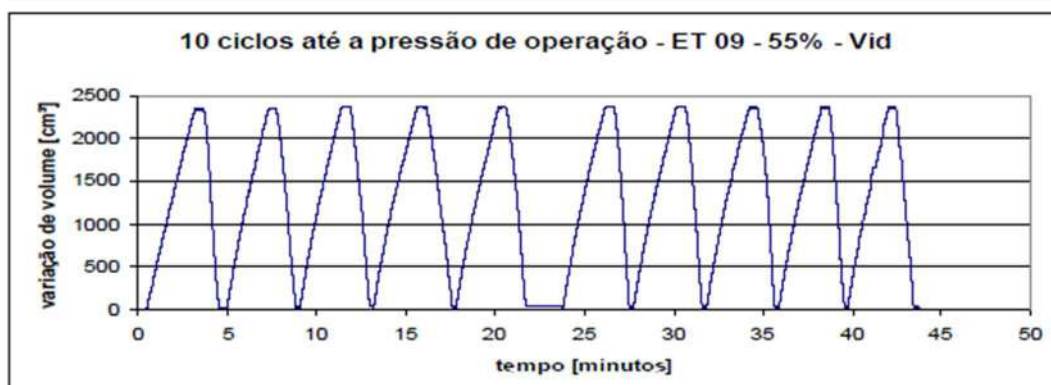
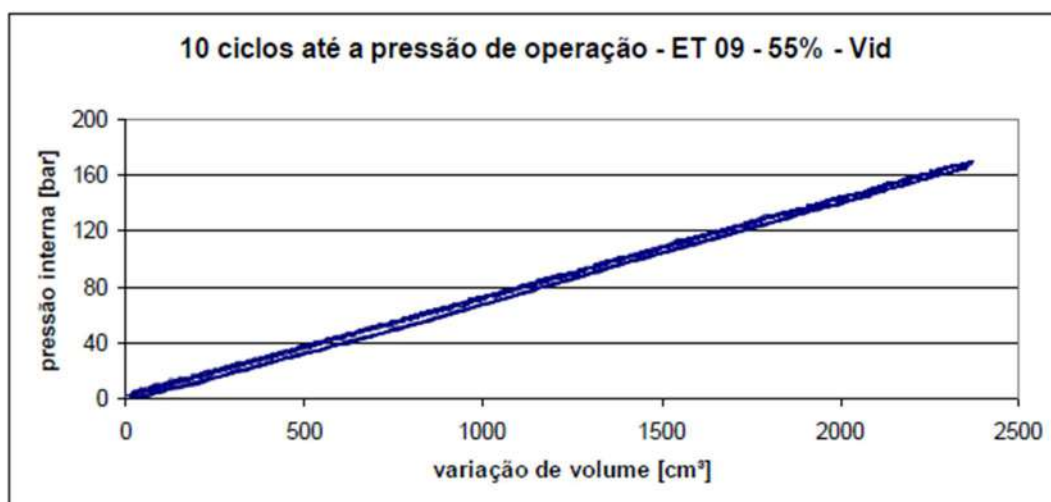
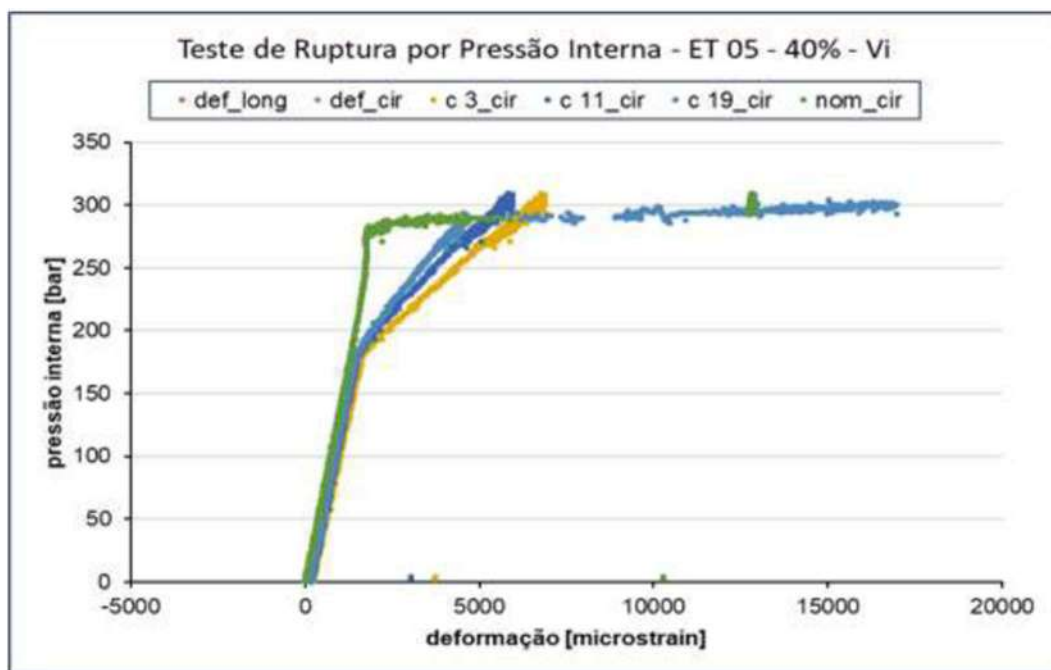


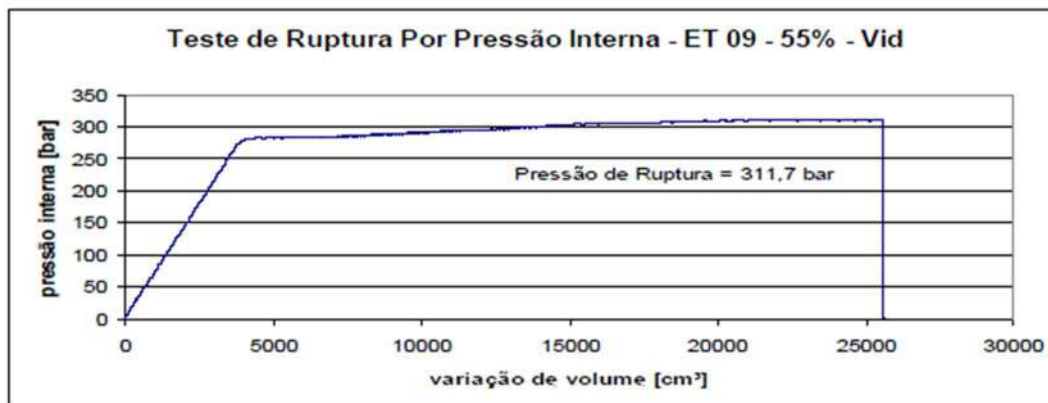
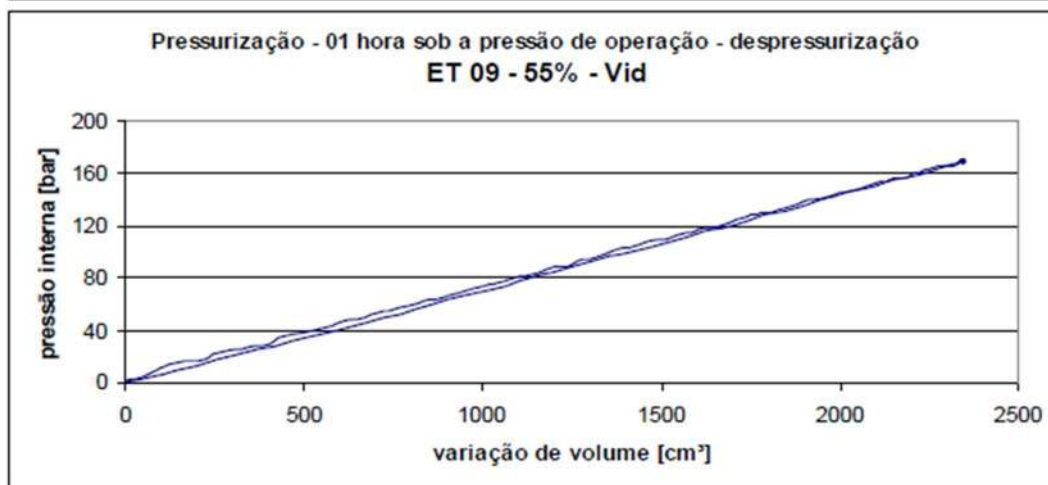
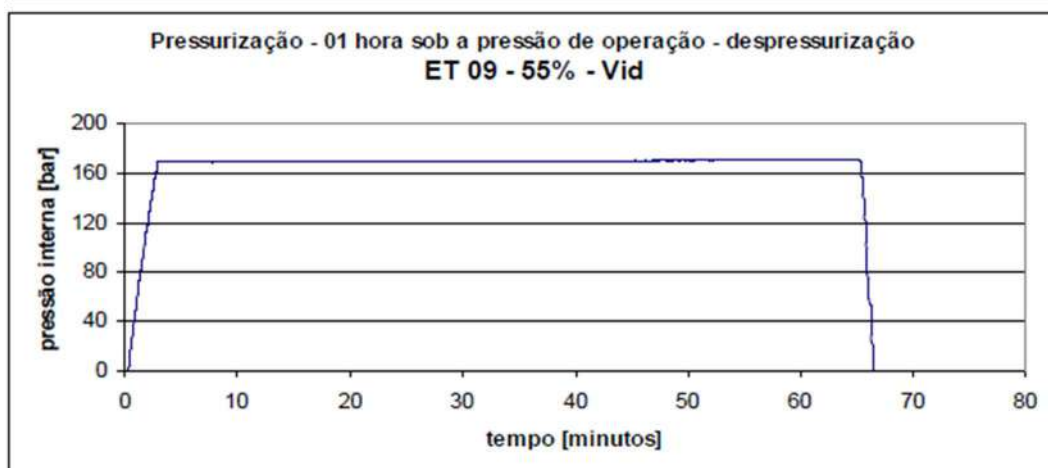
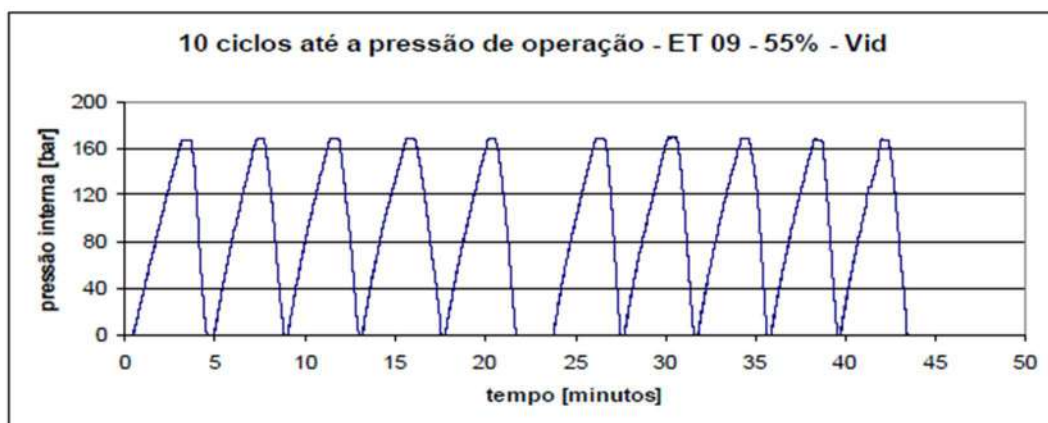


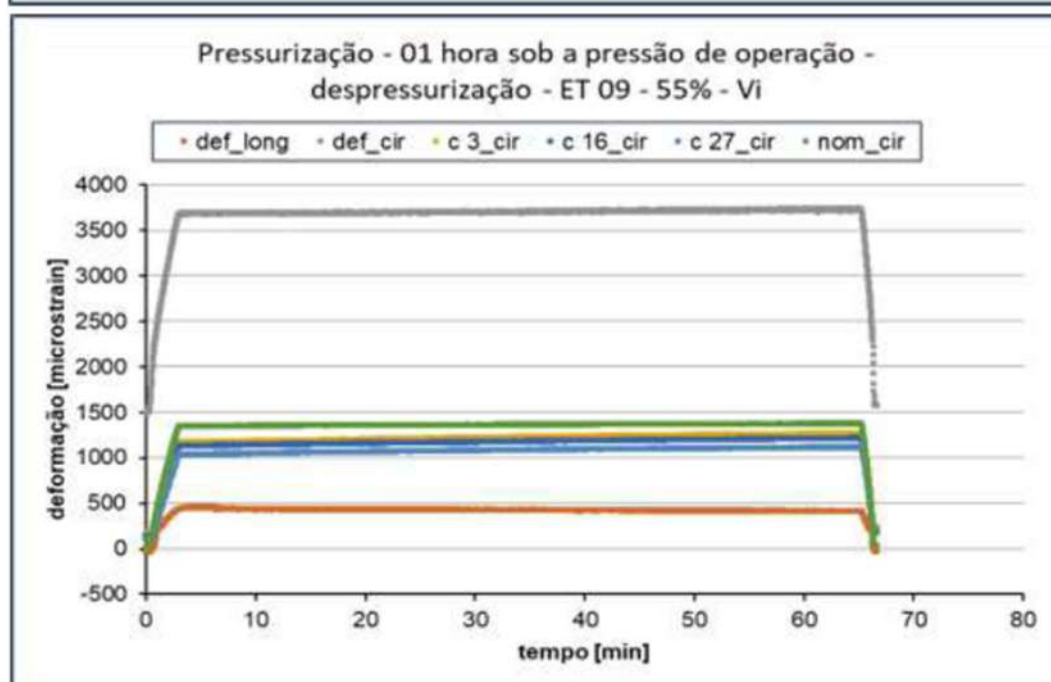
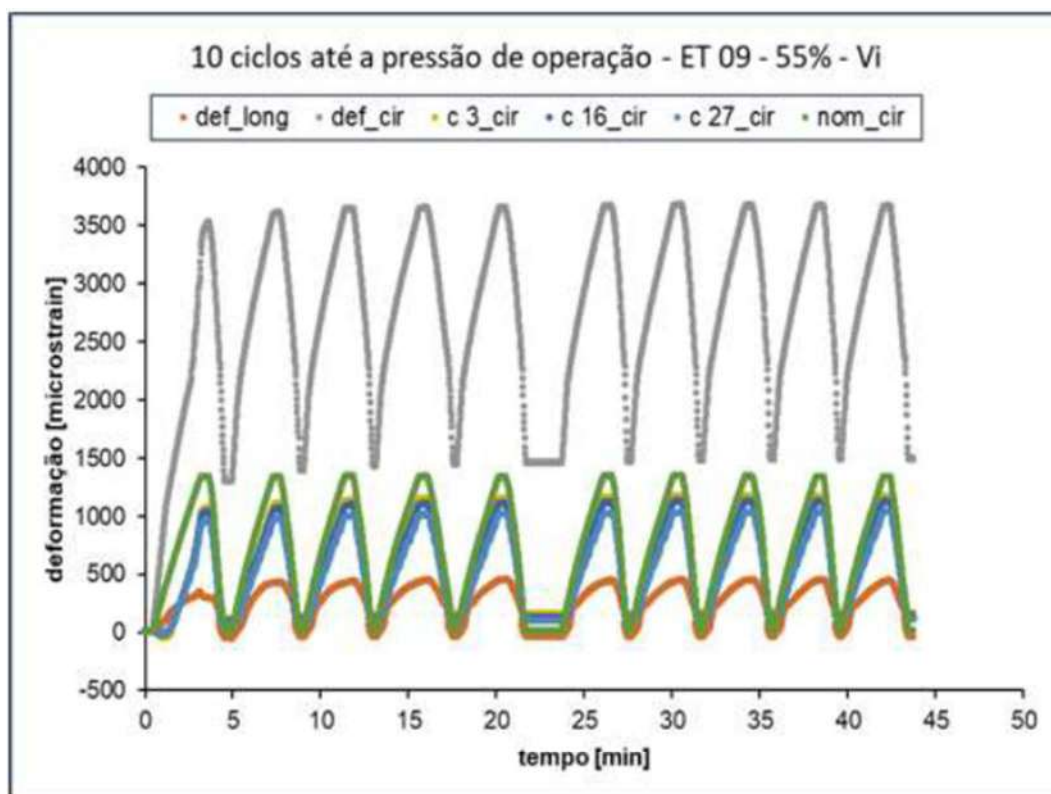


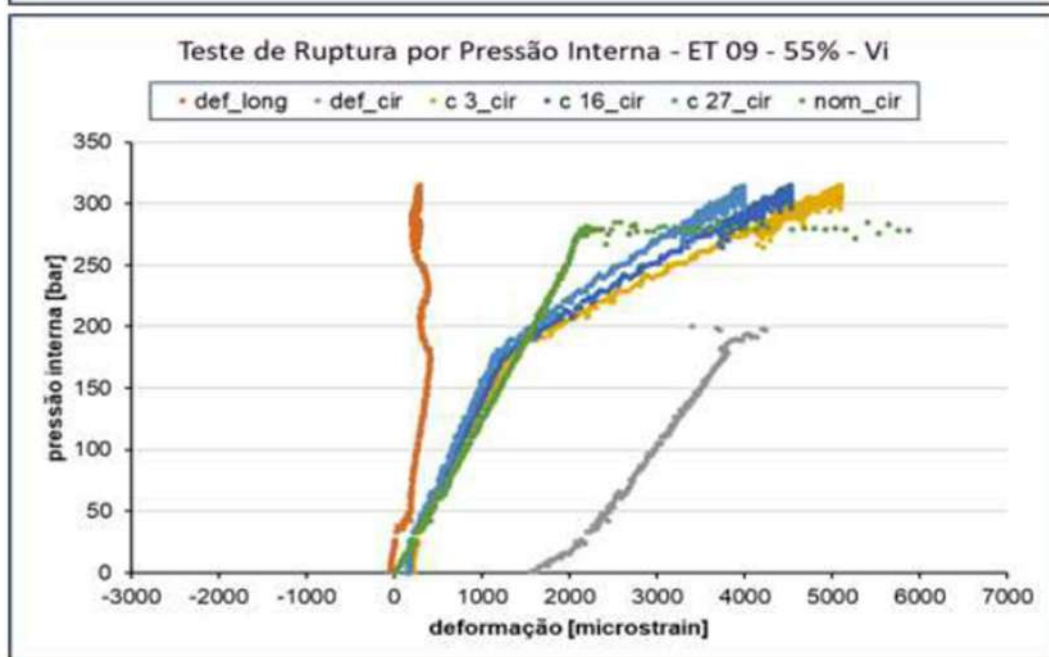
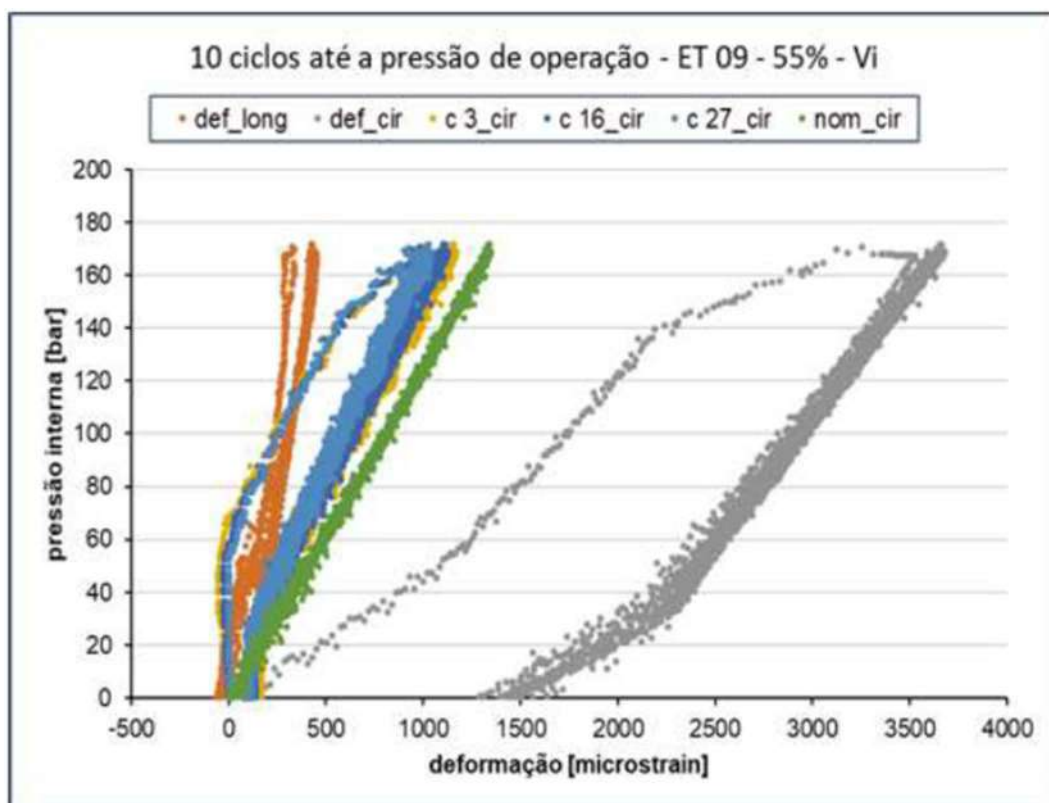
ET05 – Os extensômetros def_long e def_cir não apresentaram resposta de deformação

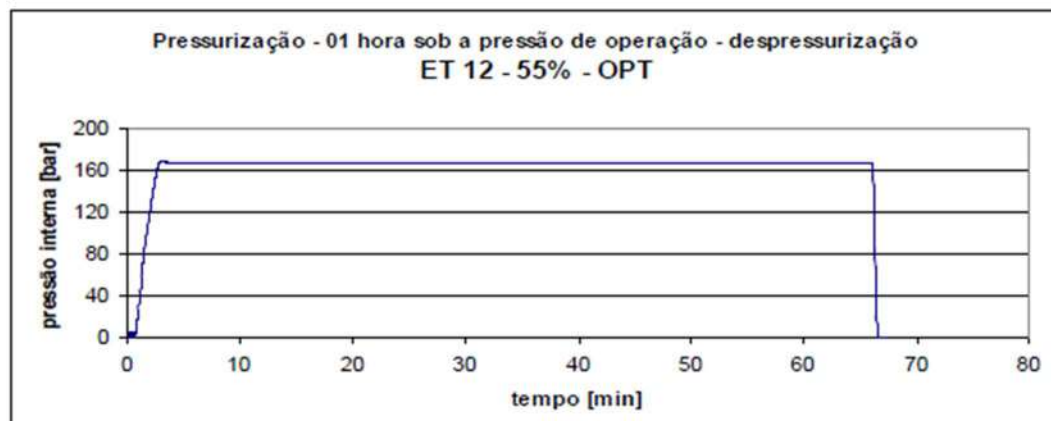
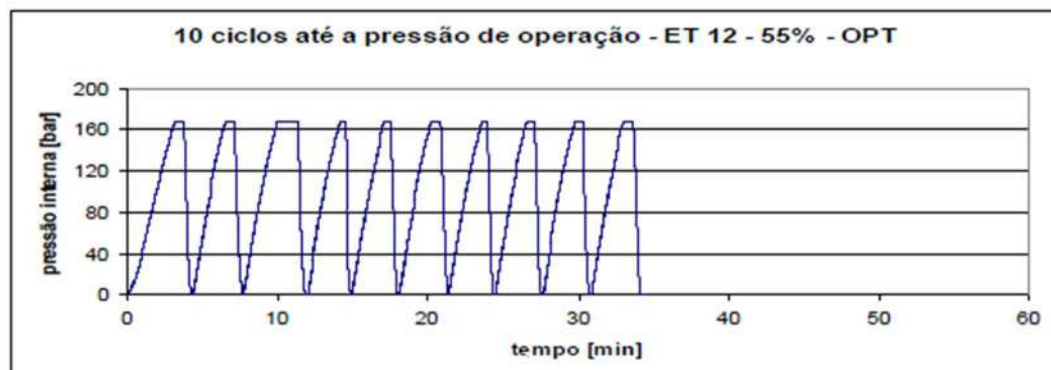
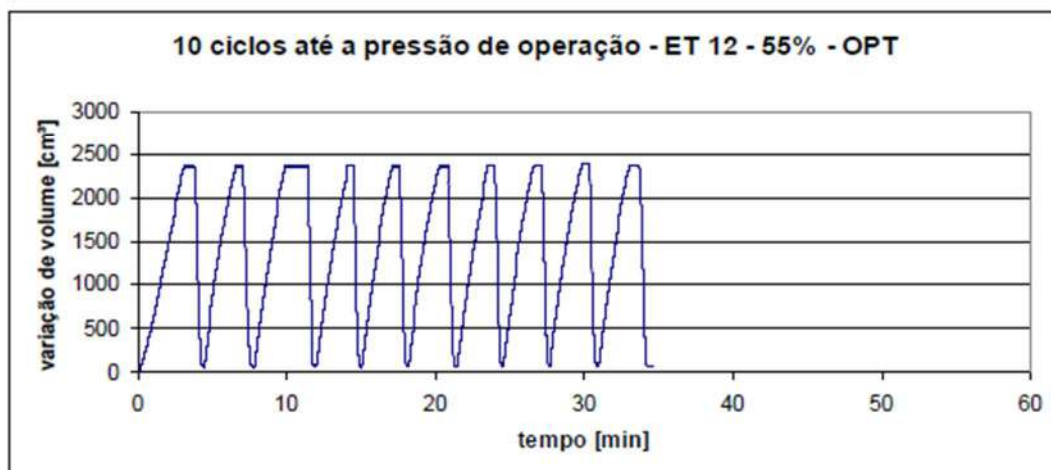
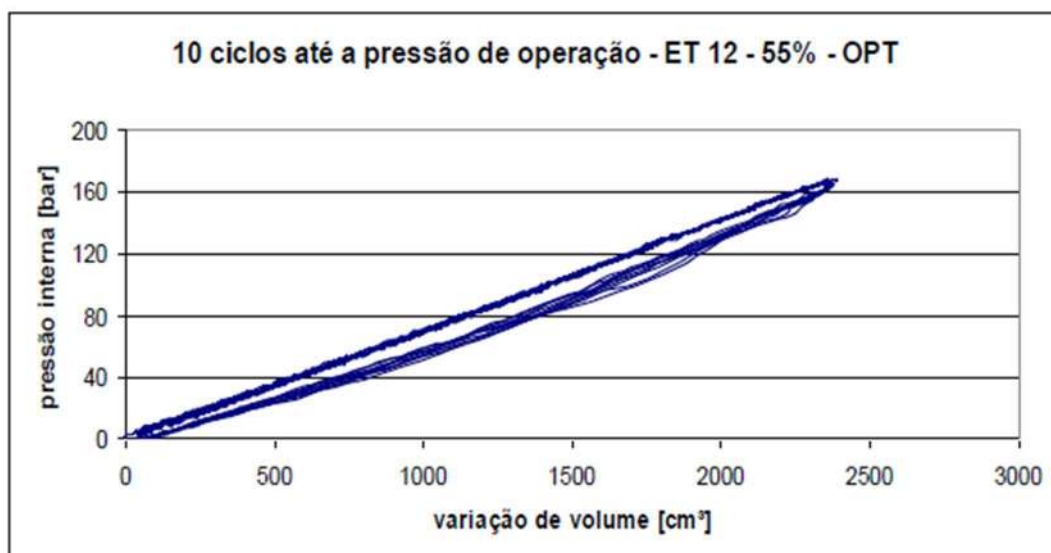


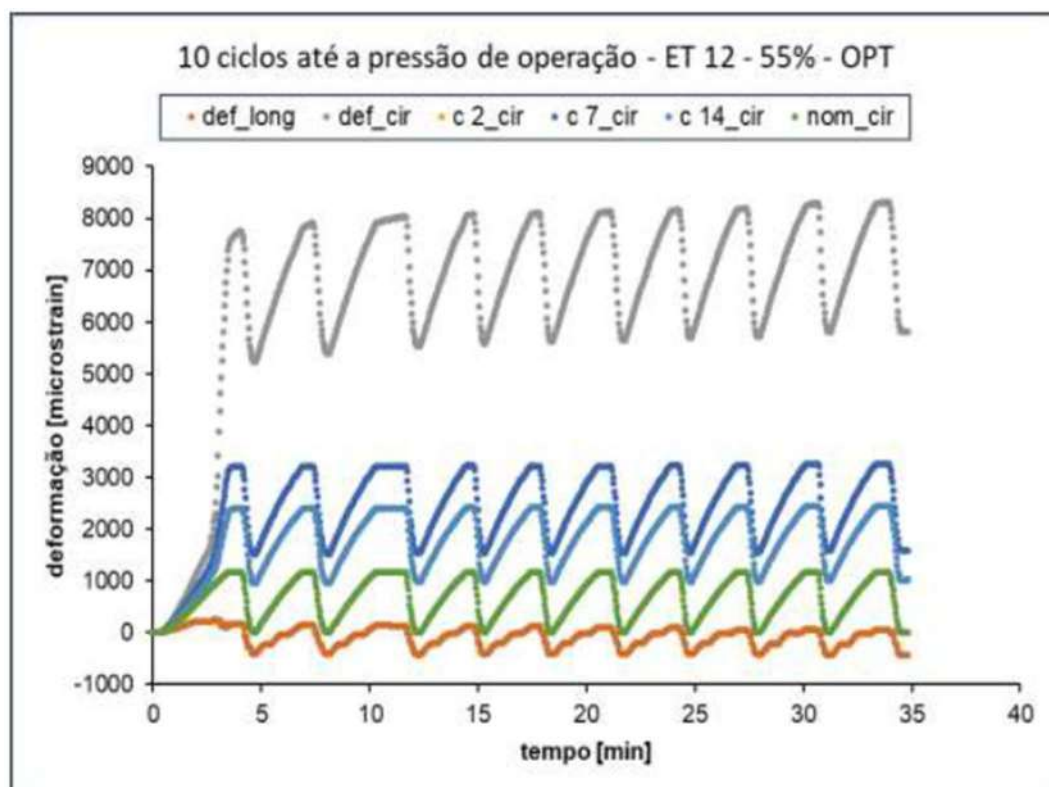
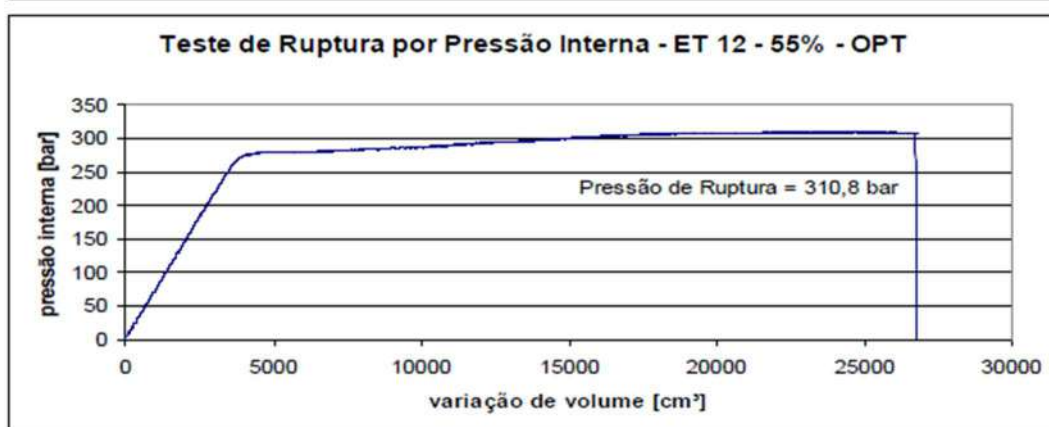
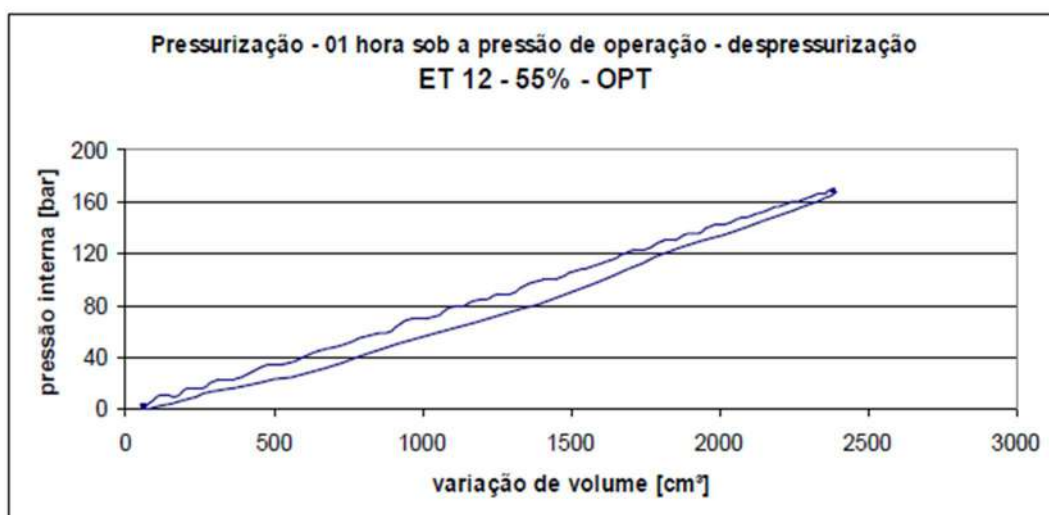




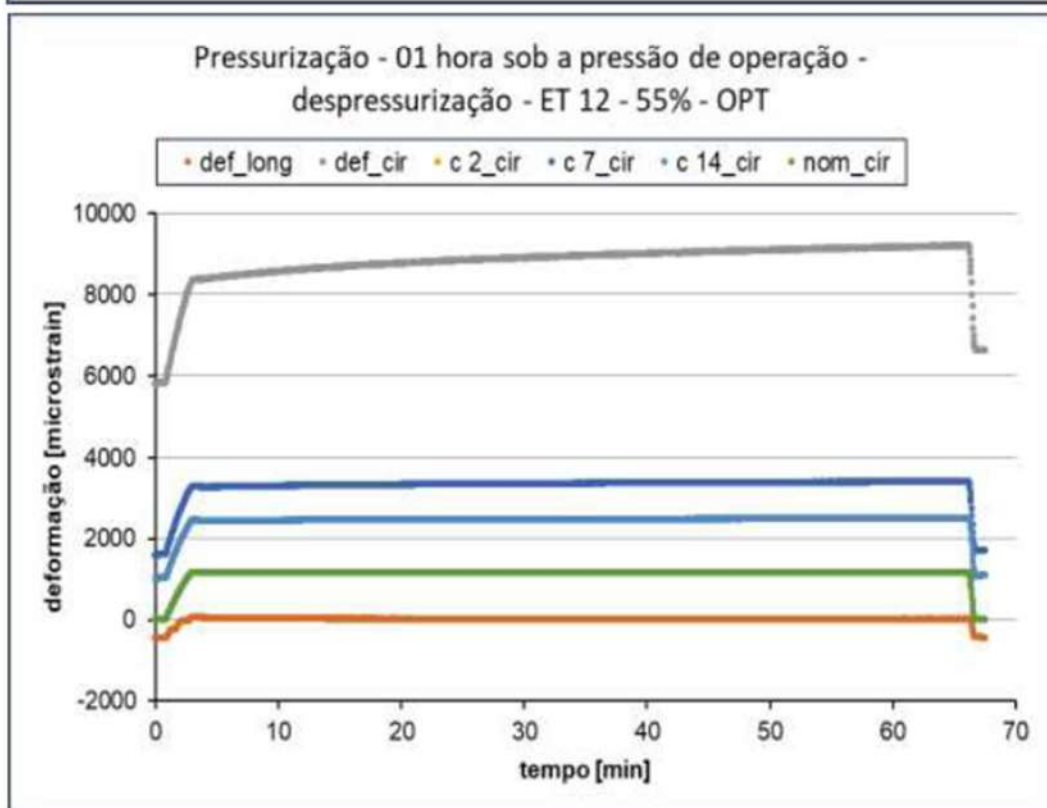
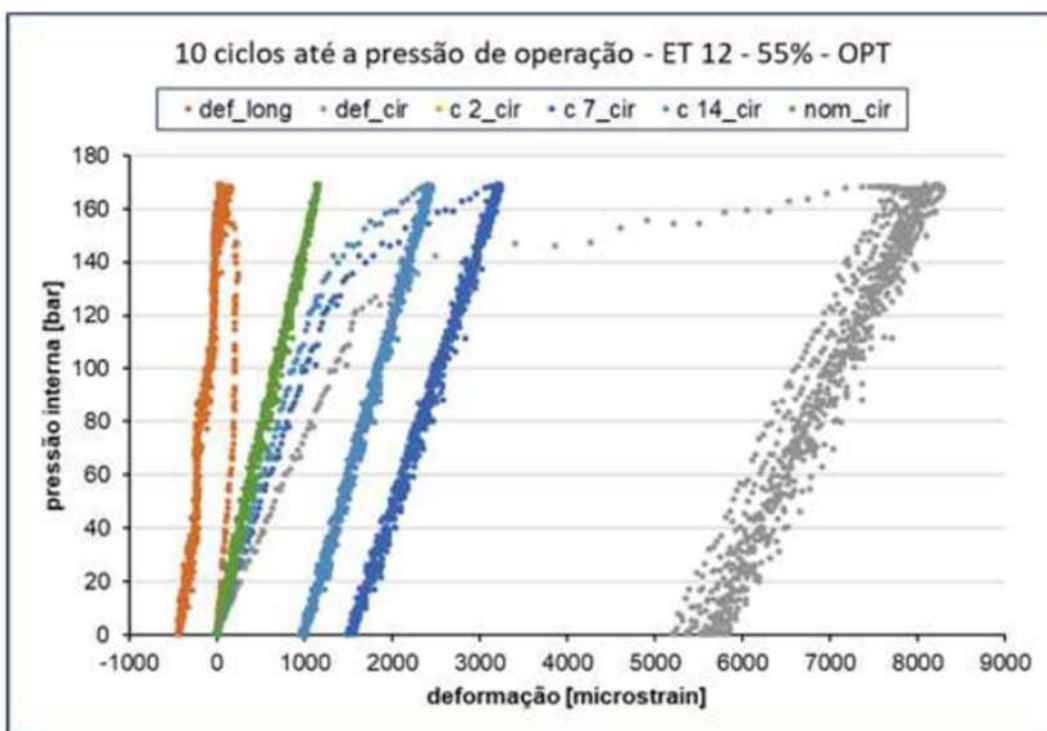


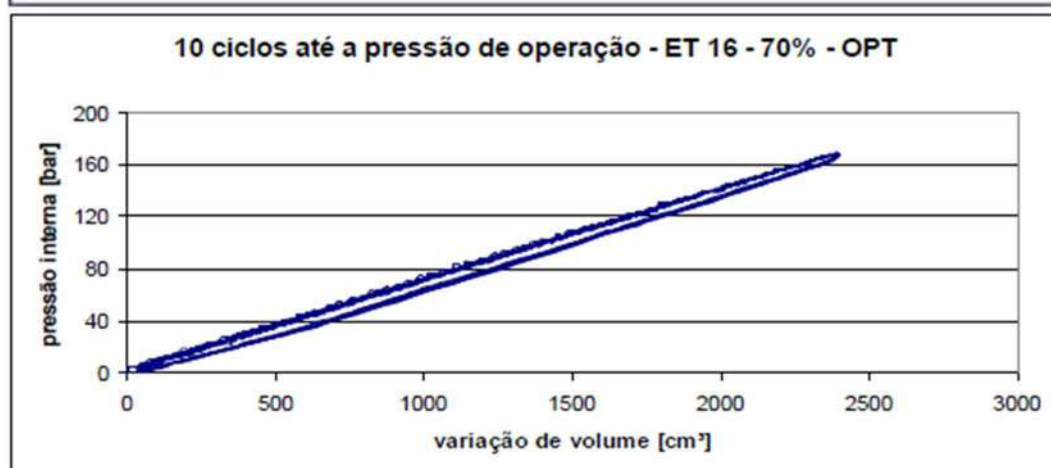
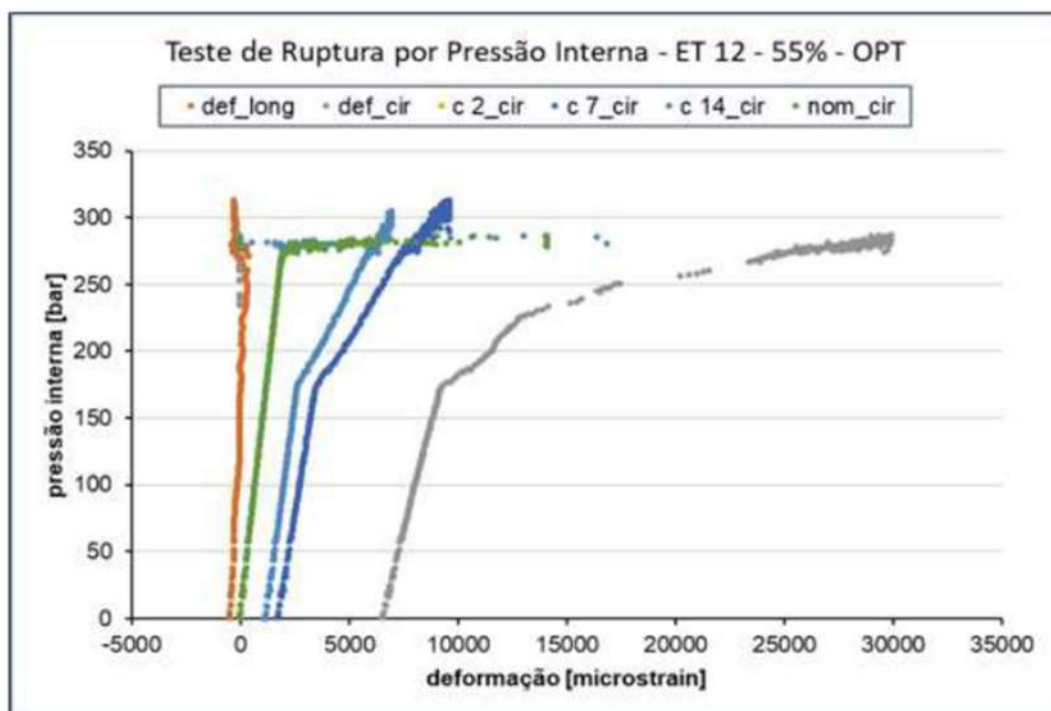


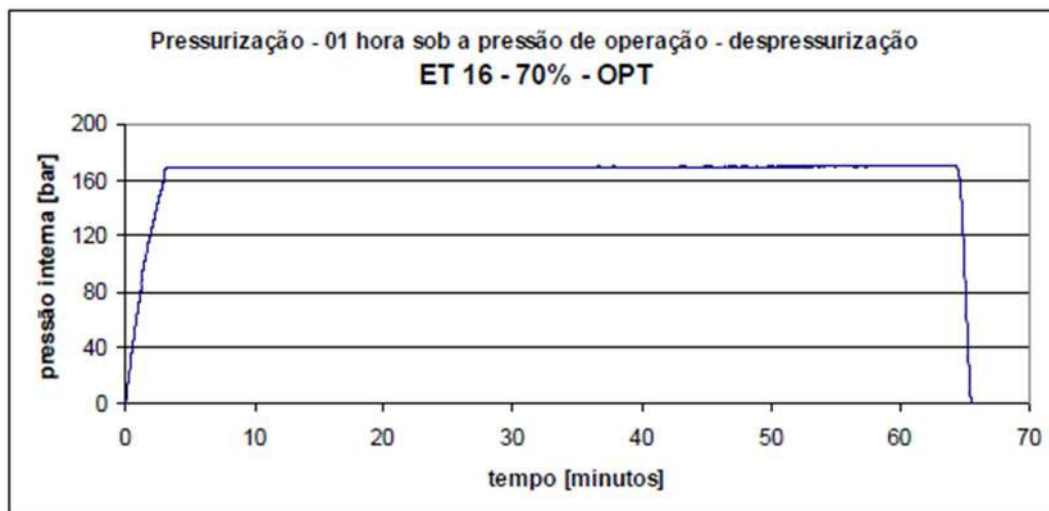
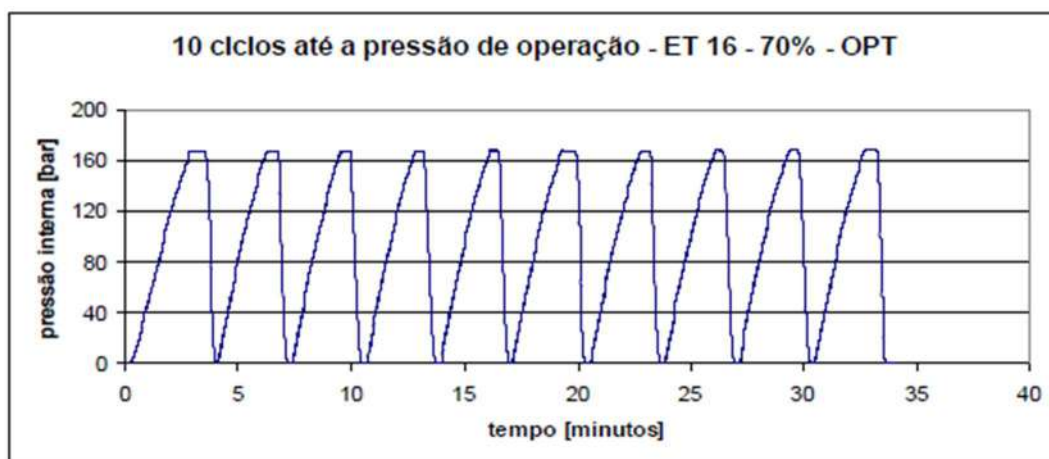


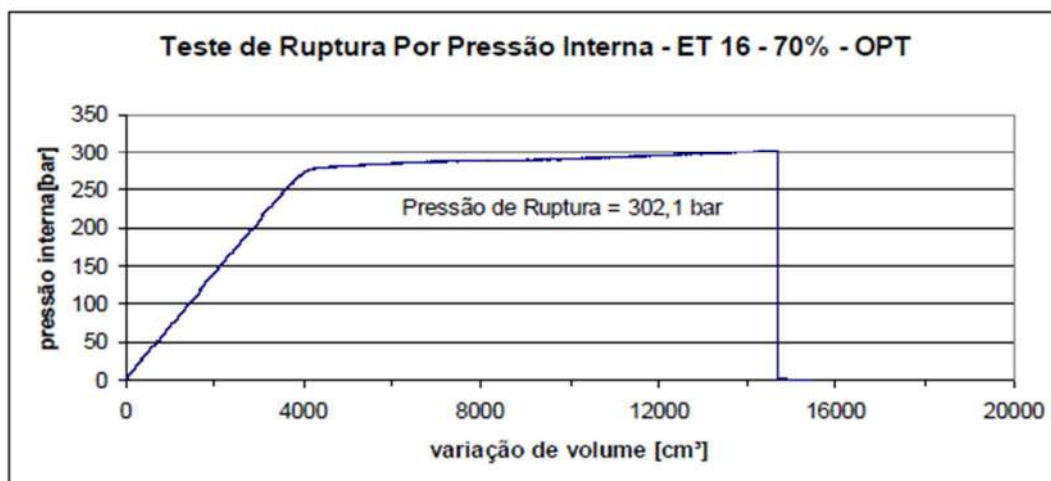
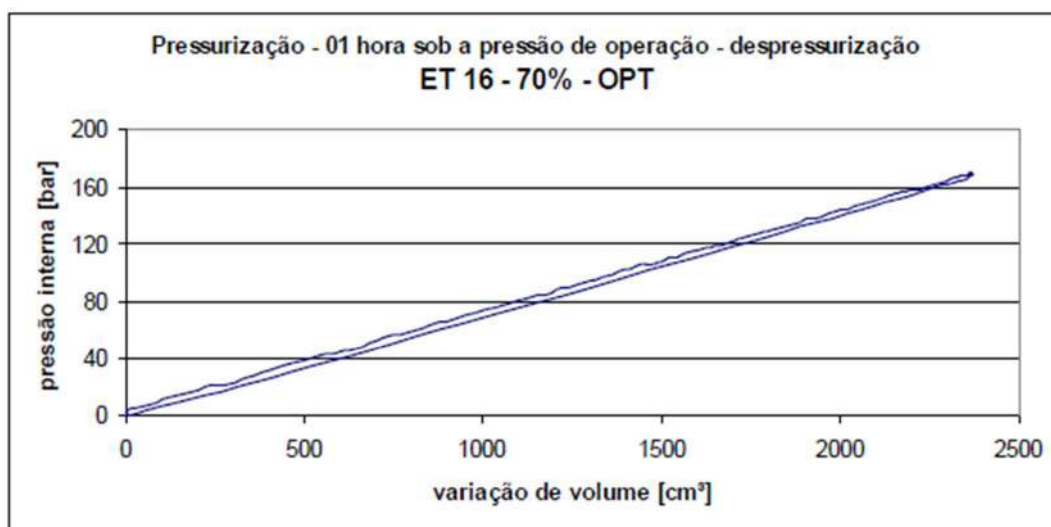


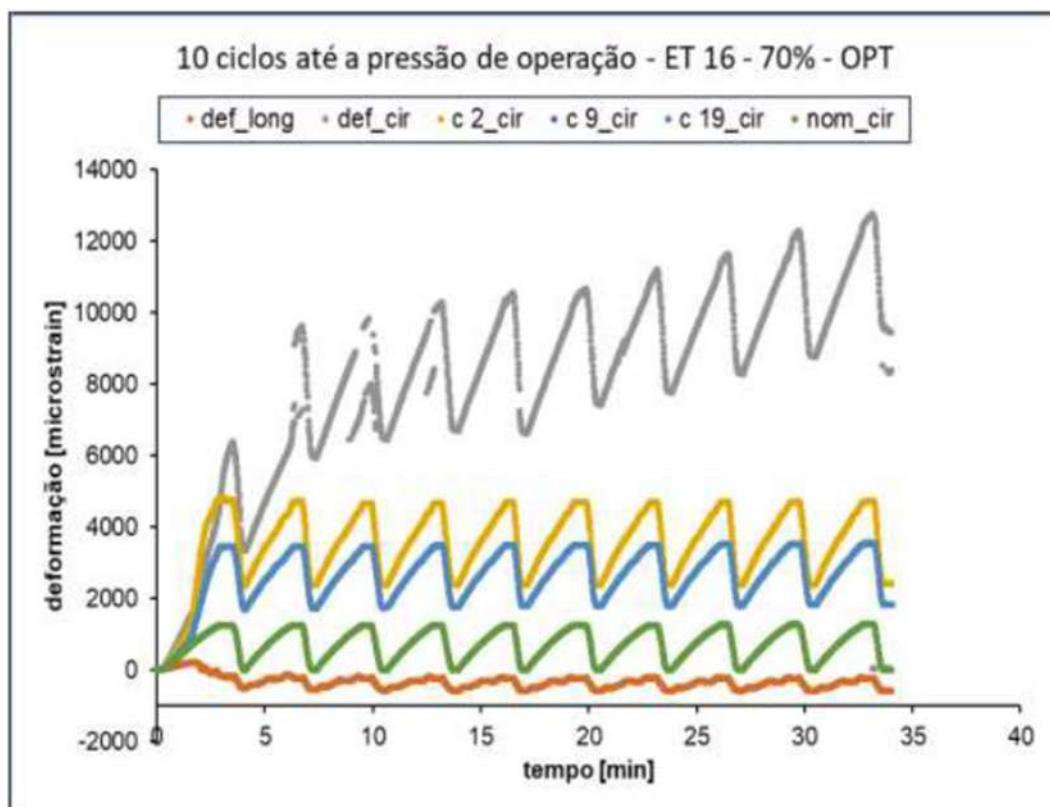
ET12 – O extensômetro c2_cir não apresentou resposta de deformação.



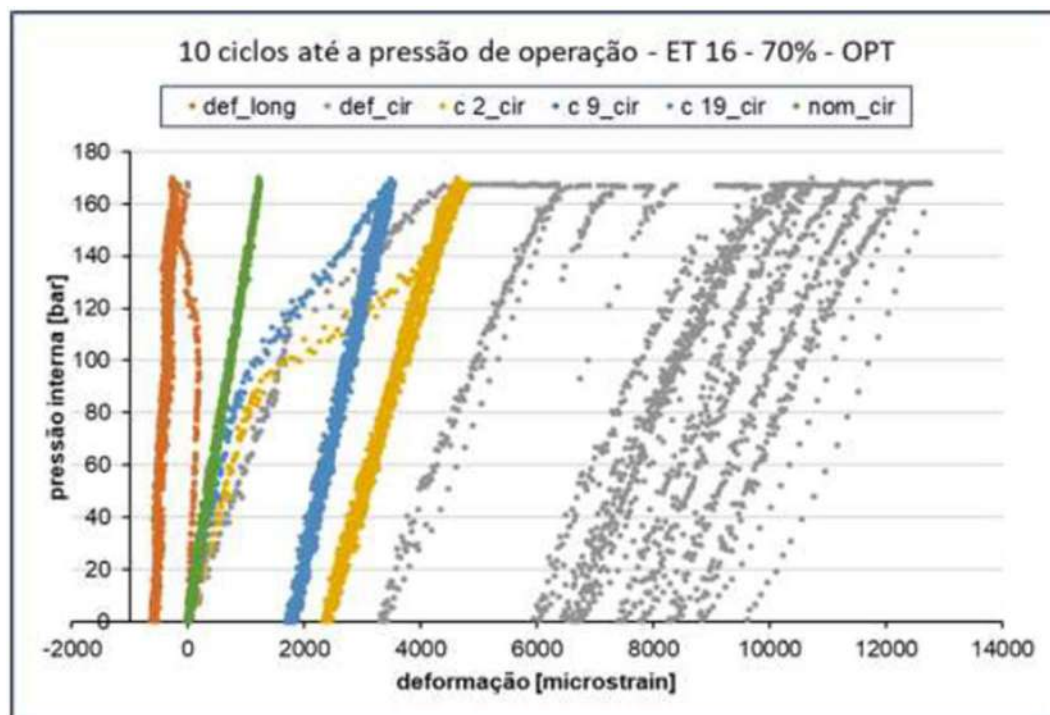


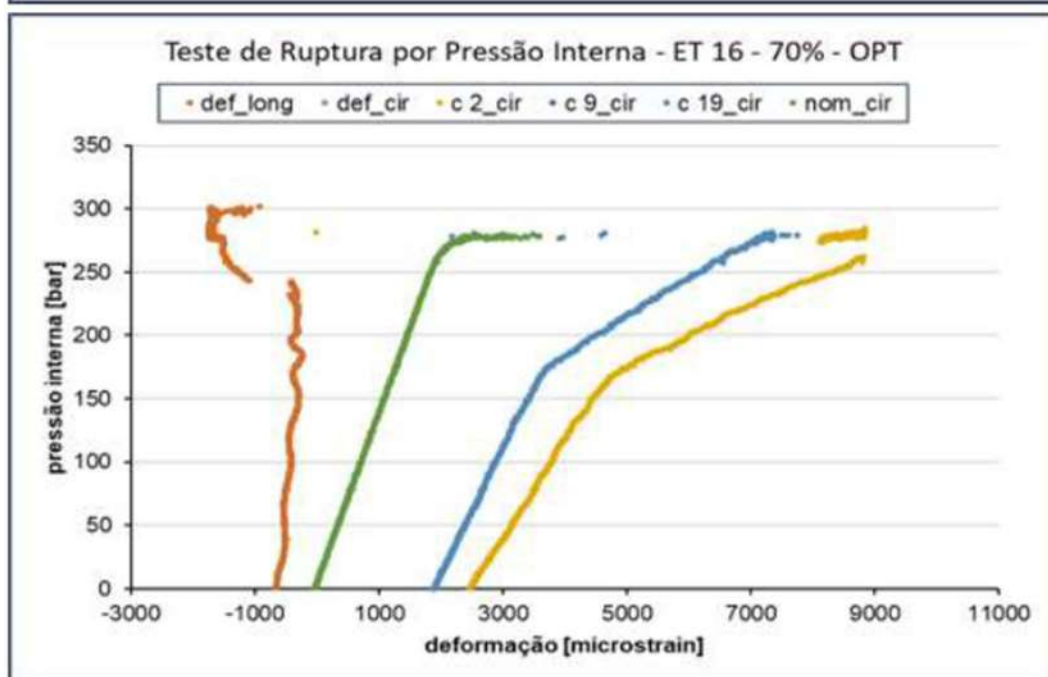
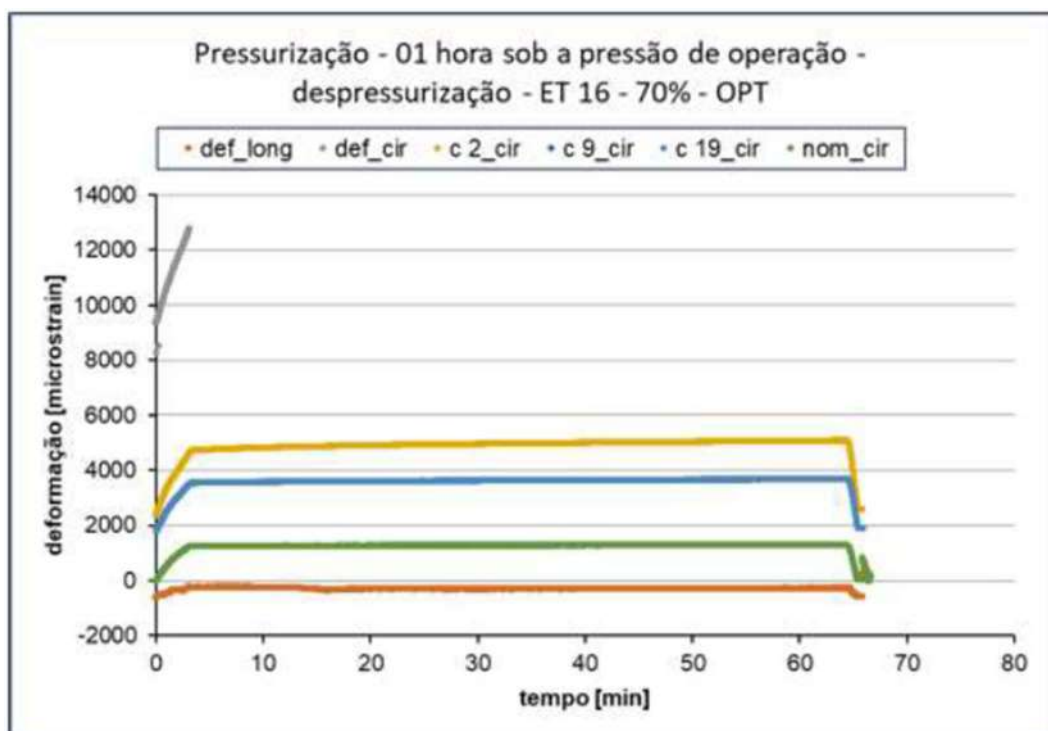


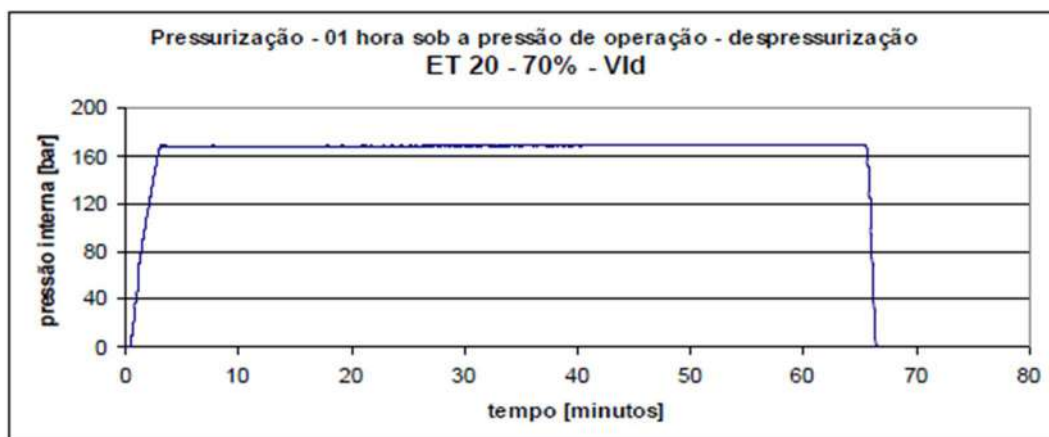
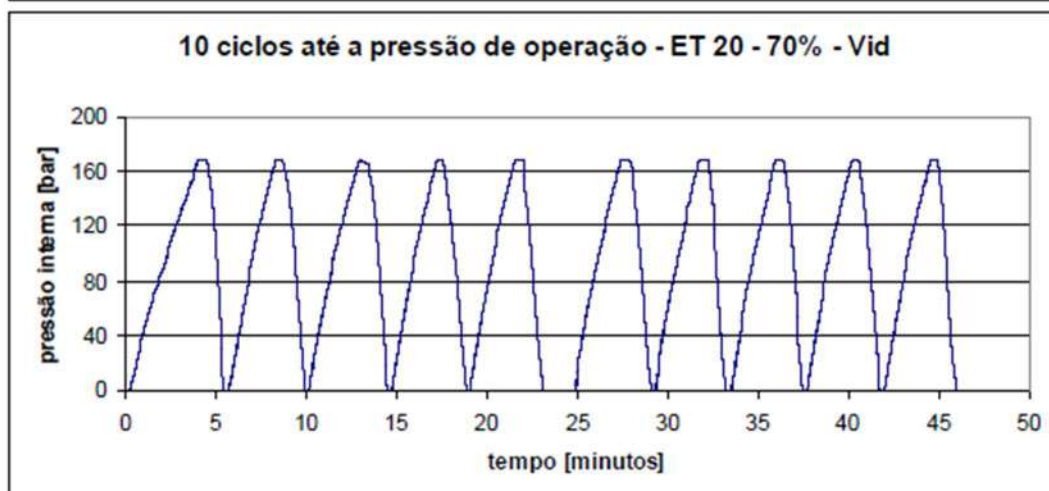
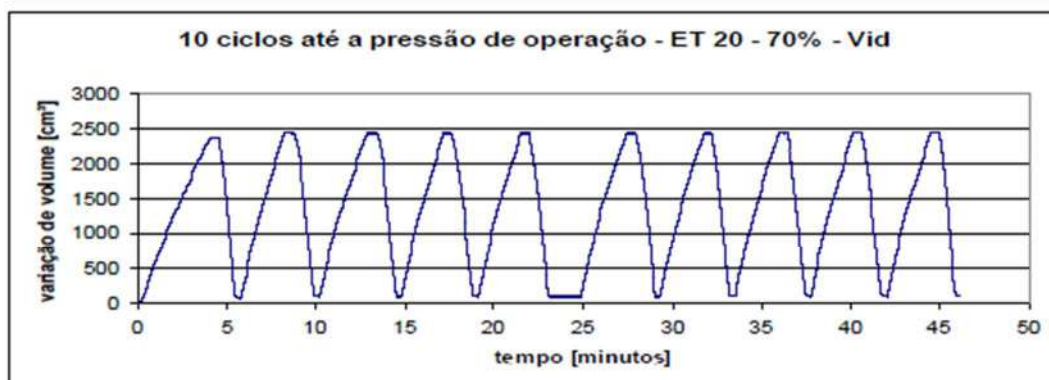
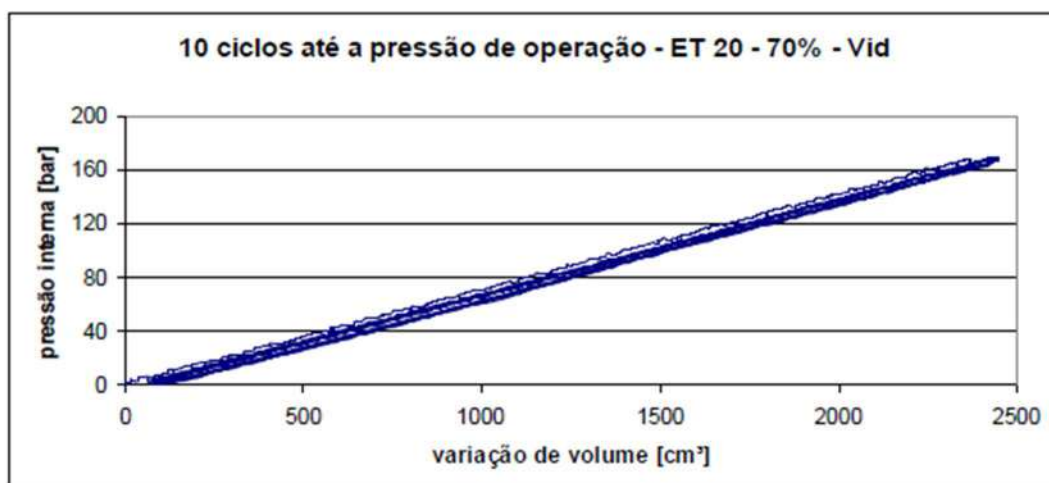


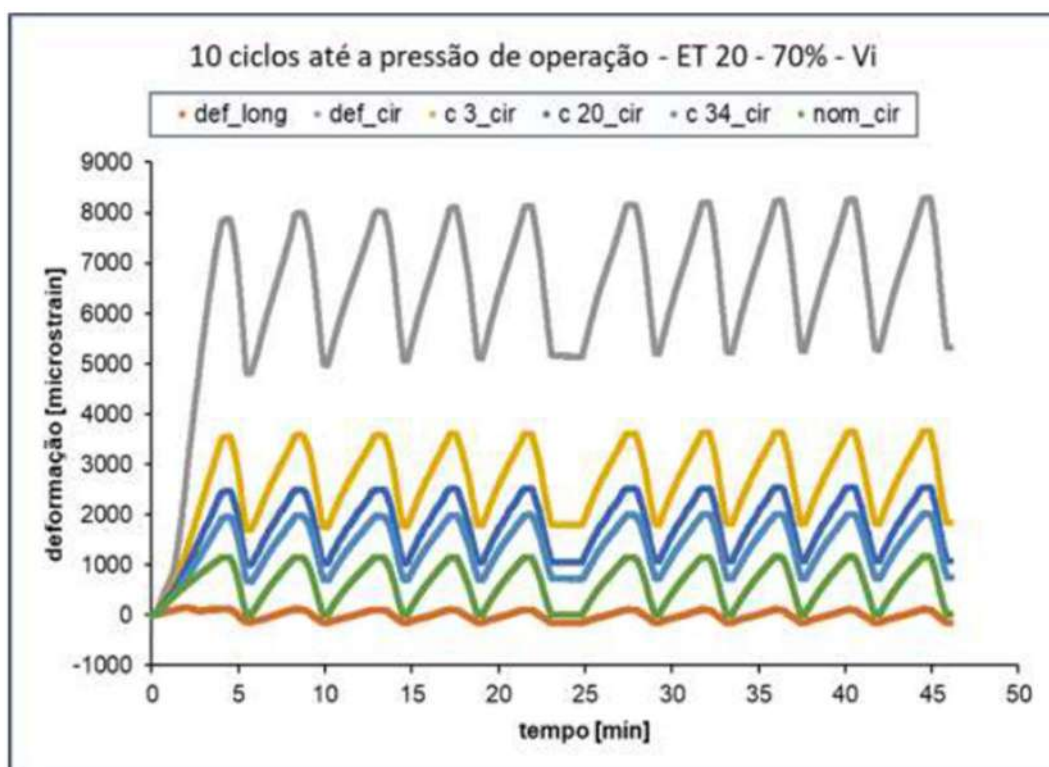
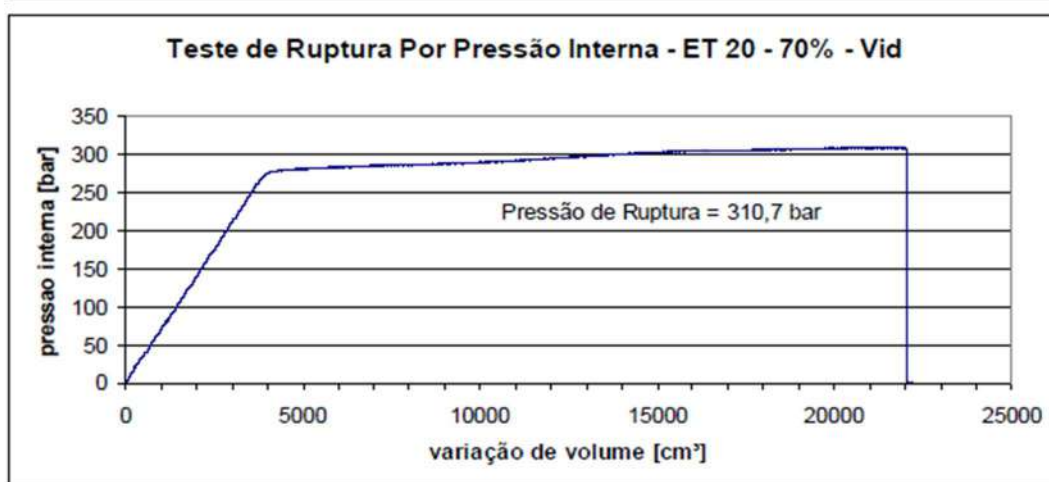
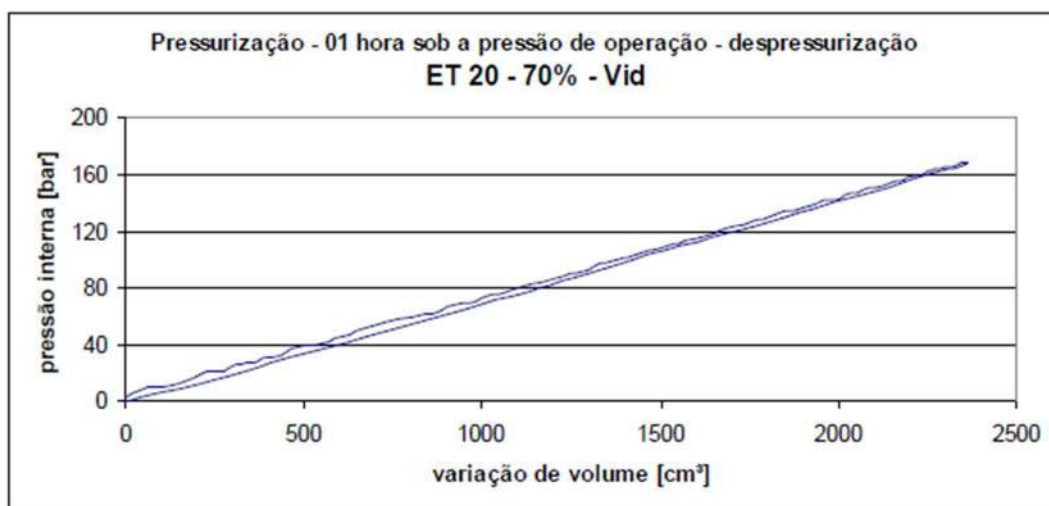


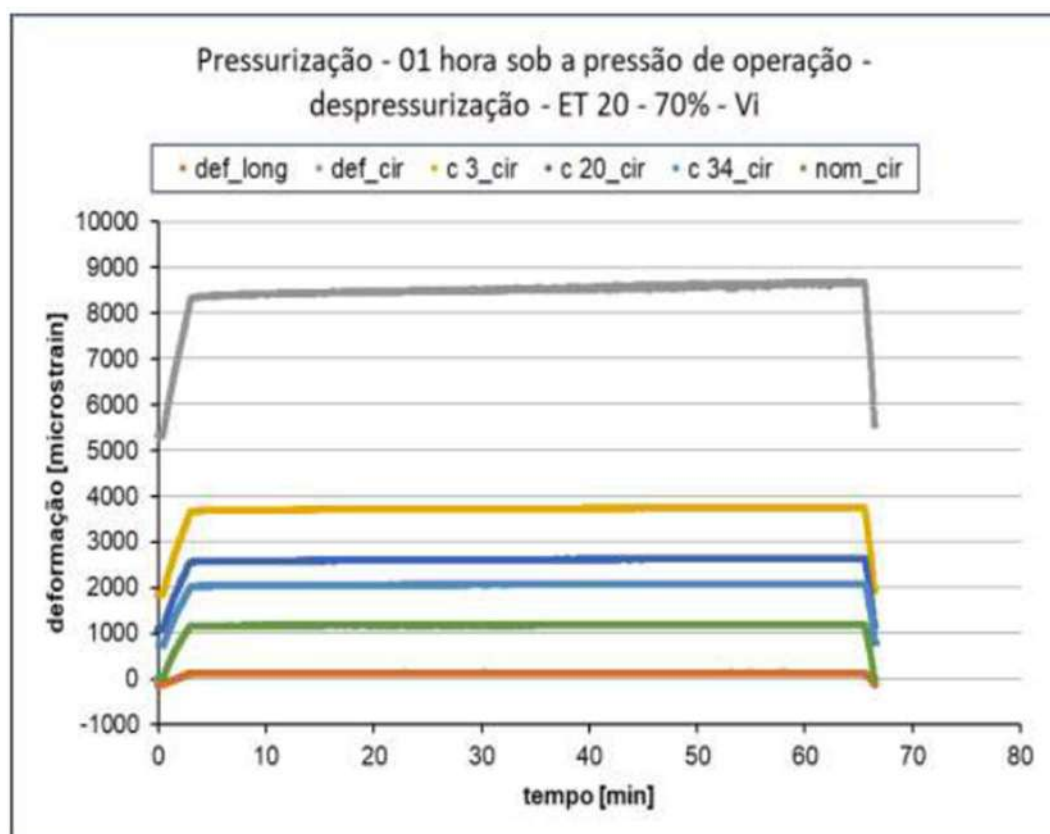
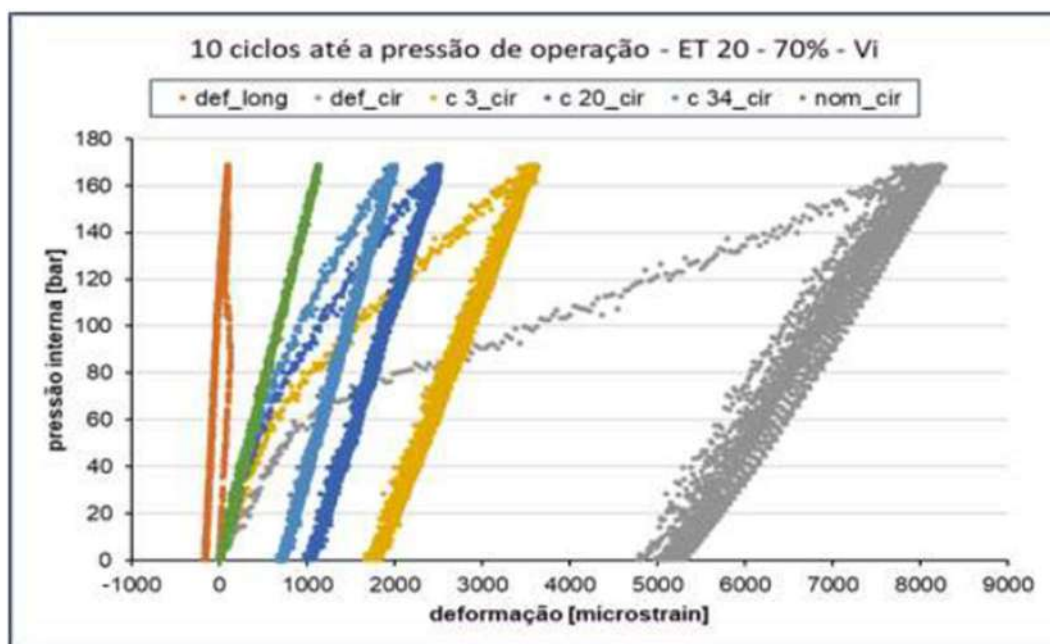
ET16 - O extensômetro c9_cir não apresentou resposta de deformação.

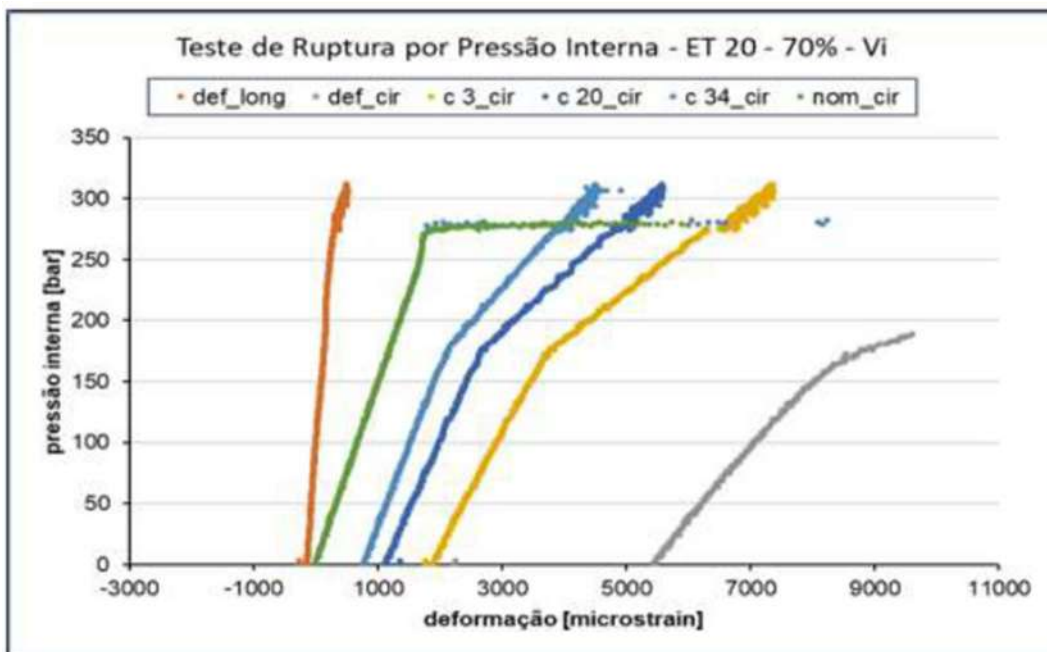




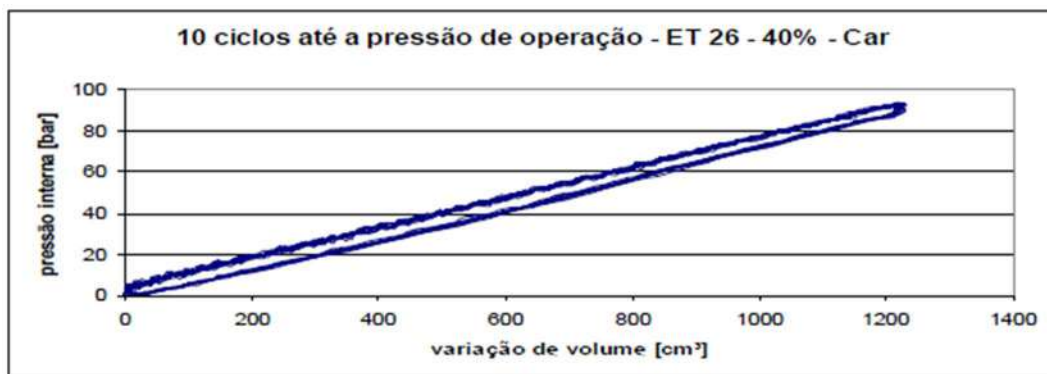


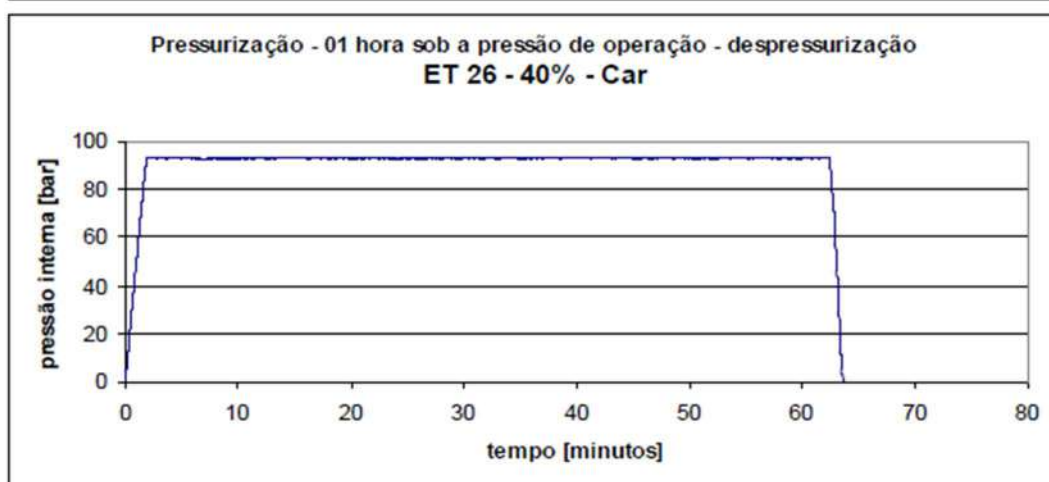
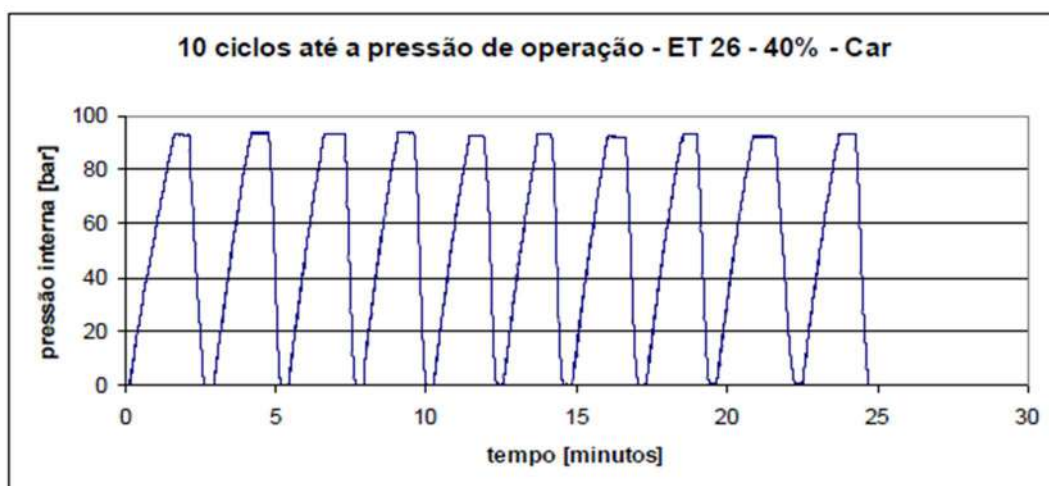


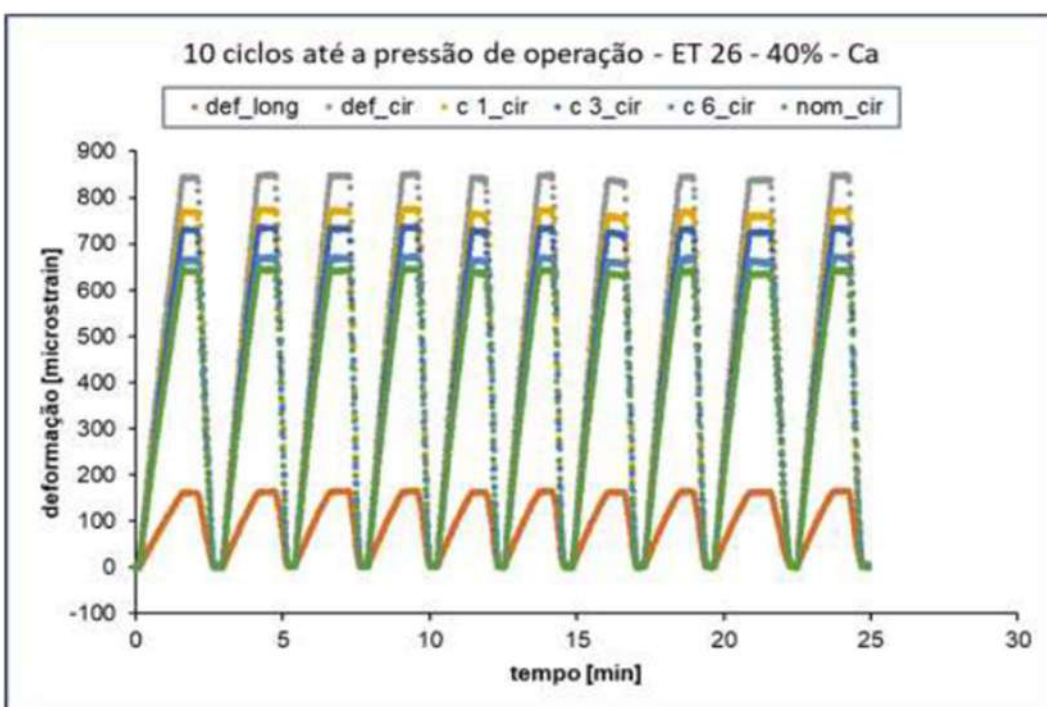
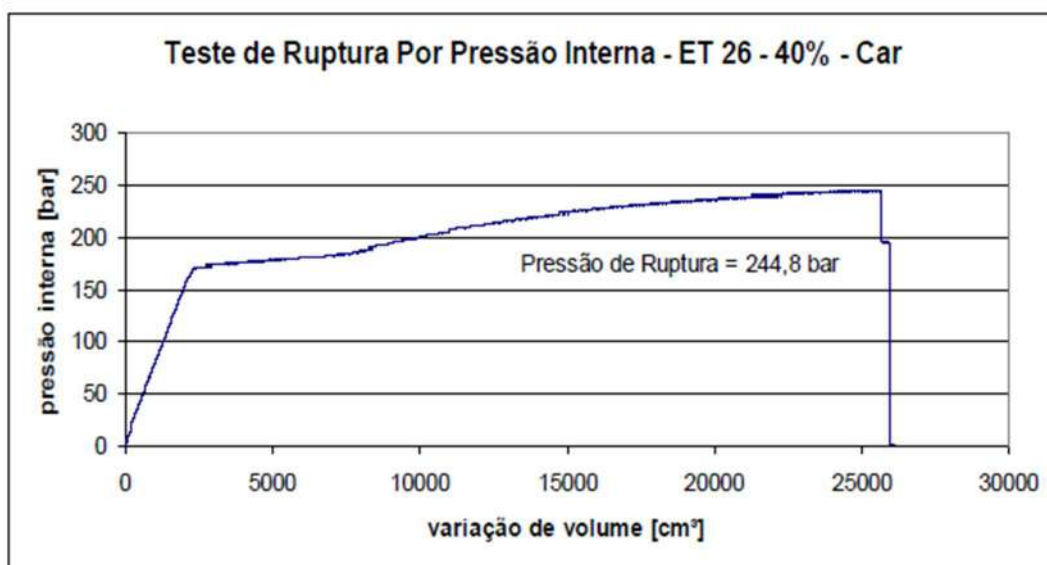
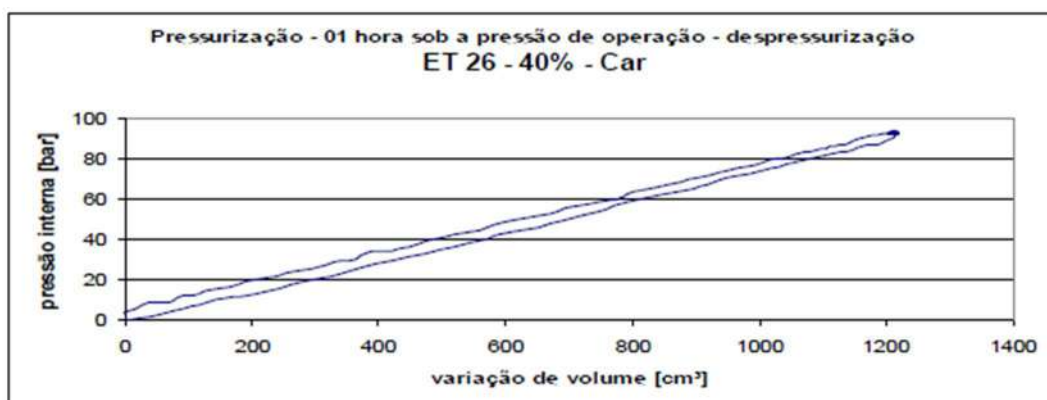


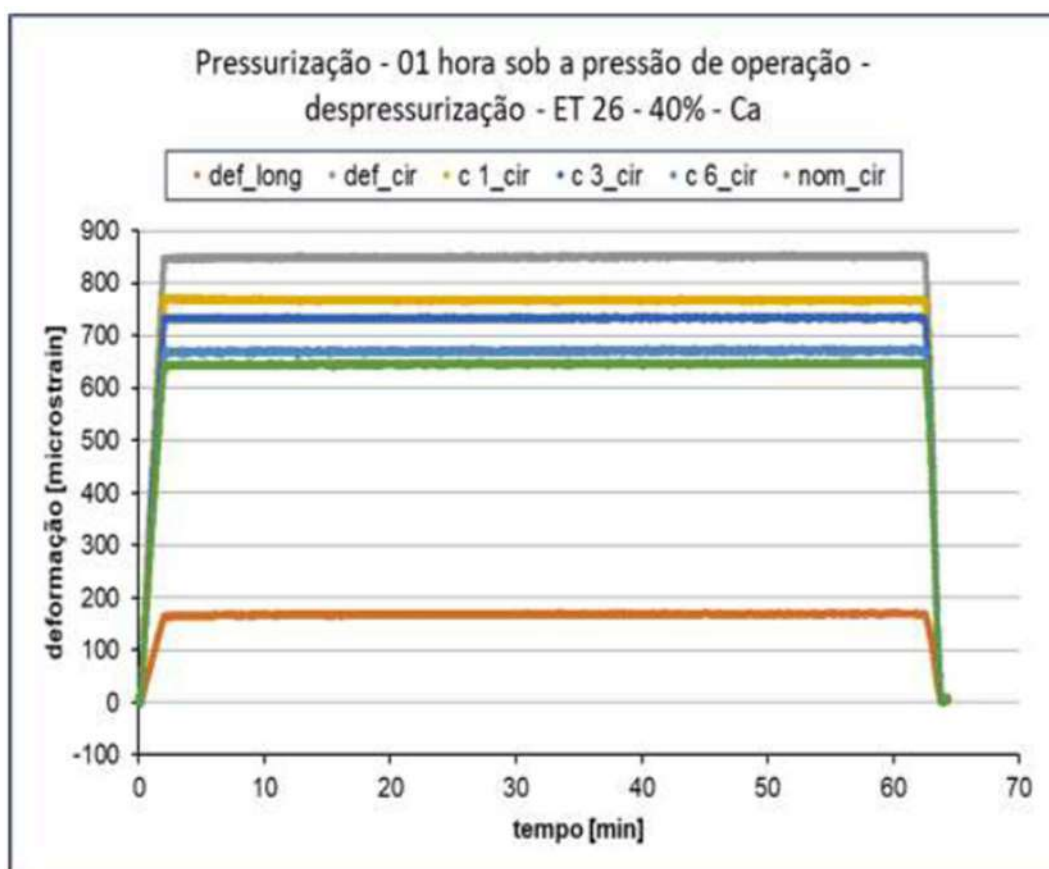
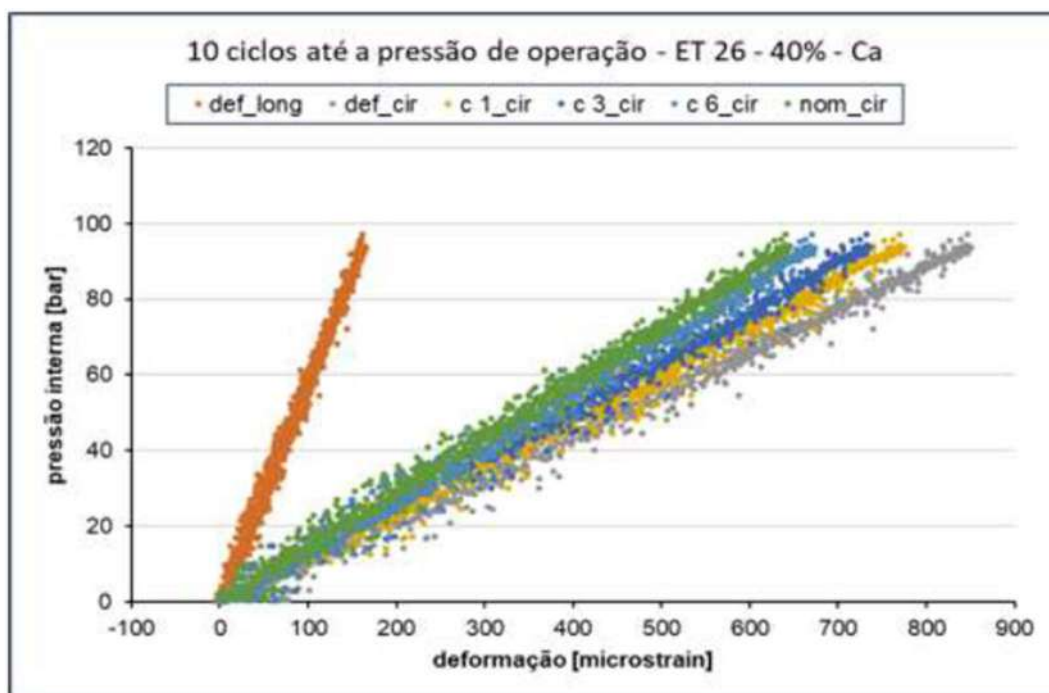


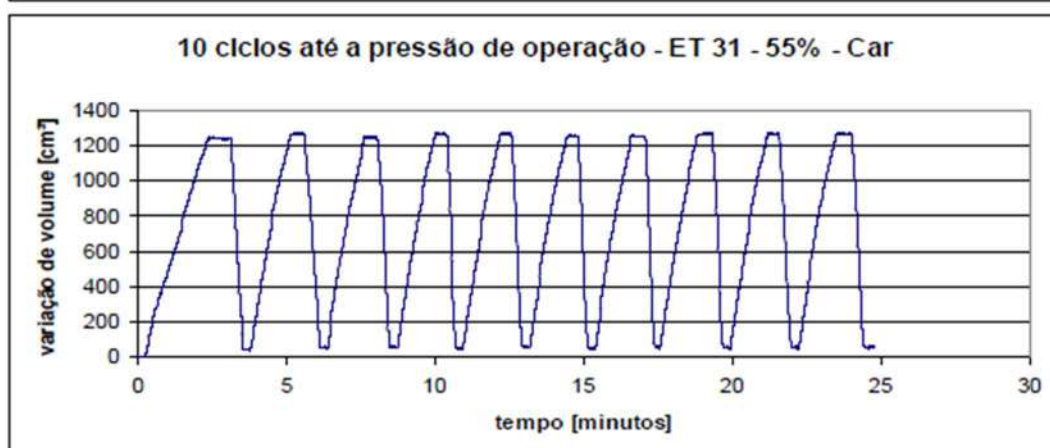
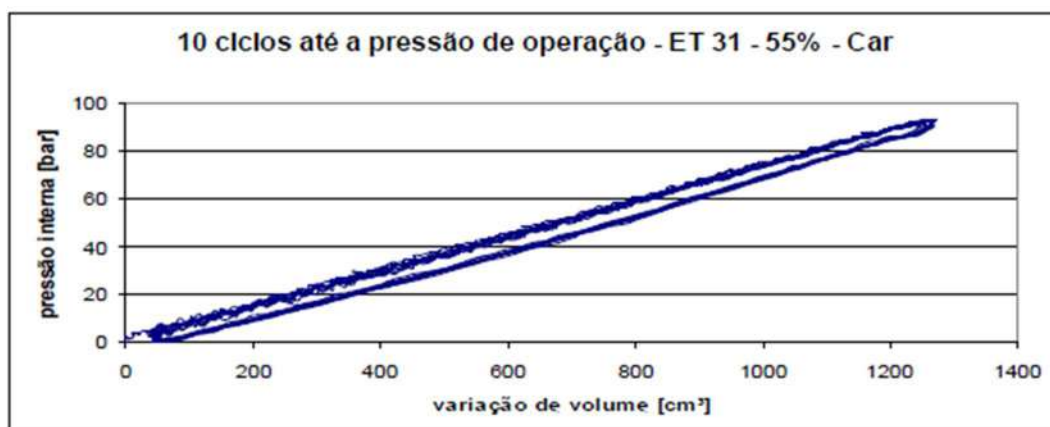
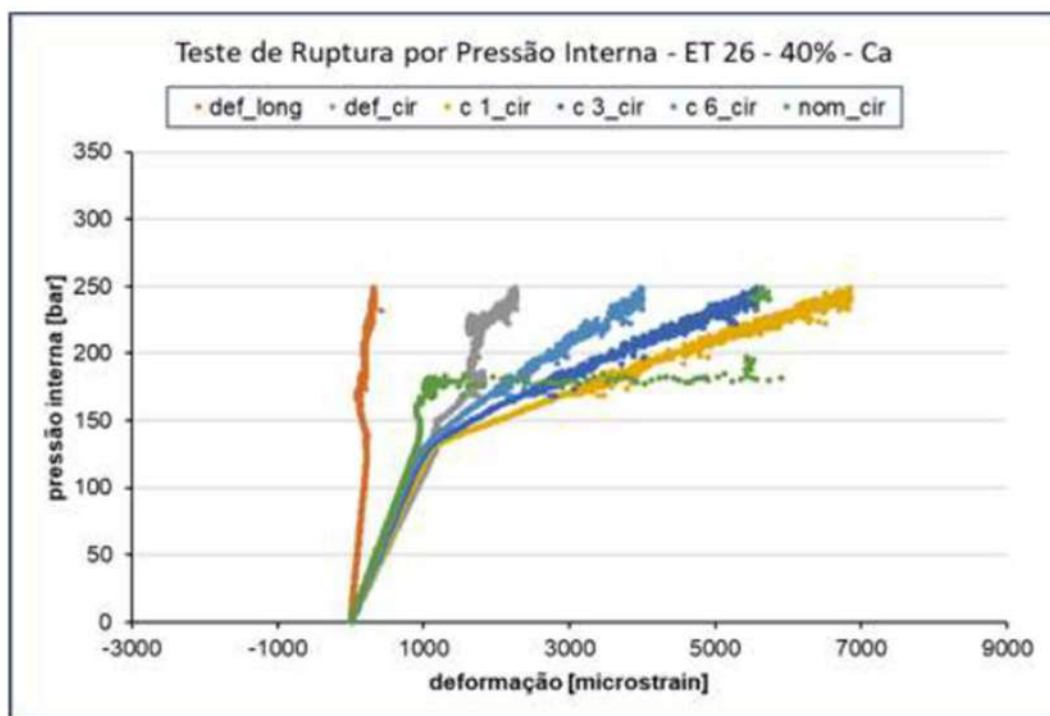
No espécime ET 20, um estalo foi ouvido alguns minutos depois de finalizado o ciclo de pressurização (após total despressurização). Os degraus observados nas deformações medidas indicam um descolamento entre o tubo e o reparo, visto que o reparo foi aplicado no tubo pressurizado.

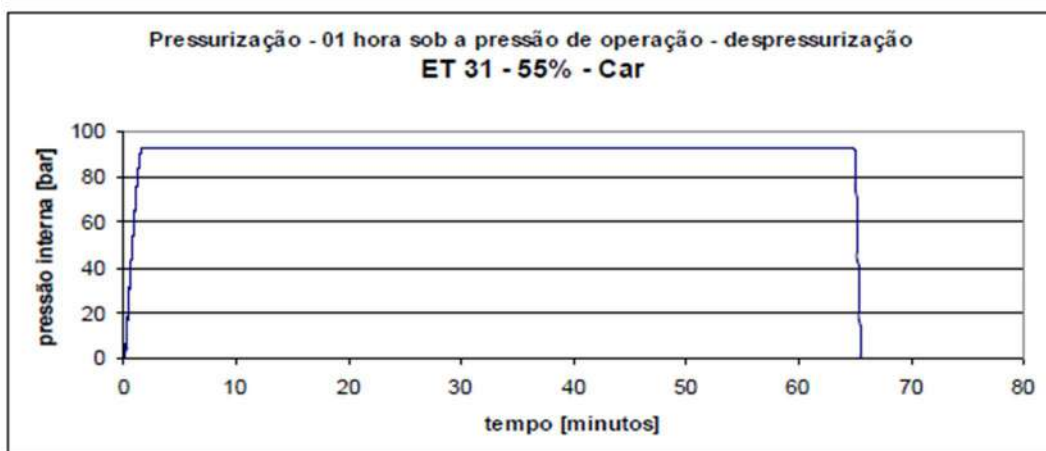


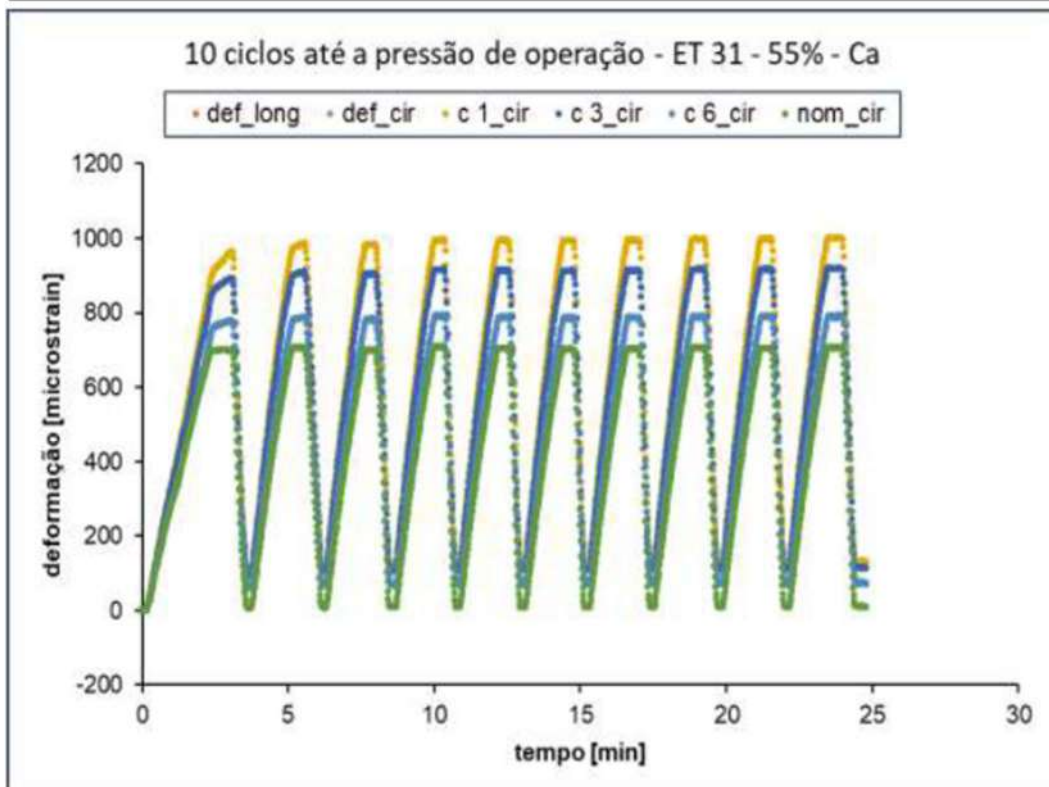
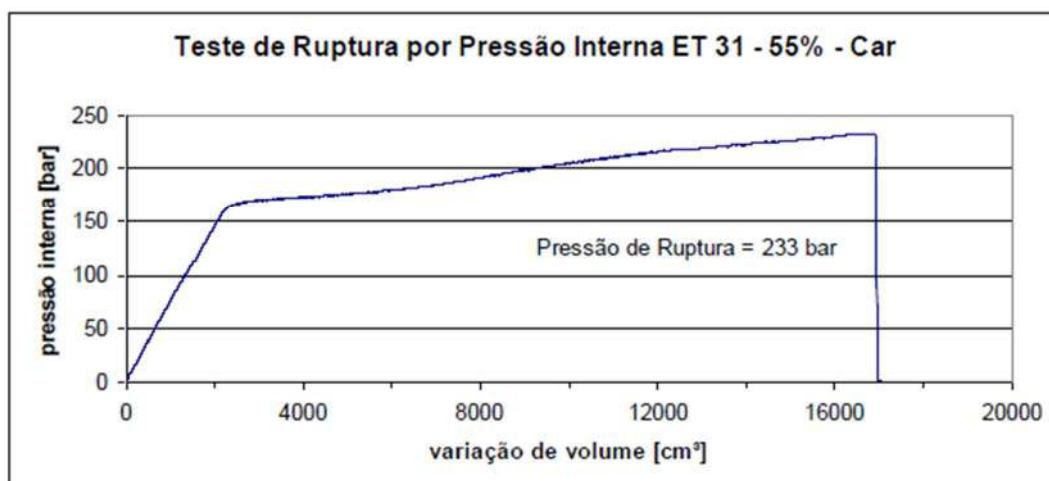
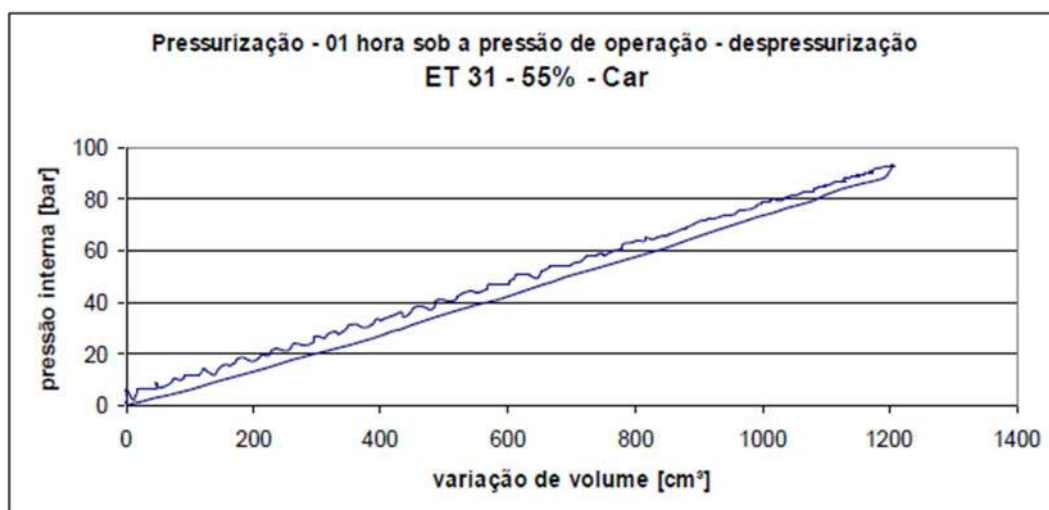


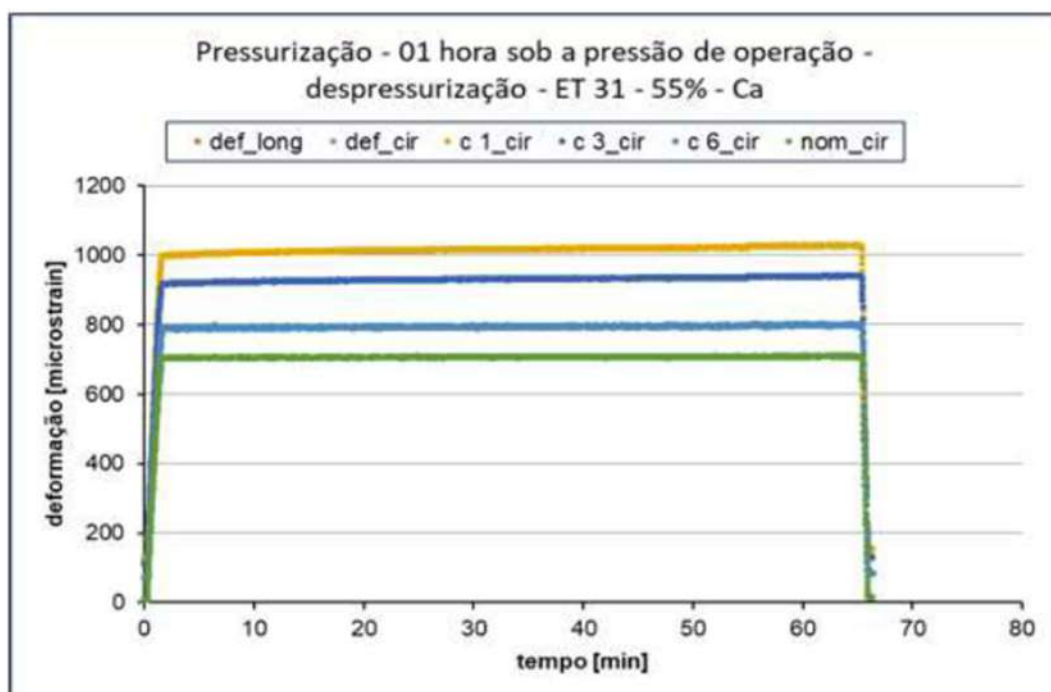
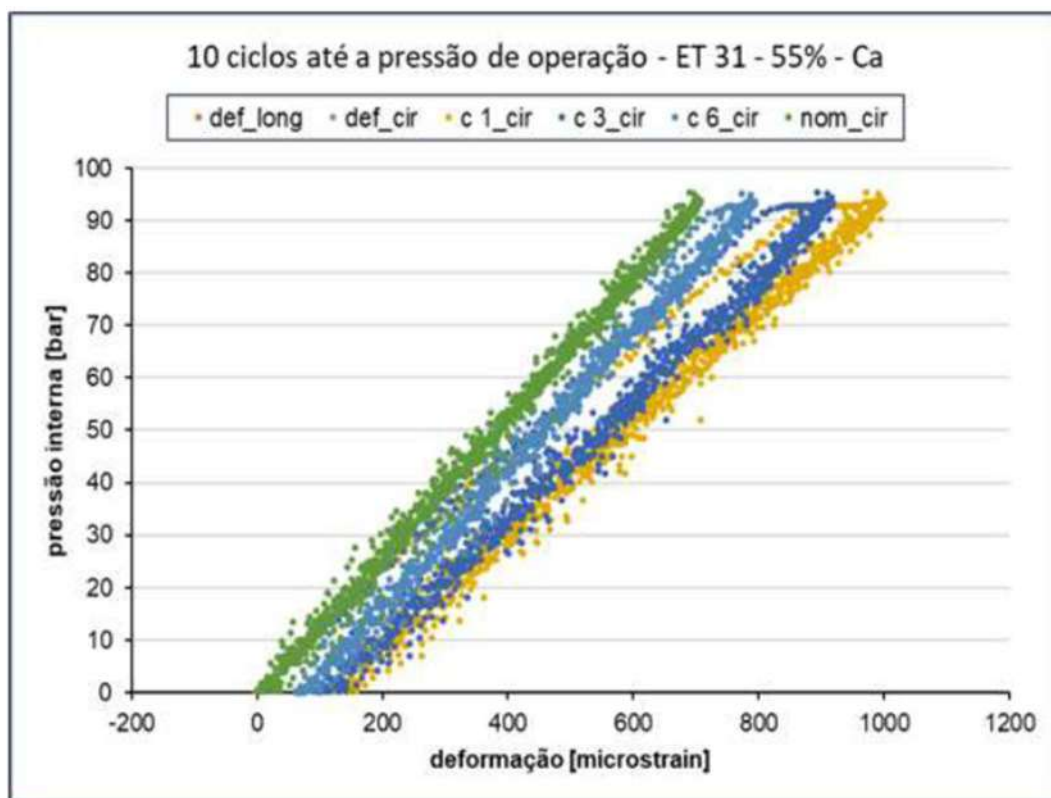


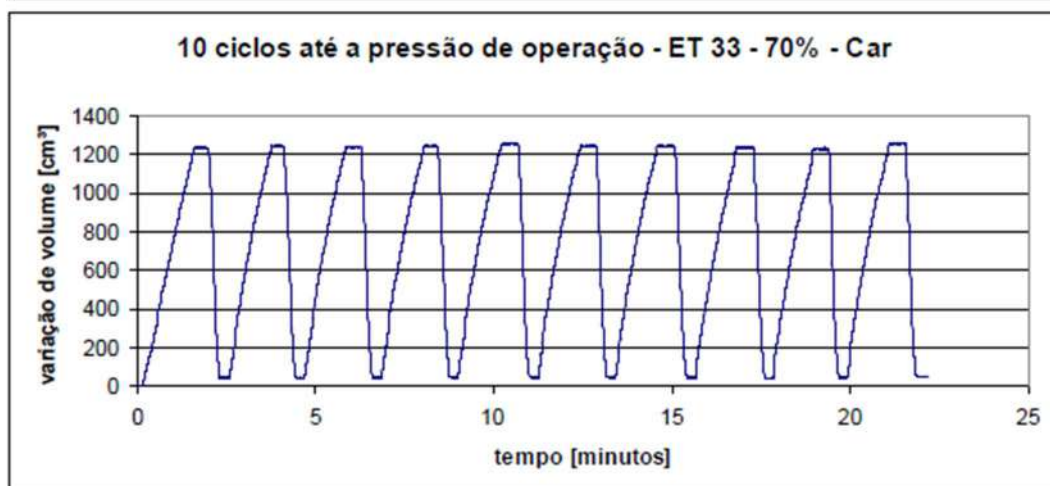
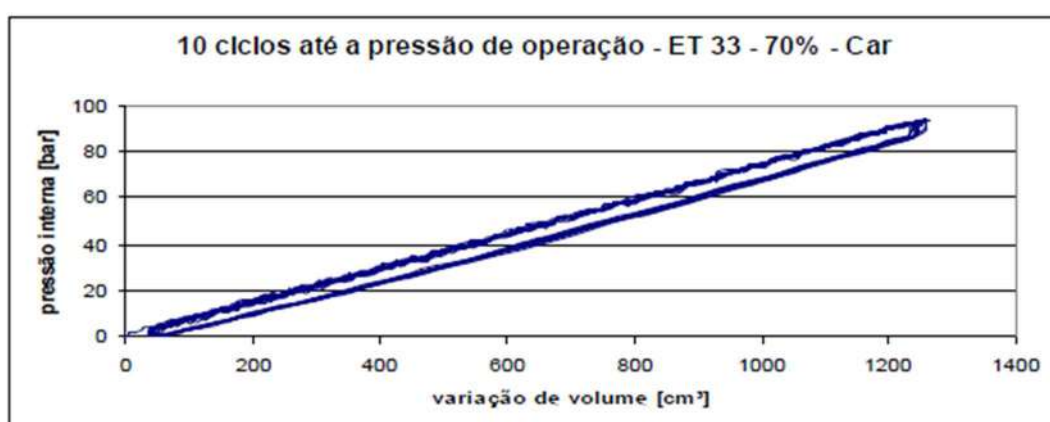
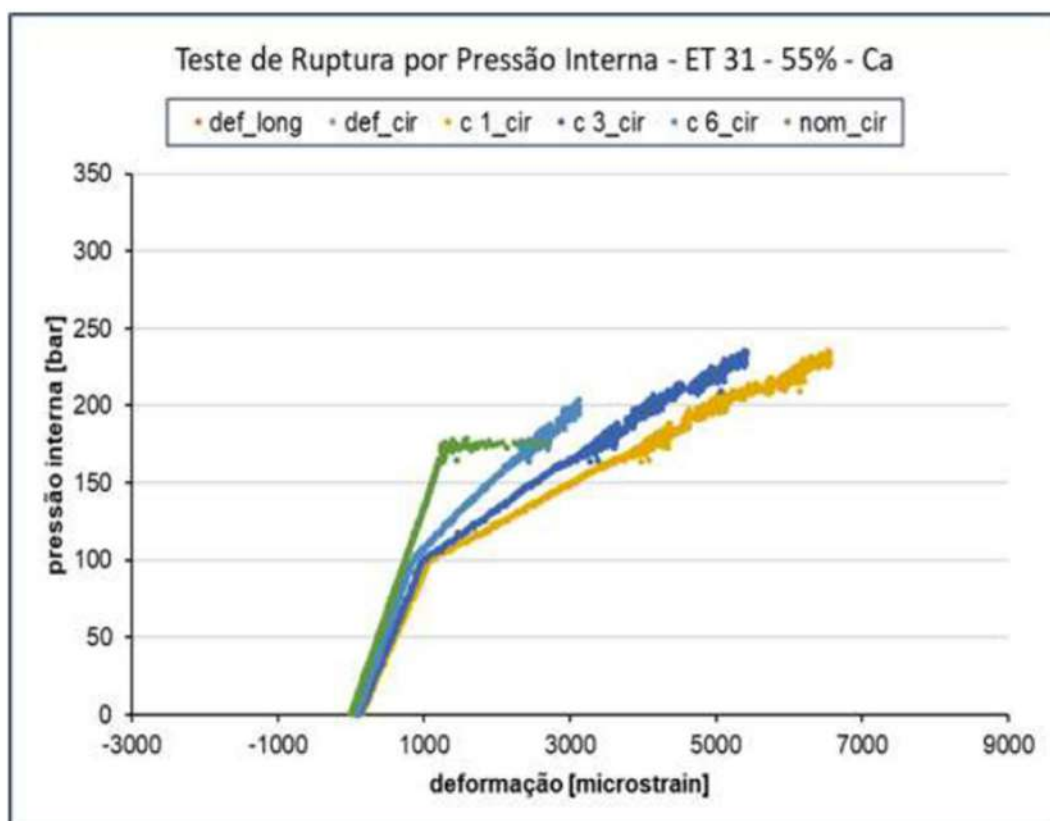


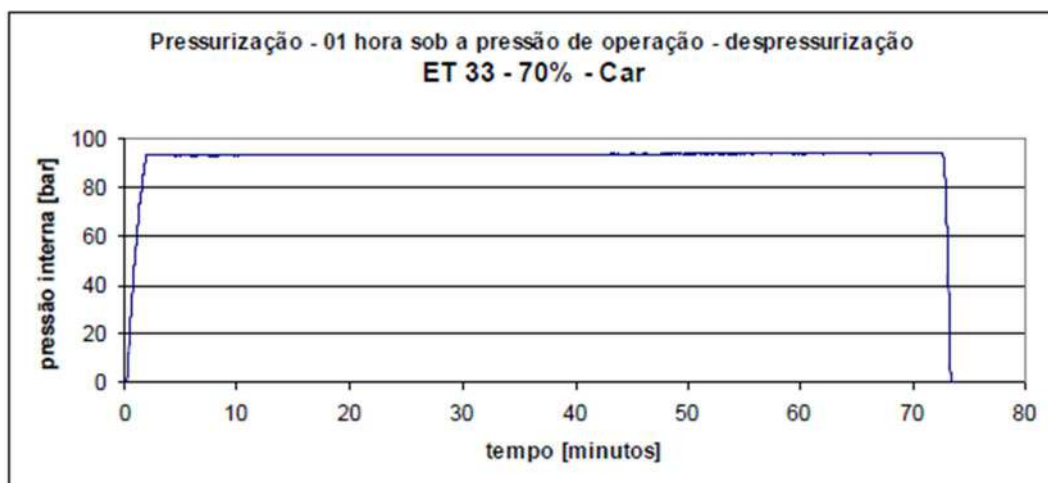


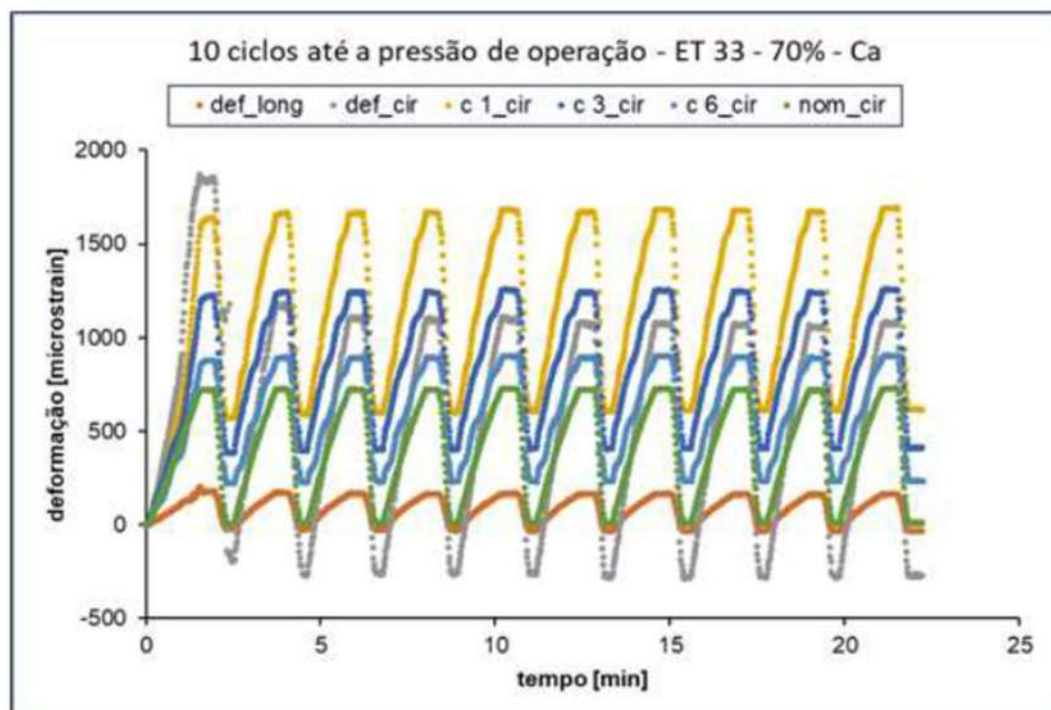
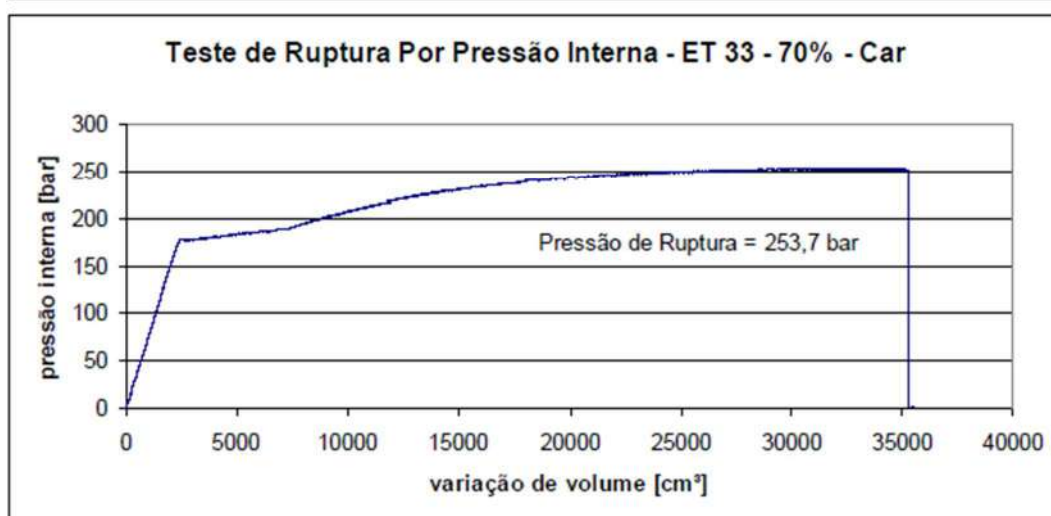
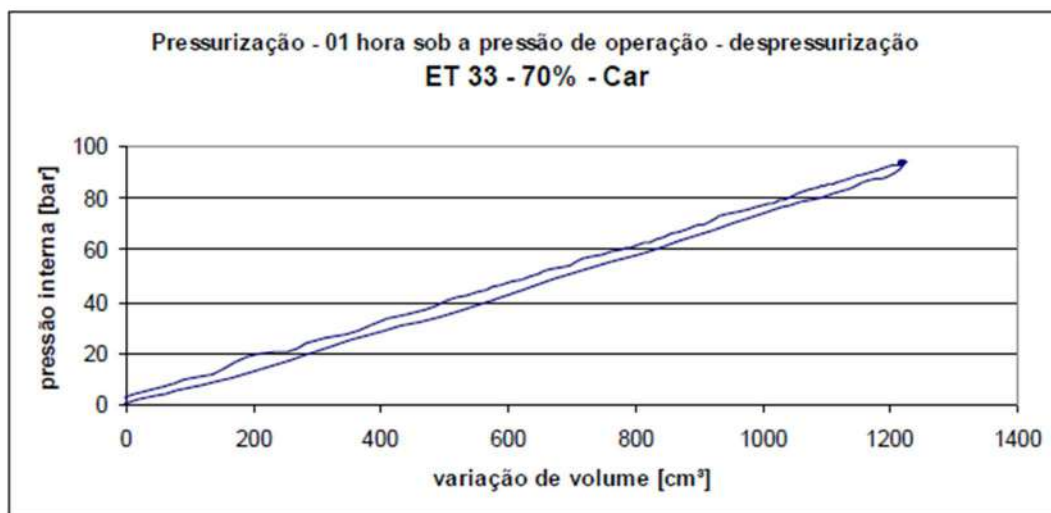


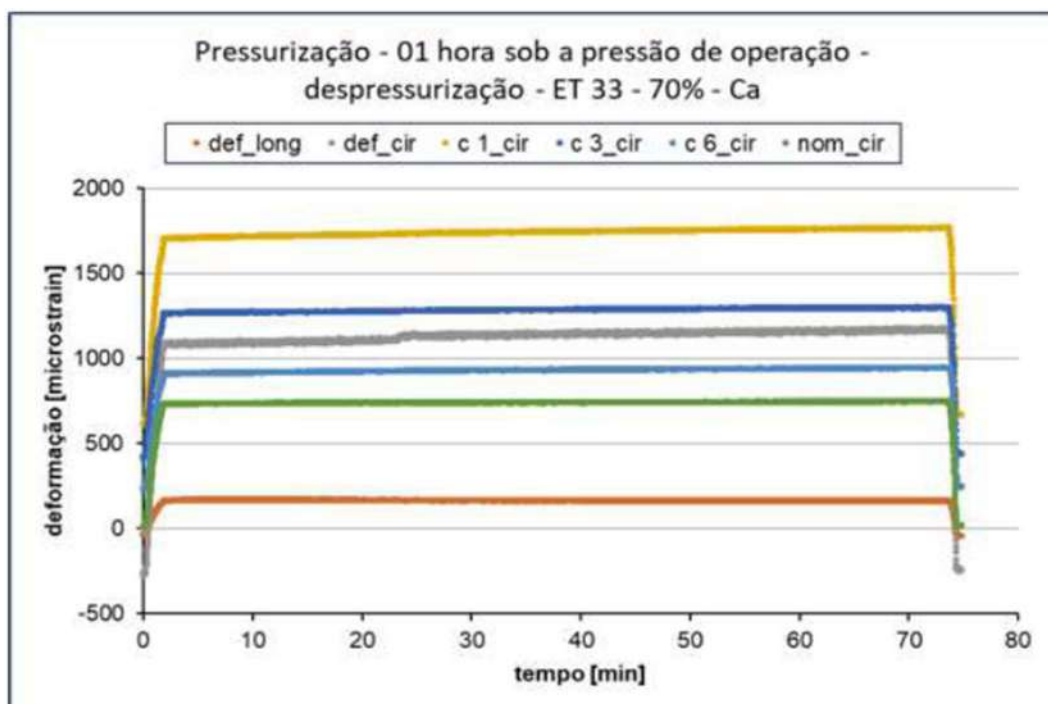
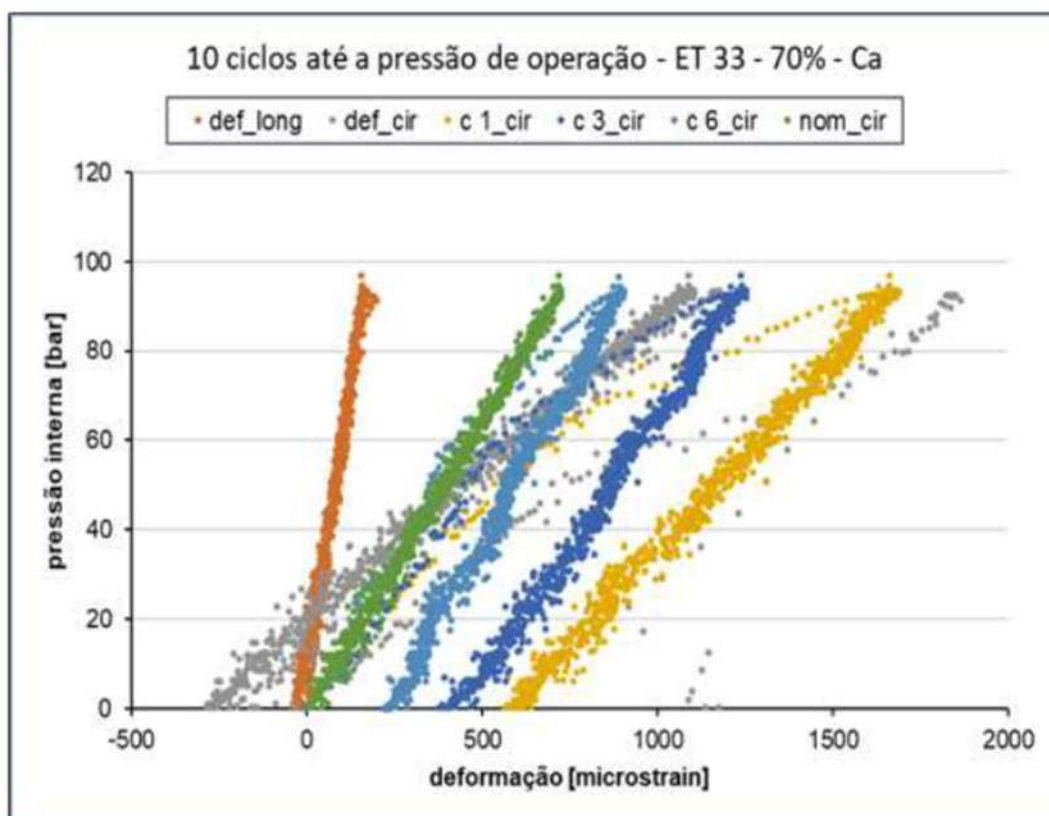


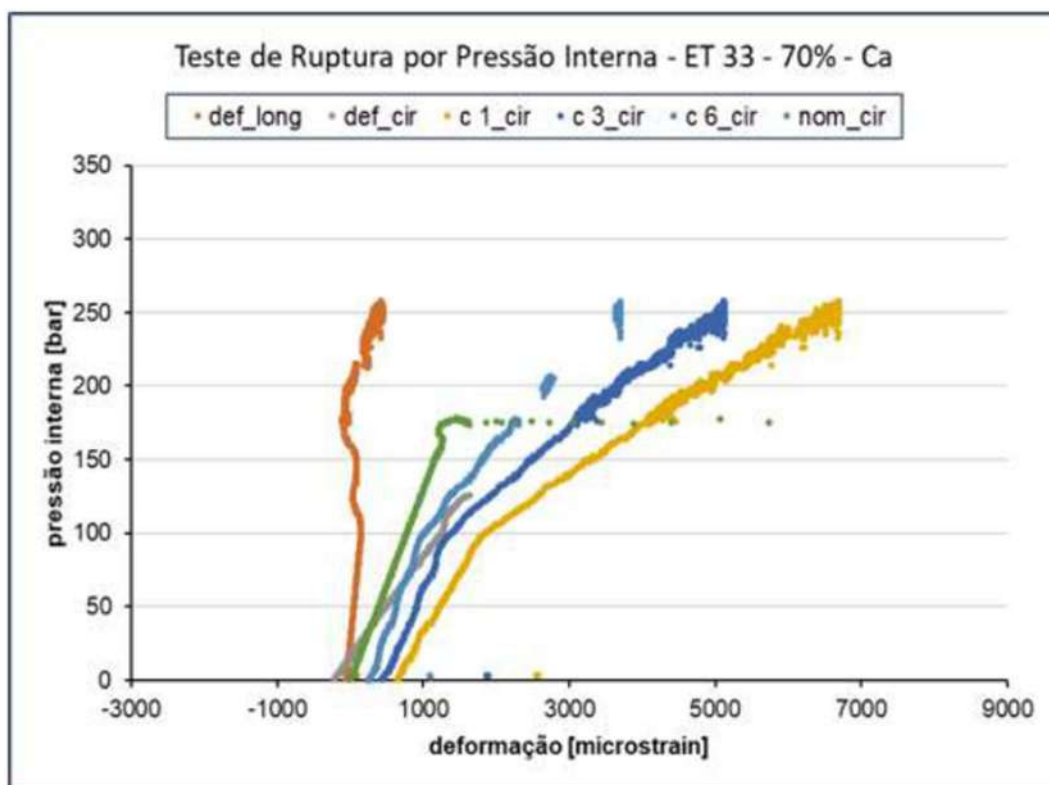












Os resultados permitem concluir que:

1) Os nove ETs testados apresentaram pressões de ruptura com valores semelhantes às pressões de ruptura dos tubos sem defeito, indicando que os nove reparos foram eficazes em restabelecer a resistência de “tubo novo”.

2) Os três ETs com reparos em fibra de vidro e resina epóxi, realizados pelo Fornecedor 2, apresentaram ruptura no tubo fora do reparo, o que sugere o restabelecimento total da resistência do tubo novo.

3) Dois dos três ETs com reparos em fibra de vidro e resina de poliuretano, realizados pelo Fornecedor 1, apresentaram ruptura no defeito sob o reparo, mas sob pressões altas e semelhantes à pressão de ruptura do tubo novo. Um dos três ETs apresentou ruptura no tubo fora do reparo, o que indica o restabelecimento total da resistência do tubo novo.

4) Resultados semelhantes aos dos reparos Fornecedor 1 foram obtidos com os reparos em fibra de carbono e resina epóxi realizados pelo Fornecedor 3. Dois dos três ETs apresentaram ruptura no defeito sob o reparo, mas sob pressões altas e semelhantes à pressão de ruptura do tubo novo. Um dos três ETs apresentou ruptura no tubo fora do reparo, o que indica o restabelecimento total da resistência do tubo novo.

5) Os ET 26, ET 31 e ET 33 apresentaram menores deformações do que os demais espécimes principalmente devido à pressão de operação ter sido bem inferior (91 bar para Gr. B contra 167 bar para X65).

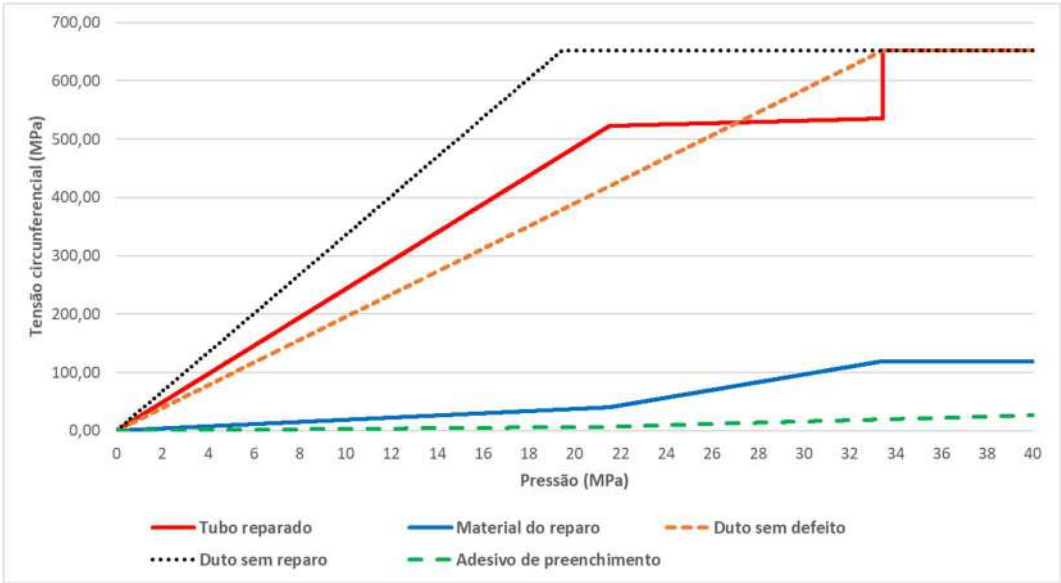
6) Os ET 9, ET 12 e ET 16 apresentaram indicação de alguma acomodação do defeito (deformações plásticas) sob o reparo nas pressurizações até a pressão de operação.

7) O ET 20 apresentou indicação de alguma acomodação do defeito sob o reparo no primeiro ciclo até a pressão de operação.

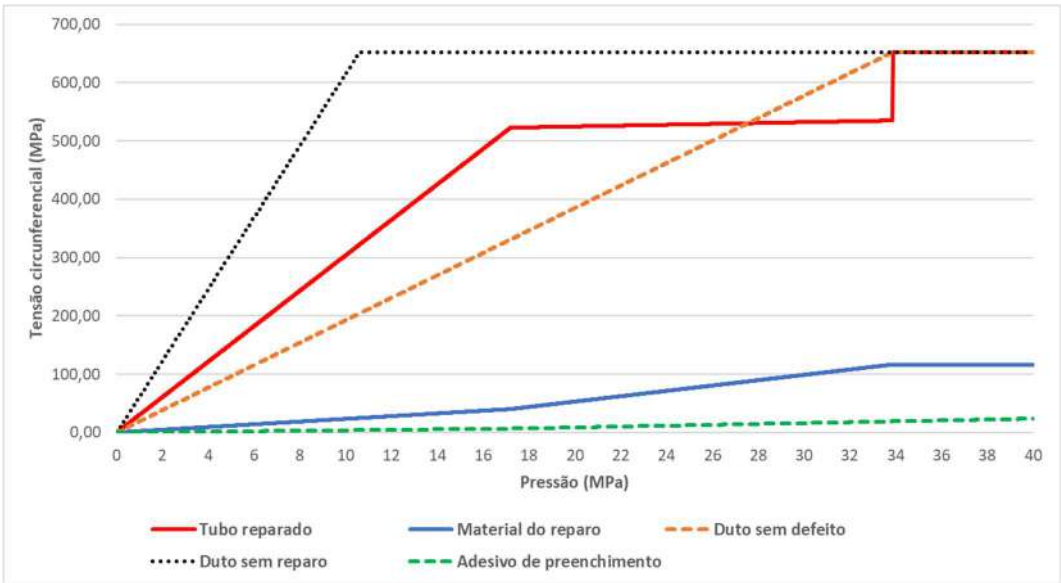
8) O espécime ET 26 apresentou rasgamento do reparo, antes da ruptura no defeito.

9) Somente o ET 16 apresentou ruptura no defeito sob o reparo, sem rasgamento do reparo.

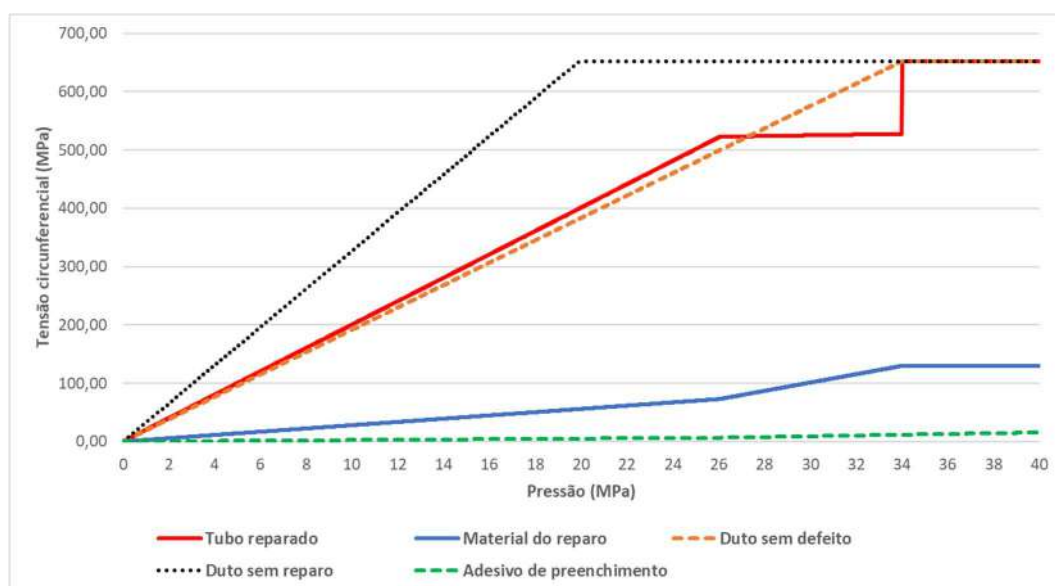
Apêndice II – Resultados Analíticos



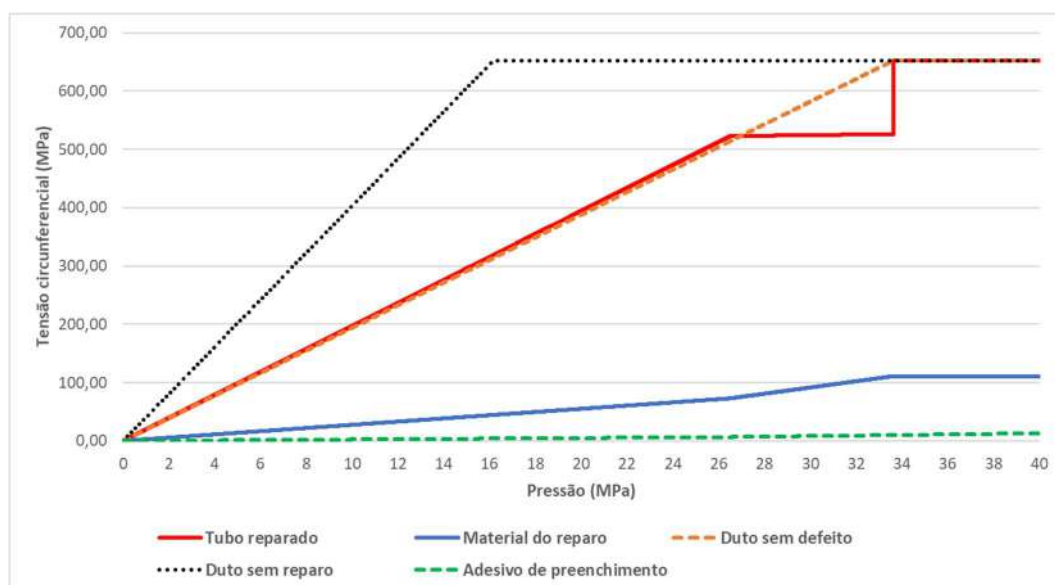
ET03 (Fornecedor 1)



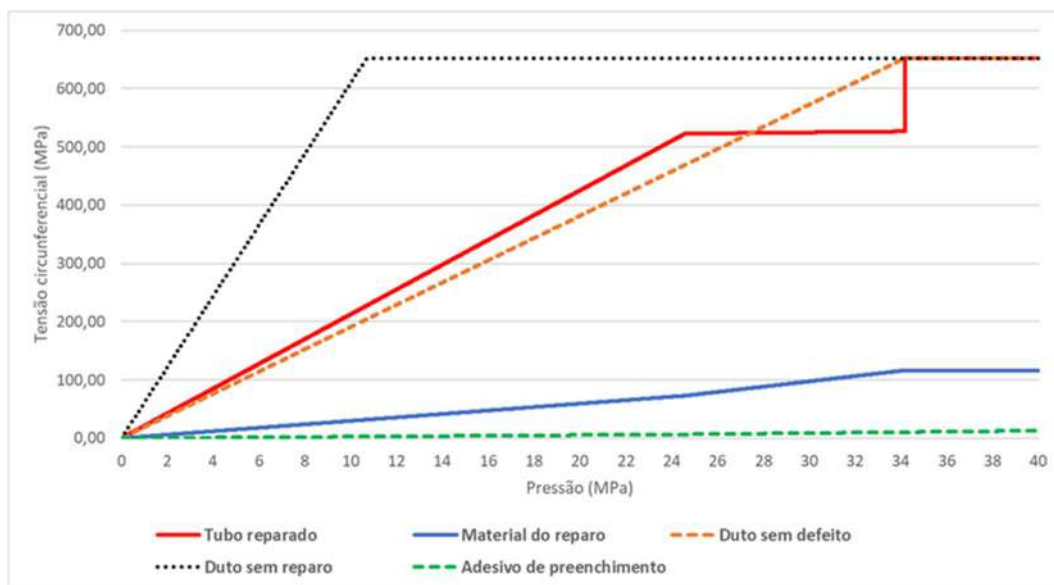
ET16 (Fornecedor 1)



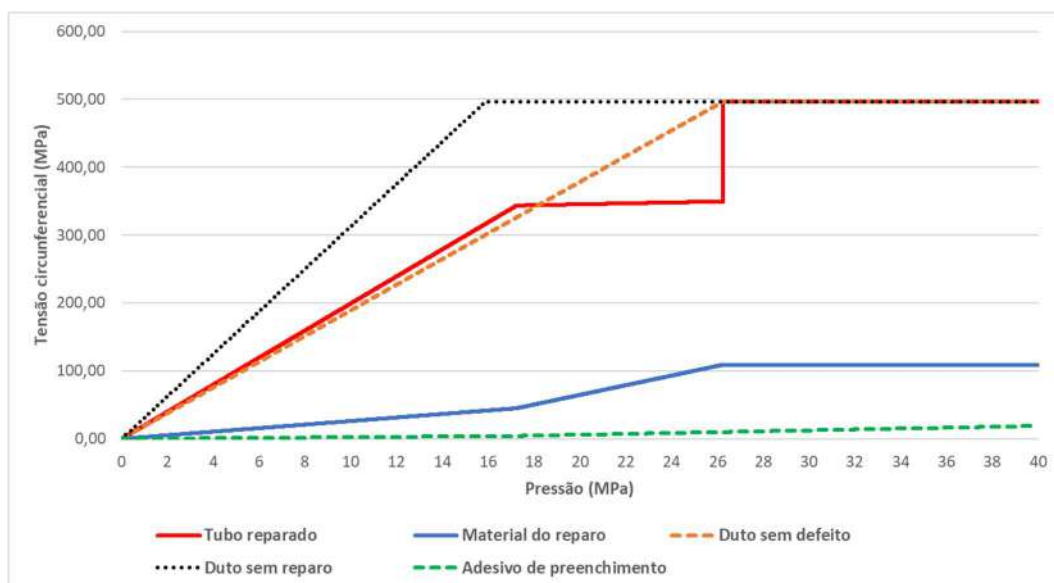
ET05 (Fornecedor 2)



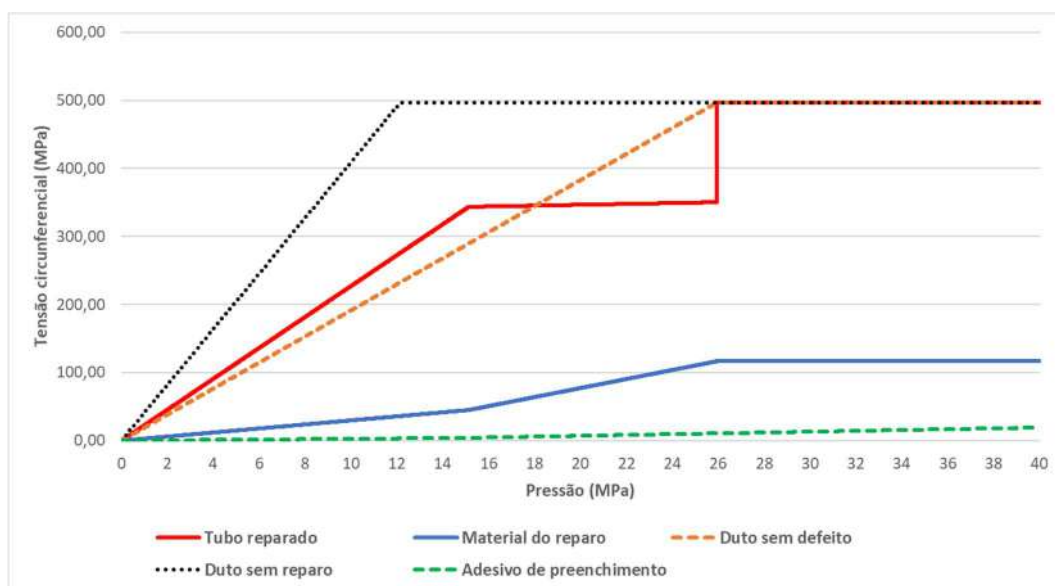
ET09 (Fornecedor 2)



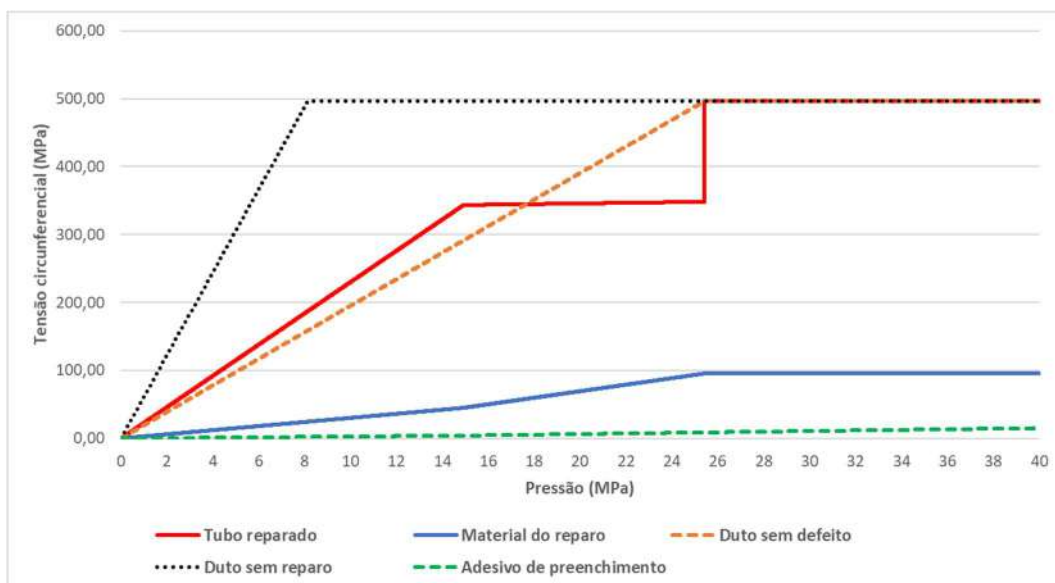
ET20 (Fornecedor 2)



ET26 (Fornecedor 3)



ET31 (Fornecedor 3)

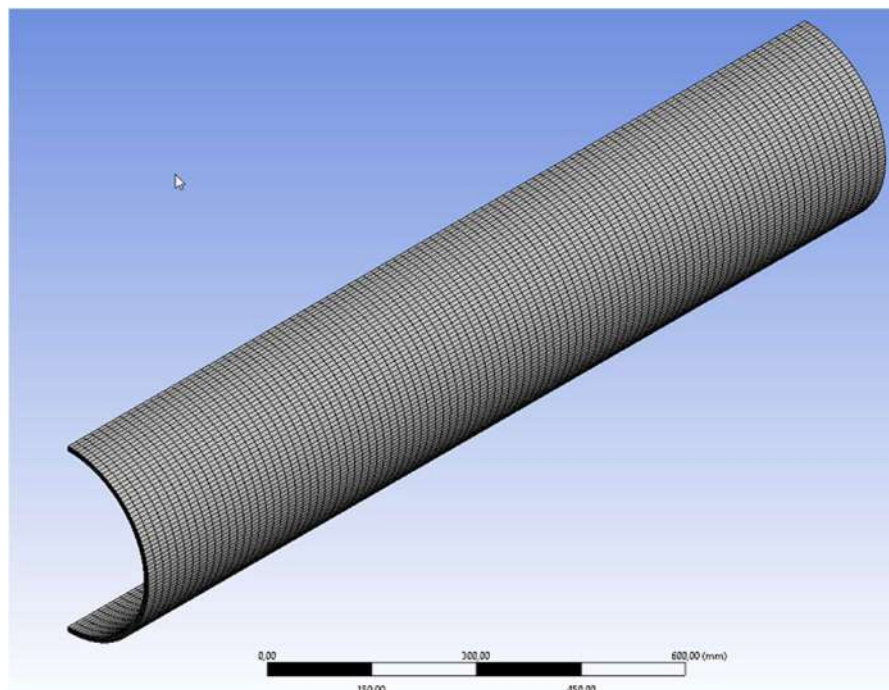


ET33 (Fornecedor 3)

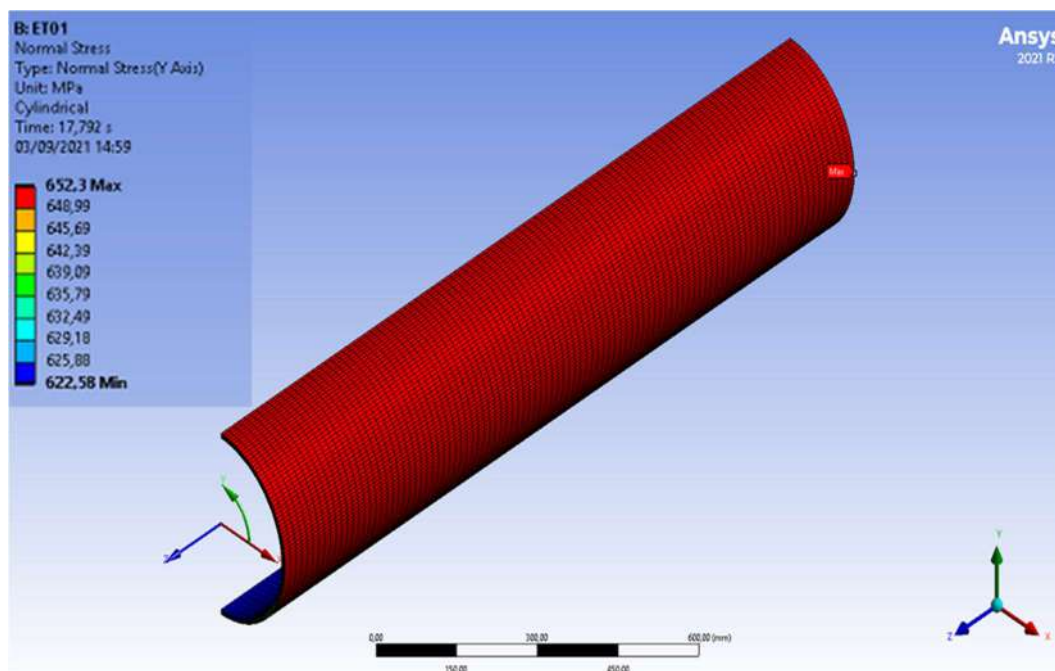
Apêndice III – Resultados Numéricos

As Figuras abaixo mostram os resultados obtidos por elementos finitos no Ansys para os espécimes sem reparo:

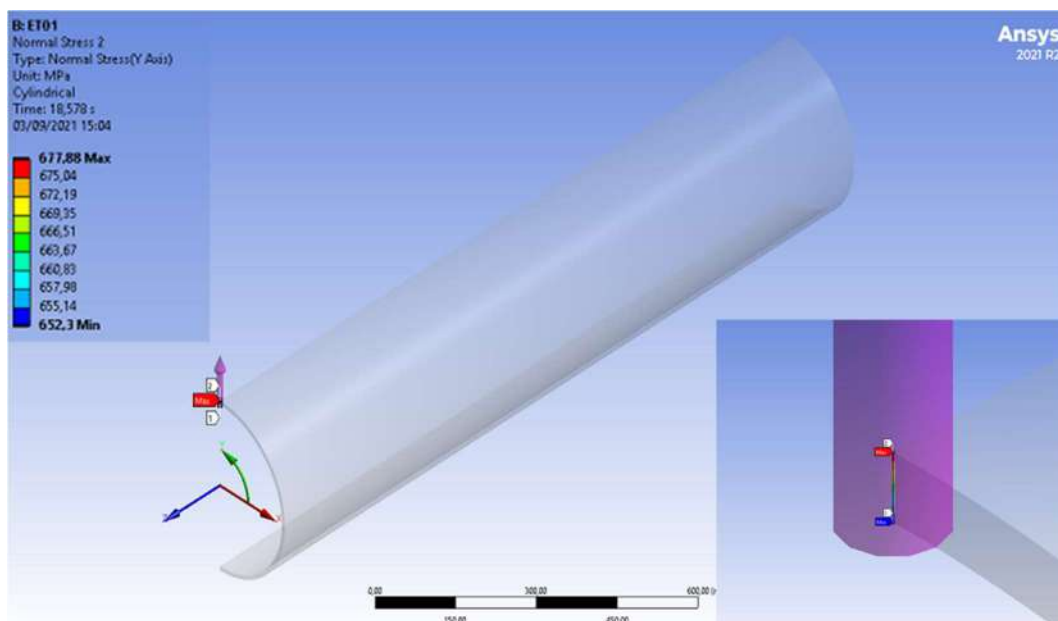
ET01:



Configuração da malha

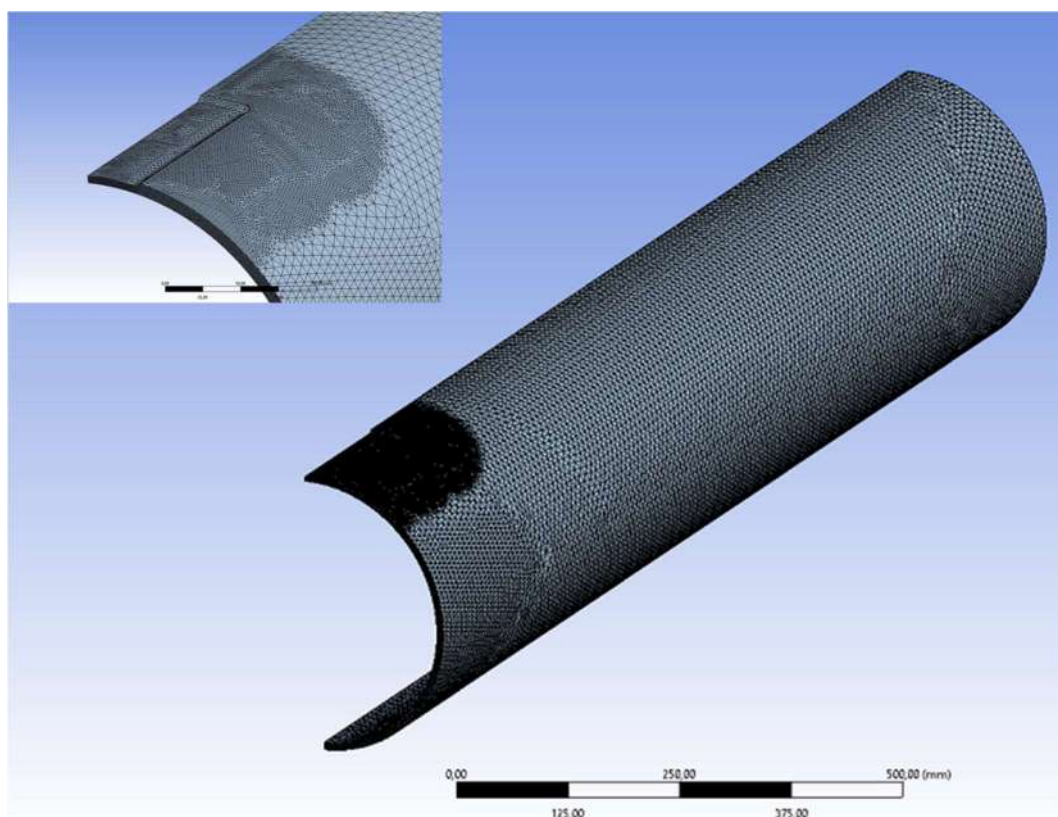


Tensão circunferencial (Lower Bond)

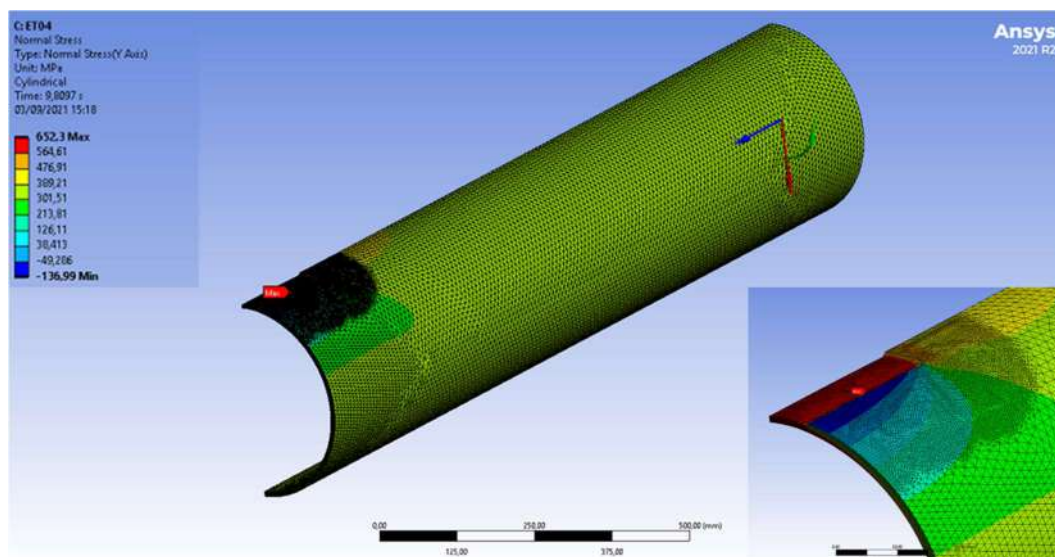


Tensão circunferencial (Upper Bond)

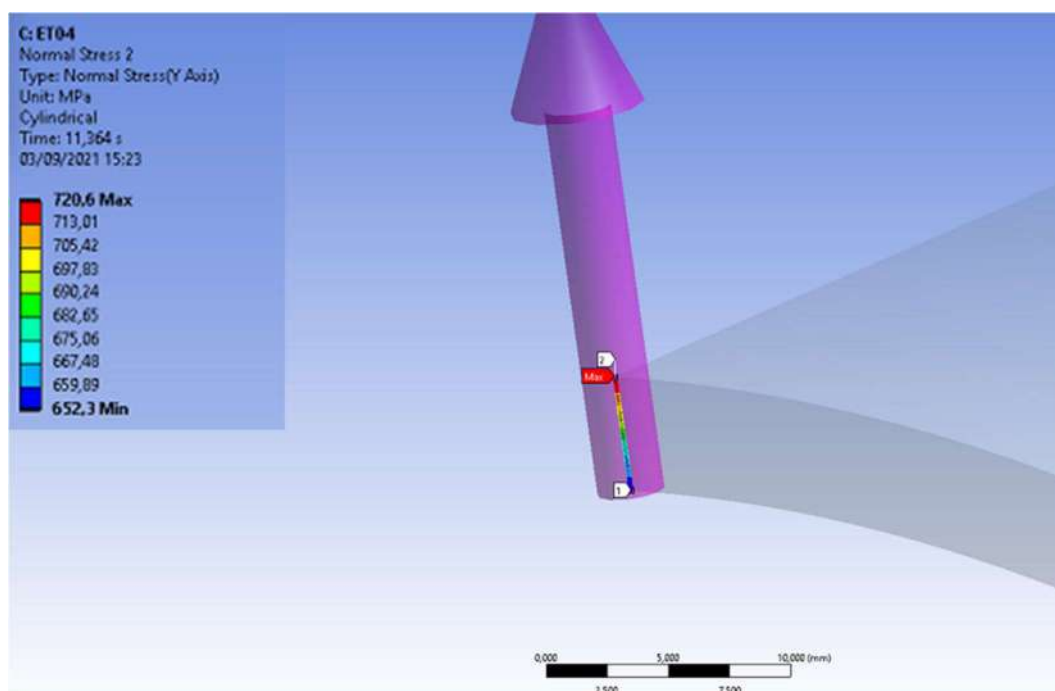
ET04:



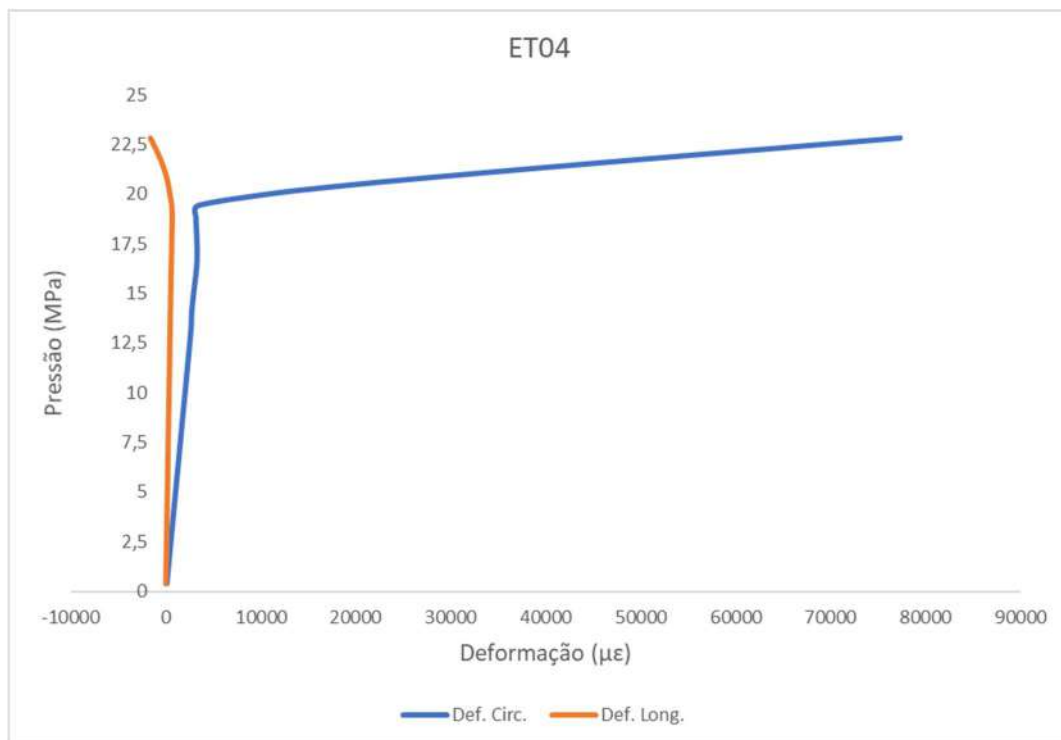
Configuração da malha



Tensão circunferencial (Lower Bond)

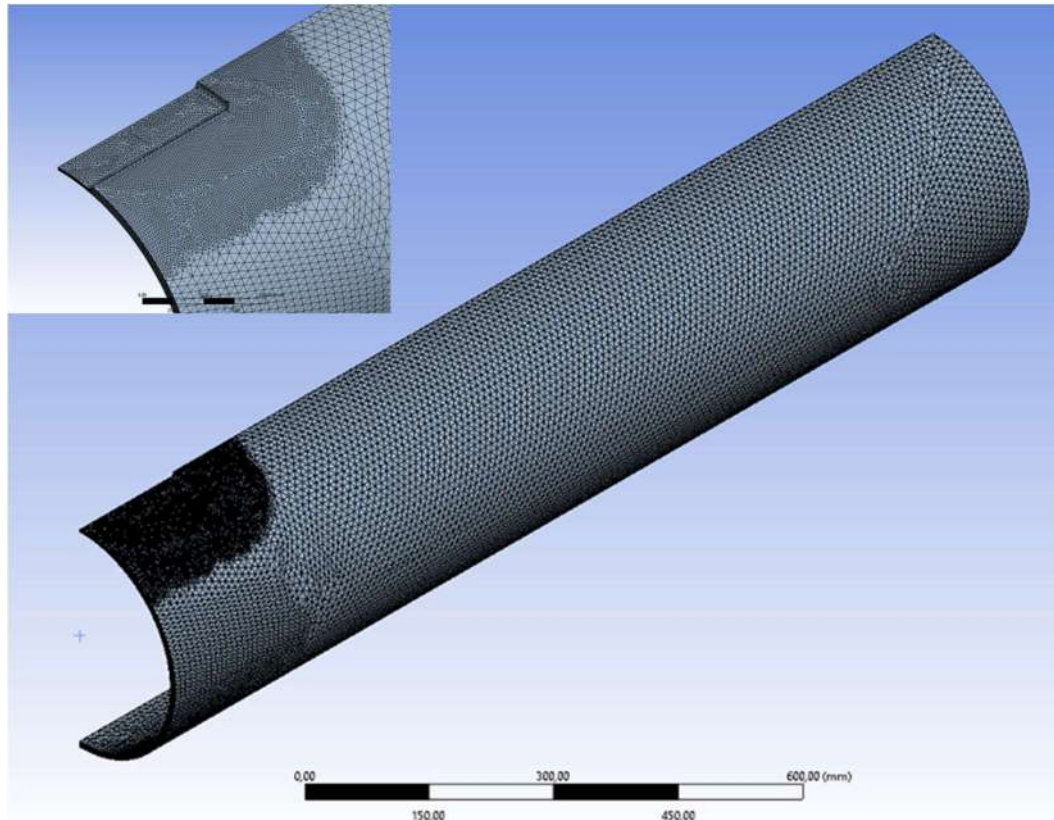


Tensão circunferencial (Upper Bond)

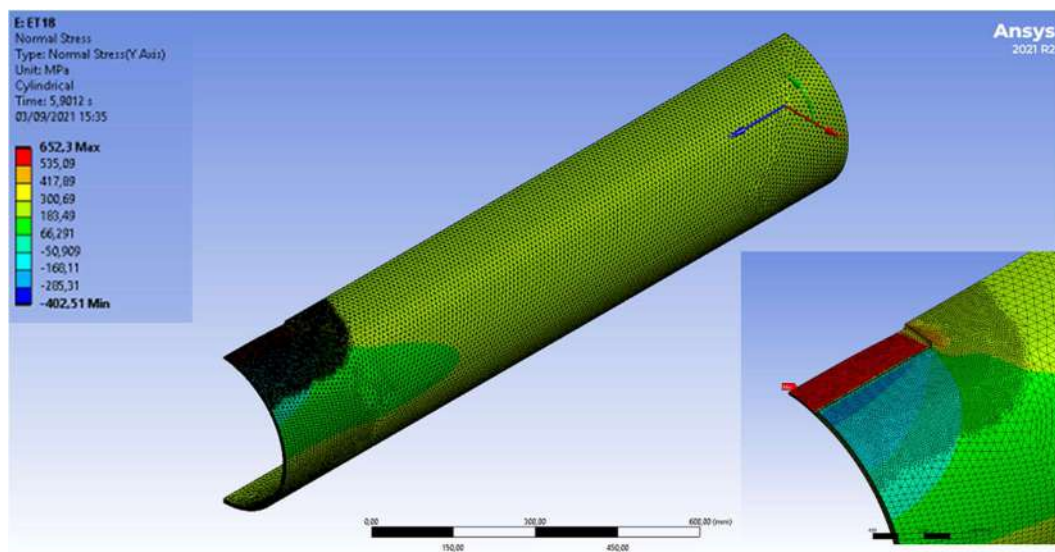


Deformações no centro do rebaixo

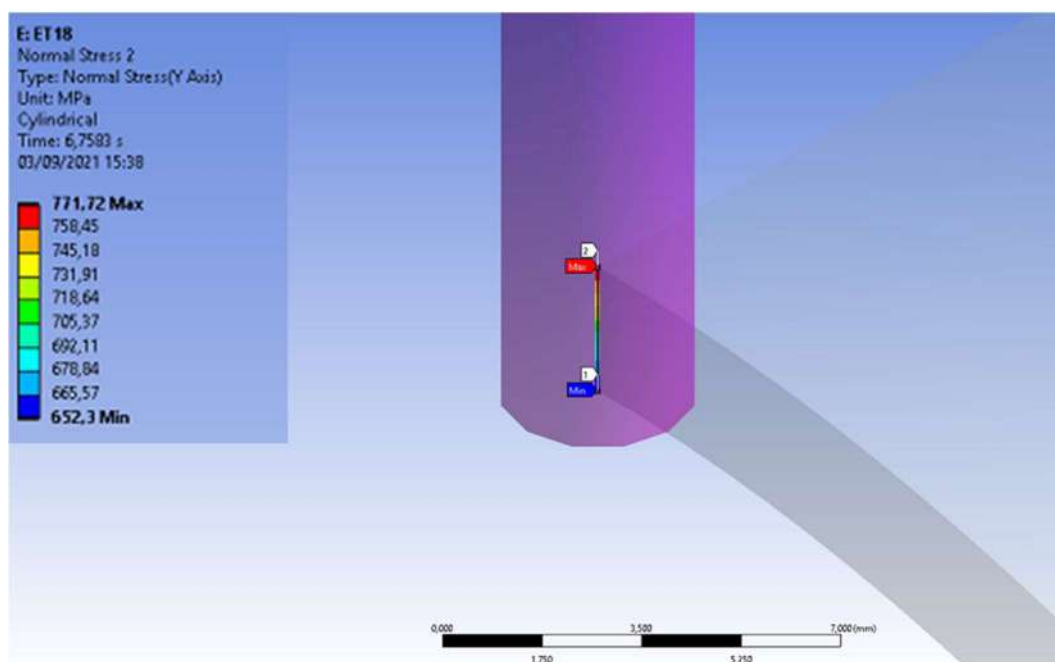
ET18:



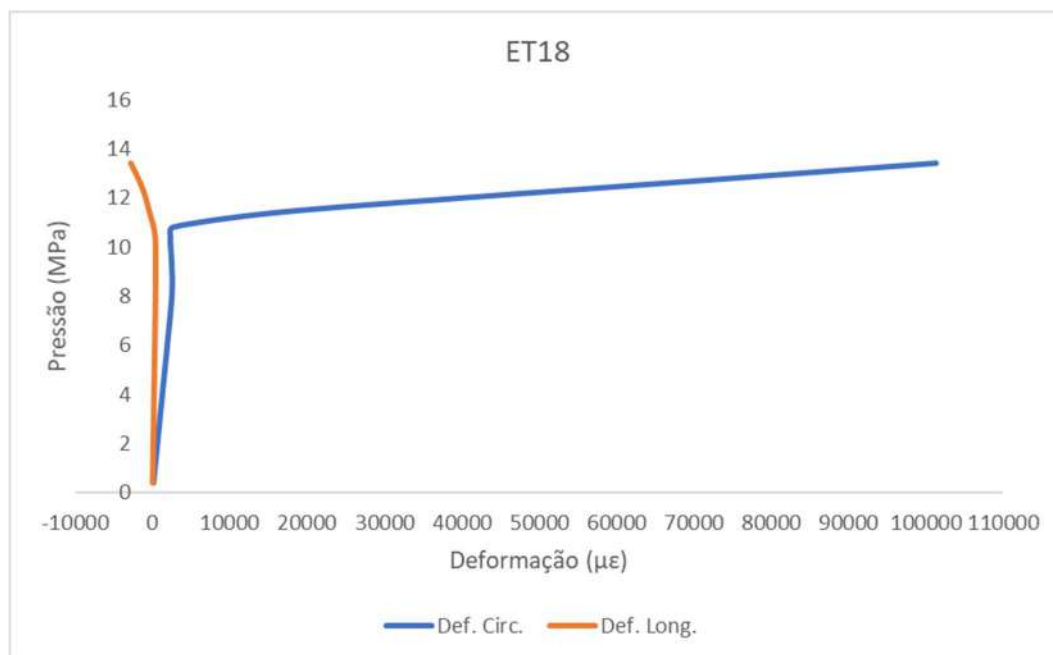
Configuração da malha



Tensão circunferencial (Lower Bond)

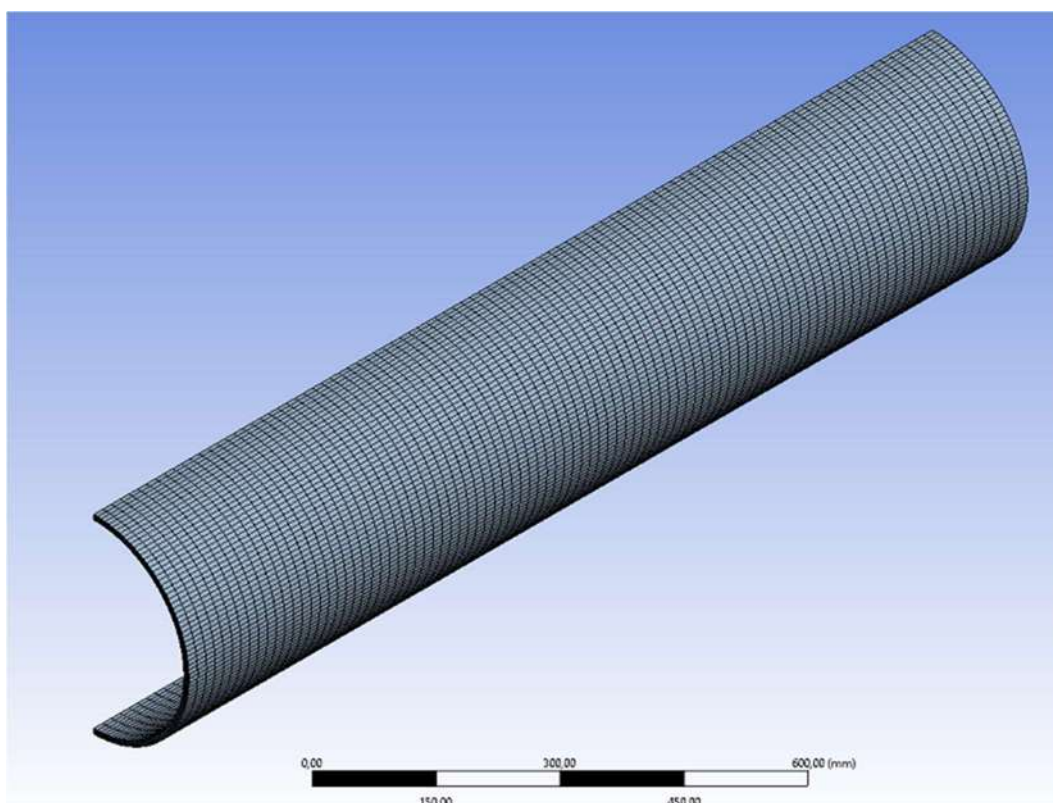


Tensão circunferencial (Upper Bond)

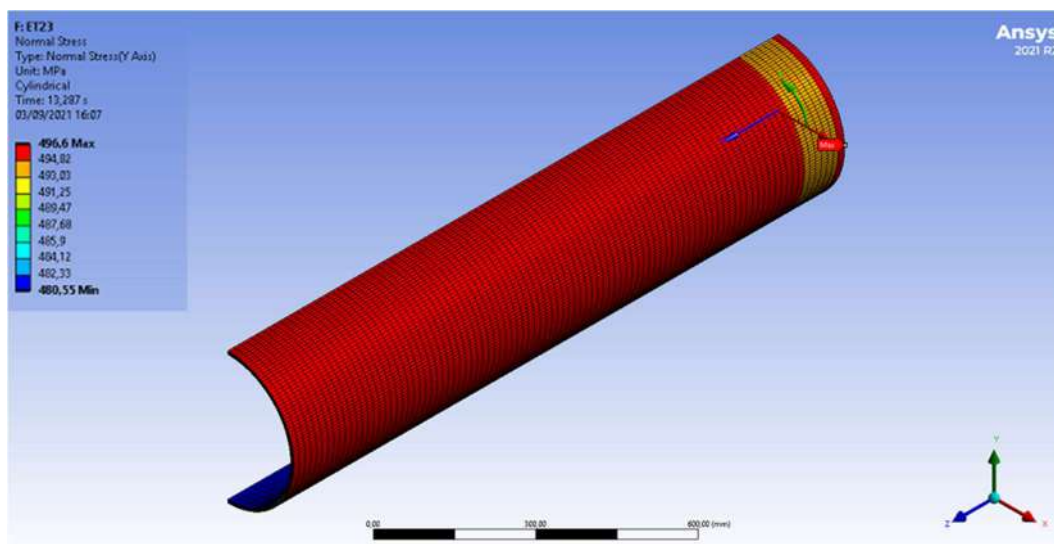


Deformações no centro do rebaixo

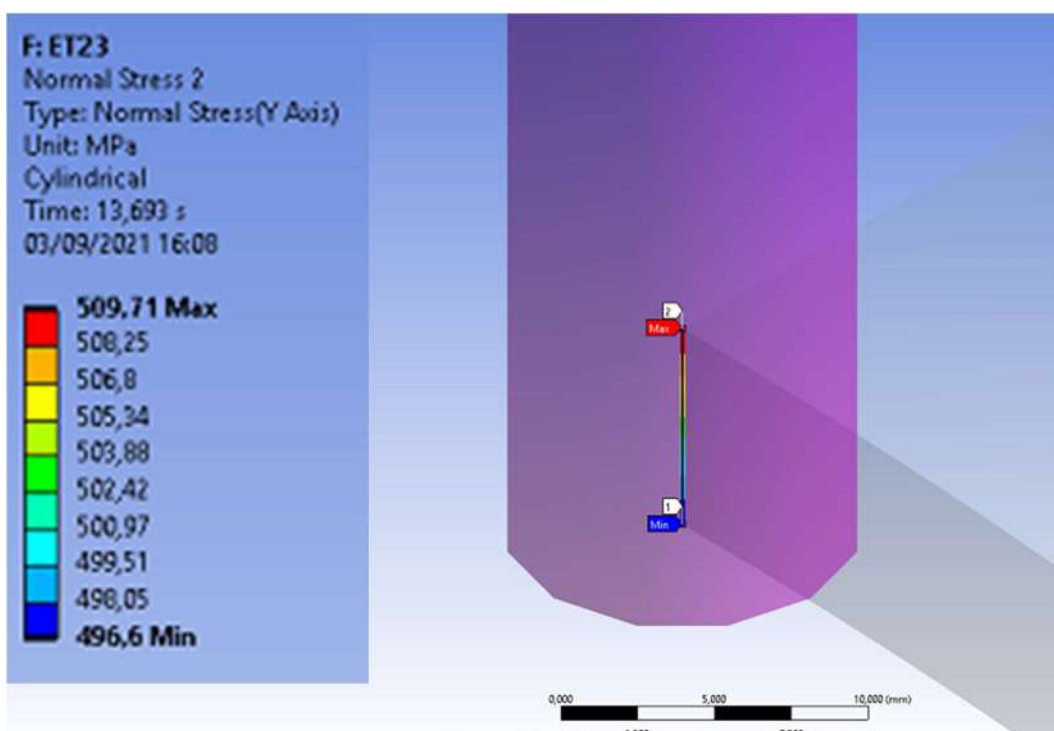
ET23:



Configuração da malha

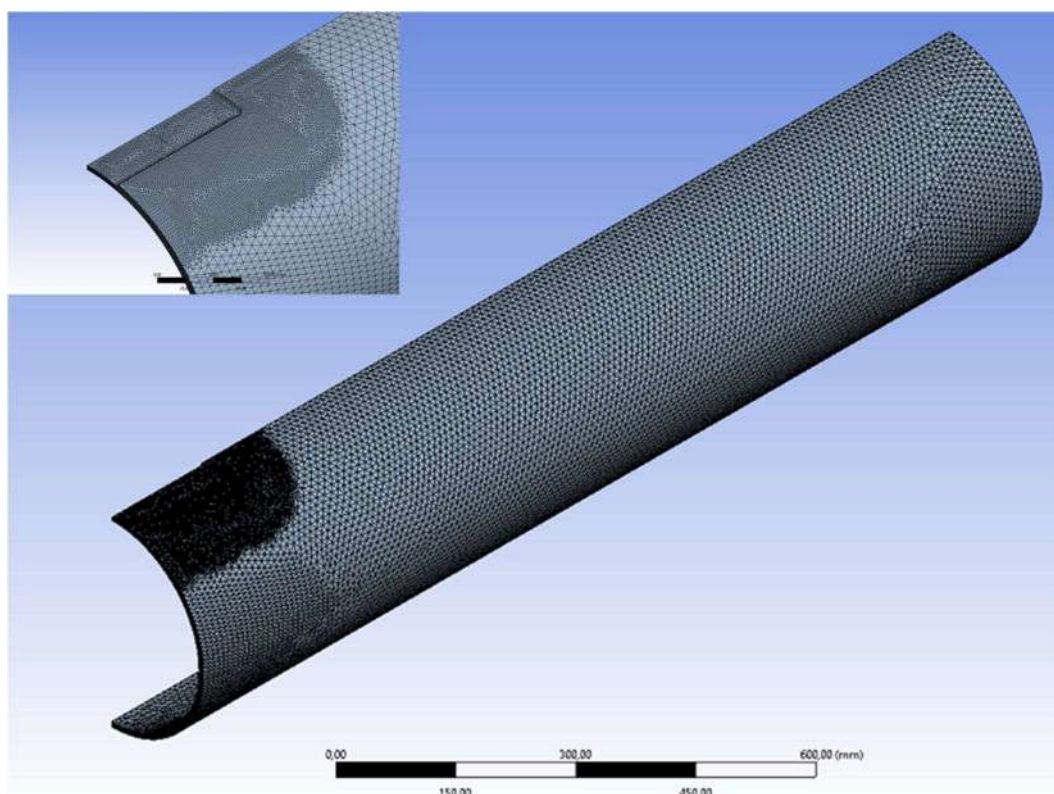


Tensão circunferencial (Lower Bond)

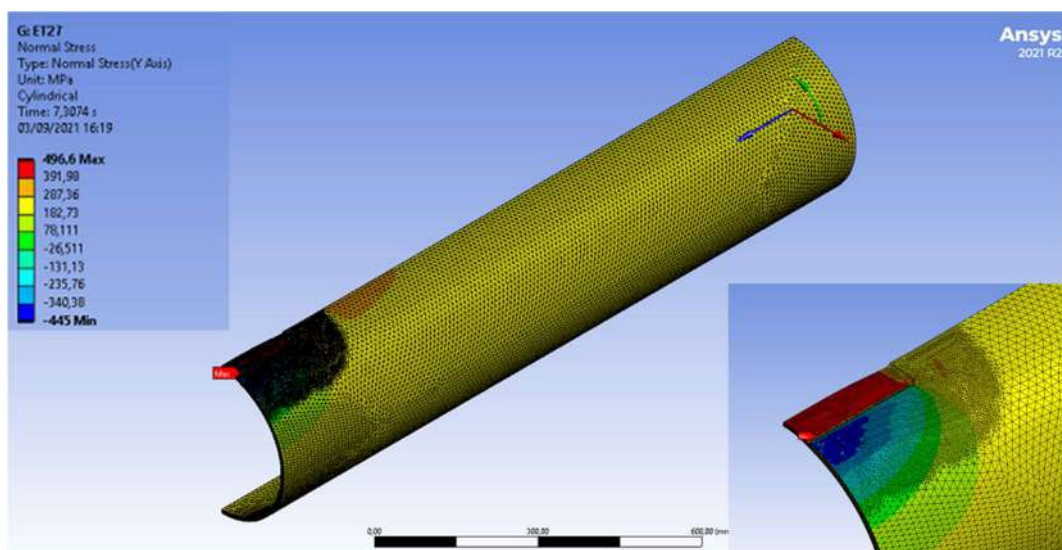


Tensão circunferencial (Upper Bond)

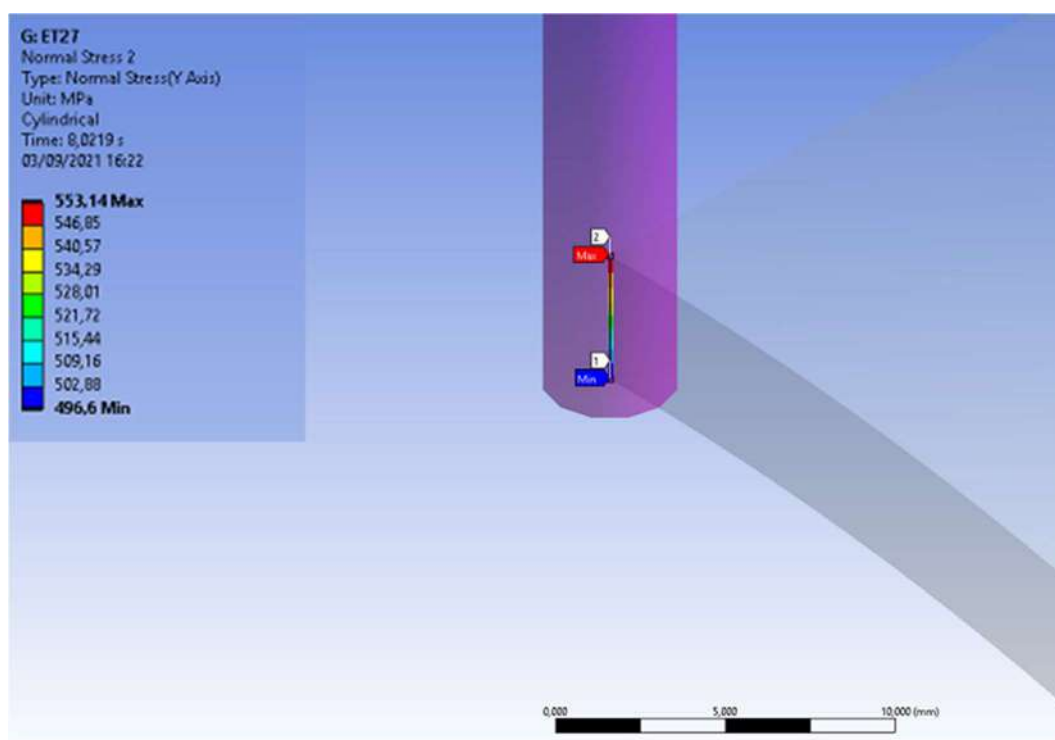
ET27:



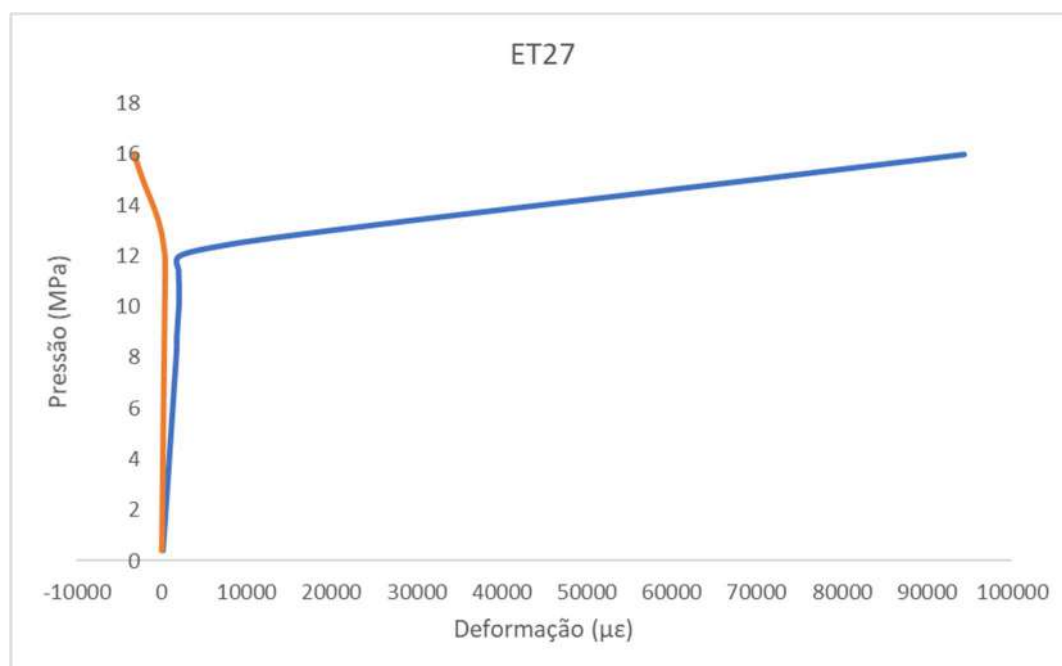
Configuração da malha



Tensão circunferencial (Lower Bond)

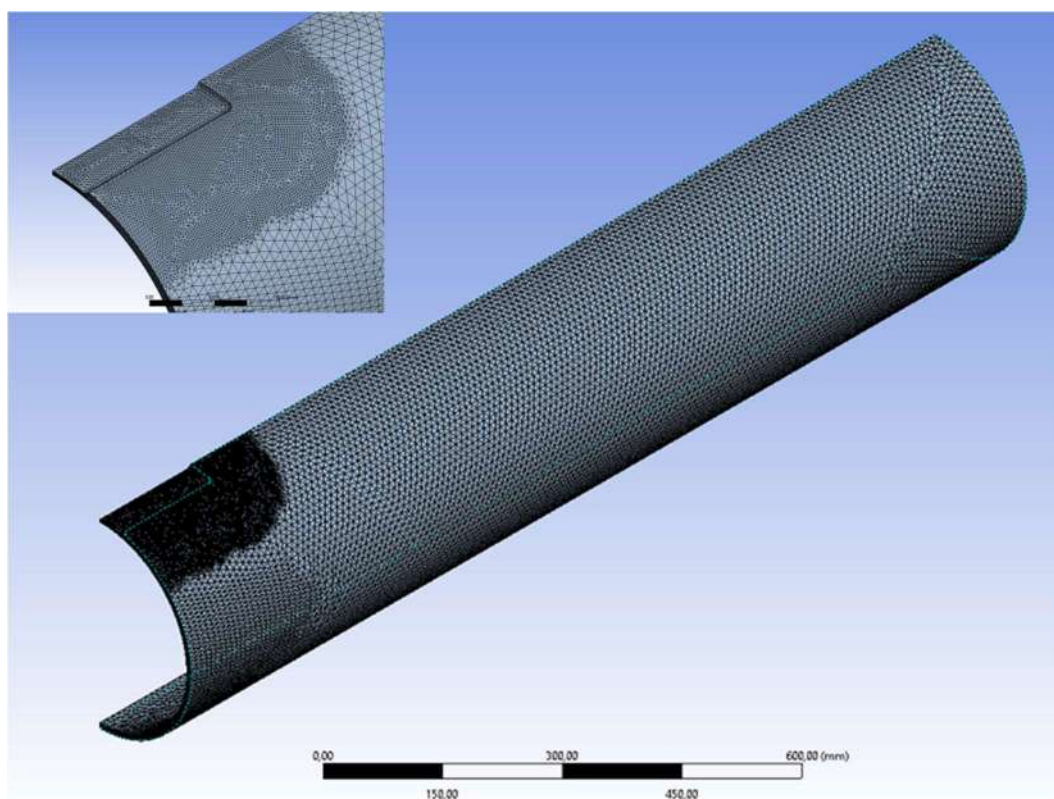


Tensão circunferencial (Upper Bond)

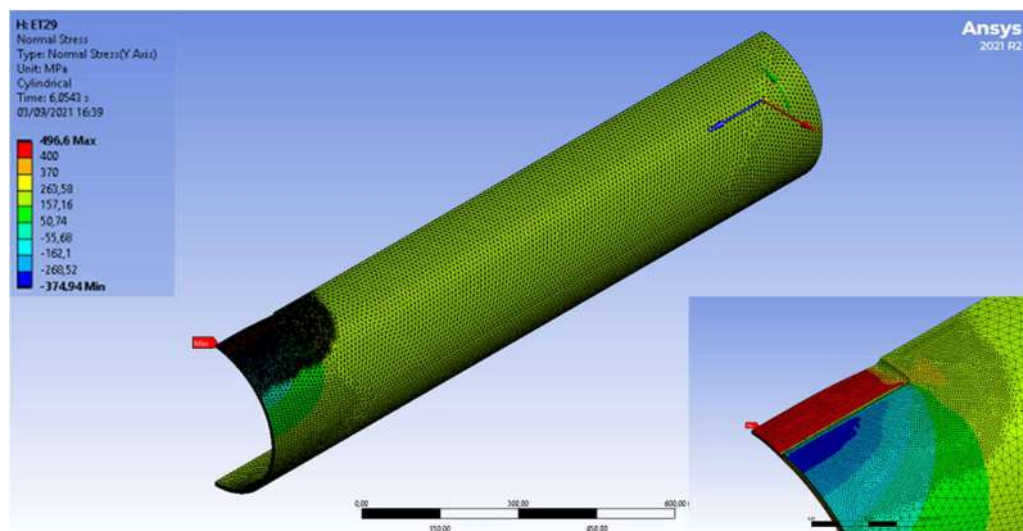


Deformações no centro do rebaixo

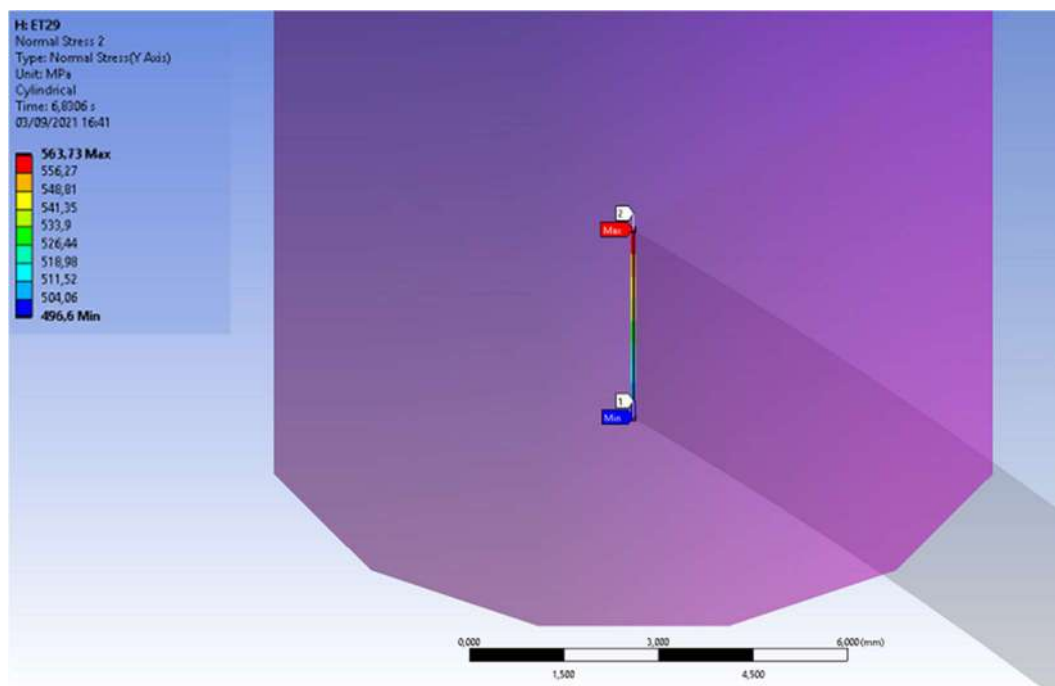
ET29:



Configuração da malha



Tensão circunferencial (Lower Bond)

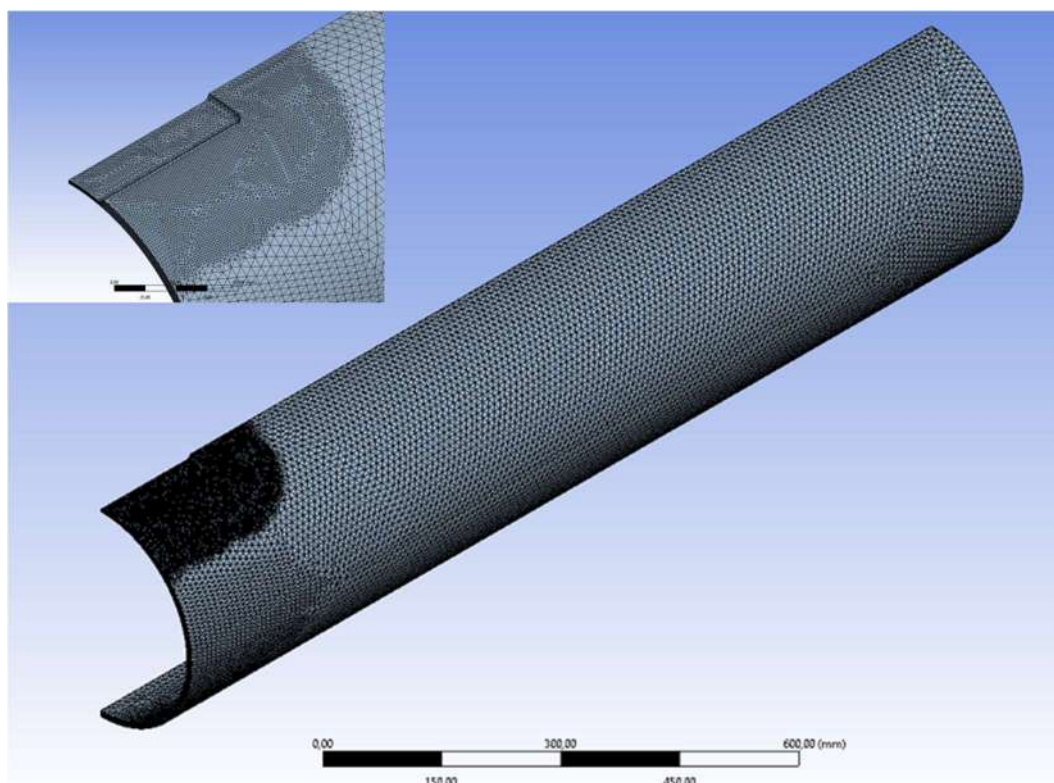


Tensão circunferencial (Upper Bond)

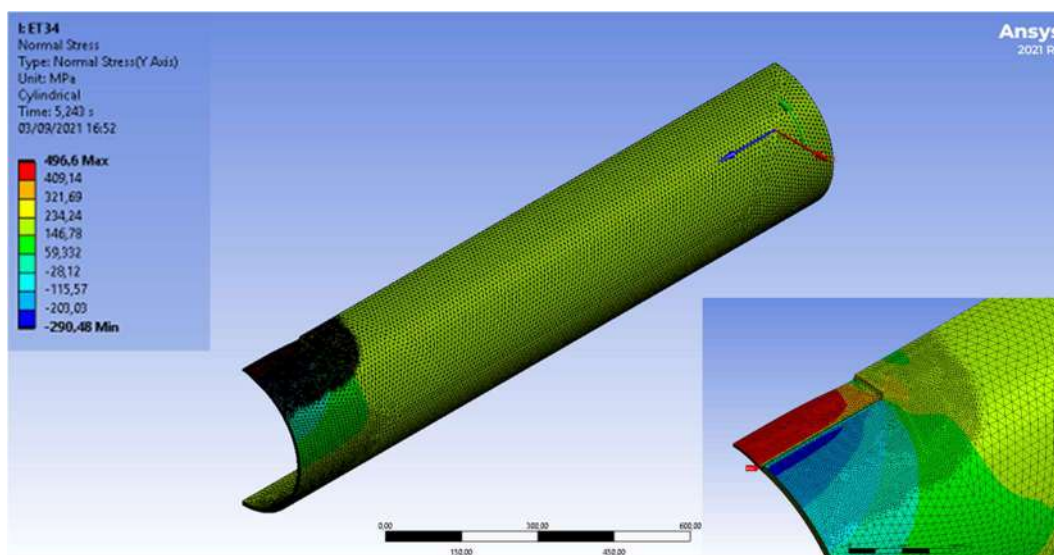


Deformações no centro do rebaixo

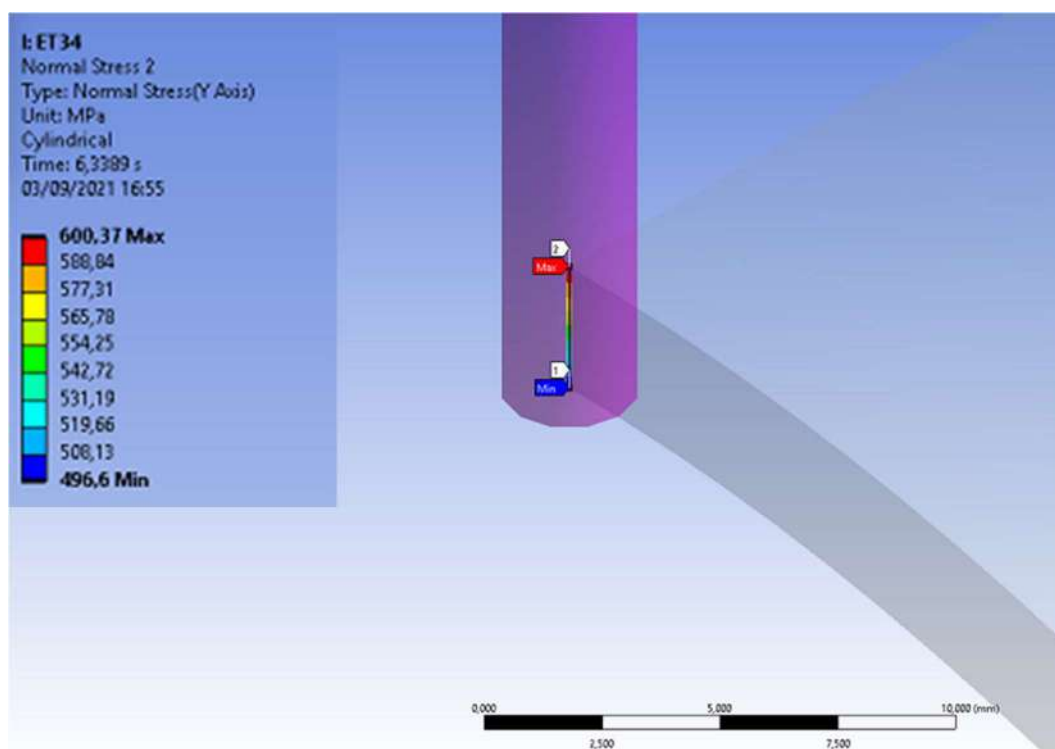
ET34:



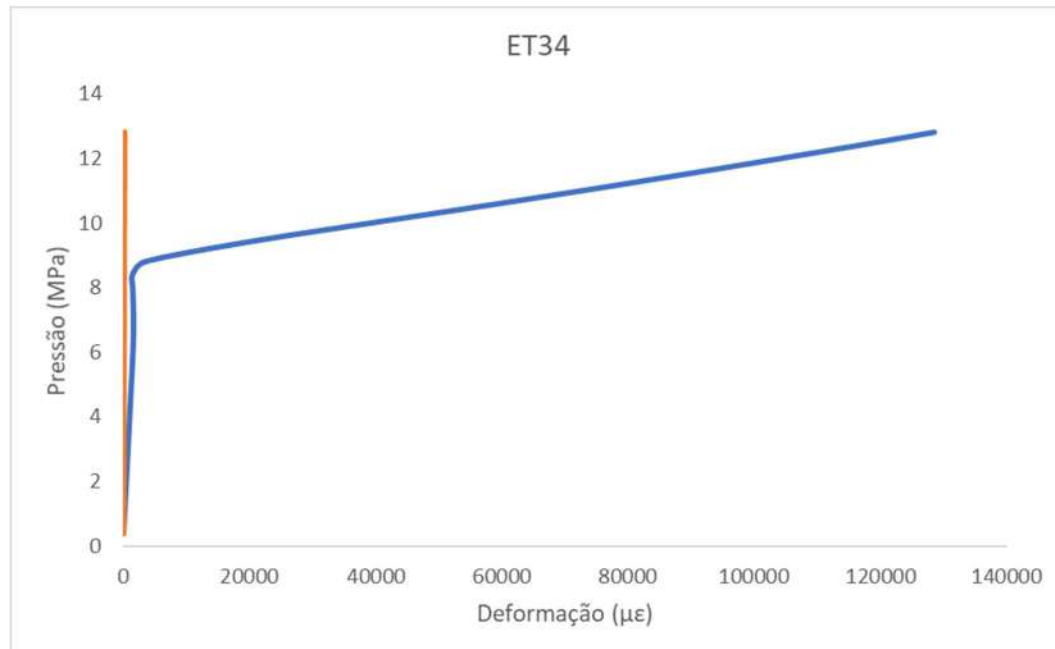
Configuração da malha



Tensão circunferencial (Lower Bond)



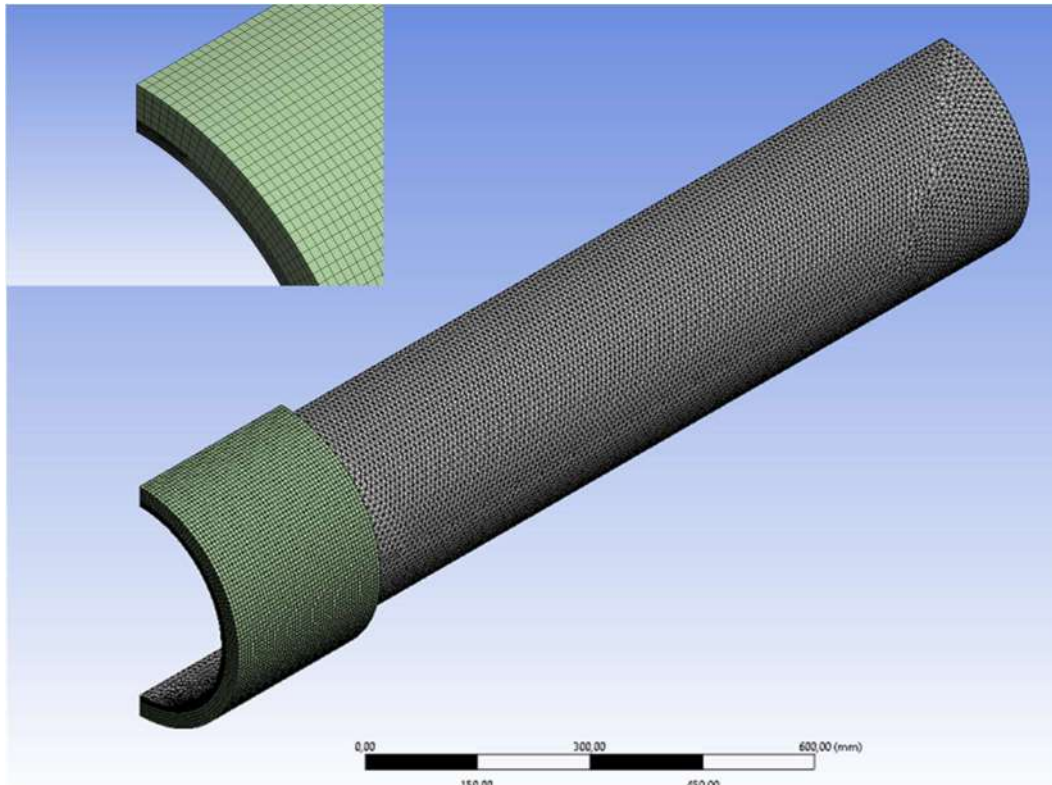
Tensão circunferencial (Upper Bond)



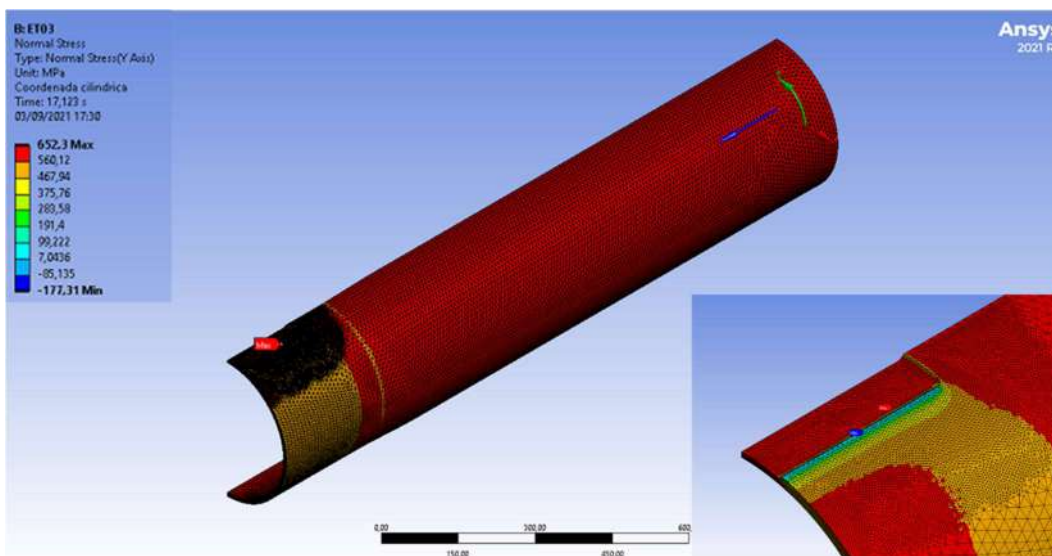
Deformações no centro do rebaixo

As Figuras abaixo mostram os resultados obtidos por elementos finitos no Ansys para a ruptura dos espécimes com reparo:

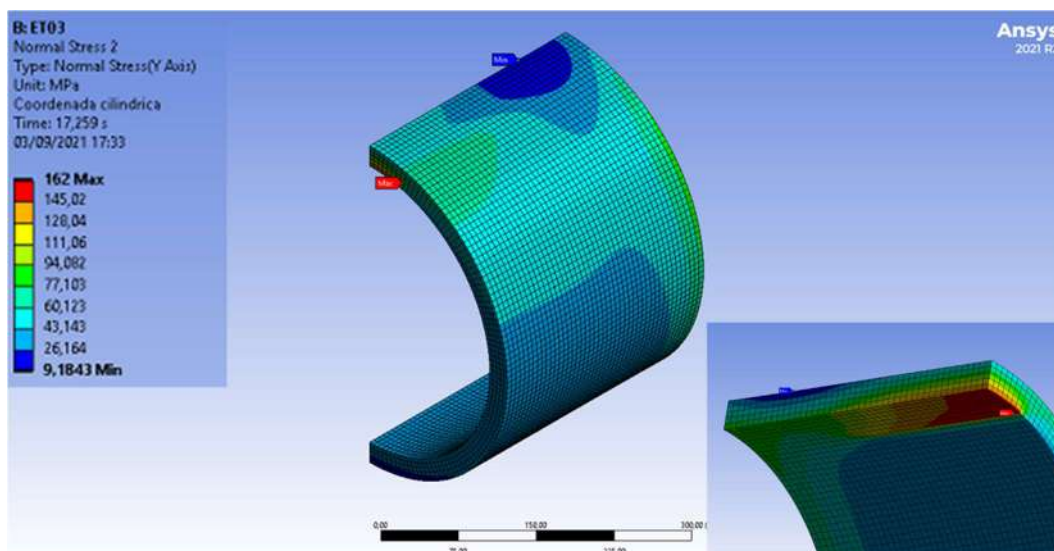
ET03 (Fornecedor 1):



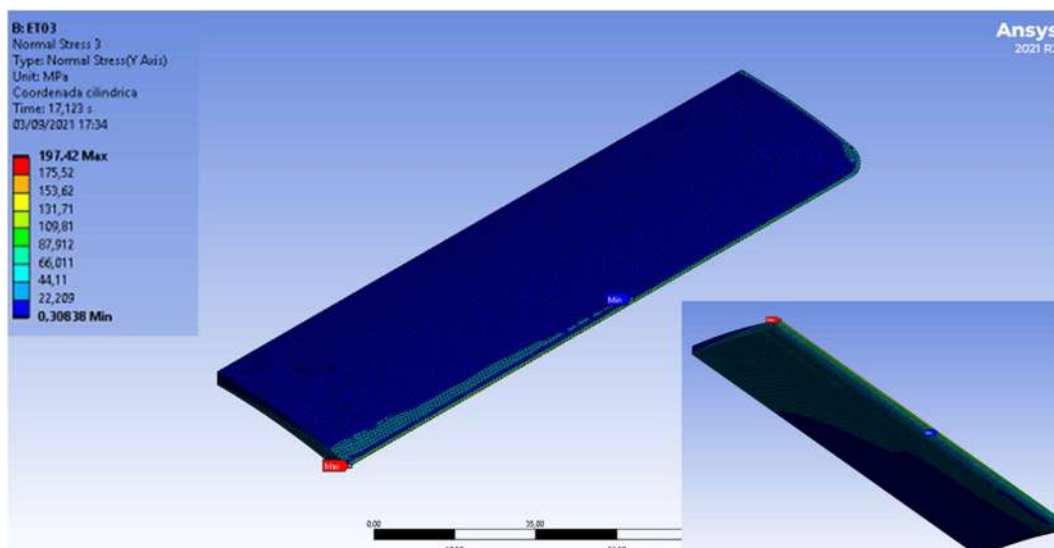
Configuração da malha



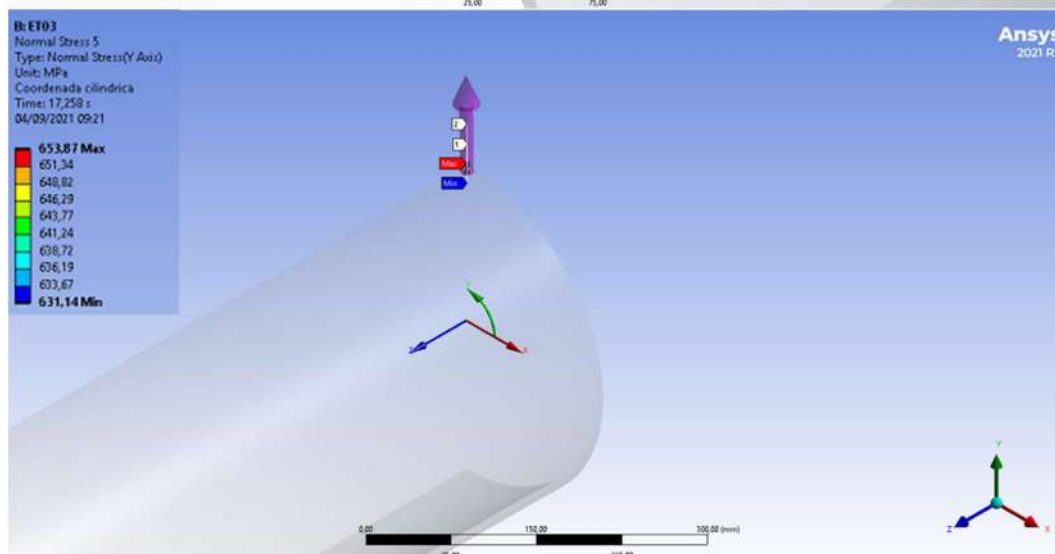
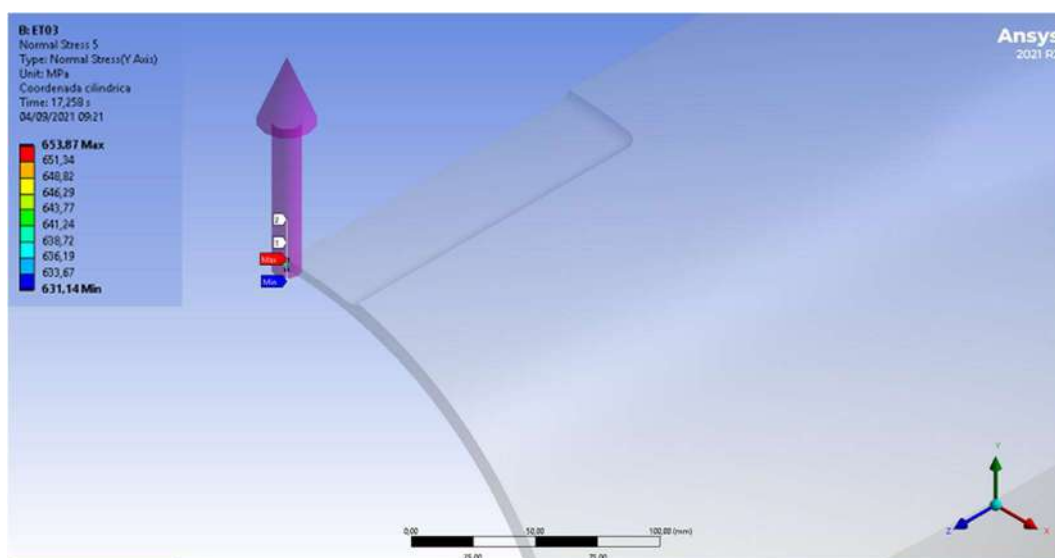
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



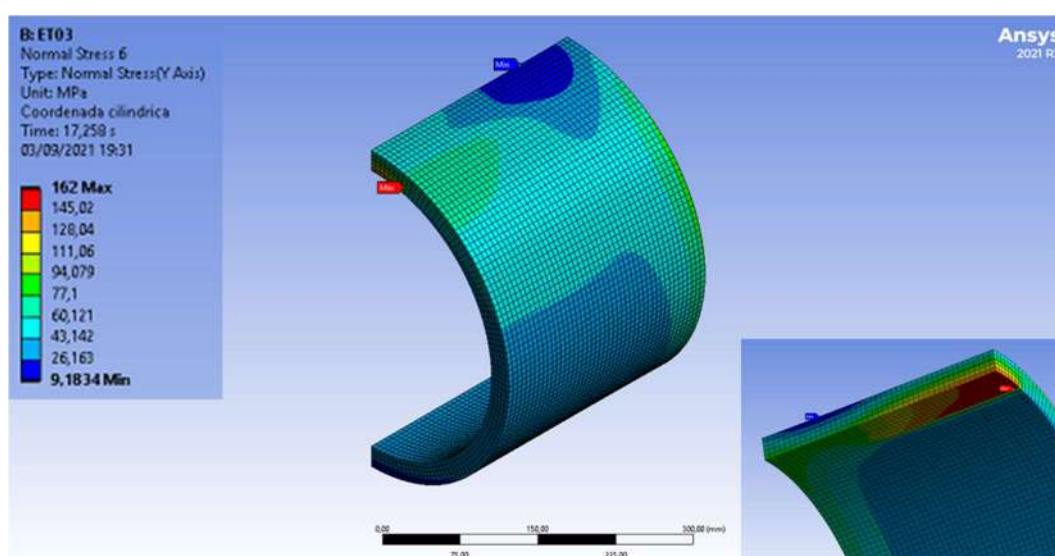
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



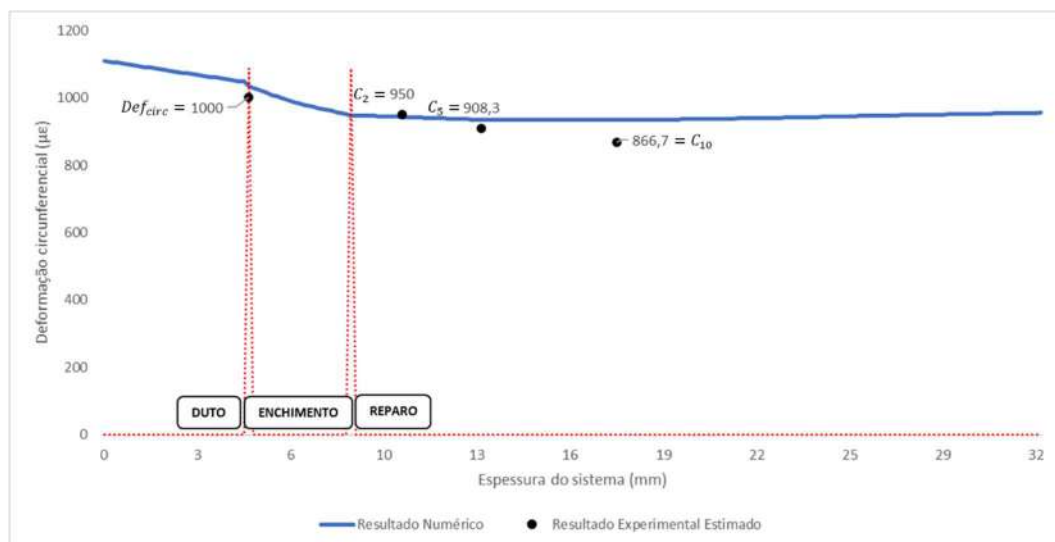
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



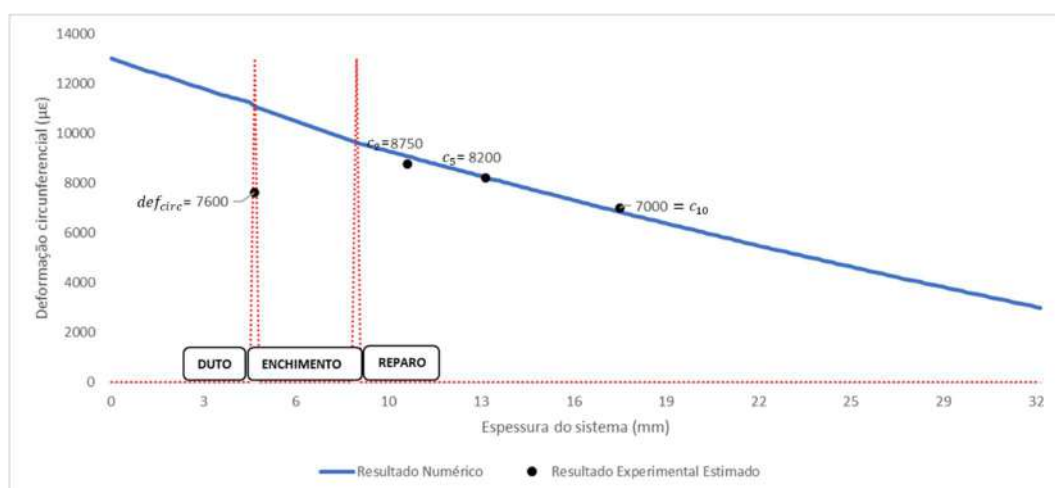
Tensão circunferencial no duto (Upper Bond - ruptura no reparo)



Tensão circunferencial no reparo (Upper Bond - ruptura no reparo)

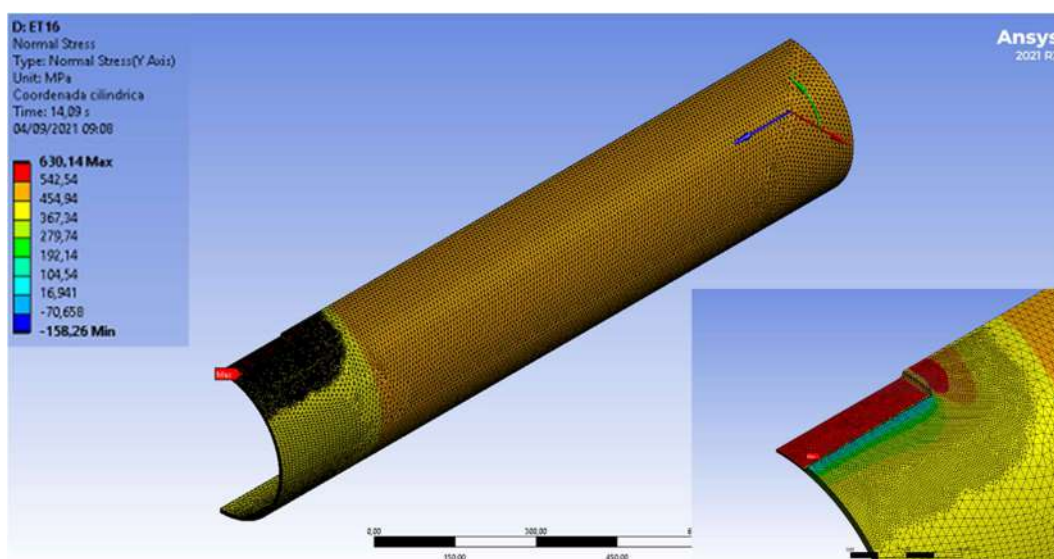


Deformações circunferenciais elásticas

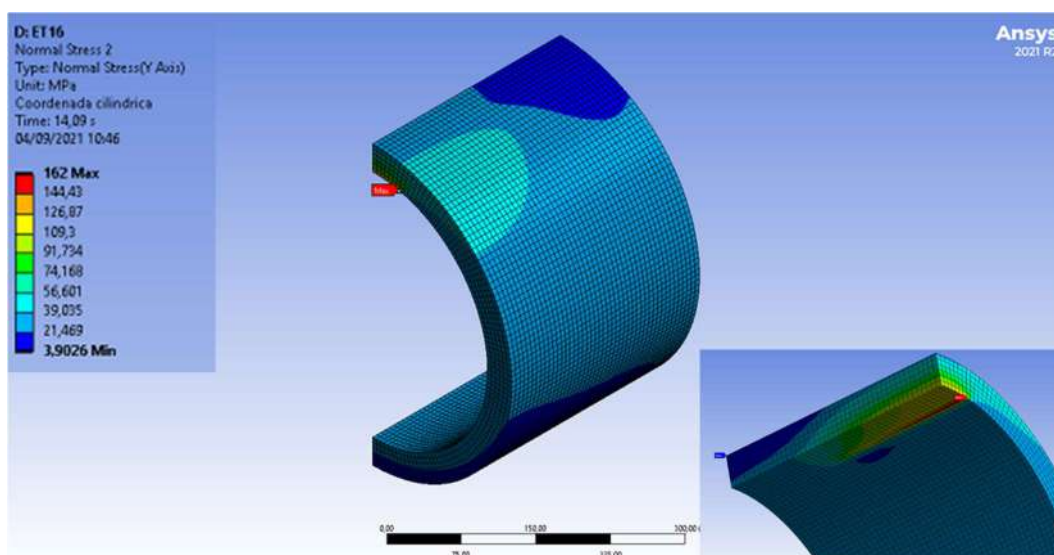


Deformações circunferenciais plásticas

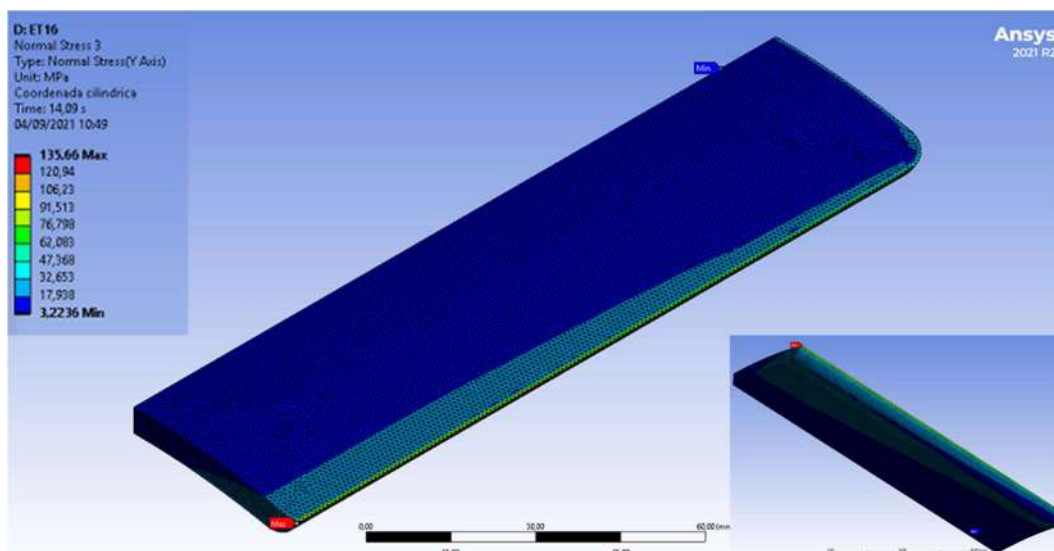
ET16 (Fornecedor 1):



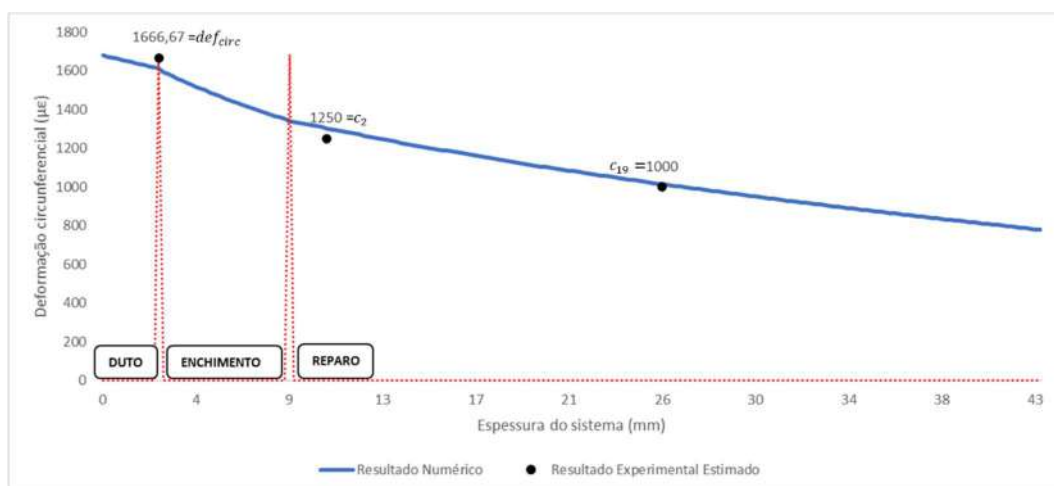
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no reparo)



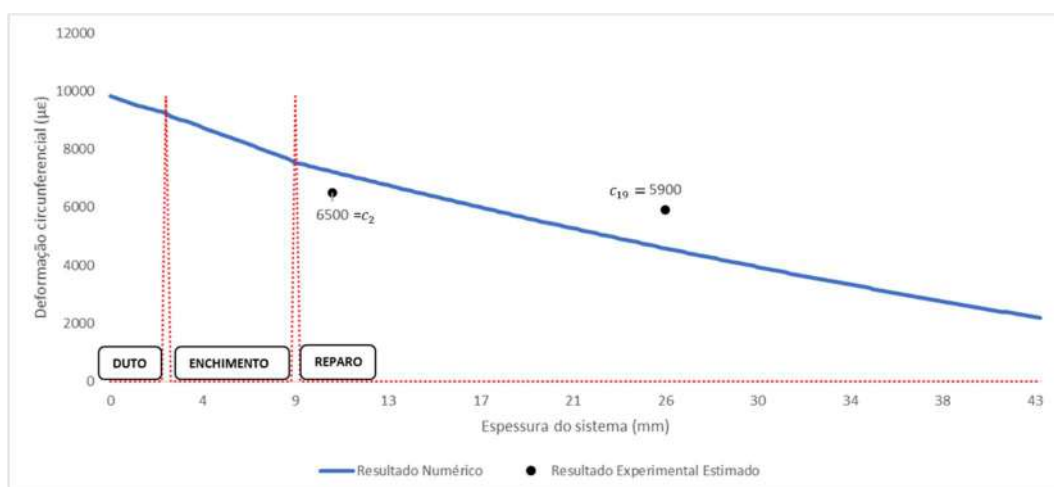
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no reparo)



Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no reparo)

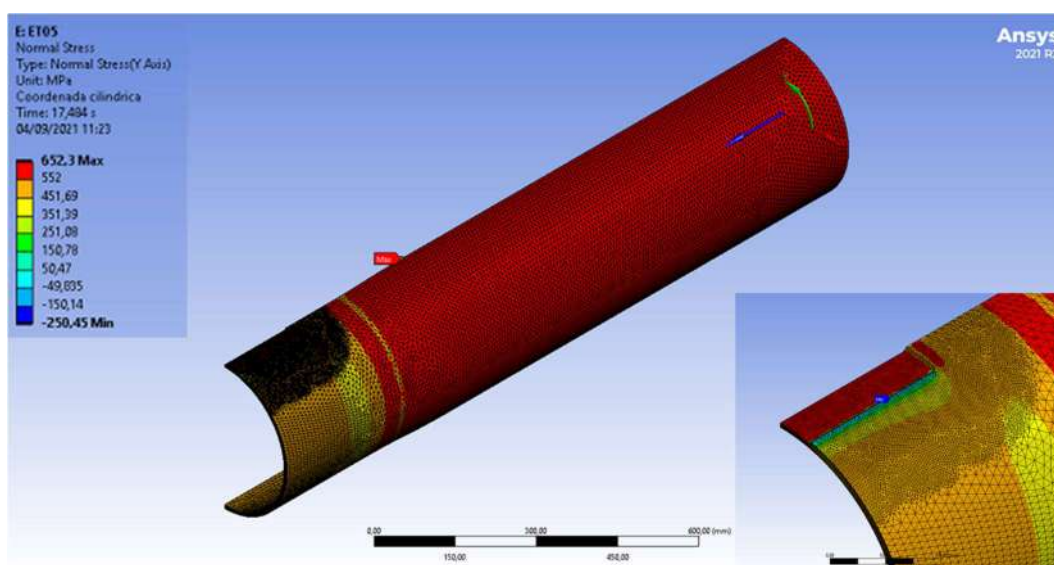


Deformações circunferenciais elásticas

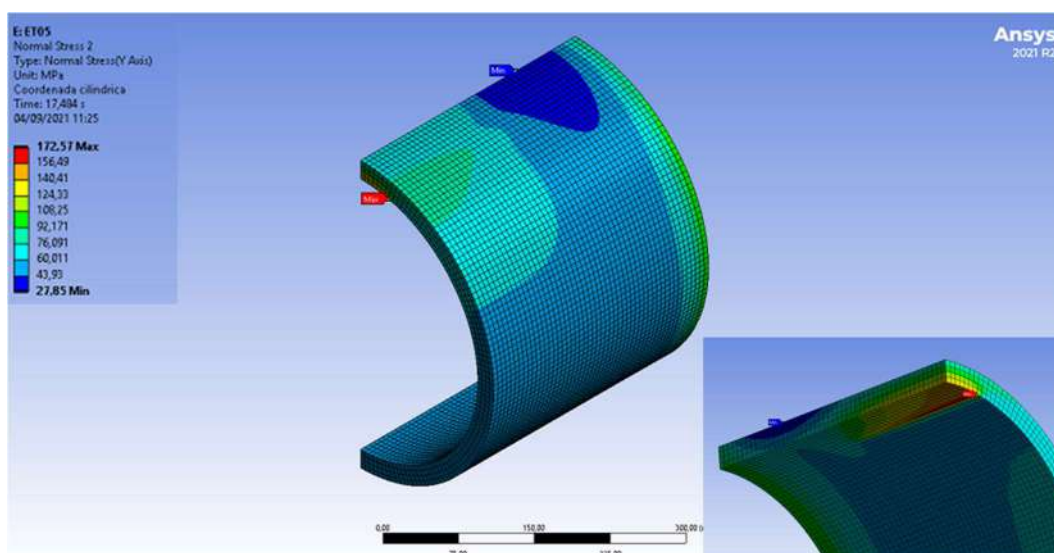


Deformações circunferenciais plásticas

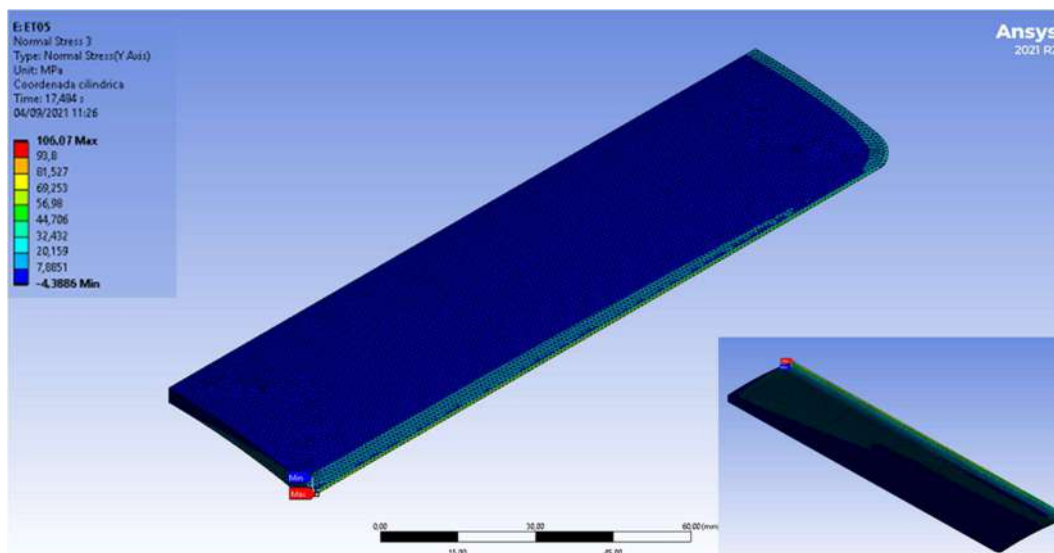
ET05 (Fornecedor 2):



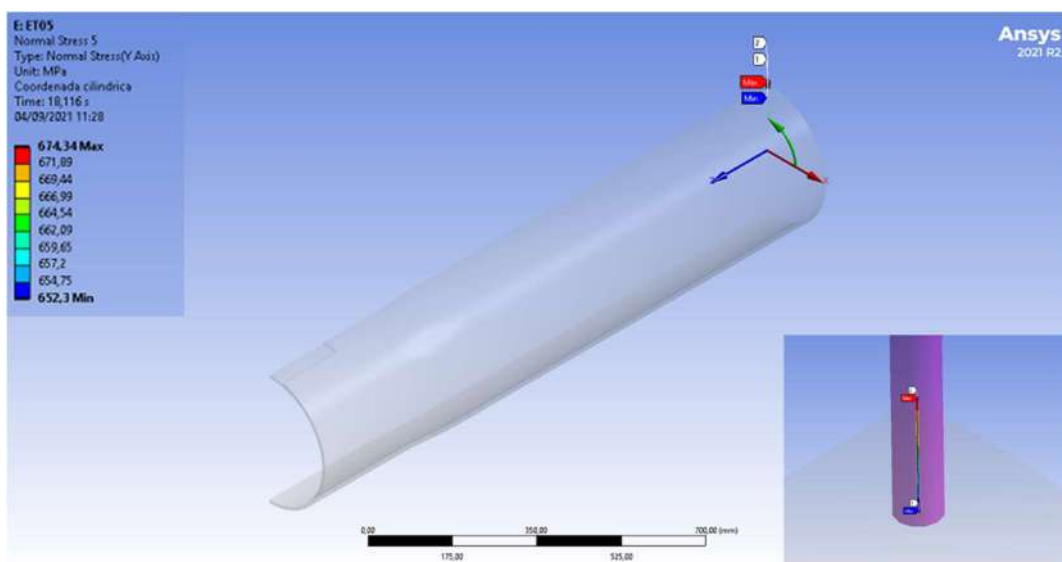
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



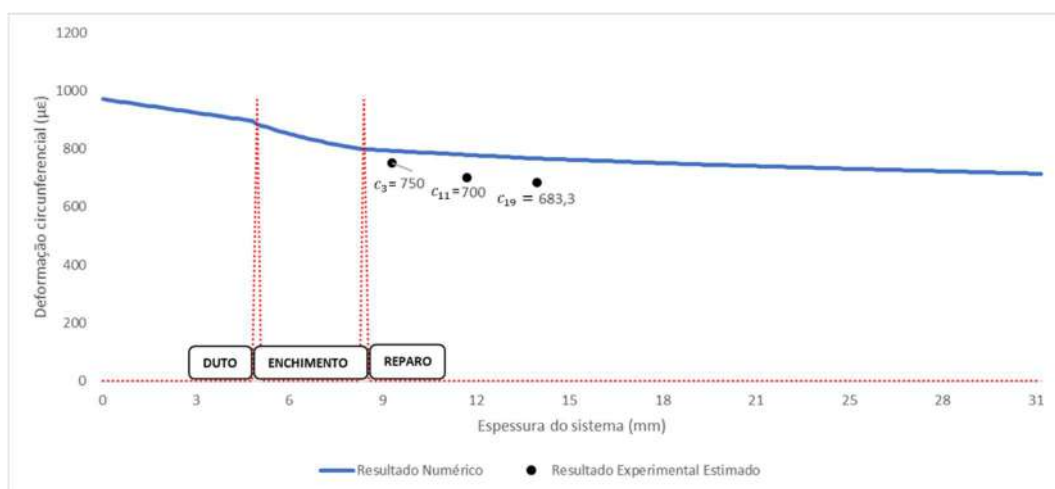
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



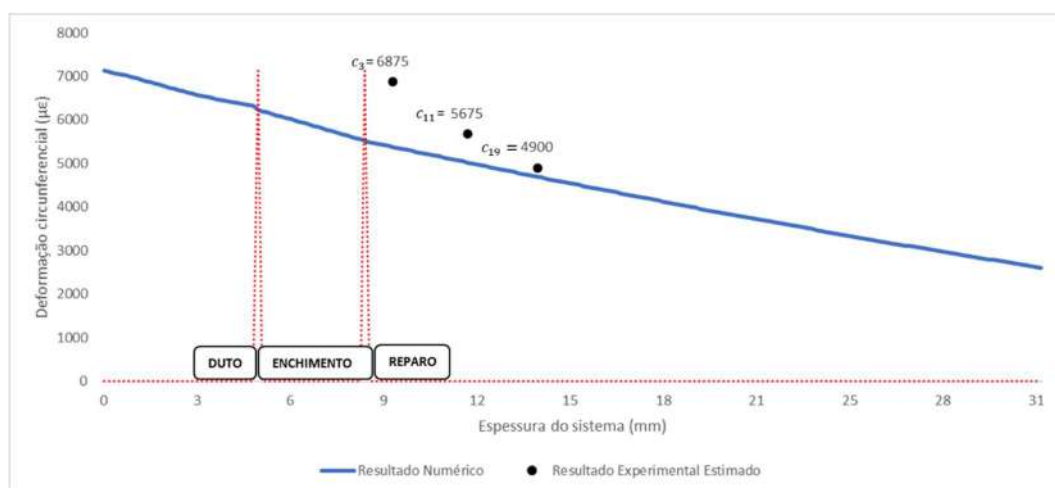
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)

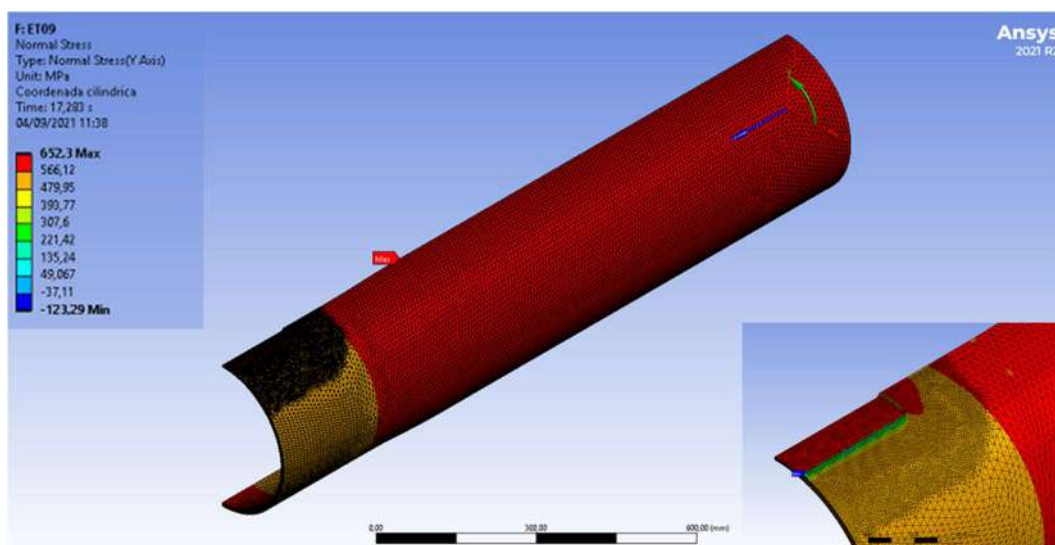


Deformações circunferenciais elásticas

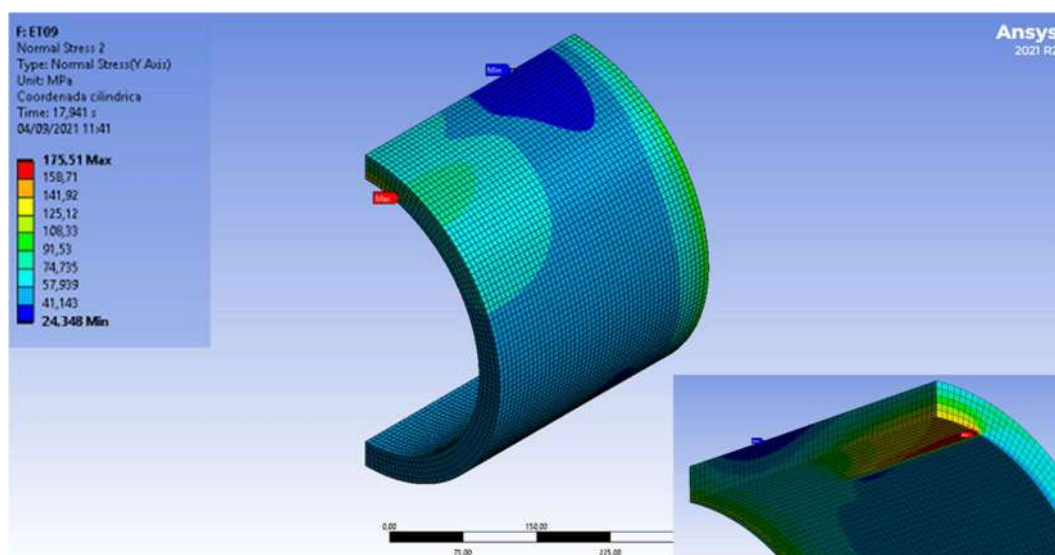


Deformações circunferenciais plásticas

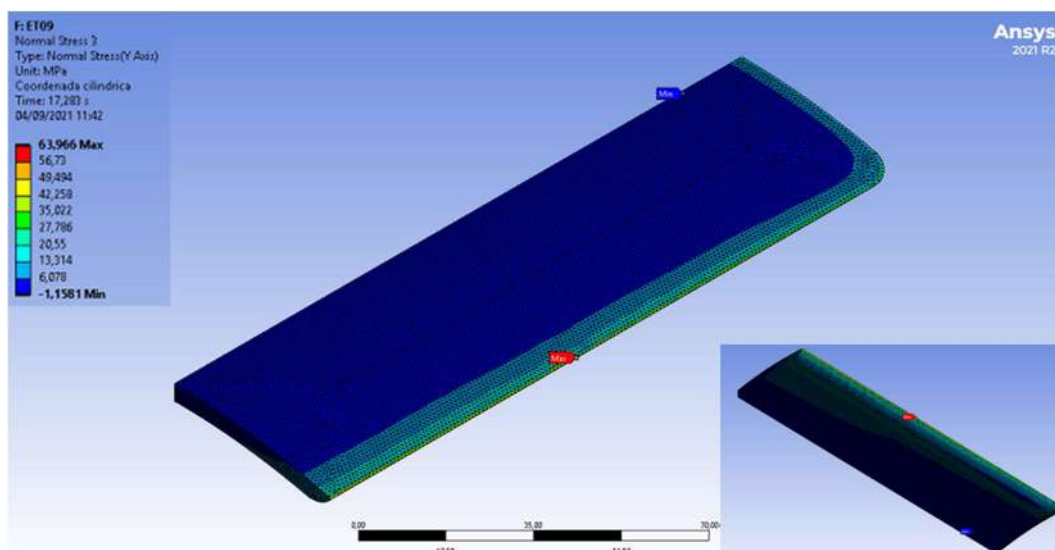
ET09 (Fornecedor 2):



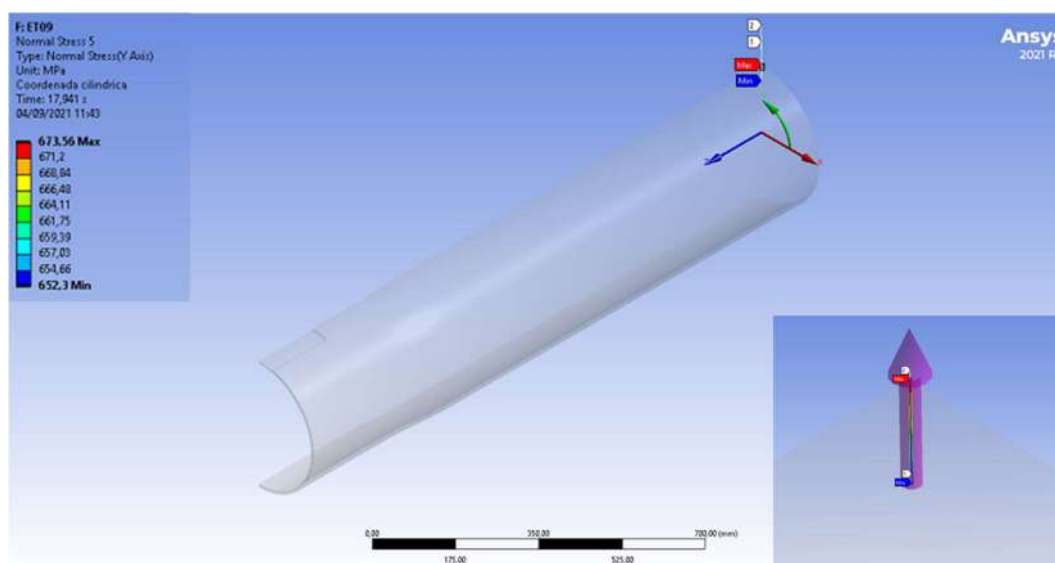
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



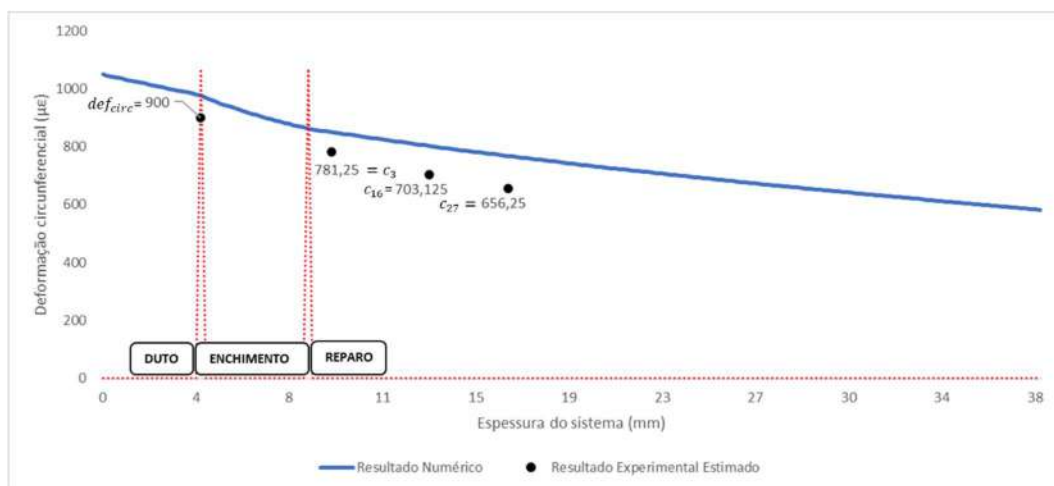
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



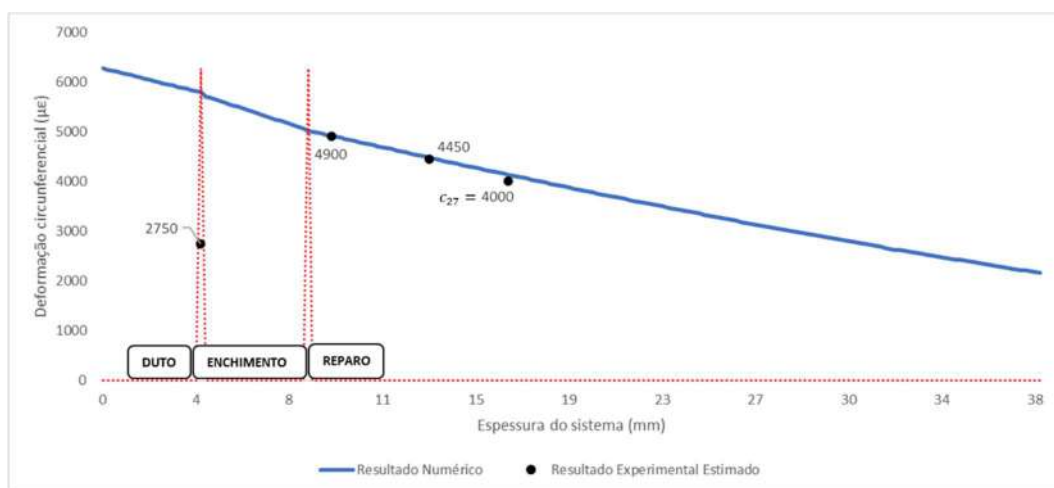
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)

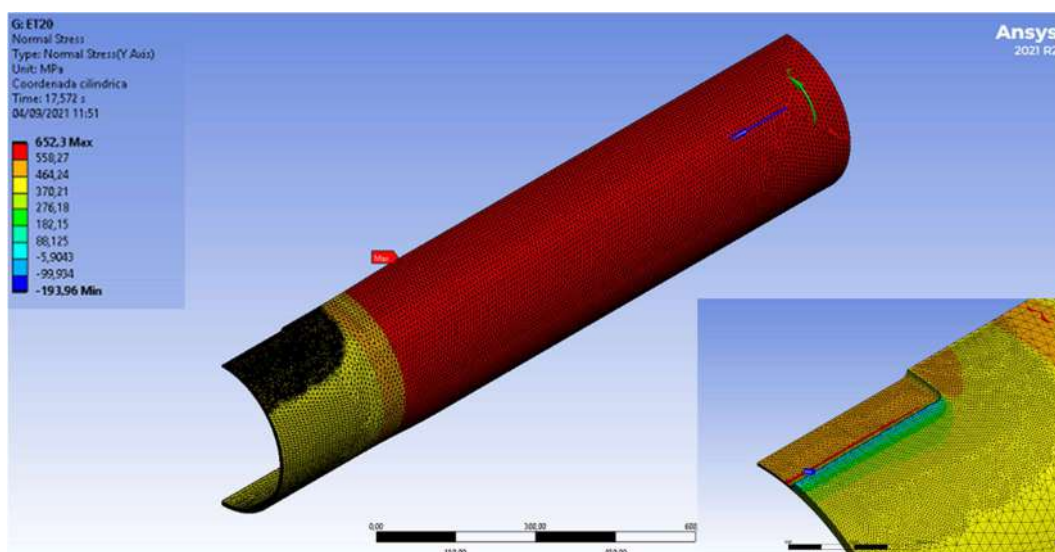


Deformações circunferenciais elásticas

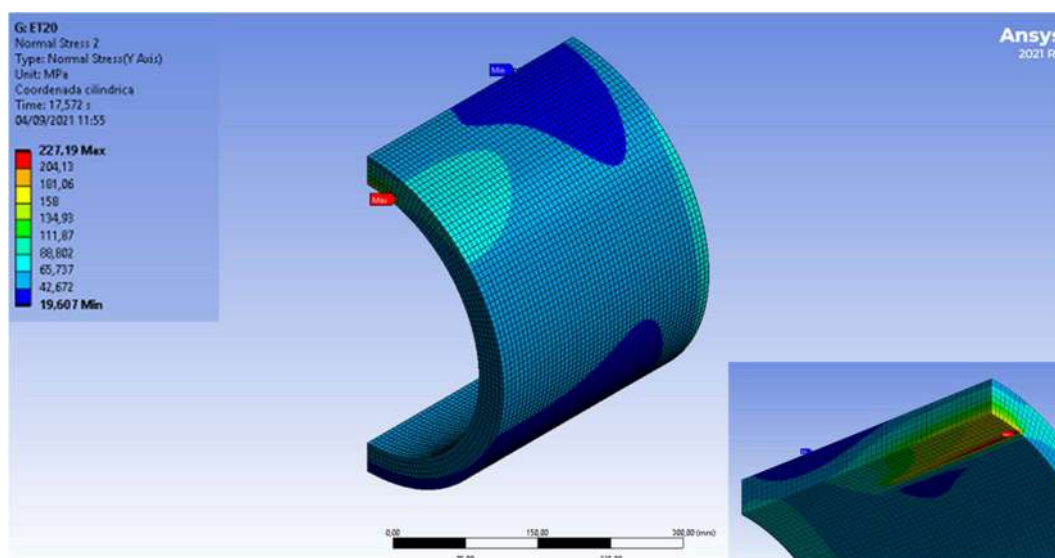


Deformações circunferenciais plásticas

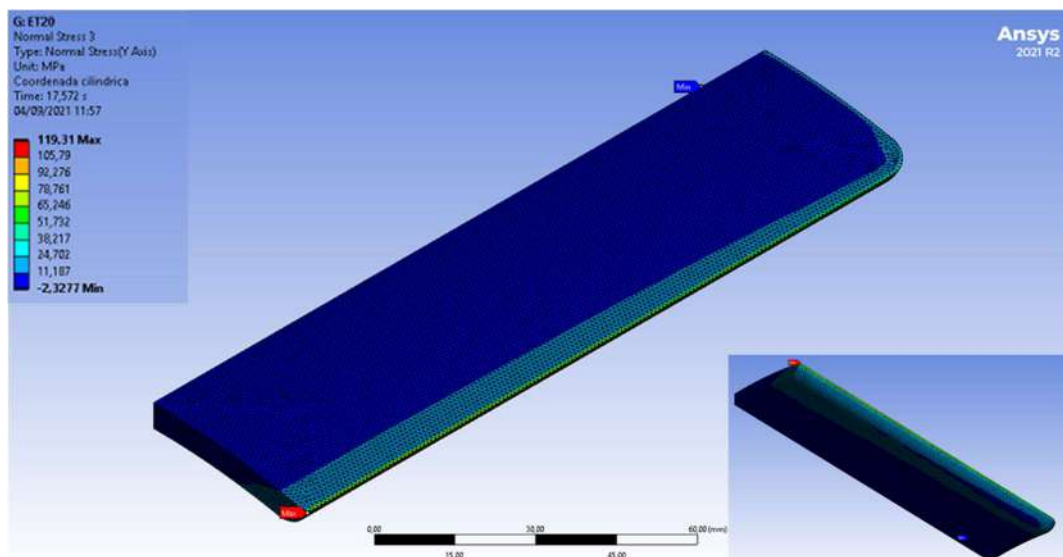
ET20 (Fornecedor 2):



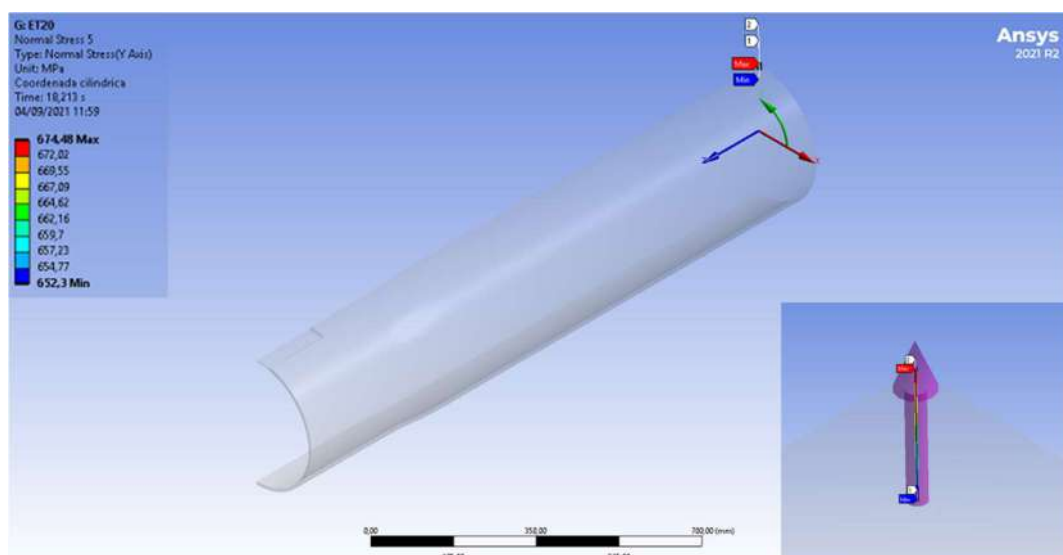
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



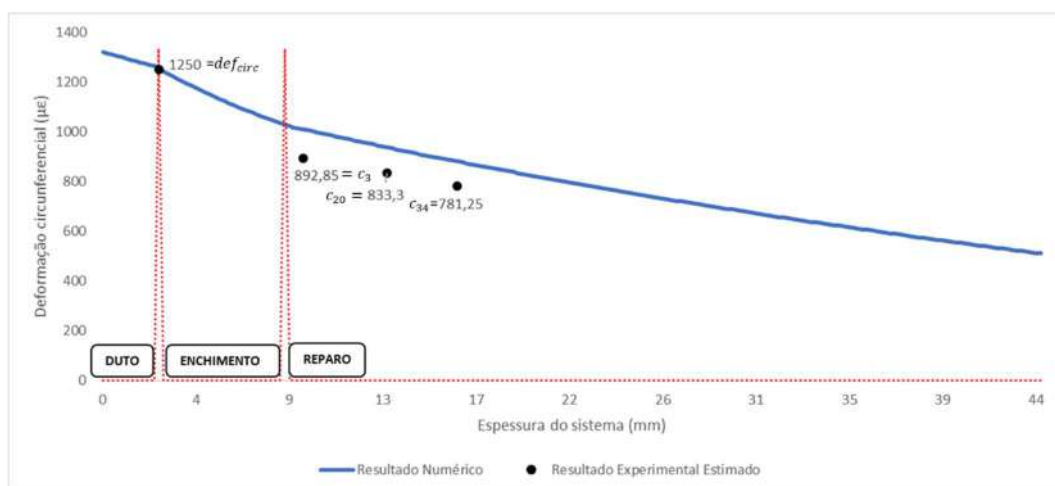
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



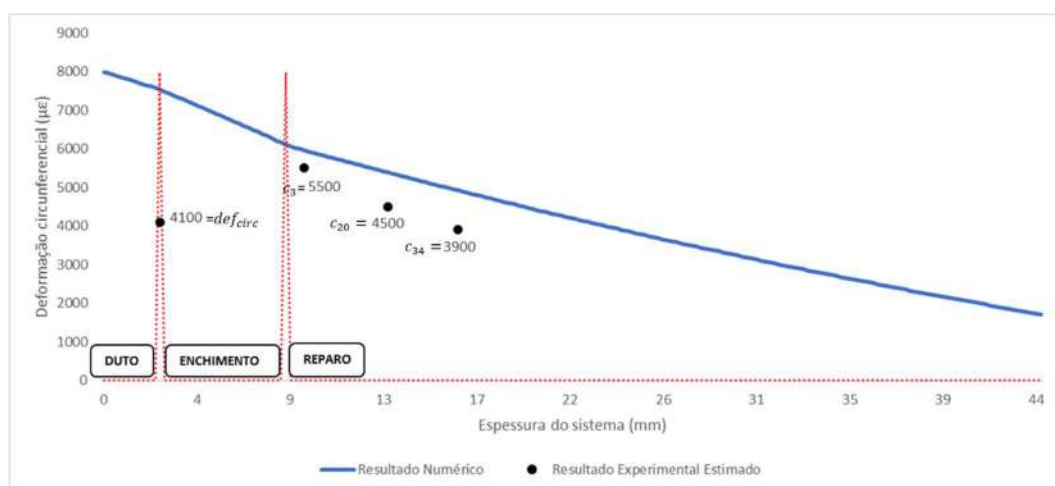
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)

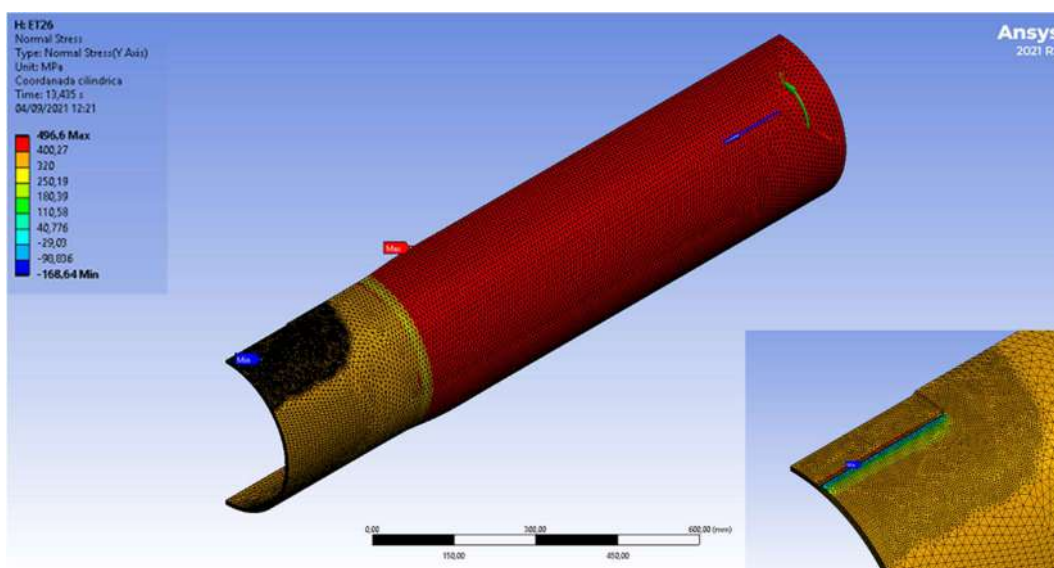


Deformações circunferenciais elásticas

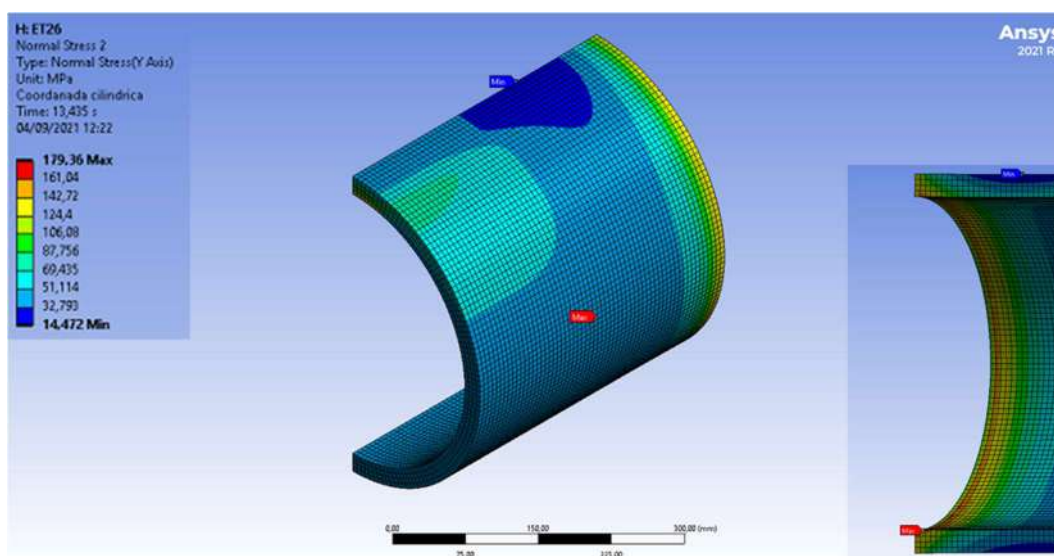


Deformações circunferenciais plásticas

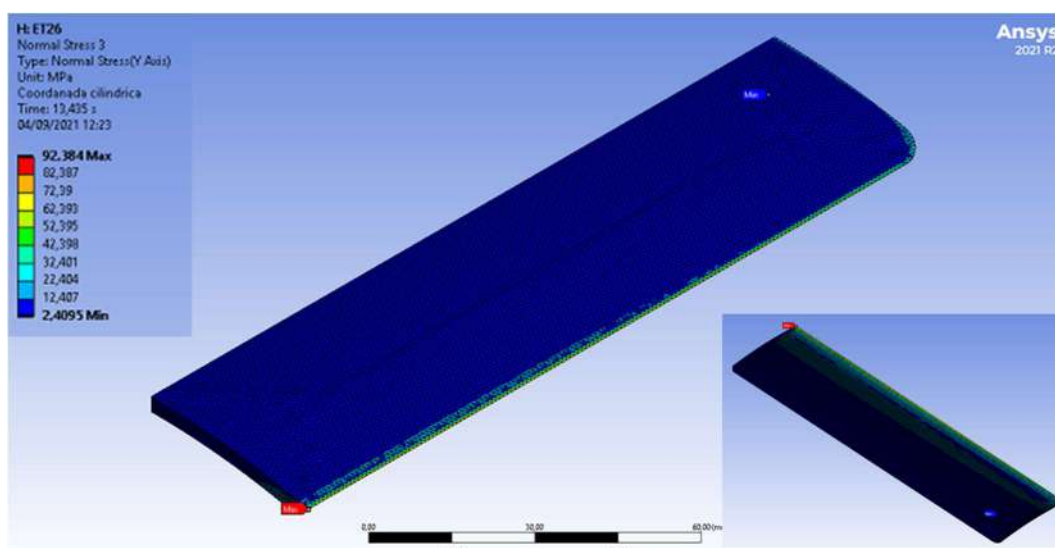
ET26 (Fornecedor 3):



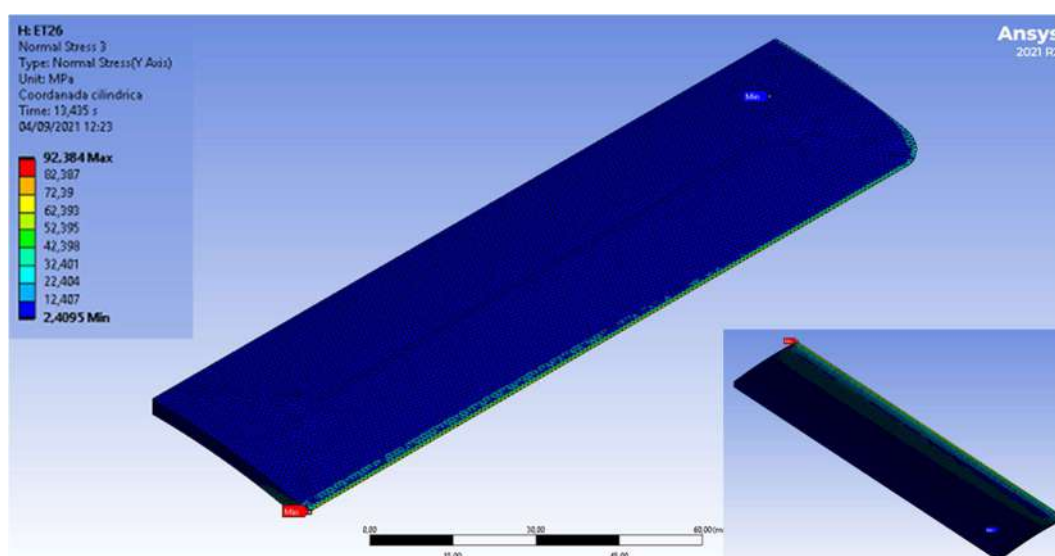
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



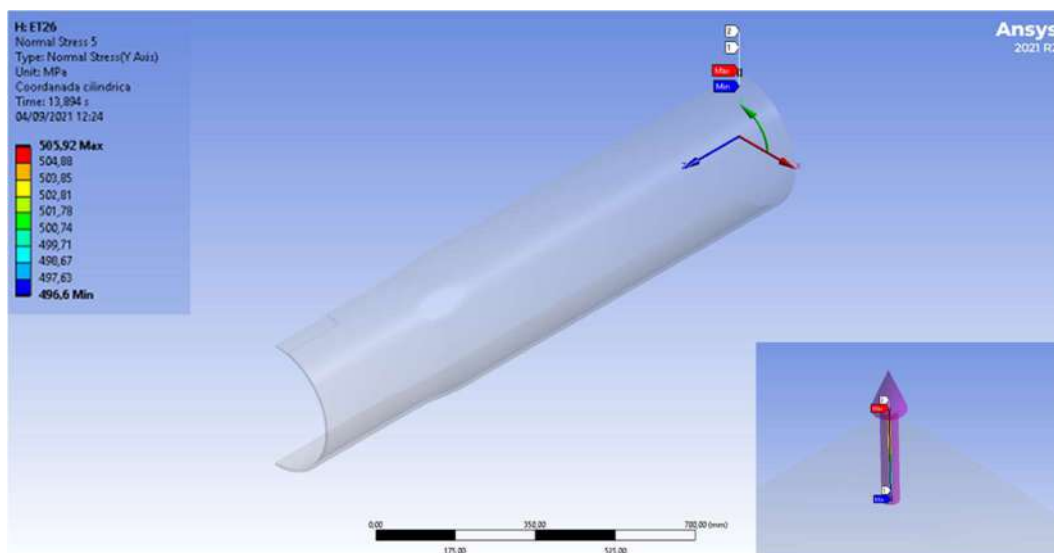
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no reparo)



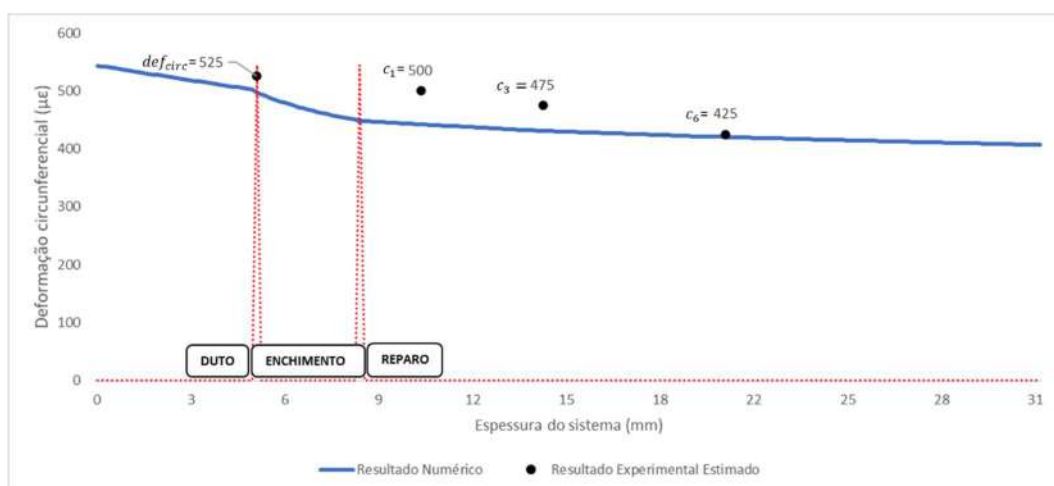
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no reparo)



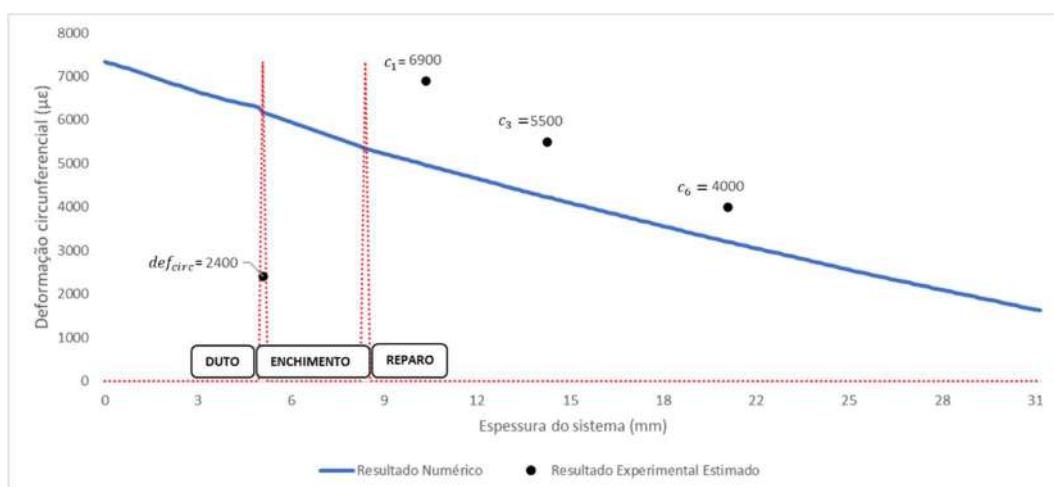
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)

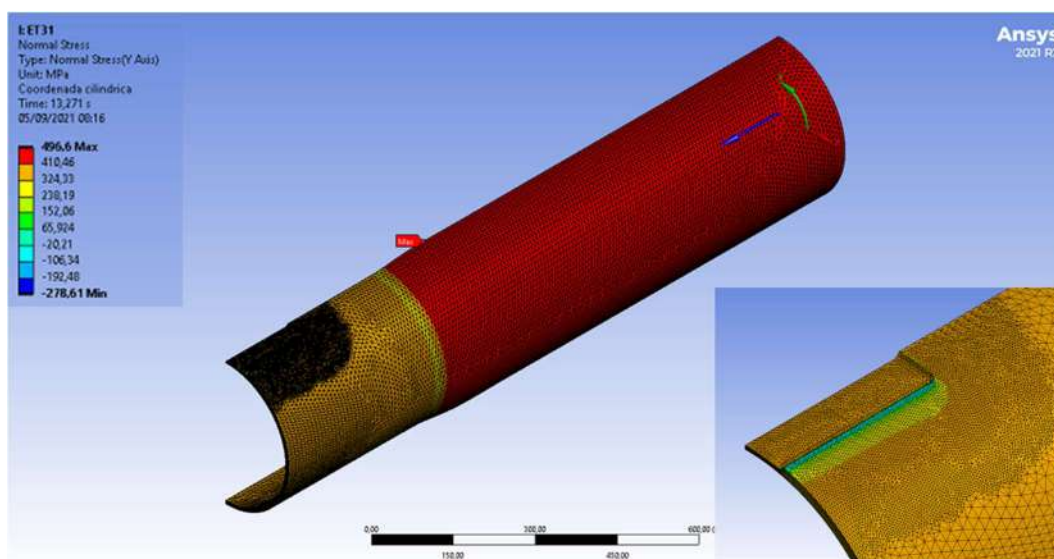


Deformações circunferenciais elásticas

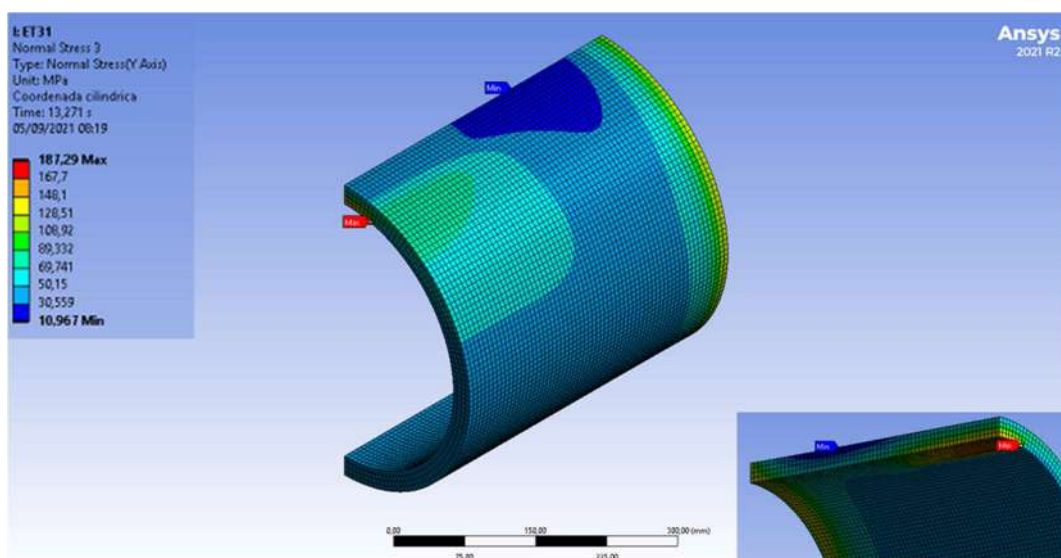


Deformações circunferenciais plásticas

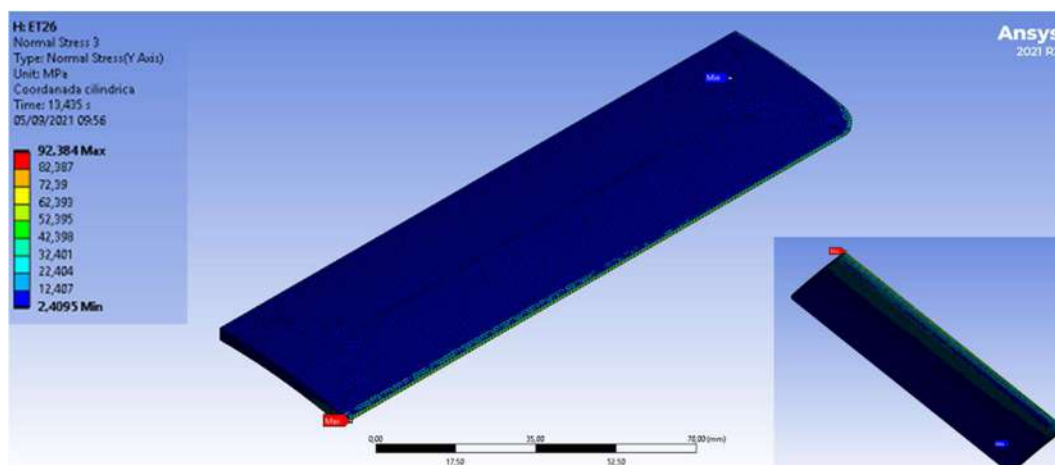
ET31 (Fornecedor 3):



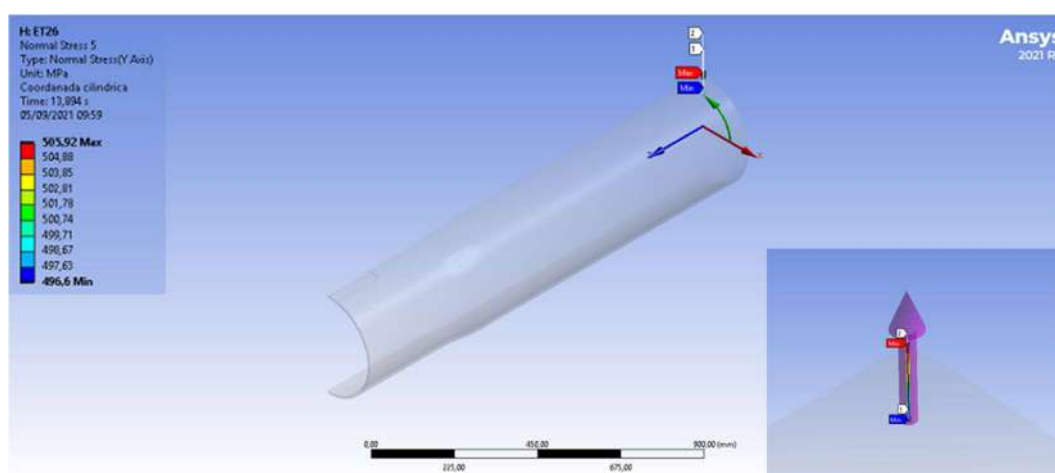
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura no duto)



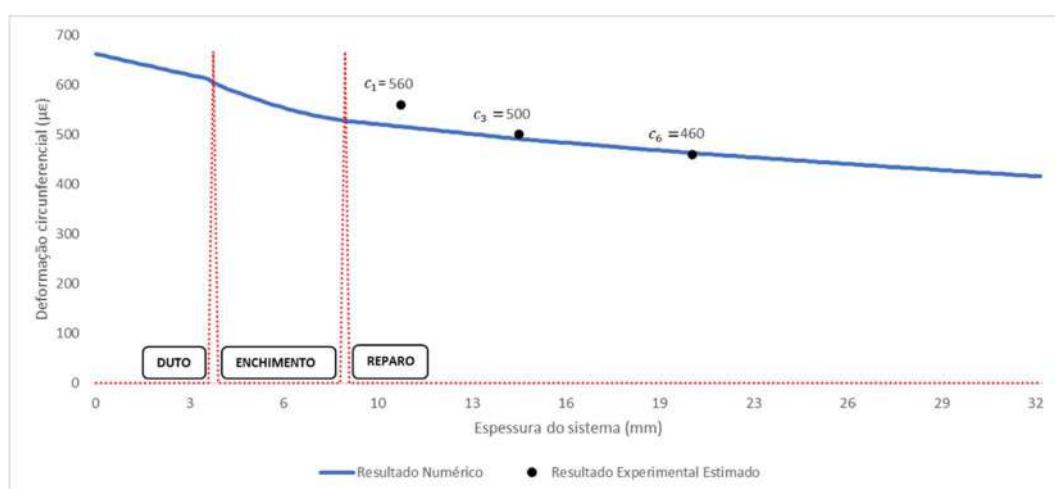
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



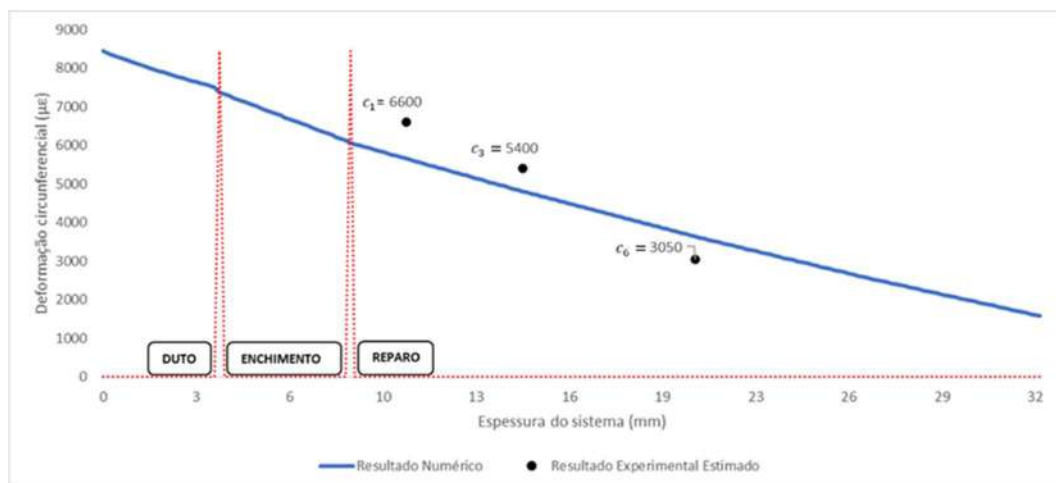
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)

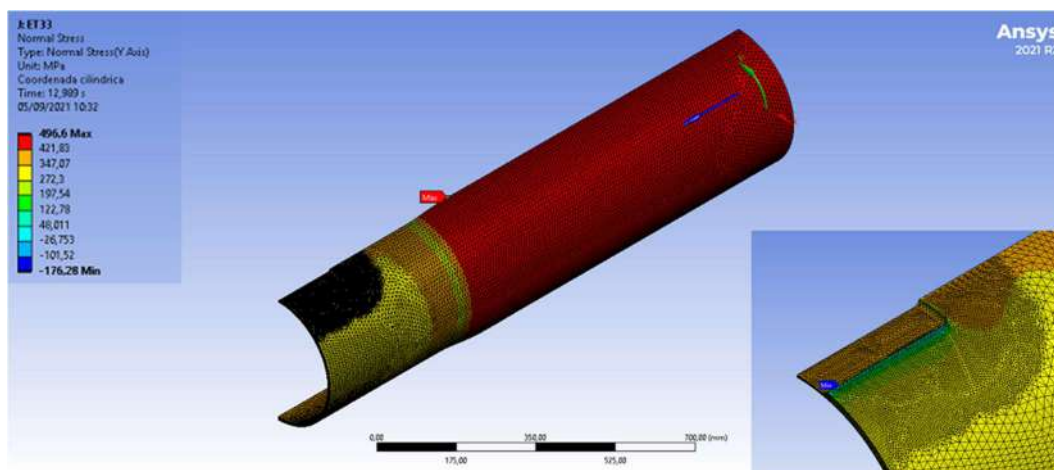


Deformações circunferenciais elásticas

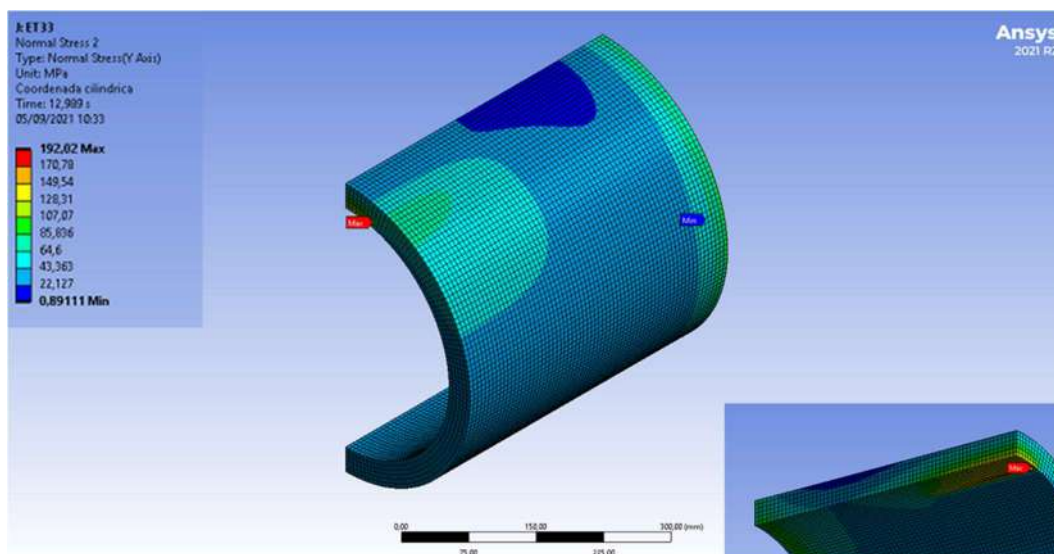


Deformações circunferenciais plásticas

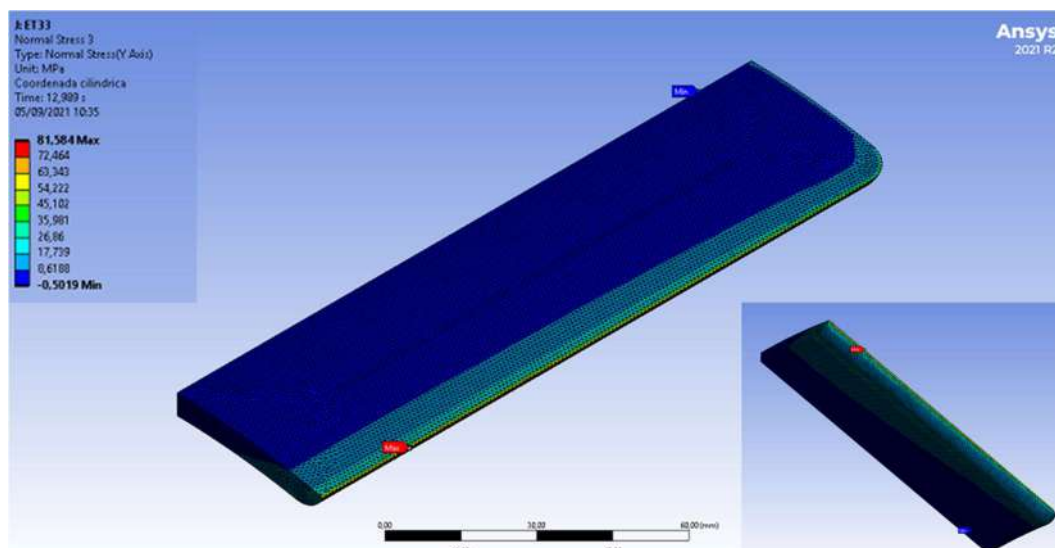
ET33 (Fornecedor 3):



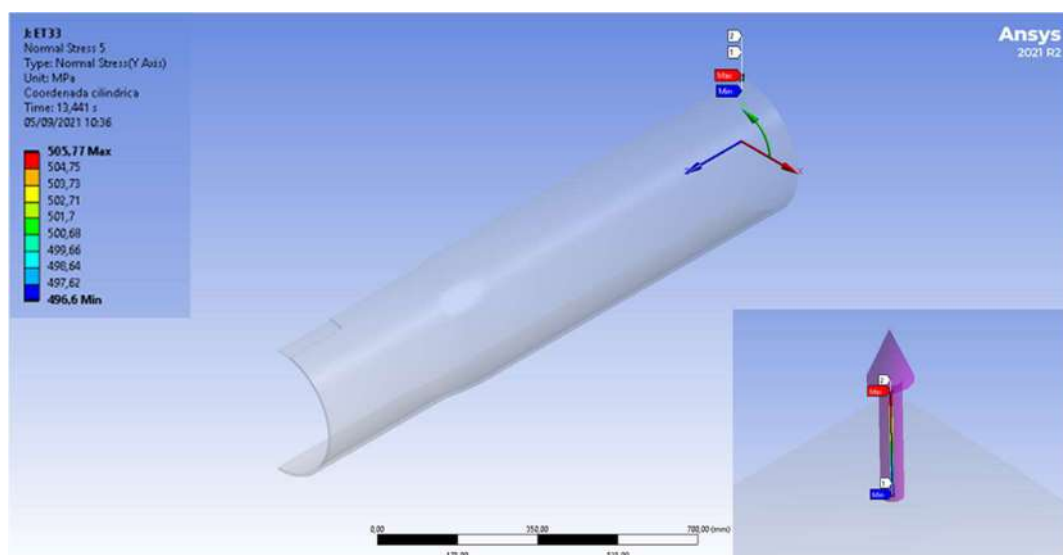
Tensão circunferencial no duto (Lower Bond – ruptura)



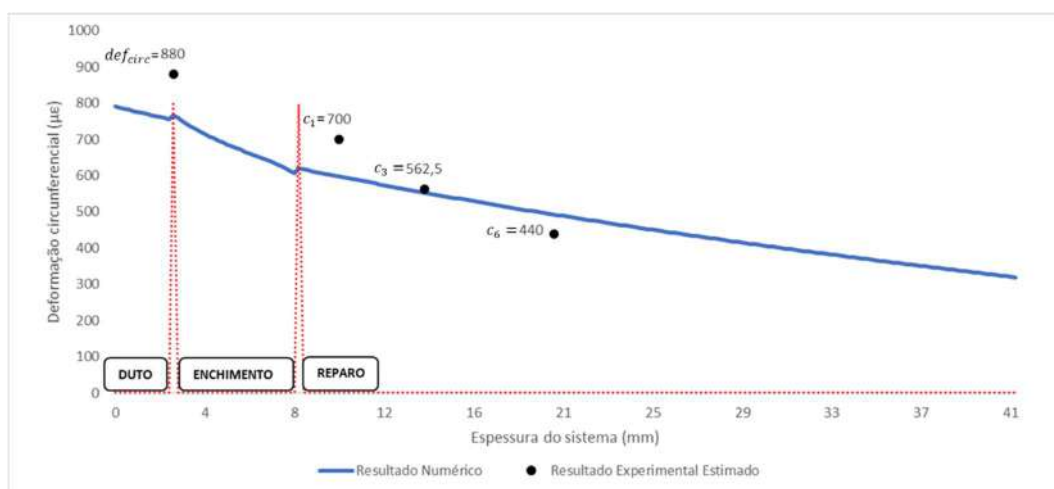
Tensão circunferencial no reparo (Lower Bond – ruptura no duto)



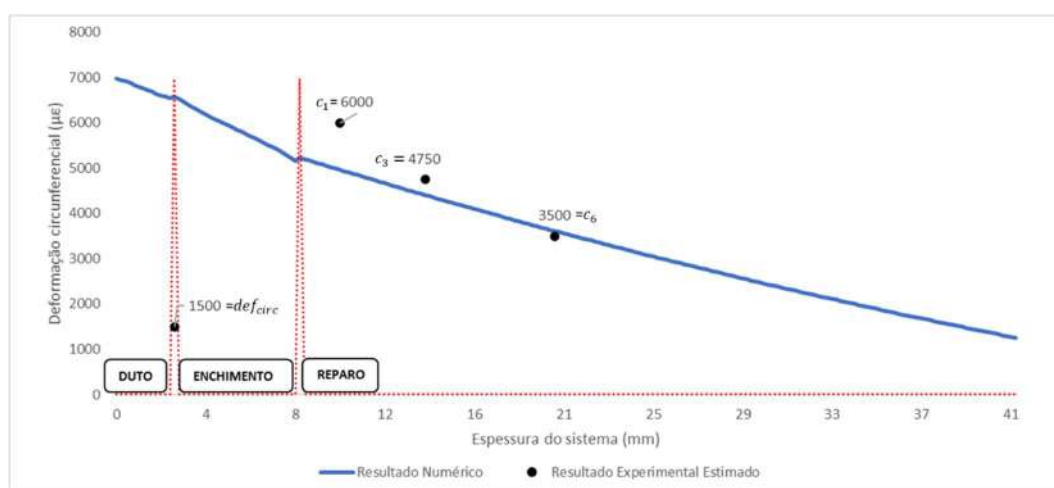
Tensão circunferencial no adesivo de enchimento (Lower Bond – ruptura no duto)



Tensão circunferencial no duto (Upper Bond – ruptura no duto)



Deformações circunferenciais elásticas



Deformações circunferenciais plásticas

Apêndice IV – Tensões, deformações e critérios de falha aplicados a dutos

A metodologia da presente pesquisa é dividida em três abordagens: experimental, analítica e numérica. Além dos testes experimentais, que teoricamente é onde se busca obter os resultados considerados mais próximos de situações reais em relação aos dutos em campo, serão também apresentados diferentes modelos, técnicas e cálculos desenvolvidos para a possível comprovação do comportamento experimental e sua utilização segura em previsões futuras.

Tensões

No caso, por exemplo, de um duto com diâmetro externo D , espessura t e operando sob determinada pressão interna P , sem nenhum outro carregamento significativo, essa verificação fica ainda mais simples já que a própria pressão interna induz tensões na estrutura que correspondem exatamente às tensões principais de acordo com os eixos circunferencial, longitudinal e radial. A figura 2 abaixo ilustra esta situação:

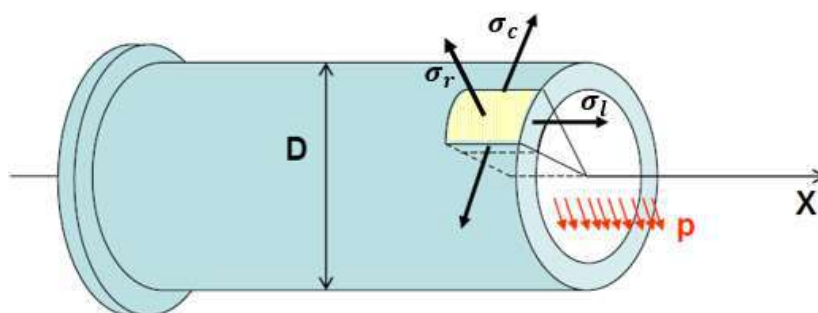


Figura 91 - Desenho esquemático ilustrando o estado de tensões na parede de um espécime tubular. Fonte: (FREIRE, 2018).

onde denomina-se σ_c a tensão circunferencial, σ_l a tensão longitudinal e σ_r a tensão radial, e considerando-se um duto com tampas nas extremidades e paredes finas ($D/t > 20$), e que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ são as tensões principais em dado elemento, tem-se que:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{PD}{2t} \quad (48)$$

$$\sigma_2 = \sigma_l = \frac{PD}{4t} \quad (49)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = -P \cong 0 \quad (50)$$

Nesse caso, a tensão radial possui um valor muito menor quando comparada às outras tensões. Por isso, normalmente desconsidera-se σ_r nos cálculos de avaliação da integridade e pode-se tratar o problema como um estado de tensão biaxial.

Na situação em que o duto é impedido de sofrer qualquer deformação longitudinal, como por exemplo quando está enterrado, uma tensão nessa mesma direção é induzida em contraponto ao não deslocamento, dada por

$$\sigma_l = \nu \frac{PD}{2t} \quad (51)$$

sendo ν o coeficiente de Poisson.

Por outro lado, quando se trata de dutos de parede espessa ($D/t \leq 20$), com raio interno a , raio externo b e r como variável que vai de a até b , tem-se que a distribuição de tensão ao longo da espessura não é mais aproximadamente constante, o que leva às equações

$$\sigma_r = \frac{P \cdot a^2 \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (52)$$

$$\sigma_c = \frac{P \cdot a^2 \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (53)$$

que, como pode-se notar, a tensão σ_r não pode ser mais desconsiderada e, portanto, o problema é tratado como um estado triaxial de tensões.

Deformações

Outra grandeza que tem papel fundamental nos cálculos estruturais é a deformação. Em física e engenharia, a deformação ε de um corpo contínuo é definida como quaisquer mudanças na configuração geométrica do corpo que acarrete uma variação de sua forma ou das suas dimensões iniciais após a aplicação de uma ação externa (solicitação), como uma tensão ou uma variação térmica

suficiente para alterar a forma de um corpo. Traduzindo matematicamente, tem-se que:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (54)$$

Nesse caso, o comprimento final l_f e o comprimento inicial l_0 na equação acima fornecem o cálculo para a deformação nominal na direção dos deslocamentos, sendo o caráter nominal devido à consideração apenas da dimensão inicial.

A deformação real ou verdadeira no processo de carregamento pode ser estabelecida imaginando-se uma sequência de etapas de carregamento onde o corpo alonga-se de um valor Δl . Tomados intervalos Δl_i muito pequenos, ou seja, aumentando indefinidamente o número de etapas i , a deformação pode ser definida como:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (55)$$

As deformações causadas pelas tensões podem ser classificadas basicamente em dois tipos:

- a) Deformação elástica: onde o corpo, após deformado, tende a retornar para sua forma inicial quando há a supressão da solicitação;
- b) Deformação plástica: onde o corpo não retorna para sua posição inicial quando a solicitação é retirada, permanecendo assim uma parcela alterada.

É possível obter as propriedades do material a ser trabalhado através de ensaios, tal como o conhecido ensaio de tração realizado uniaxialmente em um corpo de prova, cujo resultado gráfico típico para materiais dúcteis, como o aço, é exemplificado na figura 3 abaixo:

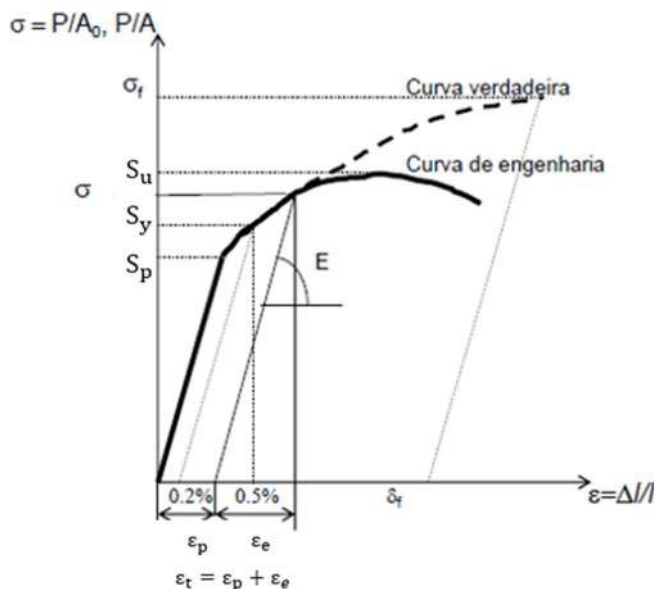


Figura 92 - Exemplo de curva tensão-deformação obtida de ensaio de tração uniaxial para o aço. Fonte: (FREIRE, 2018).

Como pode-se observar no gráfico da figura 3, existe uma relação linear elástica entre a tensão e a deformação, a qual é firmada pelo Módulo de Elasticidade (E) através da relação de Hooke (equação 9).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (56)$$

Esta etapa ocorre até a tensão limite de proporcionalidade (S_p). Após o material alcançar a tensão limite de resistência ao escoamento (S_y), todo carregamento extra acarretará numa parcela de deformação permanente, ou seja, tem-se início a fase plástica que, para um material dúctil como aço, alcança a tensão de resistência à tração (S_u) e termina em uma tensão menor que é onde ocorre a ruptura do material.

Ainda no gráfico da Figura 3, ε_p representa a deformação plástica, ε_e a deformação elástica e ε_t a deformação total.

Existem diferentes técnicas que podem ser realizadas experimentalmente a fim de avaliar de forma efetiva as relações entre tensão e deformação em estruturas

sob solicitação de cargas. A Análise Experimental de Tensões (AET) é uma área bastante desenvolvida e aplicada na indústria, tendo papel decisivo não só na caracterização do estado de tensões e/ou deformações em regiões do corpo em estudo, como também na análise prática da resistência mecânica.

Como exemplos de técnicas voltadas para caracterização das deformações podem ser citadas:

- A utilização de extensômetros (também conhecidos como *Strain Gages*) para medição pontual de deformações;
- A Análise Termoelástica de Tensões (sigla em inglês “*TSA*”) para relacionar o incremento de temperatura, causado pela deformação elástica no corpo, com as tensões principais atuantes;
- A Correlação Digital de Imagens (sigla em inglês “*DIC*”) que, através do uso de câmeras especiais, consegue mapear o campo de deslocamentos e deformações na região de interesse.

Cada técnica possui suas características e especificações próprias de aplicação e análise. Para um estudo em três dimensões, as relações constitutivas elásticas podem ser representadas como:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z) \quad (57)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu \sigma_z) \quad (58)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (59)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{xy} \quad (60)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{xz} \quad (61)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \tau_{yz} \quad (62)$$

sendo respectivamente ε_x , ε_y e ε_z as deformações normais e γ_{xy} , γ_{xz} e γ_{yz} as deformações cisalhantes correspondentes ao eixo xyz .

Critérios de Falha

Em termos estruturais, existem dois critérios de resistência comprovadamente eficazes e amplamente utilizados para a avaliação de materiais dúcteis: o critério de Tresca ou da máxima tensão cisalhante e o critério de Von Mises ou da máxima energia de distorção. Ambos podem ser aplicados para casos em que os modos de falha consideram escoamento ou ruptura.

O critério de Tresca determina que um material escoa se a tensão cisalhante máxima num ponto de análise for igual ou superior à tensão máxima cisalhante atuante no ensaio de tração no momento do escoamento. Em outras palavras, a tensão equivalente de Tresca representa um estado equivalente ao estado triaxial do ponto em análise,

$$\sigma_{Tresca} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} = \frac{S_y}{2} \quad (63)$$

O critério de Von Mises estabelece que existe escoamento se a energia de distorção num dado ponto de análise da estrutura em um estado triaxial for igual ou superior à energia de distorção atuante do corpo de prova de um ensaio de tração no instante em que há escoamento. A equação resultante é a seguinte:

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)} = S_y \quad (64)$$