

APLICAÇÃO DE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA PREVISÃO DE
REPAROS DE DUTOS COM MATERIAL COMPÓSITO

Silvia Maria Nunes Alves Loureiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph. D.

Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D. Sc.

Prof. Célio Albano da Costa, Ph. D.

Prof. Luiz Carlos Pereira, D. Sc

Prof. Telmo Roberto Strohaecker, D. Sc

Prof^a. Verônica Calado, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2005

LOUREIRO, SILVIA MARIA NUNES
ALVES

Aplicação de método de elementos
finitos na previsão de reparos de dutos com
material compósito [Rio de Janeiro] 2005

XII, 171 p. 29,7 cm (Coppe / UFRJ, D. Sc.,
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Reparo
2. Material Compósito
3. Elementos Finitos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

*Aos meus pais, Antonio e Miriam,
que dividiram comigo as dificuldades
encontradas para realização desta tese
e acreditaram que eu seria capaz de superá-las.*

*A minha filha Bárbara por
compreender que, muitas vezes, precisei
dedicar mais tempo a tese que a ela.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por colocar em meu caminho todos que contribuíram para a concretização deste trabalho:

- meus pais, pelo amor, carinho e apoio irrestrito em todas as horas e aos meus irmãos pelo incentivo constante. É neles que encontro estímulo para tudo que tenho realizado.
- meus orientadores, professor Bastian e professor Julio, pelas idéias, pela confiança e, sobretudo, por não me deixarem desanimar.
- Marcio, meu marido, pela paciência durante todo o tempo despendido na elaboração da tese.
- meus chefes, os engenheiros Carlos Hage e Francisco Eduardo Pereira, pela compreensão durante todo o tempo que eu dediquei a elaboração da tese.
- a Softec - Software Technology, representante do programa de elementos finitos, por esclarecer alguns problemas que surgiram na elaboração dos modelos.
- o professor Theodoro, do Programa de Engenharia Naval e Oceânica, por disponibilizar o Laboratório de Tecnologia Submarina - LTS, para realização dos ensaios hidrostáticos e os técnicos, Fabrício, Tadeu e em especial o Júnior, pela dedicação e seriedade com que executou os experimentos.
- o Ramos Arruda, pela ajuda na confecção dos desenhos no Autocad.
- os amigos do Laboratório de Compósitos, Enrique, Andres, Marcelo, Camila, Ana Beatriz, Wanderley e Fabíola, pelo carinho com que sempre me trataram durante o tempo que convivi com cada um deles. Em especial a Renata, pelas horas de trabalho que dividiu comigo no mapeamento dos tubos e pela amizade; a Ledjane, de quem aprendi a gostar muito e a Patrícia pelas belas lições de fé que me transmitiu.
- os funcionários da secretaria do PEMM, que sempre foram atenciosos comigo, em especial a Cláudia e a Célia.
- e tantas outras pessoas que indiretamente me ajudaram nesta trajetória.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

APLICAÇÃO DE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA PREVISÃO DE
REPAROS DE DUTOS COM MATERIAL COMPÓSITO

Silvia Maria Nunes Alves Loureiro

Agosto/2005

Orientadores: Fernando Luiz Bastian

Julio Cesar Ramalho Cyrino

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A presente tese tem como objetivo a aplicação do método de elementos finitos utilizando o programa ANSYS[®], para a previsão de reparos de dutos com materiais compósitos com perda de espessura por corrosão.

Os defeitos foram usinados por eletroerosão em diferentes profundidades e comprimentos. Pressões de ruptura foram calculadas através dos métodos B31G, 085 dL, Effective Area e DNV RP F-101 e os tubos foram submetidos a ensaios hidrostáticos e levados até a ruptura.

As espessuras do reparo foram calculadas através de uma equação empírica e feita aplicação do compósito na região do defeito. Um modelo de elementos finitos foi elaborado a fim de prever o comportamento da estrutura, através de análise não linear estática. Para validar o modelo, estes tubos foram igualmente levados a ruptura. Os resultados teóricos, experimentais e numéricos foram, então, comparados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degrees of Doctor of Science (D.Sc.)

THE USE OF FINITE ELEMENTS METHOD TO ESTIMATE PIPELINE REPAIR
USING COMPOSITE MATERIALS

Silvia Maria Nunes Alves Loureiro

August/2005

Advisors: Fernando Luiz Bastian

Julio Cesar Ramalho Cyrino

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The objective of the thesis is to use the finite elements method (ANSYS[®]) to estimate the repair of corrosion damaged pipelines with composite materials.

Defects of different lengths and deepness were machined in the pipelines using sparking (electro-erosion) machine. The rupture pressures were calculated through the methods B31G, 0.85 dL, Effective Area and DNV RP-F101 and the pipes were subject to hydrostatic test till rupture.

The repair thicknesses were calculated using an empirical equation. The composite repairs were then applied on the pipes in the region of the defects. A finite element model was made in order to predict the behavior of the system through a non-linear static analysis. In order to validate the model, the pipes were tested till rupture. The theoretical, numerical and experimental results were then compared.

ÍNDICE

Capítulo I. Introdução	1
Capítulo II. Revisão Bibliográfica	4
II.1 Materiais compósitos	4
II.1.1 Definição, classificação e características	6
II.1.2 A Regra das misturas	8
II.1.3 Matrizes, fibras e interface fibra/matriz	10
II.2. Processos de fabricação	23
II.3 Falha em dutos	25
II.4 Pressão de ruptura em dutos corroídos	31
II.4.1 ASME B31G	33
II.4.2 0.85 d L	35
II.4.3 <i>Effective Area</i>	36
II.4.4 DNV RP-F101	37
II.5 Reparo de dutos corroídos	40
II.5.1 Mecânica do reparo de dutos	41
II.5.2 Aplicação do reparo	46
II.6 Espessura de camada do reparo	49
II.7 Resistência mecânica dos materiais compósitos	54
II.7.1 Critério de falha da lâmina	55
II.7.2 Falha do laminado	58
II.8 Análise numérica-o método de elementos finitos	60
II.8.1 Análise não linear	62
Capítulo III. Procedimento Experimental	65
III.1 Caracterização do material	65

III.2 Mapeamento dos tubos	68
III.3 Fabricação dos defeitos	71
III.4 Determinação das pressões de ruptura teóricas dos tubos	74
III.5 Cálculo das espessuras de camadas de reparo	79
III.6 Aplicação do reparo	82
III.7 Modelagem dos tubos	88
III.8 Ensaio hidrostático dos tubos	94
III.9 Resultados Numéricos	123
III.9.1 Tubo TPC 164 G	123
III.9.2 Tubo TPC 163 E	134
III.10 Comparação dos resultados	143
Capítulo IV Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	146
Capítulo V Revisão bibliográfica	147
Anexo I	152
Anexo II	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Classificação dos compósitos quanto a geometria da fase de reforço</i>	7
Figura 2. <i>Exemplos de compósitos reforçados</i>	7
Figura 3. <i>Estrutura da molécula da resina epoxi</i>	13
Figura 4. <i>Esquema de produção das fibras de vidro</i>	19
Figura 5. <i>Esquema do processo de fabricação manual</i>	24
Figura 6. <i>Pites de corrosão</i>	27
Figura 7. <i>Defeitos de corrosão em dutos</i>	31
Figura 8. <i>Métodos de cálculo da resistência remanescente</i>	33
Figura 9. <i>Detalhe dos comprimentos para cálculo pelo método "Effective Area"</i>	36
Figura 10. <i>Duto com reparo em compósito</i>	42
Figura 11. <i>Duto com reparo submetido à pressão interna</i>	44
Figura 12. <i>Deformações no duto e no reparo</i>	45
Figura 13. <i>Comportamento mecânico do duto com reparo de compósito</i>	46
Figura 14. <i>Corpo de prova usado no ensaio de tração</i>	66
Figura 15. <i>Dimensões do corpo de prova confeccionados</i>	66
Figura 16. <i>Curva tensão x deformação de engenharia do aço</i>	67
Figura 17. <i>Dispositivo para mapeamento dos tubos</i>	68
Figura 18. <i>Tubo mapeado</i>	68
Figura 19. <i>Esquema dos defeitos usinados nos tubos</i>	71
Figura 20. <i>Defeito usinado em tubo</i>	72
Figura 21. <i>Medida da profundidade do defeito</i>	72
Figura 22. <i>Pressões de ruptura calculadas para $L= 21\text{ mm}$</i>	76
Figura 23. <i>Pressões de ruptura calculadas para $L=42\text{ mm}$</i>	76
Figura 24. <i>Defeito nivelado com material de enchimento</i>	86
Figura 25. <i>Tubo com defeito reparado com material compósito</i>	87
Figura 26. <i>Curva tensão x deformação do material compósito</i>	91
Figura 27. <i>Curva tensão x deformação de engenharia e verdadeira do aço</i>	91
Figura 28. <i>Curva tensão deformação do material de enchimento</i>	92
Figura 29. <i>Elemento estrutural SOLID 45</i>	92
Figura 30. <i>Malha mapeada de tubo com reparo</i>	93
Figura 31. <i>Esquema do dispositivo de ensaio</i>	94

Figura 32. <i>Detalhes do dispositivo de ensaio</i>	95
Figura 33. <i>Tubo com defeito e sem reparo instrumentado</i>	96
Figura 34. <i>Tubo com reparo instrumentado</i>	96
Figura 35. <i>Esquema da seção do tubo sem reparo</i>	97
Figura 36. <i>Esquema da seção do tubo com reparo</i>	97
Figura 37. <i>Esquema do dispositivo ligado à bomba hidráulica</i>	98
Figura 38. <i>Dispositivo pronto para ensaio</i>	98
Figura 39. <i>Bomba hidráulica e sistema de aquisição de dados</i>	99
Figura 40. <i>Curva pressão x tempo do duto intacto</i>	101
Figura 41. <i>Aspecto das falhas após ensaio hidrostático</i>	102
Figura 42. <i>Tubo TPC 16 3 D após ensaio hidrostático</i>	104
Figura 43. <i>Ruptura do material compósito no tubo TPC 163 E após ensaio</i>	105
Figura 44. <i>Abaulamento do tubo TPC 163 E fora do reparo</i>	105
Figura 45. <i>Curva pressão x deformação do tubo TPC 163 E com reparo</i>	106
Figura 46. <i>Tubo TPF 1B após ensaio hidrostático</i>	107
Figura 47. <i>Reparo do tubo TPC 165 E após ensaio hidrostático</i>	108
Figura 48. <i>Abaulamento do tubo TPC 165 E fora do reparo</i>	108
Figura 49. <i>Ruptura do tubo TPC 165 E fora do reparo</i>	109
Figura 50. <i>Curvas pressão x deformação dos tubos TPF 1B e TPC 165 E</i>	109
Figura 51. <i>Tubo TPC 164 H após ensaio hidrostático</i>	110
Figura 52. <i>Reparo do tubo TPC 165 D após ensaio hidrostático</i>	111
Figura 53. <i>Abaulamento do tubo TPC 165 D após o ensaio</i>	111
Figura 54. <i>Tubo TPC 165 D com a falha do material fora do reparo</i>	112
Figura 55. <i>Curva pressão x deformação dos tubos TPC165 D e TPC 164H</i>	112
Figura 56. <i>Tubo TPC 163 A após ensaio hidrostático</i>	113
Figura 57. <i>Ruptura do material compósito após ensaio do tubo TPC 163 C</i>	114
Figura 58. <i>Abaulamento do tubo TPC 163 C fora do reparo</i>	114
Figura 59. <i>Abaulamento do tubo TPC 163C fora do reparo</i>	115
Figura 60. <i>Curvas pressão x deformação dos tubos TPC 163 C e TPC 163 A</i>	115
Figura 61. <i>Tubo TPC 164 E após ensaio hidrostático</i>	116
Figura 62. <i>Tubo TPC 164 G após ensaio hidrostático</i>	117
Figura 63. <i>Abaulamento do tubo TPC 164 G fora do reparo</i>	117
Figura 64. <i>Abaulamento do tubo TPC 164 G na ruptura fora do reparo</i>	118
Figura 65. <i>Curva pressão x deformação dos tubos TPC 164 G e TPC 164 E</i>	118

Figura 66. <i>Tubo TPC 165 A após ensaio hidrostático</i>	119
Figura 67. <i>Tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático</i>	120
Figura 68. <i>Falha do tubo TPC 165 C fora do reparo</i>	120
Figura 69. <i>Abaulamento do tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático</i>	121
Figura 70. <i>Curva pressão x deformação dos tubos TPC 165 C e TPC 165 A</i>	121
Figura 71. <i>Ruptura do tubo TPC 164 G</i>	123
Figura 72. <i>Tensões circunferenciais na estrutura</i>	124
Figura 73. <i>Detalhes das tensões circunferenciais do tubo TPC 164 G</i>	124
Figura 74. <i>Detalhes da região do defeito do tubo TPC 164 G</i>	125
Figura 75. <i>Tensões circunferenciais no material de enchimento</i>	125
Figura 76. <i>Tensões circunferenciais no reparo</i>	126
Figura 77. <i>Detalhes das tensões circunferenciais no reparo</i>	126
Figura 78. <i>Deformações plásticas circunferenciais do tubo TPC 164 G</i>	127
Figura 79. <i>Detalhes das deformações circunferenciais na área reparada</i>	127
Figura 80. <i>Deformações circunferenciais no centro do defeito</i>	128
Figura 81. <i>Deformações circunferenciais no compósito</i>	128
Figura 82. <i>Tensões circunferenciais ao longo da espessura</i>	129
Figura 83. <i>Deformações circunferenciais ao longo da espessura</i>	129
Figura 84. <i>Pressão x deformação no material compósito</i>	130
Figura 85. <i>Pressão x deformação no material compósito</i>	130
Figura 86. <i>Tensões circunferenciais no tubo TPC 163 E</i>	134
Figura 87. <i>Tensões circunferenciais máximas na estrutura</i>	134
Figura 88. <i>Tensões circunferenciais no tubo</i>	135
Figura 89. <i>Tensões circunferenciais máximas na região do defeito</i>	135
Figura 90. <i>Tensões circunferenciais máximas no reparo</i>	136
Figura 91. <i>Detalhe das tensões no bordo do compósito</i>	136
Figura 92. <i>Deformações circunferenciais no tubo</i>	137
Figura 93. <i>Detalhes das deformações circunferenciais no tubo</i>	137
Figura 94. <i>Deformações circunferenciais no material compósito</i>	138
Figura 95. <i>Detalhes das deformações circunferenciais no bordo do compósito</i>	138
Figura 96. <i>Tensão circunferencial ao longo da espessura</i>	139
Figura 97. <i>Deformação circunferencial ao longo da espessura</i>	139
Figura 98. <i>Pressão x deformação no compósito</i>	140
Figura 99. <i>Tensão x deformação no tubo</i>	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 <i>Regra das misturas</i>	9
Tabela 2 <i>Propriedades das resinas termorrígidas</i>	14
Tabela 3 <i>Vantagens e desvantagens de alguns agentes de cura</i>	16
Tabela 4 <i>Classes de modificadores para resina epoxi</i>	16
Tabela 5 <i>Vantagens e desvantagens de algumas fibras de reforço</i>	17
Tabela 6 <i>Propriedades mecânicas das fibras</i>	18
Tabela 7 <i>Algumas formas de fibras disponíveis no mercado</i>	20
Tabela 8 <i>Principais causas de falha em dutos</i>	26
Tabela 9 <i>Tipos de corrosão e suas características</i>	30
Tabela 10 <i>Equações para cálculo das pressões de ruptura</i>	39
Tabela 11 <i>Propriedades mecânicas dos corpos de prova de aço</i>	66
Tabela 12 <i>Levantamento dimensional dos tubos</i>	70
Tabela 13 <i>Levantamento dimensional dos defeitos usinados</i>	73
Tabela 14 <i>Cálculo das pressões de ruptura dos tubos com defeito</i>	75
Tabela 15 <i>Pressões de ruptura do tubo intacto e dos tubos com reparo</i>	78
Tabela 16 <i>Cálculo das espessuras de camada de compósito</i>	81
Tabela 17 <i>Propriedades mecânicas do sistema 8003+40%104</i>	83
Tabela 18 <i>Propriedades mecânicas do enchimento</i>	84
Tabela 19 <i>Propriedades mecânicas das configurações de compósito</i>	85
Tabela 20 <i>Espessura de camada de compósito aplicada</i>	87
Tabela 21 <i>Geometria dos modelos de elementos finitos</i>	90
Tabela 22 <i>Propriedades dos materiais da estrutura</i>	90
Tabela 23 <i>Número de elementos</i>	93
Tabela 24 <i>Pressões de ruptura de tubo intacto e tubos sem reparo</i>	100
Tabela 25 <i>Pressões de ruptura de tubos com reparo</i>	103
Tabela 26 <i>Ganhos em resistência dos tubos reparados</i>	122
Tabela 27 <i>Comparação das pressões de ruptura dos tubos com reparo</i>	143
Tabela 28 <i>Comparação das pressões de ruptura dos tubos sem reparo</i>	144

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

Desde a década de 50, os dutos têm sido usados como um dos meios mais econômicos e seguros de conduzir óleo e gás, e um número elevado deles estão em construção no mundo todo. Em consequência disso, a quantidade de acidentes tem aumentado muito e sua integridade é de extrema importância devido as características explosivas dos produtos transportados. Atualmente, a contaminação da água e do solo devido aos diversos tipos de falhas vêm surgindo como um dos problemas críticos que afetam a preservação do meio ambiente. Por essas razões, esforços intensos têm sido efetuados para determinação dessa integridade estrutural.

O desenvolvimento de novos materiais com propriedades adequadas para uso específico, aumentou a oportunidade de aplicação de compósitos para reparos de dutos com defeitos. A técnica consiste em envolver o duto com mantas de material polimérico reforçado por fibras e executar sua cura. Outro método é a utilização de placas finas de material compósito já curado envolvendo o duto. Executa-se o reparo de forma que as fibras do material fiquem na direção da tensão circunferencial, que é a maior tensão atuante na seção transversal do duto. Desta forma é utilizada a grande capacidade do material resistir à tensão na direção específica.

Esse procedimento não exige a parada de operação, elimina o uso de solda diminuindo o risco de acidentes e não requer a confecção de moldes, tornando menor o tempo e o custo de execução do reparo.

Devido a complexidade do comportamento da estrutura reparada, analisar o estado de tensões através de soluções analíticas apresenta sérias dificuldades. É impossível resolver essas equações sem simplificações e considerações substanciais.

Durante as últimas duas décadas, avanços consideráveis têm sido feitos na aplicação de técnicas numéricas para analisar estruturas. Entre esses procedimentos, o mais utilizado é o método de elementos finitos que consiste, basicamente, em esquematizar uma estrutura altamente complexa como uma soma de elementos unidos. A comparação do modelo real será tão precisa quanto maior a subdivisão dos elementos.

A enorme vantagem deste método está no fato dele poder ser aplicado em estruturas de geometria complexa que não podem ser resolvidas pelos métodos tradicionais.

Naturalmente, como em outras técnicas que se baseiam em um modelo matemático, que é uma aproximação do modelo real, os resultados obtidos devem ser oportunamente testados para a validação dos mesmos.

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação do método de elementos finitos utilizando o programa ANSYS[®] para a previsão de reparos com materiais compósitos em estruturas tubulares, com defeitos em sua superfície externa apresentando formato elíptico, em diferentes profundidades e os comprimentos.

Após o mapeamento dos dutos com medições das espessuras por ultrassom e os defeitos usinados por eletroerosão, estes foram submetidos a ensaios hidrostáticos.

Para estimar as pressões de ruptura, foram usados os códigos ASME B31 G, 0.85dL, *Effective Area* e DNV RPF-101 e os valores obtidos comparados com as pressões de ruptura reais.

Tubos com defeitos idênticos foram reparados com material compósito com espessuras calculadas de acordo com uma equação empírica. Um modelo de elementos finitos foi elaborado, a fim de prever o comportamento da estrutura, através de análise não linear estática. Para validar o modelo numérico, os tubos reparados foram igualmente levados até a ruptura. Os resultados teóricos, experimentais e numéricos foram então comparados.

Serão apresentados aqui, os itens considerados importantes na previsão de reparos com materiais compósitos.

O Capítulo II que trata da revisão bibliográfica, está dividido em 8 partes. Na parte 1 são apontados os aspectos relacionados ao compósito e as propriedades dos materiais constituintes.

Na parte 2, são descritos os processos de fabricação dos materiais compósitos. Na parte 3, a corrosão é focalizada como o problema mais freqüente, responsável pela falha dos dutos. Na parte 4 é feito um relato dos principais códigos para cálculo das pressões de ruptura dos dutos corroídos. Na parte 5 é mostrada a mecânica dos reparos.

Na parte 6 é introduzida uma fórmula empírica para cálculo da espessura de camada a ser aplicada na região do defeito. Na parte 7 são apresentados os modos de falha do material compósito e, finalmente, na parte 8, são abordados aspectos do método de elementos finitos.

No Capítulo III é estabelecida a metodologia empregada no desenvolvimento do presente estudo, que tem início com o levantamento das propriedades mecânicas do aço, a modelagem numérica para a previsão de reparo com o material compósito e os ensaios hidrostáticos para validação dos modelos, passando por todas as etapas que envolvem a escolha, a fabricação e aplicação do compósito na região do defeito.

E, finalmente, no Capítulo IV são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Observa-se na história da humanidade que, dentre as diversas maneiras de avaliação do padrão de vida de um país ou sociedade, o consumo de materiais de engenharia por indivíduo, pode ser uma das mais explícitas. Os bens manufaturados, são obtidos por meio de conversão de materiais de engenharia, adicionando-lhes valor. A história tem demonstrado que, quanto mais eficientes os sistemas de produção na realização desta conversão, maior será o padrão de vida da sociedade. No ano de 2000 a.C. isto iria, presumivelmente, ser determinado pelo consumo de pederneira, utilizada como ferramenta de corte. Em torno de 1500 a.C., a tonelagem de bronze, provavelmente revelaria quem eram as potências mundiais. Por volta de 1830 d. C., teria sido o aço seguido, mais recentemente, pelas ligas leves e superligas.

Uma série de experiências na Royal Aircraft Establishment, em Farnborough, na Inglaterra, levou à descoberta, em meados de 1964, das fibras de carbono de alta resistência e alta rigidez e dos seus compósitos. Nas duas décadas seguintes, a produção de materiais compósitos reforçados por fibra havia crescido a uma taxa apenas desfrutada pelo aço até seu apogeu. [1]

Os benefícios trazidos pelos materiais compósitos são conhecidos há séculos - em 4000 a. C. os sumérios já adicionavam palha à lama para aumentar a resistência dos tijolos. Foi somente há alguns anos que o entendimento correto de seu comportamento, bem como a tecnologia para projetá-los, começou a ser desenvolvida. O avião F 111 foi um dos primeiros modelos a incorporar essa tecnologia. Um outro exemplo, é o *Boeing 787* a ser construído por um conglomerado de grandes empresas, que tem material compósito constituído de fibra de carbono com resistência à tração de 5490 MPa e resina epoxi em sua estrutura primária, tais como asas e fuselagem.[2]

A possibilidade de combinar alta resistência e rigidez com baixo peso, tem também despertado a atenção da indústria automobilística; a Ford Motor Company desenvolveu, em 1979, um carro com alguns componentes feitos de material compósito.

Em 1997, a Chrysler desenvolveu um carro completamente baseado em material compósito, conhecido com o CCV, Composite Concept Vehicle, cuja estrutura era totalmente moldada em resina modificada para suportar impacto, com fibra de vidro . A Nissan Motor Co., Ltd, também lançou recentemente um carro que inclui componentes de metal e de fibras de carbono. [3]

Além desses exemplos, a aplicação de material compósito foi aumentada, incluindo, agora, áreas como a indústria náutica, esportiva, civil e aeroespacial e à área petroquímica. [4]

Uma das aplicações mais recentes é no reparo de dutos. Em 1997, o Gas Research Institute (GRI), reuniu uma equipe de pesquisadores, cientistas, engenheiros e especialistas em dutos, a fim de avaliar técnicas alternativas de reparo para complementar métodos tradicionais aprovados pelo Department of Transportation (DOT).

Os métodos convencionais incluem uma das duas formas: cortar o segmento danificado e substituí-lo por um trecho novo através de soldagem , ou cobrir a área danificada com uma luva de metal soldada.

Para fornecer às companhias alternativas seguras e efetivas aos métodos mais caros para reparos de dutos corroídos ou danificados, a equipe foi instruída a determinar a possibilidade de utilizar compósitos no reparo de dutos de alta pressão. [5]

Uma substituição de um trecho através de técnicas convencionais é, sem dúvida, a opção mais cara, pois implica em paradas operacionais.

A execução do reparo utilizando material compósito elimina os custos anteriormente envolvidos e pode ser efetuada com o duto em operação. Consiste em enrolar o compósito em torno da região danificada, o que produz alguma pré-compressão sobre a parede do duto. Como resultado, a tensão circunferencial induzida pelo gás pressurizado é reduzida e o crescimento da trinca é prevenido. [6] [7]

II.1.1 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Ainda hoje, não há uma definição realmente adequada para material compósito. Alguns consideram um compósito como uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, havendo uma interface reconhecível entre eles.[1]

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define como uma mistura física de dois ou mais materiais, combinados para formar um novo material de engenharia, útil, com propriedades diferentes aos componentes puros, podendo ser obtidos por combinação de metais, cerâmicas ou polímeros. [8]

Nesta combinação, os constituintes retêm suas identidades, quer dizer, eles não se dissolvem ou se descaracterizam completamente e atuam em conjunto, fazendo com que as propriedades do compósito sejam diferentes daquelas apresentadas pelos constituintes individualmente.

Porém, em virtude dos compósitos serem normalmente empregados devido às suas propriedades individuais, a definição pode ser restringida a incluir somente aqueles materiais que contenham um reforço e um material aglomerante. O aglomerante tem como função manter os reforços unidos, transmitindo a estes o carregamento aplicado, enquanto os reforços têm como função suportar os carregamentos transmitidos pelo aglomerante.

Deste modo, os compósitos têm, tipicamente, uma ou mais fases descontínuas, envolvidas por uma fase contínua. A fase descontínua é geralmente mais rígida e mais resistente que a fase contínua, denominada matriz. Na condição de assegurar o reforço, geralmente deve haver uma fração volumétrica substancial da fase descontínua.

Quanto à classificação, a geometria da fase descontínua é um dos principais parâmetros a ser considerado, visto que as propriedades mecânicas dos compósitos dependem da forma e das dimensões do reforço. Por esta razão podem ser classificados com base na geometria de seus componentes estruturais, conforme figura 1, separando-os em reforçados por fibras e reforçados por partículas. O reforço fibroso caracteriza-se

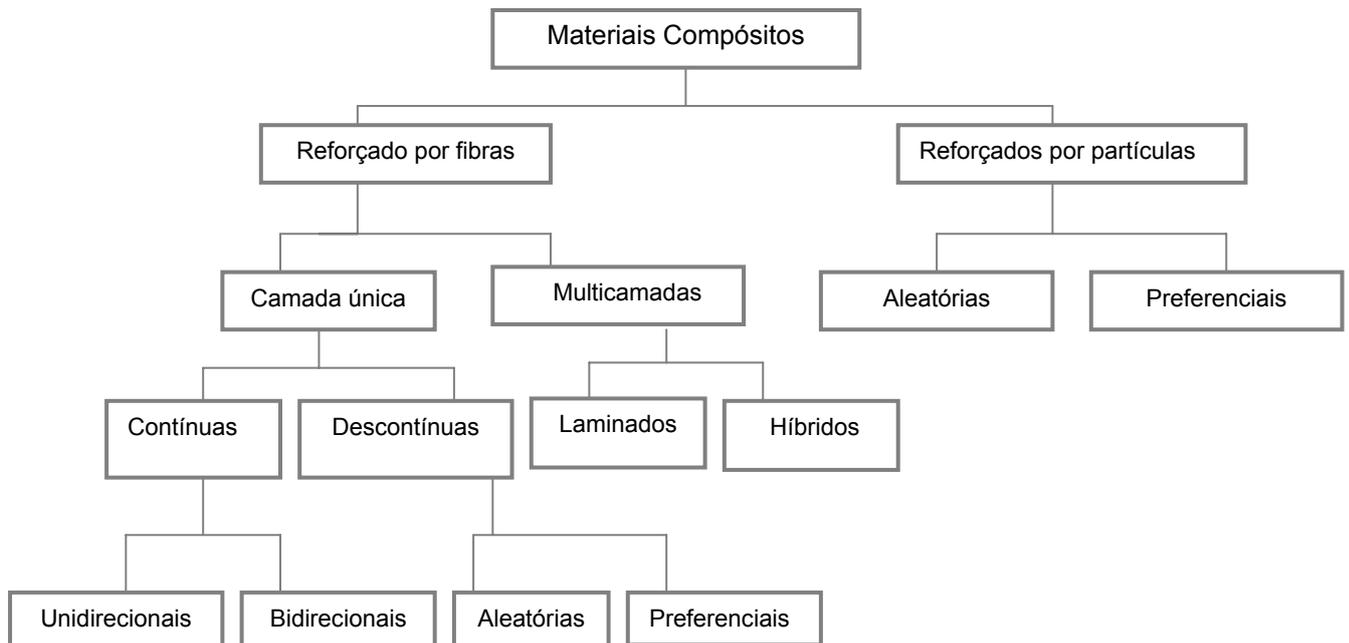


Figura 1. Classificação dos compósitos quanto a geometria da fase de reforço

por seu comprimento ser muito maior que a dimensão de sua seção transversal (diâmetro). Entretanto, esta relação de comprimento com o diâmetro, conhecida como razão de aspecto, pode variar consideravelmente. A figura 2 mostra, esquematicamente, alguns exemplos de compósitos reforçados por partículas e por fibras.[1]

O reforço de fibras apresenta-se, ainda, na forma de mantas e tecidos.

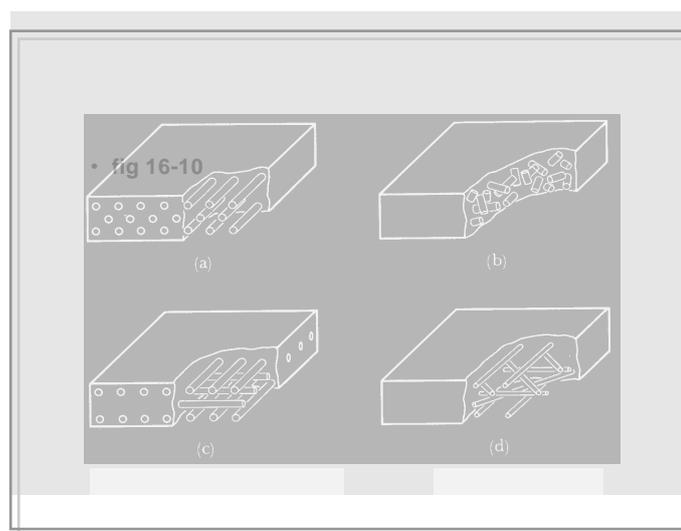


Figura 2. Exemplos de compósitos reforçados:(a) por fibras contínuas unidirecionais; (b) por partículas aleatórias; (c) por fibras contínuas ortogonais; (d) por fibras descontínuas aleatórias.

O uso das fibras está baseado em três características importantes:

- um pequeno diâmetro em relação a seu tamanho de grão ou outra unidade microestrutural. Isto permite que seja alcançada uma fração mais alta da resistência teórica obtida além do que é possível em um diâmetro maior. Isto é um resultado direto do assim chamado efeito do tamanho, ou seja, quanto menor o tamanho, mais baixa a probabilidade de ter imperfeições no material.
- uma alta razão de aspecto (comprimento/diâmetro) que permite que uma fração muito grande do carregamento aplicado seja transferido via matriz para a fibra rígida e forte.
- um alto grau de flexibilidade que é realmente uma característica do material poder ter alto módulo, desde que tenha um diâmetro muito pequeno. Esta alta flexibilidade permite que uma variedade de técnicas seja empregada para fabricação de compósitos com estas fibras. [9]

Uma outra característica importante é a anisotropia, ou seja, suas propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas num ponto do material variam em função da direção nas quais estão sendo analisadas. Isto permite que as propriedades do material sejam desenvolvidas de modo a se obter um desempenho desejado de acordo com os carregamentos aplicados. Em componentes reforçados por fibras contínuas, como laminados unidirecionais ou bidirecionais, a presença da anisotropia pode trazer benefícios, pois pode-se planejar para que a tensão máxima em serviço esteja na direção da mais alta resistência. Assim, essa vantagem recai na capacidade de controlar tal característica através do projeto e da fabricação do material. [1]

II.1.2 A REGRA DAS MISTURAS

Ao se adicionar uma carga a um polímero, para formar um material compósito bifásico, a primeira idéia é de que as propriedades do novo material formado sejam intermediárias entre as propriedades dos dois componentes.

Esse comportamento, previsto para as propriedades de um compósito, é denominado de regra das misturas ou princípio da atividade. A regra das misturas direta, é utilizada para calcular algumas propriedades, cuja equação geral é assim descrita:

$$P = P_m V_m + P_f V_f, \quad (1)$$

onde P é a propriedade do compósito, os índices m e f referem-se aos componentes matriz e fibra e V a fração volumétrica. [8]

Outras propriedades são calculadas pela regra das misturas inversa, como é o caso do módulo de elasticidade transversal.

Em compósitos com fibras em mais de uma direção ou aqueles com reforços particulados ou outros não fibrosos, a equação da regra das misturas direta provê uma limitação superior para o módulo de elasticidade e a equação inversa uma limitação inferior. A maioria dos casos práticos situam-se entre esses dois valores e a busca de modelos para esses casos intermediários tem requerido atenção da comunidade de pesquisa em compósitos.[10]

A tabela 1 apresenta algumas propriedades obtidas através da regra das misturas, em um compósito de fibras unidirecionais, com carregamento aplicado na direção da fibra.[9]

Tabela 1 Regra das misturas

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS	REGRA DAS MISTURAS
Densidade	$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$
Módulo de Elasticidade longitudinal	$E_{cl} = E_f V_f + E_m V_m = E_{11}$
Módulo de Elasticidade transversal	$1/E_{ct} = V_f / E_f + V_m / E_m = E_{22}$
Deformação	$\epsilon_{ct} = \epsilon_f V_f + \epsilon_m V_m$
Resistência longitudinal	$\sigma_{cl} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$

II.1.3 MATRIZES, FIBRAS E INTERFACE FIBRA/MATRIZ

Além das considerações feitas normalmente quando se projeta com materiais convencionais de engenharia, o projetista que utiliza um compósito, tem que considerar também a seleção de seus materiais constituintes, isto é, a proporção, tipo, distribuição e orientação das fibras, dependendo das propriedades requeridas, seleção de processo, geometria do compósito e requisitos de produção.[1]

MATRIZES

As matrizes podem ser poliméricas, metálicas ou cerâmicas. A escolha dependerá das propriedades físicas, mecânicas e térmicas exigidas, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado.

O compósito que será usado no reparo de dutos terá matriz polimérica, particularmente a de resina epoxi, que será, portanto, focalizada aqui com mais detalhe.

As matrizes poliméricas, são as mais utilizadas por serem de fácil moldagem, boa resistência química e baixo peso específico.

O papel da matriz é manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com as fibras em virtude de suas características coesivas e adesivas.

Além disso, tem a função de transferir o carregamento para as fibras e também protegê-las contra o ataque ambiental como corrosão e abrasão, e dos danos devido ao manuseio. Por isso, é essencial que as forças adesivas da interface fibra/matriz, sejam fortes.

De fato, a resistência da interface é uma importante consideração na escolha da combinação fibra/matriz. A resistência à ruptura do compósito depende em grande escala da magnitude da adesão; uma adesão adequada é essencial para maximizar a transferência de carregamento da matriz para as fibras.[11]

A matriz é o elo fraco do compósito, especialmente porque não existem atualmente resinas que resistam às tensões que as fibras são capazes de suportar.

Um ambiente químico agressivo, a umidade do ambiente ou a exposição a outras condições adversas, podem diminuir bastante o desempenho da matriz antes da fibra ser danificada.

Entretanto, as resinas exercem muitas funções essenciais, além das mencionadas anteriormente: elas mantêm as fibras na posição e orientação adequadas de modo a suportar as cargas desejadas, distribuem as cargas quase uniformemente entre as fibras, servem como barreira à propagação das trincas e garantem toda a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito.

As resinas termorrígidas passam por uma reação química irreversível durante a polimerização, conhecida como processo de cura. Durante a cura são formadas ligações cruzadas entre as cadeias moleculares adjacentes, desenvolvendo uma estrutura tridimensional.

Essas ligações cruzadas, à medida que se formam, causam diminuição da mobilidade das cadeias moleculares, provocando a solidificação. Quando a reação química é exotérmica, a temperatura irá influenciar no tempo de cura. Portanto, o processo de cura pode ser acelerado pela aplicação de calor e pressão em condições controladas, por meio de autoclaves. Ou, ainda, pela adição de um catalisador adequado, conhecido como agente de cura, na proporção certa para cada tipo de resina. Quando se solidificam assim permanecem e mesmo que reaquecidas, não se refundem. Sob aquecimento haverá combustão do material e deste modo não podem ser reutilizadas.

Já as resinas termoplásticas consistem de cadeias moleculares lineares ou ramificadas que, ao serem aquecidas sob pressão, a sua consistência altera-se de sólida rígida a líquida viscosa. Neste processo não ocorrem reações químicas ou decomposição. Assim, em outras palavras, as resinas termoplásticas podem "amolecer" seguidamente sob aplicação de calor e pressão e "endurecer" novamente quando resfriadas. [1]

Os sistemas termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta estabilidade térmica, rigidez adequada, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, resistência à fluência e à deformação sob carregamento.

Estes materiais podem ser misturados fisicamente com fibras em método de processamento bastante simples e de baixo custo. Mais de três quartos de todas as matrizes dos compósitos poliméricos são constituídas de resinas termorrígidas. As mais usadas e baratas são os poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas, usadas em compósitos reforçados principalmente com fibras de vidro.

As resinas epoxi são mais caras e, além das aplicações estruturais, são utilizadas na indústria aeroespacial por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à umidade do que os poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas. Em aplicações a altas temperaturas, são empregadas as resinas poli-imidas e seu limite superior de temperatura para utilização em regime contínuo é de aproximadamente 230°C. [8]

Qualquer sistema de resina para uso em um material compósito irá necessitar das seguintes propriedades:

- boas propriedades mecânicas
- boas propriedades adesivas
- boas propriedades de tenacidade
- boa resistência a degradação ambiental [12]

A resina epoxi

Do grego "EP" (sobre ou entre) e do inglês "OXI" (oxigênio), literalmente o termo epoxi significa oxigênio entre carbono, ou seja, um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono.

A primeira resina comercial foi desenvolvida simultaneamente na Europa e nos Estados Unidos, que pesquisavam a reação da epícloridrina e do bisfenol A, no fim de 1930 e início de 1940, dando assim a resina mais comum conhecida como diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). [13]

A molécula abaixo representada, é a resina epoxi antes de ser catalisada que, dependendo do valor de n , pode ser líquida ou sólida, sendo que a viscosidade aumenta conforme vai aumentando o n . Com n menor ou igual a 1 teremos resinas líquidas e com n maior que 1, as resinas podem ser sólidas ou semi-sólidas. [14]

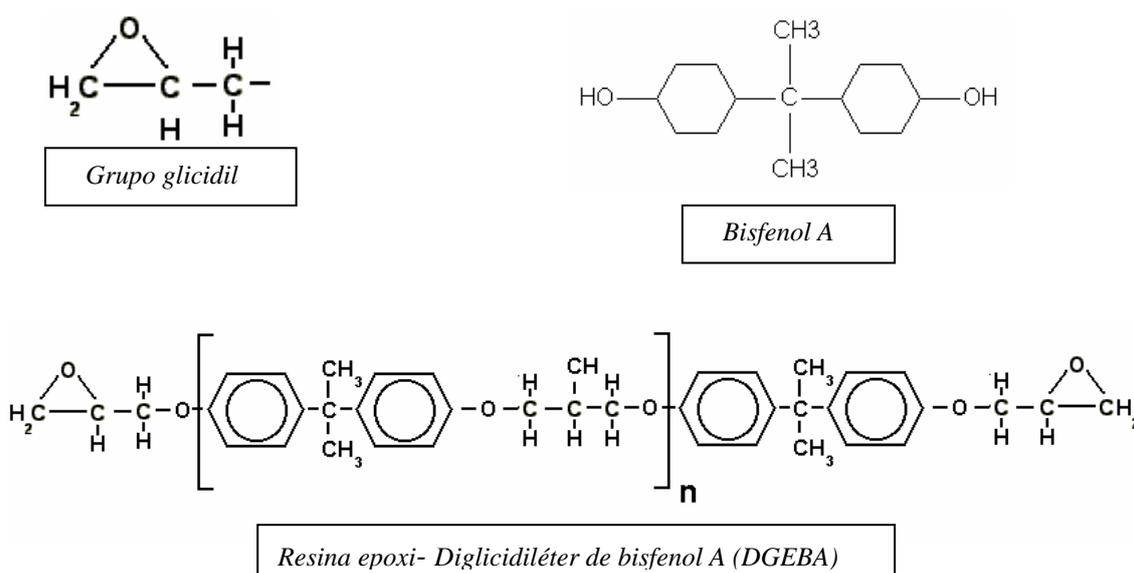


Figura 3. Estrutura da molécula da resina epoxi [14]

Formada a partir de uma cadeia molecular longa, a resina epoxi é semelhante à vinil-éster em relação aos locais reativos nas extremidades. Na resina epoxi, contudo, esses locais reativos são formados por grupos epoxi em lugar dos grupos ésteres. A ausência de grupos ésteres significa que ela tem uma boa resistência a absorção de água. Os anéis no seu centro são capazes de absorver tensões mecânicas e térmicas melhor que os grupos lineares, o que confere à resina boa rigidez, tenacidade e resistência ao calor.

Geralmente identificada por sua cor característica âmbar ou marrom, as resinas epoxi tem um número de propriedades úteis. A resina líquida e seus agentes de cura formam um sistema de baixa viscosidade facilmente processado. São curadas fácil e rapidamente a temperaturas entre 5 e 150 °C, dependendo da escolha do agente de cura. [12]

Possui uma alta resistência, baixa contração, excelente adesão à vários substratos, isolamento elétrico, resistência química e a solventes, baixo custo e baixa toxicidade.

São quimicamente compatíveis com a maioria dos substratos e tendem a molhar as superfícies facilmente, fazendo-as bem adequadas a aplicação em compósitos.[13]

A resina epoxi necessita ser alterada com algum agente flexibilizante, como poliamidas, diaminas graxas, poliésteres e polissulfetos, pois se empregada sem estes agentes apresentará uma excessiva dureza.[15]

A tabela 2 mostra algumas propriedades da resina epoxi em comparação com outros sistemas termorrígidos.

Tabela 2 Propriedades das resinas termorrígidas [16] [17][9]

PROPRIEDADES	EPOXI	POLIÉSTER	POLIIMIDA
Densidade, ρ (g/cm ³)	1,15 - 1,35	1,12 - 1,46	1,43
Módulo de elasticidade, E (GPa)	2,8 - 4,5	1,0 - 4,5	3,10
Resistência à tração, σ (MPa)	55 - 60	30 - 70	72,41
Alongamento, %	1,5 - 8,0	1,7 - 2,5	5-7
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁵ °C ⁻¹)	8-11	-	9

Agentes de cura e modificadores para resina epoxi

Quando uma resina é selecionada, considerações devem ser feitas em relação à resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação, resistência à compressão, resistência ao impacto, temperatura de transição vítrea (T_g), resistência à chama, durabilidade em serviço, disponibilidade, facilidade de processamento e preço.

As resinas epoxi são de particular interesse para aplicações estruturais porque fornecem um equilíbrio entre propriedades químicas e mecânicas combinadas com extrema versatilidade de processamento. Em todos os casos, as resinas termorrígidas podem ser trabalhadas para satisfazer necessidades específicas e sua formulação e processamento são quase sempre mantidos em segredo.

Os três elementos básicos que devem ser entendidos quando da formulação de um sistema de resina ou seja, em que eles contribuem para o desempenho mecânico e

físico da peça durante e após a fabricação, são a resina base, os agentes de cura e os modificadores. [13]

A resina pode curar em temperaturas desde 5 a 260 °C. O produto curado pode ser flexível e maleável ou rígido e frágil, com a T_g variando desde a temperatura ambiente até 260 °C e alongamentos de 1 a mais de 100%.

Quando a funcionalidade e o mecanismo de cura são entendidos, os agentes de cura são usados em quantidades estequiométricas, embora relações de misturas sejam determinadas experimentalmente a níveis recomendados em partes de agente de cura por partes de epoxi.[13]

Esses materiais podem ser divididos em duas principais classes: alcalinos e ácidos. Os agentes alcalinos incluem as bases de Lewis, amidos e poliaminas alifáticas primárias, secundárias e terciárias e os ácidos, que incluem os ácidos de Lewis, fenóis, ácidos orgânicos, anidridos, ácido carboxílico e tióis. As aminas alifáticas são as que mais combinam com as resinas epoxi. Alguns tipos mais usados são etileno diamina (EDA), dietileno triamina (DETA), trietileno tetramina (TETA), tetraetileno pentamina (TEPA).

As reações de adição com aminas primárias e secundárias ocorrem entre o grupo hidrogênio-nitrogênio e o grupo epoxi. Numerosas combinações estão disponíveis, já que várias estruturas epoxi podem conter um, dois, três ou mais locais reativos e a amina pode conter vários grupos hidrogênio-nitrogênio. Tanto o número quanto a distância entre os grupos reativos afetam o desempenho do material. A distância, quando ampla, fornece produtos flexíveis e maleáveis e quando curta, produtos duros e frágeis.[13]

A terceira categoria principal apontada anteriormente para a formulação dos constituintes da resina, são os modificadores. Eles são usados para fornecer desempenho físico e mecânico específicos, tanto em resinas curadas quanto em não curadas. A categoria geral dos modificadores incluem borrachas, termoplásticos, diluentes, retardantes de chama, enchimentos, pigmentos e corantes.

Nas tabelas 3 e 4, são mostrados alguns dos principais agentes de cura, suas vantagens e desvantagens e como os modificadores atuam no sistema de resina epoxi.

Tabela 3 Vantagens e desvantagens de alguns agentes de cura [14]

AGENTES DE CURA	VANTAGENS	DESvantagens
Aminas alifáticas	Cura rápida a T ambiente Baixo custo Baixa viscosidade Boa resistência química Fácil mistura com a resina	Tempo curto de trabalho Altamente exotérmica Alta toxicidade Relação crítica de mistura Pode causar 'blush' (névoa e oleosidade superficial)
Poliamidas	Baixa toxicidade Bom poder de adesão Boa flexibilidade Relação de mistura não crítica Longo tempo de trabalho Boa resistência a água	Alta viscosidade Custo elevado Baixa resistência térmica Baixa resistência química Longo tempo de cura Cores escuras
Aminas cicloalifáticas	Baixa viscosidade Excelente estabilidade de cor Alto brilho Boa resistência química Fácil mistura com a resina Pouco suscetível a <i>blush</i>	Alto custo Cristalização Baixa reatividade Média resistência térmica
Anidridos	Longo tempo de trabalho Baixa viscosidade Alta resistência térmica Boa resistência química Fácil mistura com a resina Alto brilho sem <i>blush</i>	Alto custo Grande relação de mistura Necessidade de cura a quente Cores escuras Necessidade de pós-cura Necessidade de um acelerador

Tabela 4 Classes de modificadores para resina epoxi[13]

CLASSE	FORMA	PROPRIEDADES OBTIDAS
Borrachas	Líquida e sólida	Flexibilidade Resistência a fadiga Resistência a trincas Tenacidade à fratura
Termoplásticos	Líquida	Tenacidade à fratura
Diluentes	Líquida	Redução da viscosidade
Retardantes de chama	Líquida, sólida e pó	Inibidor de chama
Enchimentos	Pós, polpa, flocos, esferas, fibras curtas, <i>whiskers</i>	Resistência ao impacto Reduz a retração Melhora as propriedades térmicas e elétricas

FIBRAS

A função do reforço em um material compósito é fundamentalmente a de melhorar as propriedades mecânicas do sistema de resina. As diversas fibras usadas têm propriedades diferentes e afetam conseqüentemente o compósito de modos diferentes.

As fibras individuais ou feixes de fibras podem ser usados em processos tais como o de enrolamento filamentar. Para muitas aplicações as fibras precisam ser arranjadas sob a formas de tecidos, para tornar a manipulação possível.

As propriedades mecânicas do compósito fibra/matriz polimérica são dominadas pela contribuição da fibra ao compósito. Estão listados a seguir os quatro fatores principais que governam essa contribuição:

- as propriedades mecânicas das fibras individuais
- a interação da superfície das fibras e da resina (interface)
- a quantidade de fibras
- a orientação das fibras [12]

Uma variedade grande de fibras é disponível como reforço para materiais compósitos. As características desejáveis da maioria das fibras são a alta resistência, alta rigidez e densidade relativamente baixa. Cada tipo de fibra tem suas vantagens e desvantagens próprias, conforme tabela 5.

Tabela 5 Vantagens e desvantagens de algumas fibras de reforço [18]

FIBRA	VANTAGENS	DESvantagens
Fibra de vidro tipo E e tipo S	Alta resistência Baixo custo	Baixa rigidez Curta vida em fadiga
Aramida	Alta resistência à tração Baixa densidade	Baixa resistência à compressão
Boro	Alta rigidez Alta resistência à compressão	Alto custo
Carbono (AS4, T300, C6000)	Alta resistência Alta rigidez	Custo moderadamente alto
Grafite	Rigidez muito alta	Baixa resistência Alto custo
Cerâmica (carbeto de silício)	Alta rigidez Uso a altas temperaturas	Baixa resistência Alto custo

Na tabela 6 são mostradas as propriedades mecânicas básicas das fibras mais comumente usadas. Os nomes entre parênteses são dos fabricantes. Os materiais metálicos foram introduzidos na tabela para comparação de suas propriedades com as das fibras. No presente trabalho serão aplicadas fibras de vidro para confecção do compósito no reparo de dutos.

Tabela 6 Propriedades mecânicas das fibras [9] [18]

TIPO DE MATERIAL	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DENSIDADE TÍPICA (g/cm ³)
Carbono (Hércules)	3730	235	1,81
Aramida (Du Pont)	3400	180	1,47
Vidro tipo E (Corning)	3450	72,5	2,54
Vidro tipo S2 (Corning)	4480	85,6	2,5
Liga de alumínio (2024 T3)	400	73	2,7
Titânio	950	110	4,5
Aço inoxidável 18-8 (arame)	700-1000	198	7,8
Tungstênio (arame)	3150	360	19,3

O desempenho superior dos materiais compósitos recai na alta resistência específica (relação resistência/densidade) e alta rigidez específica (módulo de elasticidade/densidade) e estas duas propriedades são controladas pelas fibras.

A fibra de vidro

A mistura dos produtos areia, caulim, CaO e colemanita (borato hidratado de cálcio) a 1600 °C, produz o vidro líquido que, passado em orifícios muito finos e simultaneamente resfriados, produz filamentos de vidro. [16]

Conforme pode ser visto na figura 6 esquemática, os feixes são retirados continuamente das feiras de platina-ródio, cada uma produzindo várias centenas de filamentos. As fibras são puxadas e revestidas na superfície com uma emulsão de polímero (*sizing*) e com silanos, que previnem a abrasão, em etapa anterior aos filamentos serem agrupados em feixes de 100 a 200 filamentos e enrolados em um coletor. Esse tratamento superficial aplicado durante a produção, serve também para a

introdução de silanos na superfície das fibras, com a finalidade de promover a ligação fibra/resina na fabricação dos compósitos. Após, são aquecidas e secas. A emulsão é curada e os filamentos enrolados juntos em feixes sobre um mandril, sendo a base para vários produtos como fios, tecidos, mantas, etc. [16]

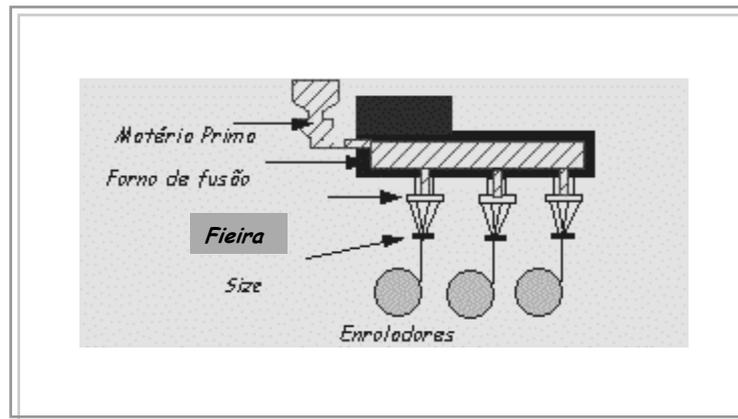


Figura 4. Esquema de produção das fibras de vidro [16]

Propriedades como resistência à corrosão, densidade, resistência ao calor e ao fogo, resistência à oxidação e a soluções químicas são características que exercem grande influência na escolha das fibras para a fabricação de materiais compósitos.[19]

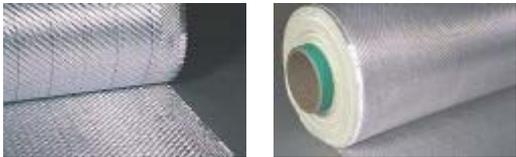
As fibras tipo E são as mais comumente utilizadas em matrizes poliméricas. Como já foi visto anteriormente, têm boas propriedades de resistência à tração e à compressão, rigidez, boas propriedades elétricas e um custo relativamente baixo, mas a resistência ao impacto é relativamente pobre. [12]

Podem ser comercializadas em diversas formas, conforme a tabela 7 apresentada a seguir.

INTERFACE FIBRA/MATRIZ

A interface entre fibra e matriz é da maior importância para os materiais compósitos reforçados por fibra. Sua estrutura e propriedades representam o papel principal em determinar o desempenho mecânico e a integridade estrutural dos compósitos reforçados por fibras.

Tabela 7 Algumas formas de fibras disponíveis no mercado [12]

FORMAS DISPONÍVEIS NO MERCADO	FIBRA DE VIDRO
Roving	
Tecido	
Manta	

As grandes diferenças entre as propriedades elásticas da matriz e da fibra são interligadas por meio da interface ou, em outras palavras, as tensões atuantes na matriz são transmitidas para as fibras através da interface. [20]

Por outro lado, uma vez que a natureza da interação é dependente das propriedades da fibra e da matriz, segue que a interface é específica para cada sistema. Este fato exerce influência direta na escolha dos materiais a serem empregados, pois uma combinação de fases quaisquer nem sempre estabelecerá a interação adequada da fibra e matriz, sendo às vezes necessário um tratamento superficial na fibra para que esta interaja fortemente com a matriz.

Devido à importância da interface no desempenho mecânico e na integridade estrutural dos compósitos, cresce o interesse no entendimento dos mecanismos físicos e químicos responsáveis pela adesão fibra/matriz. [1]

A boa adesão interfacial aumenta a transmissão de tensão da matriz para a carga, melhorando o desempenho mecânico do compósito. Caso não haja esta interação, surgirão, inevitavelmente, vazios na região interfacial e o material estará sujeito a falhas, como por exemplo, a propagação de trincas em maiores escalas. A adesão está relacionada com a natureza química da fibra e da matriz polimérica.

Os mecanismos de adesão entre os constituintes de um compósito são basicamente os seguintes:

- Adsorção e molhamento

O molhamento eficiente da fibra pela matriz remove o ar e recobre toda a superfície da fibra com material polimérico. Este mecanismo dependerá das tensões superficiais dos componentes.

- Interdifusão

A formação de ligações entre a superfície matriz/fibra pode ocorrer quando as fibras são modificadas superficialmente por um determinado polímero antes de serem incorporadas à matriz. A resistência da ligação entre matriz/fibra dependerá do grau de emaranhamento molecular gerado entre o polímero da matriz e a superfície da fibra modificada. A porosidade da fibra terá grande influência no aumento da resistência do polímero a ser modificado. Assim, no caso do negro de fumo, consegue-se bons níveis de reforço devido a uma adesão mecânica mais eficiente e até difusão das macromoléculas na estrutura da fibra, permitindo o ancoramento mecânico das moléculas da fibra.

- Atração eletrostática

Pode ocorrer quando as duas superfícies possuem cargas elétricas opostas, como nos casos de interações ácido-base e ligações iônicas. A resistência da ligação dependerá de cargas elétricas.

- Ligação química

É a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre geralmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da fibra que serve como ponte entre

o polímero e a fibra. Estes materiais devem conter uma parte de sua estrutura que interage com a superfície da fibra e outra deve conter grupos orgânicos semelhantes às cadeias da matriz polimérica. A resistência mecânica da interface depende do número e tipo das ligações químicas presentes.[8]

II.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

A escolha da metodologia de fabricação está ligada ao tipo de produto que se quer fabricar e às propriedades que se quer atingir. A ela estará associada a forma e a disposição das fibras usadas na produção do material compósito. Os métodos de fabricação estão associados ao tipo de produto a ser produzido, ao custo de fabricação e de matéria prima. [19]. A seguir serão resumidos alguns deles:

- Enrolamento de filamentos - processo automatizado para fabricar compósitos nos quais *rovings* contínuos (tanto pré-impregnados com resina como retirados de um banho de resina) são enrolados em um torno giratório.
- Moldagem à vácuo - técnica de moldagem em que a peça é curada dentro de uma camada de filme da qual o ar é removido através de vácuo.
- Moldagem por centrifugação - molda formas cilíndricas e ocas, tais como tanques, tubulações e postes. A manta de fios cortados é colocada em um molde cilíndrico oco, ou fios contínuos são cortados diretamente sobre as paredes internas do molde. À medida em que o molde gira, a resina é aplicada à sua parte interna.
- Moldagem por projeção simultânea - técnica na qual *roving* contínuo é colocado em uma pistola onde é cortado em comprimentos pré-determinados. Esta pistola borrifa o fio de vidro cortado junto com uma quantidade medida de resina sobre um molde aberto onde ocorre a catalisação.
- Moldagem por transferência de resina - um processo de moldagem no qual a resina catalisada é bombeada em um molde bipartido onde fibras de reforço foram colocadas. A resina e/ou o molde pode ou não ser aquecido.
- Moldagem por transferência de resina com uso de vácuo - um processo de infusão onde um vácuo puxa resina em um molde unilateral. Uma cobertura, rígida ou flexível, é colocada em cima do topo para formar um selo.
- Moldagem por compressão - uma técnica para moldar termorrígidos, na qual a

peça é moldada colocando a fibra e resina em um molde aberto, fechando o molde, e aplicando calor e pressão até que o material seja curado ou alcance sua forma final.

- Pultrusão - um processo automatizado contínuo, para a fabricação de barras, tubos e formas estruturais que têm uma seção transversal constante. *Roving* e outros reforços são saturados com resina e continuamente puxados através de um molde aquecido, onde a peça é formada e curada. A peça curada é cortada, então, no comprimento desejado. [21]

- Moldagem por laminação manual (*hand-lay-up*) - usado na aplicação do reparo do presente trabalho, consiste na aplicação de camadas de resina no estado líquido e com viscosidade adequada, sobre um molde definido, conforme esquema da figura 5. Sobre cada camada de resina é aplicada uma camada de fibra. A resina pode ser termorrígida ou termoplástica e as fibras podem estar na forma de tecido, *roving* picado ou mistas. As sucessivas aplicações de camadas de resina e fibra são feitas até que se atinja a espessura desejada. Após a adição de cada camada de fibra é feita a compactação com auxílio de um rolo para que esta fique uniforme e isenta de vazios e porosidades. O método é limitado a componentes com formas relativamente simples e que não necessitem de um bom acabamento superficial. [19]

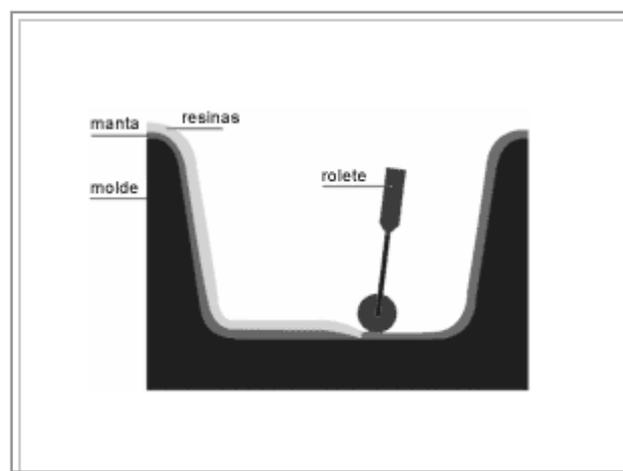


Figura 5. Esquema do processo de fabricação por laminação manual [21]

II.3 FALHA EM DUTOS

Defeitos em dutos podem ser introduzidos durante o processo de fabricação (laminação), no transporte (trinca por fadiga), na montagem (defeitos na solda) e instalação (mossas) e também devido à corrosão combinada com essas interferências externas.

Dutos, como outras estruturas, se deterioram com o tempo. Há milhares de quilômetros de linhas de transmissão espalhadas pelo mundo, que devem ser operadas com segurança e de uma forma eficiente.

Para garantir a sua integridade, os operadores devem ser capazes de detectar esses defeitos e avaliar se são significativos. No passado, isto levava a paradas e reparos das linhas. Hoje, tem aumentado o uso de métodos de avaliação desses defeitos e estratégias de reparo.[22]

Em particular, um dano importante em tubos de aço é a corrosão. Como resultado de exposições ambientais e de operação, a corrosão tende a aparecer em vários locais da tubulação de transporte de óleo ou gás e não em um só ponto.

Considera-se que o modo de falha na estrutura seja controlado pelas tensões devido à pressão interna e à presença de corrosão. [23]

O DOT (Department of Transportation of United States of America) compila dados sobre acidentes com dutos e suas causas. Estes dados indicam que os danos provocados por forças externas contribuem para um número maior de acidentes que outras categorias de causas, se forem considerados todos aqueles envolvendo líquidos perigosos, linhas de transmissão e distribuição de gás natural.

As forças externas incluem os efeitos de movimentos de terra, raios, chuvas fortes e inundações, temperaturas, ventos fortes, escavações pelo operador e por terceiros, fogo ou explosão externamente ao duto, batidas por veículos não ligados à escavação, ruptura de dutos previamente danificados e vandalismo. Ainda assim, verifica-se que a corrosão foi responsável por um pouco mais de

25 % do percentual total de acidentes entre 2002 e 2003, conforme tabela 8, tanto para transporte de líquidos como para gases. [24]

Tabela 8 Principais causas de falha em dutos [24]

CAUSAS	LÍQUIDOS PERIGOSOS		GASES	
	Acidentes	%	Acidentes	%
Escavação	41	15,1	32	17,8
Forças naturais	13	4,8	12	6,7
Outras forças externas	12	4,4	16	8,9
Falha do material ou da solda	45	16,5	36	20,0
Falha do equipamento	42	15,4	12	6,7
Corrosão	69	25,4	46	25,6
Operações	13	4,8	6	3,3
Outras	37	13,6	20	11,1
Total	272	-	180	-

Dutos enterrados geralmente recebem duas formas de proteção. Um revestimento representa a forma primária de proteção, enquanto a proteção catódica é a forma secundária, sendo esta projetada para proteger a superfície externa do duto contra a corrosão nos defeitos de superfície invariavelmente presentes.

Os revestimentos tendem a sofrer um desgaste, levando ao aumento da necessidade de proteção catódica. [25]

A corrosão externa em dutos é a que mais prevalece quando a falha dos revestimentos, inibidores ou de proteção catódica ocorre em um ambiente corrosivo.

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. Considerando-se como oxidação-redução todas as reações químicas que consistem em ceder ou receber elétrons, pode-se considerar os processos de corrosão como reações de oxidação dos metais, isto é, o metal age como redutor, cedendo elétrons que são recebidos por uma substância, o oxidante, existente no meio

corrosivo.[26]

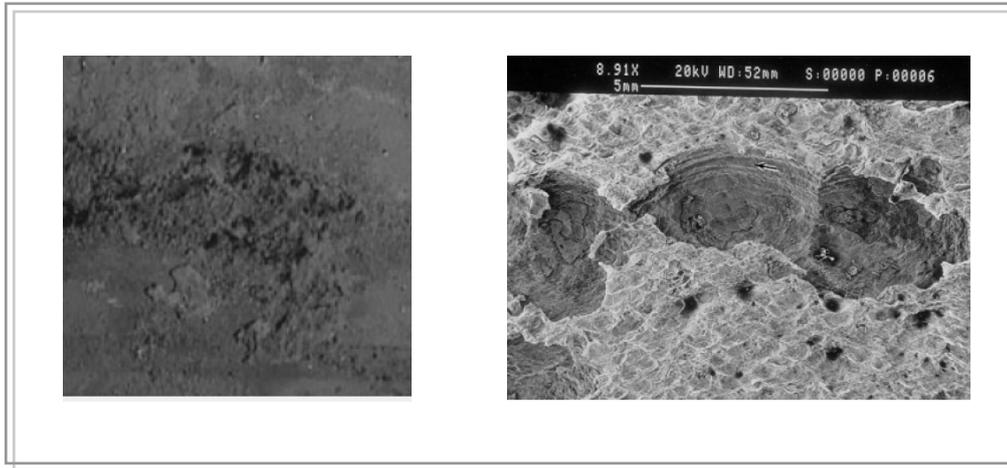


Figura 6. (a) Pites de corrosão ; (b) vistos através de um microscópio eletrônico de varredura

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, subseqüentemente, as falhas evitadas.[25]

A corrosão em dutos pode ser interna ou externa. A corrosão externa na forma de pite e perda generalizada de metal pode ser atribuída a fatores como defeitos de revestimento, proteção catódica inadequada ou ambos.

Em contraste com a corrosão externa, visível quando o duto está exposto, a corrosão interna não é aparente. Em muitos casos, a corrosão interna é causada por mais de um mecanismo. Por exemplo, a corrosão microbiologicamente influenciada, consiste não somente do ataque proveniente de ácidos orgânicos, mas pode contribuir para células galvânicas, células de concentração de oxigênio ou sulfeto, trincas de corrosão sob tensão e/ou fragilização por hidrogênio.

A acumulação de películas de óxido e depósitos dentro do duto, favorece o aparecimento de locais para as bactérias crescerem e ocorrerem células de concentração. Esses depósitos em um sistema de dutos podem produzir inúmeros problemas operacionais, variações provenientes da diminuição do fluxo, perda da capacidade de transferência de calor. Um sistema limpo reduz o potencial de corrosão microbológica, e reduz depósitos de corrosão sob a superfície. Além disso, um sistema limpo é necessário para qualquer tratamento químico de modo a maximizar seu impacto e efetividade sobre o sistema.

Uma limpeza no interior do duto para reduzir ou eliminar a corrosão pode ser efetuada de várias maneiras. Dentre esses métodos estão *pigs*, limpeza abrasiva, jateamento hidráulico, limpeza química e combinação de limpeza química e *pig*.

Assim, há várias iniciativas que podem ser usadas para controle da corrosão interna. Mudanças mecânicas e/ou operacionais, tratamentos químicos aplicados ou uma combinação de todos esses métodos. Se essa for a opção, uma avaliação prévia dos agentes químicos deve ser feita. Isto economizará tempo, esforços e dinheiro e irá reduzir o risco de problemas que venham resultar de uma escolha inadequada.[25]

Os tipos mais comuns de corrosão que podem ocorrer em dutos enterrados são:

- corrosão por pites devido às não homogeneidades do material.
- corrosão sob tensão induzida por cloreto ou por sulfato.
- corrosão por aeração diferencial que ocorre pelas diferenças de concentração de oxigênio no solo adjacente ao tubo, nas diferentes regiões.[27]
- corrosão induzida por microorganismos, sob condições anaeróbicas, por bactéria redutora de sulfato e bactéria produtora de ácido.[27]
- corrosão galvânica por correntes parasitas.[28]

A corrosão sob tensão é a combinação da tensão (incluindo tensão residual remanescente após a fabricação) e a corrosão localizada que produzem, normalmente, fratura frágil do metal sob determinadas condições.[25]

A aeração diferencial pode se formar quando o duto passa através de dois ou mais diferentes tipos de solo com diferentes permeações de oxigênio. As regiões sem aeração, altas quantidades de sal, pH baixo e alta umidade servem como anodo e aquelas com boa aeração, baixa quantidade de sal, alto pH e áreas com umidade moderada servem como catodo. [28]

A corrosão induzida por microorganismos é uma das causas mais comuns e caras de se combater. Ela ocasiona obstrução mecânica do duto, bem como penetração na parede de metais ferrosos e não ferrosos. É o resultado da presença e/ou de atividades de organismos associados à superfície que promovem a deterioração de um metal ou liga geralmente na forma de ataque localizado na superfície.[25]

Os dutos enterrados também estão sujeitos também a corrosão ocasionada por correntes elétricas de interferência que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Quando elas atingem instalações metálicas enterradas podem ocasionar corrosão nas áreas onde abandonam essas instalações para retornarem ao circuito original.

Em um duto revestido, a descarga de corrente ocorre em pequenas áreas tais como microporosidades ou outras falhas no duto ou no revestimento. Nestes locais, pites ou perfurações na parede podem ocorrer.

Diferente da corrosão galvânica, onde a descarga de corrente é distribuída sobre grandes áreas, ela é restrita a poucos pequenos pontos. As correntes parasitas podem ocorrer em longas distâncias, já que o catodo e o anodo estão separados um do outro. A existência de correntes parasitas pode ser detectada medindo as flutuações de potencial duto/solo em relação ao tempo e a distância, bem como a medida do gradiente de potencial superficial, no solo ao longo da rota do duto.

Devido ao fato da corrosão ocorrer sob diferentes formas, considerando-se a aparência ou ataque e as várias causas e seus mecanismos, pode-se agrupá-las quanto à morfologia e fatores mecânicos. Na tabela 9, são apontadas algumas das características descritas.

Tabela 9 Tipos de corrosão e suas características [21]

CORROSÃO					
	TIPOS	CARACTERÍSTICAS		TIPOS	CARACTERÍSTICAS
MORFOLOGIA	Uniforme	Perda uniforme da espessura	FATORES MECÂNICOS	Corrosão sob fadiga	Profundas escavações no material. Fendas perpendiculares à direção da tensão seguindo caminhos retos e regulares
	Por pites	Pontos ou pequenas áreas na superfície metálica			
	Por placas	Placas que se desprendem progressivamente		Corrosão combinada com erosão	A erosão remove a película do produto de corrosão expondo a superfície a novo desgaste corrosivo
	Alveolar	Aspecto de cratera			
CAUSAS OU MECANISMOS	Empolamento por hidrogênio	O hidrogênio penetra e difunde-se na malha cristalina e em regiões com descontinuidades	MEIOS CORROSIVOS	Corrosão sob tensão	Ação combinada de tensões residuais ou aplicadas, (provenientes de soldagem ou operações a frio) e meios corrosivos
	Galvânica	Corrosão localizada ocasionando profundas penetrações no material metálico que funciona como anodo		Atmosfera	Poluição do ar, umidade, gotículas de sal transportadas pelo ar, gases
	Eletrolítica	Corrosão localizada causada por correntes elétricas que fluem pelo solo		Solo	Umidade, pH, correntes de fuga, heterogeneidades
				Microorganismos	A corrosão se processa sob a influência de microorganismos
				Água do mar	Corrosão uniforme, por placas, pites ou alvéolos

II.4 PRESSÃO DE RUPTURA EM DUTOS CORROÍDOS

Como já foi visto, a corrosão é considerada uma das principais causas das falhas em dutos. A figura 7 mostra o esquema de um defeito de corrosão orientado longitudinalmente na parede de um duto, onde t é a espessura da parede do duto, d é a profundidade do defeito e L é o comprimento da região corroída projetada no eixo longitudinal.

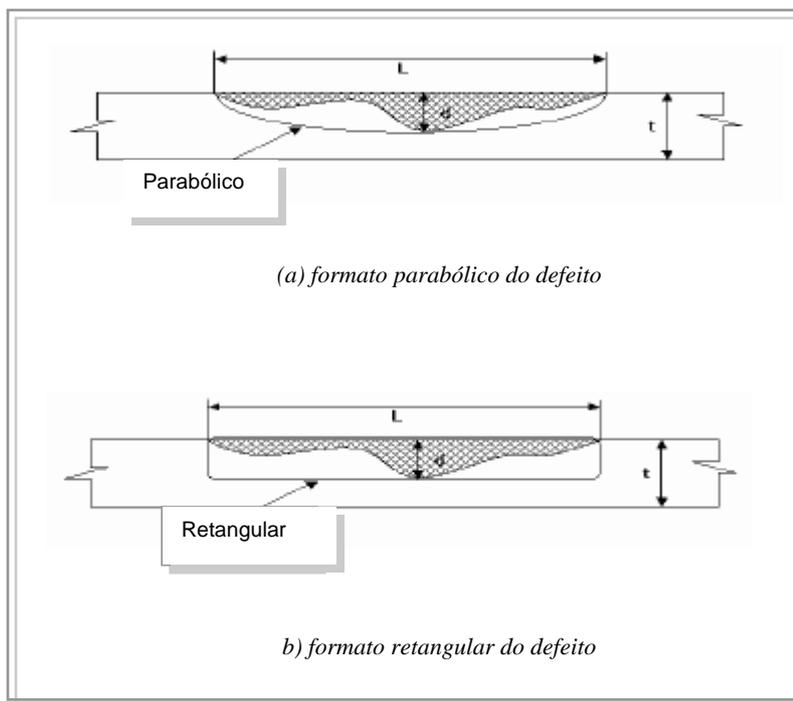


Figura 7. Defeitos de corrosão em dutos [29]

O defeito forma uma região de concentração de tensões, que interrompe a trajetória normal da tensão circunferencial e obriga a sua distribuição em torno dele. O mecanismo de falha primário é geralmente considerado ser uma extensão do defeito através da seção remanescente da parede do duto. Na falha, a parede do duto é rompida e o colapso ocorre ou por vazamento ou por ruptura. O tipo de falha é dependente do tamanho do defeito através da parede; a preocupação aqui é limitada somente à ocorrência da falha e não ao tipo de falha. [30]

Serão apresentados a seguir, os métodos mais conhecidos para avaliação da resistência remanescente nos dutos com defeitos ocasionados por perdas de espessura devido à corrosão, com orientação longitudinal e submetidos à pressão interna.

O código B31G apresenta uma das soluções mais aceitas para o cálculo dos defeitos de corrosão. Nele é considerada a geometria complexa de um pite como tendo uma forma parabólica ou retangular e é aplicado um fator de expansão, ou fator de dilatação, para a compensar a geometria do defeito. [31]

Esta solução foi modificada por Kiefner e Vieth para melhorar a sua precisão. Eles reuniram uma série de resultados de testes de ruptura em dutos para deduzir procedimentos de cálculo melhorados para determinar a pressão de ruptura da região remanescente em dutos corroídos. [32]

O melhoramento foi alcançado introduzindo um novo fator de expansão, uma tensão de escoamento média do material (σ_{flow}), e uma consideração mais detalhada da forma do defeito usando um cálculo iterativo que é implementado em um programa conhecido como RSTRENG.

Esses dois métodos têm sido amplamente usados para determinar a resistência remanescente de dutos e de vasos de pressão devido a seus resultados conservativos. Contudo, foi verificado que eles são excessivamente conservativos quando aplicados em dutos de alta resistência.

Em 1997, Stephens e Leis [33] observaram que a falha em dutos corroídos de aço de média a alta resistência era controlada mais pela máxima resistência à tração do que limite de escoamento. Com base em observações experimentais, Stephens e outros, desenvolveram um programa baseado no método de elementos finitos específico, que é conhecido por PCORRC, e propuseram uma solução para carga limite em tubos de tenacidade de moderada a alta, baseada em extensas séries de análise.

Recentemente, os procedimentos para cálculos de defeitos de corrosão têm se tornado mais específicos em termos dos materiais dos dutos e das geometrias dos defeitos. [34]

Outros métodos como o 0.85dl, o *Effective Area*, o DNV RP-F101 também serão analisados aqui.

A figura 8 mostra os métodos grupados verticalmente por seu tipo e horizontalmente por sua aplicabilidade.[35]

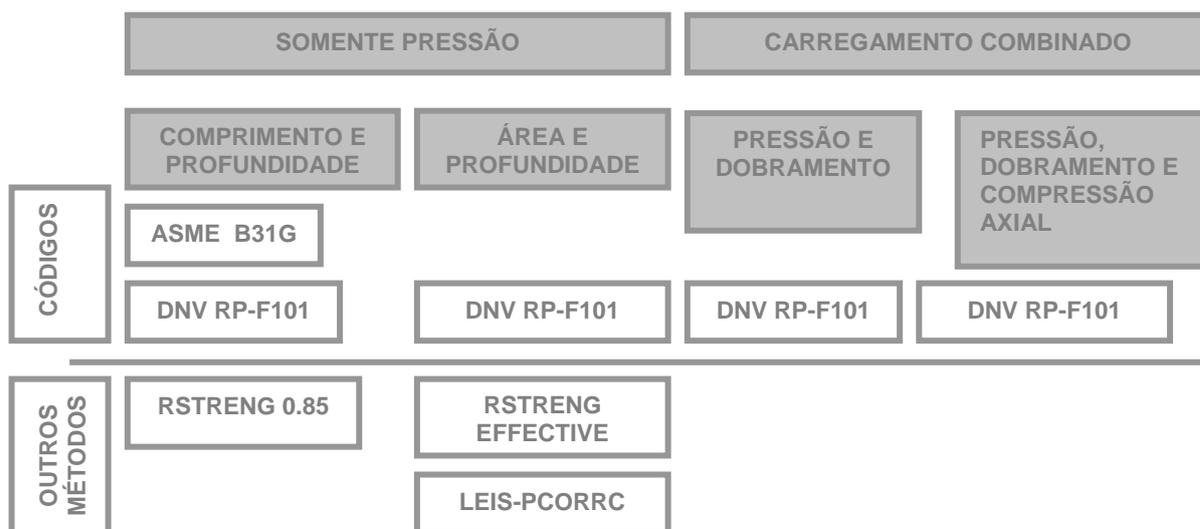


Figura 8. Métodos de cálculo da resistência remanescente [35]

II.4.1 ASME B31G

No final da década de 60, a AGA (American Gas Association) em conjunto com o Columbus Laboratories of the Battelle Memorial Institute, em Columbus - Ohio, começaram um trabalho de pesquisa para examinar o comportamento da iniciação de fratura em vários tipos de defeitos de corrosão em dutos. Fazia parte deste estudo determinar o relacionamento entre tamanho do defeito e o nível de pressão que causaria vazamento ou ruptura. O crescimento desse programa de pesquisa, aliado aos benefícios que os resultados poderiam produzir, fez com que diversas empresas operadoras começassem a se interessar pelo assunto.

Durante os anos 70 e 71, vários testes foram realizados em corpos de prova tubulares com defeitos reais em dutos de 16" a 30" de diâmetro, espessura de parede variando entre 0,312" a 0,375" e aços do tipo API 5L Grau A-25 a API 5L Grau X-52.

A partir dos conceitos da Mecânica da Fratura, foram elaboradas expressões semi-empíricas, ajustadas pelos resultados dos testes, que permitiram estimar a pressão de ruptura de defeitos de corrosão. Este método de cálculo foi apresentado por Kiefner e Duffy, em 1971, no relatório intitulado "Summary of Research to Determine the Strength of Corroded Area in Line Pipe".

A equação gerada neste estudo ficou conhecida como "NG-18 Surface Flaw Equation" e o método ASME B31G foi concebido a partir desse modelo semi-empírico.

Este método de avaliação foi incluído nas normas ASME B32.4 e ASME B31.8 e descrito em detalhes no documento ANSI/ASME B31G - 1984 "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines", que foi revisado e reeditado como ASME B31G 1991.[36]

Seu emprego está limitado às seguintes condições:

- Dutos construídos segundo as normas ASME B31.4, ASME B31.8 e ASME B31.11.
- Dutos com corrosão, fabricados com aço carbono ou aços de alta resistência de baixa liga, do tipo ASTM A53, A106, A381, API 5LX e API 5L.
- Corrosão no corpo do duto, com contornos relativamente suaves que não cause elevada concentração de tensão.
- Não pode ser aplicado para corrosão em soldas longitudinais ou circunferenciais, áreas afetadas termicamente, danos mecânicos como *gouges* e *grooves* e defeitos de fabricação na chapa de aço.
- Carregamento resultante da pressão interna.
- Defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 10 e 80% da parede do duto, excluindo este último.

As considerações feitas para a sua aplicação são as seguintes:

- A tensão circunferencial no defeito no instante da ruptura é igual a tensão de escoamento média (σ_{flow}) que é calculada da seguinte forma: $\sigma_{flow} = 1,1 \text{ SMYS}$, onde SMYS é o limite de escoamento do material.

- O defeito é considerado curto se $L \leq \sqrt{20Dt}$ e longo se $L > \sqrt{20Dt}$, onde L é o comprimento do defeito, D é o diâmetro do duto e t a espessura da parede do duto.
- Para defeitos considerados longos, o fator de expansão ou de dilatação, assume um valor muito grande, tendendo para infinito.
- A área A é definida como sendo a área do material perdido, projetada no plano que corta a parede do duto e passa pelo seu eixo, conforme ilustrado na figura 6.
- A área original da região corroída A_0 , é calculada como $A_0 = Lt$
- A área corroída pode ser expressa como $A = \alpha Ld$, onde α é a constante que define a forma geométrica adotada para representar a área do material perdido e d a profundidade máxima do defeito.

No método ASME B31G foi definido que a área de um defeito de corrosão considerado como curto, assume a forma de uma parábola, ou seja $\alpha = 2/3$, enquanto em defeitos longos a área perdida assume a forma retangular, portanto $\alpha = 1$ (ver figura 6).

II.4.2 MÉTODO 0,85 dL

Esta versão modificada do método ASME B31G, foi proposta por Kiefner e Vieth em 1989, como resultado do Projeto PR 3-805 do Pipeline Research Committee da AGA com o Institute Battelle, que também é conhecido como RSTRENG/0.85 dL.

As principais diferenças entre a versão modificada e original do ASME B31G são as seguintes:

- A área do material perdido equivale a 0,85dL, ou seja, $\alpha = 0,85$.
- A tensão de escoamento média é dada por $\sigma_{flow} = SMYS + 69 \text{ MPa}$.
- Aplicável para defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 20 e 80 % da parede do duto, inclusive na região do cordão de solda obtido por soldagem a arco submerso.
- O defeito é considerado curto se $L \leq \sqrt{50Dt}$ e longo se $L > \sqrt{50Dt}$
- São atribuídos M (fator de expansão ou dilatação) diferentes para defeitos curtos e longos.

II.4.3 MÉTODO *EFFECTIVE AREA*

O método *Effective Area* foi desenvolvido juntamente com o método 0,85 dL, no mesmo projeto PR 3-805 referido anteriormente. Fez parte também deste projeto o desenvolvimento do programa computacional RSTRENG, que calcula a pressão de ruptura de defeitos pelos métodos ASME B31G, 0,85dL e *Effective Area*.

Consiste em dividir o defeito em diversos trechos de comprimentos variados (L_1, L_2, \dots, L_n), conforme ilustrado na figura 9 e calcular a pressão de ruptura para cada um deles.

Cada um dos comprimentos de defeitos é denominado L_{efetivo} e a sua respectiva área corroída de área efetiva. A área original da região corroída (A_0) para cada L_{efetivo} é dada por:

$$A_0 = (L_{\text{efetivo}}) \cdot (t), \text{ onde } t \text{ é a espessura da parede do duto} \quad (3)$$

A pressão de ruptura do defeito de comprimento L é a menor das pressões calculadas.

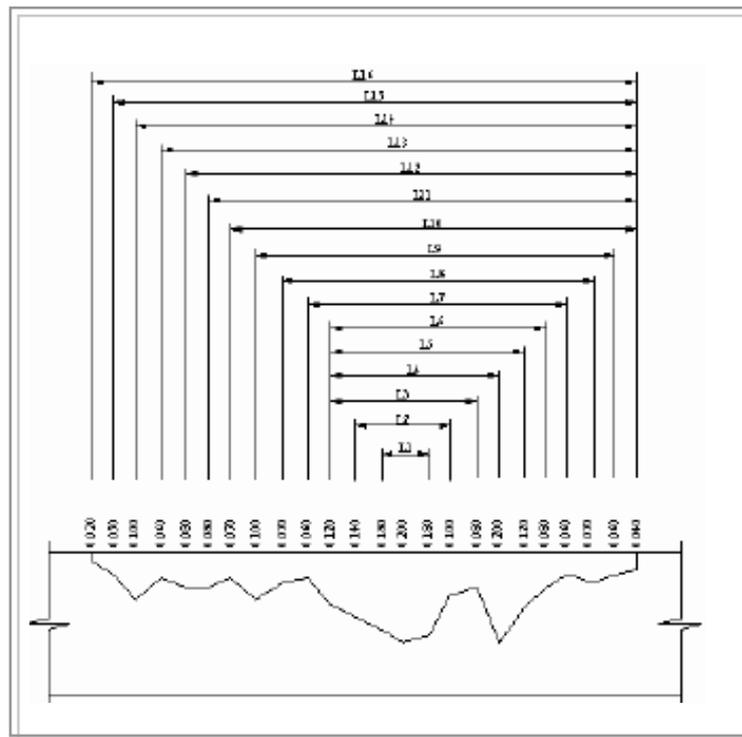


Figura 9. Detalhe dos comprimentos para cálculo pelo método "Effective Area"

As seguintes considerações são feitas:

- O valor da tensão média de escoamento é dado por $\sigma_{flow} = SMYS + 69 \text{ MPa}$.
- O defeito é classificado como curto se $L \leq \sqrt{50Dt}$ e longo se $L > \sqrt{50Dt}$
- São considerados diferentes fatores de expansão ou dilatação para defeitos longos e curtos. [36]

II.4.4 MÉTODO DNV RP-F101

A Det Norske Veritas (DNV), em cooperação com a British Gas Technology e o patrocínio de onze empresas/organizações internacionais, dentre elas a Petrobrás, formaram a Joint Industry Projects (JIP) para elaborar uma metodologia de avaliação de defeitos de corrosão. O resultado deste estudo gerou o documento publicado em 1999, intitulado Recommended Practice RP-F101 Corroded Pipelines. [37]

Foram realizados ensaios de pressão em tubos contendo defeitos de corrosão isolados, defeitos interagindo com outros e defeitos de forma complexa.

Além de pressão interna, foram feitos carregamentos axiais e perpendiculares ao duto. Análises por elementos finitos não linear em 3-D, também fizeram parte deste estudo.

Quanto às características de defeito, pode ser aplicado em dutos com corrosão interna ou externa, em soldas circunferenciais ou longitudinais, em perda de espessura de metal reparado por esmerilhamento, com perfil suave e sem presença de trincas.

Para utilização do método na avaliação de áreas corroídas em solda, deve-se ter certeza que defeitos provenientes do processo de soldagem não estejam interagindo com os defeitos de corrosão. O método não pode ser aplicado para as seguintes condições:

- Dutos que não sejam fabricados com aço carbono.
- Aços com grau superior a X80.
- Dutos com carregamentos cíclicos.
- Defeitos não suaves, do tipo trinca.

- Defeitos de perda de espessura provocados por danos mecânicos (*gouges*).
- Defeitos de fabricação de soldas.
- Defeitos com perda de espessura maior que 85 % da parede do duto.
- Em materiais em que a temperatura de transição seja acima da temperatura de operação.
- Aços semi-acalmados.
- Aços de baixa tenacidade, ou seja, menores que 60 J no ensaio Charpy.

Este método foi estruturado em duas partes, da seguinte forma:

A primeira abordagem é apresentada como parte A e está de acordo com a filosofia de segurança adotada pela DNV Offshore Standard OS-F101, Submarine Pipeline System, onde incertezas quanto à profundidade do defeito e as propriedades do material são consideradas. Para a determinação da pressão máxima admissível de operação devido à presença do defeito, fatores parciais de segurança foram introduzidos nas equações que calculam a pressão de ruptura.

A segunda abordagem, descrita como parte B, é baseada no ASD (Allowable Stress Design). A pressão máxima admissível de operação é determinada aplicando-se um fator de segurança após o cálculo da pressão de ruptura. Considerações quanto às incertezas associadas às dimensões dos defeitos ficam por conta do analista.

Os pites e os alvéolos, são umas das formas de corrosão mais prejudiciais. Estes defeitos podem se apresentar isoladamente ou em colônias. Abordaremos o defeito isolado por ser o que estudaremos no presente trabalho.

Defeito isolado é definido como aquele que não interage com defeitos adjacentes. A pressão de ruptura deste defeito é independente de outros defeitos no duto.

Na tabela 10, estão as equações para cálculo das pressões de ruptura, conforme as considerações apresentadas anteriormente.

MÉTODO	σ_{flow}	FORMATO DO DEFEITO	FATOR DE DILATAÇÃO		PRESSÃO DE RUPTURA
ASME B31G	1,1SMYS	Parabólico [2/3 (d/t)]	$M = \left[1 + 0,8 \frac{L^2}{Dt} \right]^{1/2}$		$1,1 \text{ SMYS} \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right]$
		Retangular (dt)			$1,1 \text{ SMYS} \frac{2t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \right]$
0.85dL	SMYS + 69MPa	Arbitrário [(0,85dL)]	Defeito curto	$M = \sqrt{1 + 0,6275 \left(L^2 / (Dt) \right) - 0,003375 \left(L^2 / (Dt) \right)^2}$	$(\text{SMYS} + 69) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right]$
			Defeito longo	$M = 3,3 + 0,032 \left(L^2 / (Dt) \right)$	
RSTRENG	SMYS + 69MPa	Perfil do defeito	Defeito curto	$M = \sqrt{1 + 0,6275 \left(L_{efetivo}^2 / (Dt) \right) - 0,003375 \left(L_{efetivo}^2 / (Dt) \right)^2}$	$(\text{SMYS} + 69) \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - A_{efetiva} / A_0}{1 - (A_{efetiva} / A_0) M^{-1}} \right]$
			Defeito longo	$M = 3,3 + 0,032 \left(L_{efetivo}^2 / (Dt) \right)$	
DNV RP-F101 (defeito isolado)	σ_u	Retangular	$Q = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$		$\frac{2t \sigma_u \left(1 - \frac{d}{t} \right)}{(D - t) \left(1 - \frac{d}{tQ} \right)}$
DNV RPF-101 (defeito de geometria complexa)	σ_u	Retangular (dt) e perfil do defeito			$\frac{2t \sigma_u \left(1 - \frac{d_{ave}}{t} \right)}{(D - t) \left(1 - \frac{d_{ave}}{tQ} \right)}$

Tabela 10 Equações para cálculo das pressões de ruptura

II.5 REPARO DE DUTOS COM ESTRUTURA CORROÍDA

Como anteriormente mencionado, o uso de materiais compósitos no reparo de dutos danificados tem aumentado significativamente nas últimas décadas. Aspectos como facilidades econômicas, segurança, desempenho, proteção contra corrosão e a capacidade de executar reparos no local têm sido fatores responsáveis por essa popularidade. Nos Estados Unidos, recentes iniciativas feitas pelo *Office of Pipeline Safety* retiraram muitas das limitações existentes anteriormente.

Muitos estudos têm sido realizados para avaliar os reparos para remediar danos mecânicos e de perda de espessura por corrosão em tubulações de gás e de líquidos. Estas técnicas de reparo têm sido extensivamente testadas e avaliadas tendo em vista as exigências dos dutos.

Enquanto materiais compósitos são usados para reparos de tubulações, reconhece-se que estes materiais podem ser instalados para reclassificar dutos para pressões de operação mais altas.

Os códigos que estabelecem as condições de operação de dutos são específicos quando determinam as pressões de trabalho. Por exemplo, as tensões geradas pelas pressões máximas de operação permitidas em linhas de transmissão de gás e líquido são, respectivamente, 72 e 80 % do limite de escoamento especificado do material.

Os dutos de transmissão de gás têm um grau maior de restrição que os de líquido, quando se considera sua localização. Dutos em áreas mais densas de população devem ter pressões de operação mais baixas que em área rural. Devido a essas limitações, as empresas que operam a altas pressões são forçadas a instalar novas linhas, geralmente ao longo das já existentes.

Também em dutos que apresentam corrosão significativa, pode ser necessário reduzir sua pressão de operação. Nestas situações o único recurso é, ou cortar as seções do duto corroídas substituindo-as por novas ou instalar luvas envolvendo-o totalmente.

Esses procedimentos nem sempre são ideais e o emprego de materiais com compósito traz uma solução para tais problemas.

O principal objetivo dos métodos de reparo com material compósito é reforçar os danos que ocorrem por corrosão ou mecânicos (tais como entalhes e perdas de material), minimizando a necessidade de soldagem e permitindo, em alguns casos, o reparo com a linha pressurizada. Tipicamente, estes processos procuram restaurar a resistência de dutos, reduzir a deformação em regiões danificadas e isolar os tubos da exposição ao ambiente.[38]

II.5.1 MECÂNICA DO REPARO DE DUTOS

A pressão interna em uma linha de transporte de óleo ou gás, atua em todas as direções, causando um estado de tensões correspondente nas paredes da tubulação. Quando há uma perda de espessura no duto devido à corrosão, na região do defeito onde a parede é mais fina o material estará a um nível de tensões mais alto que no duto liso e pode, portanto, escoar abaixo de seu nível de segurança.

O reparo de material compósito trabalha dividindo o carregamento circunferencial na região do defeito, restringindo a deformação do material na seção mais fina e, portanto, trazendo a tensão para níveis seguros. O aço ainda poderá escoar, mas a taxa de escoamento será controlada pelo compósito externamente aplicado, de tal forma que a pressão de operação possa ser mantida dentro de valores seguros. Para isto, as propriedades mecânicas do reparo devem ser primeiramente conhecidas. [39]

O reparo aplicado age da seguinte maneira:

- aumenta a espessura da seção transversal resistindo à pressão interna.
- introduz outro material com escoamento e resistência máxima diferentes. A espessura do material compósito em conjunto com sua resistência máxima determina o nível de reforço fornecido quando a seção reparada é levada à pressão de ruptura.

A figura 10 mostra várias camadas de compósito aplicada a um duto de aço com material de enchimento entre eles.

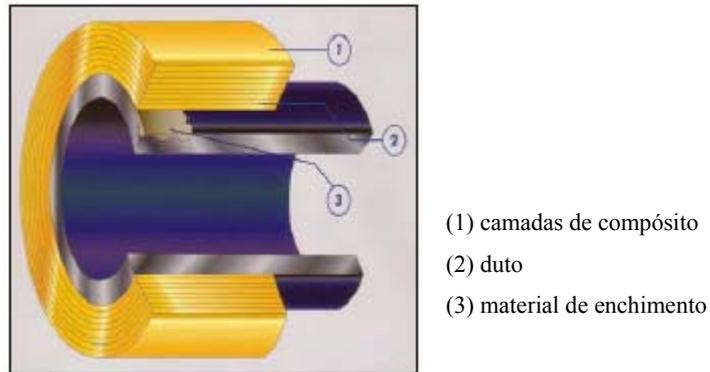


Figura 10. Duto com reparo em compósito

A resistência mecânica fornecida pelo duto e pelo reparo, é regida pela equação:

$$P_{rup} = \frac{\sigma_{rup} \cdot t_{duto} + \sigma_c \cdot t_c}{r} \quad (4),$$

onde,

P_{rup} = pressão de ruptura da estrutura

t_{duto} = espessura do duto

σ_{rup} = tensão de ruptura do duto

σ_c = tensão de ruptura do compósito

t_c = espessura do compósito

r = raio interno do duto

O outro aspecto a ser abordado na avaliação do desempenho de um sistema de reparo de dutos é o nível de restrição fornecido para diminuir a deformação na seção reforçada do duto. Os cálculos associados a este tópico são mais complicados que aqueles apresentados, devido aos problemas relacionados à plasticidade do material do duto.

Do ponto de vista do carregamento, os seguintes eventos ocorrem quando uma região corroída reparada é pressurizada de modo que um escoamento plástico é induzido no material:

- o duto e o compósito são tensionados quando a pressão interna é aumentada. O mais rígido dos dois será tensionado a um nível mais alto (em reparos de compósito este será o material do duto). A rigidez da configuração é calculada usando a seguinte equação:

$$K = E.t, \quad (5)$$

onde E é o módulo de elasticidade e t a espessura do material.

- uma vez que a seção corroída do duto começa a escoar, sua rigidez relativa é reduzida. Neste ponto, o reparo começa a ser uma fonte crítica de resistência para a estrutura. Basicamente, esta fase de carregamento pode ser representada assumindo que o material do duto reparado tem o módulo de elasticidade modificado (reduzido) relacionado à inclinação da reta que une as resistências ao escoamento e à tração.

- a pressão de ruptura final é governada pela resistência à tração do material do duto e do reparo. [38]

O módulo de elasticidade é uma propriedade chave do reparo. Uma luva de compósito provê reforço circunferencial ao duto. Quando a pressão interna provoca sua expansão a luva restringe essa expansão. A quantidade de carregamento e a taxa de divisão do carregamento entre o duto e o compósito, são dependentes das propriedades de cada material. Se, por exemplo, o duto é enrolado com um material de baixo módulo como a borracha, a divisão do carregamento será pequena. O material a ser enrolado tem que ser suficientemente rígido para dividir o carregamento no ciclo de pressão e forte o suficiente para suportar as tensões geradas.[39]

Para compreensão do que foi dito anteriormente, consideremos um duto de aço com perda de espessura por corrosão em sua superfície externa, de acordo com o que está mostrado na figura 11.

Uma pressão interna p atuando no duto com uma espessura de parede t e espessura t_c de reparo, irá acarretar um estado de tensões que pode ser escrito através da equação:

$$\frac{pD}{2t} = \sigma_s \cdot C + \sigma_c \cdot t_c / t, \quad (6)$$

sendo C um fator de perda de espessura devido a corrosão, σ_s e σ_c as tensões no aço e no composto, respectivamente, e D o diâmetro externo do duto reparado.

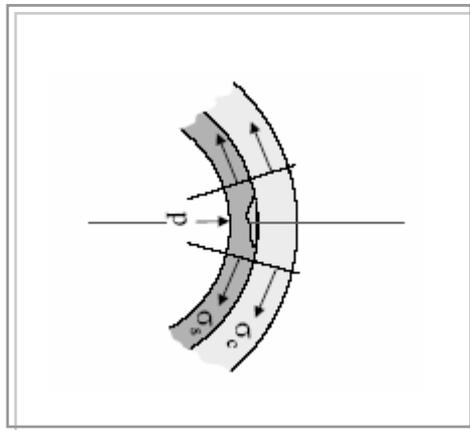


Figura 11. Duto com reparo submetido à pressão interna[40]

Se forem introduzidos medidores de deformação na região mais profunda do defeito e na parte externa do material composto, teremos o seguinte comportamento para o regime de deformação elástica e plástica do duto de aço, conforme esquema da figura 12.

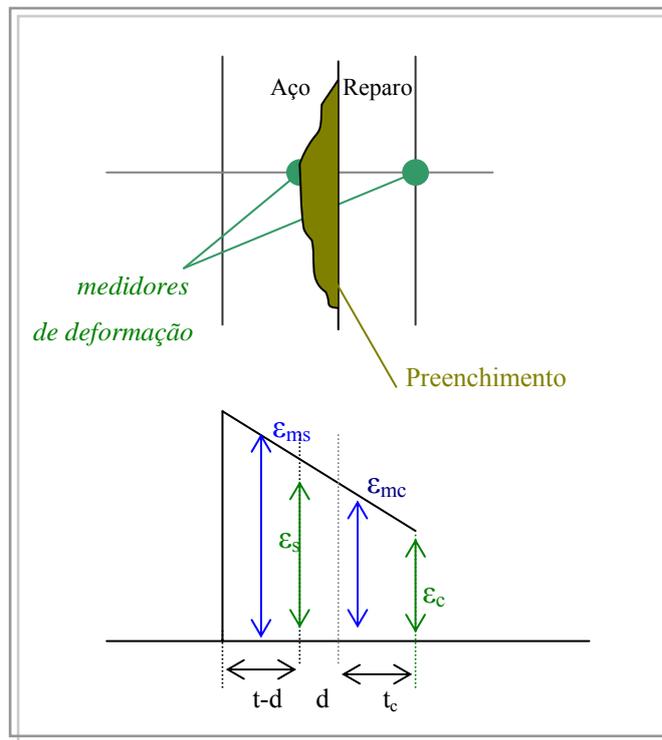


Figura 12. Deformações no duto e no reparo [40]

As equações 7 e 8 e o gráfico da figura 13 mostram o comportamento da tensão na região de ligamento, antes e após o escoamento do material. [40]

$$\frac{pD}{2t} = E_s \cdot \epsilon_{ms} \cdot C + E_c \cdot \epsilon_{mc} \cdot t_c / t \quad (7)$$

$$\frac{pD}{2t} = E_s \cdot \epsilon_{mys} \cdot C + E_c \epsilon_{mc} t_c / t + E'_s \Delta\epsilon_{ms} C' + E_c \Delta\epsilon_{mc} t_c / t \quad (8) \quad \text{onde,}$$

ϵ_{ms} = deformação no aço

E'_s = módulo de elasticidade do aço na região plástica

ϵ_{mc} = deformação no compósito

E_s = módulo de elasticidade do aço

ϵ_{mys} = deformação no escoamento do aço

E_c = Módulo de elasticidade do compósito

$\Delta\epsilon_{ms}$ = diferença de deformação no aço

t_c = espessura do compósito

$\Delta\epsilon_{mc}$ = deformação no compósito

t = espessura do aço

C e C' = fatores de correção

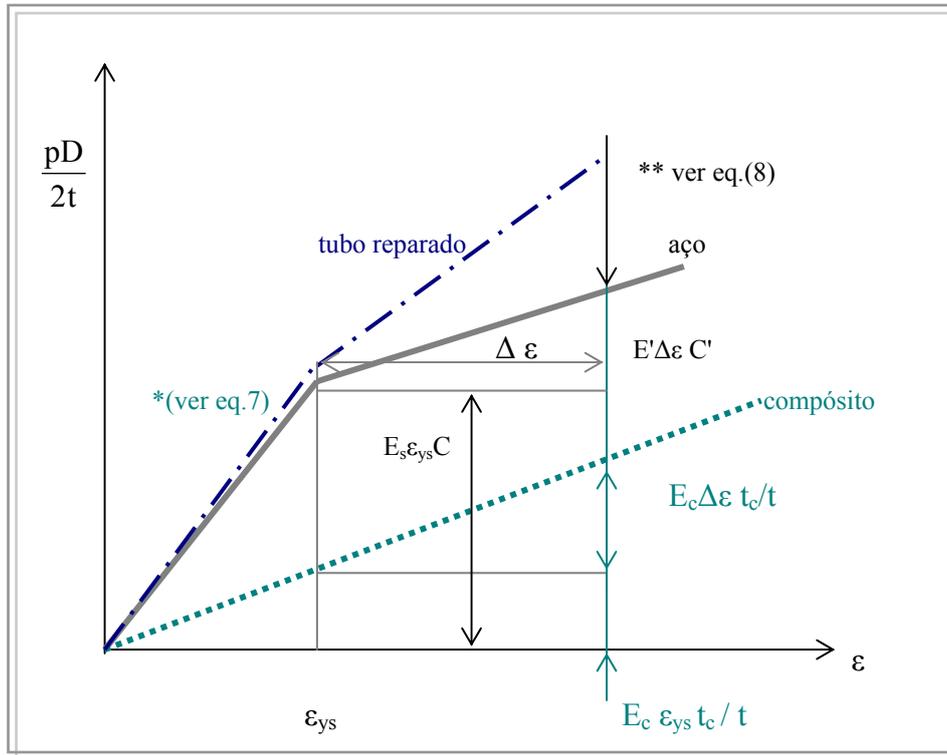


Figura 13. Comportamento mecânico do duto com reparo de compósito [40]

II.5.2 APLICAÇÃO DO REPARO

O material compósito aplicado pode ter várias configurações (tipos, arranjo e configuração das fibras, tipos de matriz). A aplicação dos reparos em dutos *in loco*, é feita diretamente sobre a superfície metálica. Os fabricantes propõem a seguinte seqüência de etapas para este procedimento:

- preparação da superfície.

A preparação da superfície é feita normalmente através de limpeza com jato de areia ou manual, para a retirada de resíduo metálico, ferrugem, graxas, óleos e outro materiais que podem influenciar de forma negativa na adesão do material compósito na superfície da estrutura.

- aplicação de uma camada de resina base, mais conhecida como *primer*.

Essa camada é usada para fazer o nivelamento da superfície, onde irregularidades causadas por corrosão ou dano mecânico são preenchidas.

- aplicação de uma camada de resina com mesma composição da matriz do material compósito.

Essa camada ajuda a melhorar a afinidade química da interface entre o *primer* e o material compósito, contribuindo também no nivelamento da superfície antes da aplicação do material compósito.

- preparação da resina que será a matriz do material compósito.

- umedecimento das camadas de fibras com a resina de forma que fiquem completamente impregnadas com a mesma.

- aplicação das camadas do material compósito na superfície até que se atinja a espessura necessária.

- finalmente, pode ser aplicada uma camada adicional para proteção contra intempéries e raios ultra violeta.[41] [42] [43]

Veremos a seguir, as principais empresas que produzem comercialmente compósitos específicos para reparos.

CLOCK SPRING COMPANY L.P.

O material compósito é fabricado por pultrusão, estando as fibras de vidro no sentido longitudinal em uma matriz polimérica. Os laminados já são comercializados com uma curvatura de acordo com o diâmetro da estrutura a ser reparada. A espessura do material também é definida.

O reparo consiste de três etapas: o material compósito, um adesivo para segurar o reparo e um material de enchimento para transferir o carregamento do defeito para a luva de compósito.[41]

O compósito é aplicado com as fibras perpendiculares ao eixo do duto

ARMOR PLATE, INC.

A empresa desenvolveu um produto denominado Armor Plate Pipe Wrap[®] que consiste de um tecido de fibra de vidro saturado de resina epoxi, para reparo estrutural

em dutos corroídos ou danificados, que trabalham a altas pressões. Pode ser aplicado em tubulações retas, joelhos, tês, *risers* e em tubulações em plataformas *offshore*. [42]

STRONGBACK CORPORATION

Strongback[®] é uma luva de compósito fabricada pela Strongback Corporation, constituída de tecido de fibra de vidro impregnado de resina ativada pela água e pode ser aplicada em quaisquer condições climáticas em partes de dutos e juntas. A resina é uma mistura de epoxi e um agente de cura de poliamina alifática que é capaz de deslocar água da superfície molhada de modo a fazer uma ligação permanente. A formulação é livre de solventes para garantir máxima segurança e desempenho técnico. Pode ser usado também Kevlar[®] como material de reforço.

As várias aplicações desses produtos incluem reforço ou reparo de dutos quando ocorre perda de espessura, abrasão, corrosão e vazamento. [43]

RUST ENGENHARIA

A empresa é líder nacional no mercado de proteção contra corrosão e aplicações de revestimento em material polimérico reforçado por fibra de vidro.

O produto desenvolvido é denominado Residuto[®] e consiste de uma manga em material compósito formada por camadas sucessivas de fibra de vidro embebidas em resina, laminadas *in-loco*. É usado na reabilitação de dutos, para reparos de defeitos externos causados por corrosão ou indentações. A aplicação pode ser efetuada com o duto em operação. O serviço é realizado à frio, a instalação fácil e rápida com equipamentos leves. [44]

II.6 ESPESSURA DE CAMADA DO REPARO

Há várias opções para tratar a corrosão em dutos pressurizados baseadas em práticas da indústria. Assumindo que medidas adequadas tenham sido tomadas para estimar a geometria da corrosão, são efetuados cálculos para avaliar a capacidade de suportar a pressão da seção remanescente do duto, podendo ser usados códigos como o ASME B31G e outros.

Se a corrosão é severa o suficiente para aumentar as tensões localizadas no duto acima de 100 % da resistência mínima ao escoamento especificada (SMYS), o operador se depara com 3 opções: substitui a seção corroída do duto, faz um reparo reconhecido pelo código ASME, ou opera a pressões mais baixas. Para a maioria das operadoras, a primeira e a última opção não são atrativas devido à perda de rendimento associada ao fluxo reduzido ou à parada da linha.

Para o reparo de dutos corroídos com material compósito, foi desenvolvido por Armor Plate Inc, um método para calcular a espessura da camada de compósito a ser aplicada. O número de camadas é calculado de modo que a pressão de ruptura do duto corroído e do material de reparo, seja igual a duas vezes a máxima pressão de operação. Esta pressão de operação gera uma tensão que corresponde a 72 % do limite de escoamento especificado do material. O cálculo da pressão de ruptura em estruturas corroídas pelo ASME B31G se baseia em uma tensão igual a 110 % do limite de escoamento e mais um fator que é função da geometria da corrosão. [45]

Esta abordagem mais conservadora introduzida por Armor Plate, traz um aspecto adicional de segurança ao reparo proposto.

A seguir são listadas as considerações que devem ser adotadas para utilização dos cálculos da espessura da camada.

- a corrosão deve ser relativamente suave (defeitos brandos, sem trincas agudas ou entalhes).
- os cálculos não estão direcionados ao reparo de vazamentos ou para previsão de pressões de falha.

- é assumido que o material do duto tem ductilidade adequada para permitir escoamento plástico, tais como as classes de materiais requeridas pela API 5L.
- o método não é direcionado a reparos de soldas circunferenciais e longitudinais, danos mecânicos tais como moissas ou goivaduras ou defeitos introduzidos no processo de fabricação.
- O método de reparo não é direcionado a crescimento de corrosão continuado. Os cálculos assumem que a profundidade de corrosão não muda. As operadoras são encorajadas a monitorar mudanças na espessura da parede durante as inspeções de rotina.

A teoria utilizada assume que o material do duto, mesmo no seu estado degradado devido à corrosão, contribui para a resistência total da seção reparada. A outra contribuição é a resistência do reparo.

A equação 10 envolve variáveis fundamentais usadas para calcular a pressão necessária para provocar a falha no duto e no material compósito.

$$P_{rup} = k_{corr} \left(\frac{2\sigma_{max} t}{D} \right)_{duto} + \left(\frac{2\sigma_{falha} t}{D} \right)_{compósito}, \text{ onde} \quad (10)$$

P_{rup} = pressão de ruptura baseada nas resistências do duto e do compósito

k_{corr} = fator de redução de pressão devido à corrosão

σ_{max} = máxima resistência à tração do duto

t = espessura de parede no duto e/ou do compósito

D = diâmetro externo do duto ou do compósito

σ_{falha} = resistência de falha do compósito

O fator de resistência à corrosão, k_{corr} , é usado para calcular a tensão na seção corroída na qual é esperado ocorrer a falha .

$$S = S_{\text{max}} \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 M}} \right] \quad \text{onde,} \quad (11)$$

S = tensão circunferencial da seção nominal do duto quando a falha ocorrer

S_{max} = máxima resistência à tração no duto

A/A_0 = relação entre a profundidade da corrosão e a espessura original da parede da seção corroída do duto

M = fator de Folias, que é uma função de L , D e t e é definido como:

$$M = \sqrt{1 + \frac{0,8L^2}{Dt}} \quad , \text{ onde} \quad (12)$$

L = comprimento longitudinal da seção corroída

D = diâmetro do duto

t = espessura da parede do duto

Para estas séries de equações, a espessura da parede pode ser determinada assumindo que a geometria da corrosão e do duto são conhecidas, bem como as propriedades do material do duto e do compósito. O objetivo final no desenvolvimento da equação é a pressão de ruptura.

Para estimar a espessura da camada de compósito, é necessário obter os seguintes parâmetros:

i) Fator de redução de pressão na região corroída

$$k_{\text{corr}} = \frac{\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M}\right)}, \quad \text{onde } A = d \text{ e } A_0 = t, \quad (13)$$

sendo,

d = profundidade do defeito

t = espessura da parede do duto.

ii) Pressões correspondentes ao limite de escoamento (SMYS), ao limite de resistência (UTS) e a máxima pressão de operação (MAOP) do duto, onde D é o diâmetro externo do duto.

$$P_{\text{SMYS}} = \frac{2\text{SMYS}t}{D} \quad (14)$$

$$P_{\text{UTS}} = \frac{2\text{UTS}t}{D} \quad (15)$$

$$P_{\text{MAOP}} = 0,72P_{\text{SMYS}} \quad (16)$$

iii) Pressão necessária para romper o duto reparado

$$P_{\text{rup req}} = 2 P_{\text{MAOP}} \quad (17)$$

iv) Pressão de ruptura de corrosão

$$P_{rupcorr} = k_{corr} P_{UTS} \text{ , onde} \quad (18)$$

k_{corr} é o fator de redução da pressão

v) Espessura de camada de reparo

$$X = P_{rup req} - P_{rupcorr} \quad (19)$$

$$t_c = \frac{D}{2\sigma_c} \frac{1}{\frac{1}{X} - \frac{1}{2\sigma_c}} \text{ onde,} \quad (20)$$

σ_c é a resistência do compósito e,

D é o diâmetro externo do duto [45]

É recomendável, ainda, que seja calculado o comprimento do defeito a partir do qual é necessário reparar o duto com compósito. A equação que controla esse parâmetro é a usada no código B31G para a determinação do máximo comprimento de corrosão permitido, dada por:

$$L = 1,12B\sqrt{Dt} \quad (21)$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1,1d/t - 0,15}\right)^2 - 1} \text{ , sendo } B \leq 4,0 \quad (22)$$

Se o comprimento longitudinal do defeito for maior que o comprimento calculado, então o reparo deve ser efetuado. [35]

II.7 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

O uso de materiais compósitos em engenharia necessita, também, de um entendimento dos modos de falha, que são próprios deste tipo de material. Como os laminados são construídos a partir de lâminas individuais, é essencial entender como esses carregamentos são distribuídos entre as lâminas.

Em condições de serviço, as estruturas de compósitos laminados desenvolvem trincas na matriz, descolamento fibra/matriz, fratura da fibra e delaminação. Estes efeitos, que provocam perda permanente da integridade do laminado, são chamados de danos e causam diminuição da rigidez e da resistência do material. Com isto a capacidade de carregamento e a vida em serviço da estrutura é reduzida. Quando uma estrutura ou componente cessa de exercer a sua função, é dito que ele falhou.[46]

Como os materiais compósitos são constituídos de elementos com propriedades mecânicas diferentes, cada um contribui de maneira distinta para as propriedades estruturais. Deste modo, regiões com resistência inferior à de regiões adjacentes exercerão maior influência na resistência global do compósito do que em regiões com maior resistência, visto que é mais provável que ocorra primeiro uma falha na região de menor resistência do que em uma região de maior resistência, visto que a resistência é fortemente influenciada por aspectos do comportamento local.[1]

A maneira mais fácil de se analisar tais fenômenos é por meio dos mecanismos ou modos de falha. A identificação dos modos de falha pode ser feita por uma análise micromecânica ou macromecânica, dependendo do tipo de caracterização que se deseja.

Na identificação micromecânica, considera-se o fato de que os elementos constituintes dos compósitos (fibra e matriz) têm, em geral, características de resistência muito diferentes. Além disso, a interface entre estes elementos tem características distintas de ambos. Na análise micromecânica também é possível considerar falhas e defeitos de fabricação. Assim, identificam-se três modos de falha: falha da matriz, falha da fibra e falha da interface fibra-matriz. Estes modos de falha são considerados iniciadores da falha geral do laminado.[1]

A fratura da fibra ocorre quando uma trinca se propaga na direção transversal ao seu comprimento, provocando a separação do laminado pela destruição do elemento que mais resiste à tração. Contudo, este mecanismo contribui pouco na absorção de energia, em relação aos demais.

A fratura da matriz ocorre quando uma trinca contorna a fibra, provocando a ruptura completa do compósito. Um fenômeno que provoca o aumento da energia de fratura, conseqüentemente da tenacidade, é a ramificação das trincas na matriz. Esta ramificação se origina do encontro de uma trinca e de uma fibra que, se forem por hipótese, perpendiculares entre si, produzem ramificações paralelas à fibra. Isto é a origem de trincas secundárias que provocam o descolamento entre a fibra e a matriz.

Os mecanismos de falha da interface baseiam-se nos mecanismos ou teorias de adesão entre a fibra e a matriz. Obviamente, se a adesão for comprometida, dar-se-á a falha da interface. Contudo, convém salientar que a falha pode ou não ocorrer na interface, isto é a falha pode ser adesiva (na interface) ou coesiva (na fibra ou na matriz). Tais mecanismos podem ocorrer simultânea ou isoladamente e promovem falhas de deslocamento ou arrancamento de fibras (*pull-out*) ou influem em outros mecanismos como a delaminação. [1]

II.7.1 CRITÉRIOS DE FALHA DA LAMINA

Os critérios de falha usados para análise de estruturas de compósitos podem ser divididos em dois grupos principais: critérios baseados em condições independentes e critérios interativos. Além disso, combinações destes têm sido desenvolvidas. São geralmente denominados critérios parcialmente interativos.

Os critérios independentes incluem o da máxima tensão e máxima deformação, extensamente utilizados e os interativos são expressões quadráticas de tensões sendo os mais conhecidos o de Tsai-Hill, Tsai-Wu e Hoffman. Um exemplo de critério parcialmente interativo é o de Hashin, aplicável a lâminas unidirecionais. [1]

Critério da tensão máxima

O critério de tensão máxima estipula que a resistência mecânica da lâmina analisada é atingida quando uma das três tensões às quais a lâmina está sendo submetida atingir o valor da tensão de ruptura correspondente. Desta forma, o critério pode ser descrito da seguinte maneira:

$$X_c < \sigma_1 < X_t \quad (23)$$

$$Y_c < \sigma_2 < Y_t \quad (24)$$

$$-S < \tau_{12} < S, \quad (25)$$

onde σ_1 , σ_2 e τ_{12} representam as tensões longitudinal, transversal e de cisalhamento no plano da lâmina. X_c e X_t representam as resistências mecânica na direção longitudinal em compressão e em tração, Y_c e Y_t representam as resistências mecânicas na direção transversal em compressão e em tração e S representa a resistência mecânica ao cisalhamento. Se as inequações acima são verificadas, a lâmina não se romperá devido ao estado de tensões (σ_1 , σ_2 , τ_{12}). [47]

Critério da deformação máxima

O critério da deformação máxima estipula que a resistência mecânica da lâmina é atingida quando uma das três deformações às quais a lâmina está sendo submetida atingir o valor da deformação de ruptura correspondente. Desta forma, pode ser escrito da seguinte maneira:

$$X_{\varepsilon c} < \varepsilon_1 < X_{\varepsilon t} \quad (26)$$

$$Y_{\varepsilon c} < \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon t} \quad (27)$$

$$-S_{\varepsilon c} < \gamma_{12} < S_{\varepsilon c}, \quad (28)$$

onde,

ε_1 , ε_2 e γ_{12} representam as deformações longitudinal, transversal e de cisalhamento no plano da lâmina, X_{ec} , X_{et} representam as deformações máximas na direção longitudinal em compressão e em tração, Y_{ec} e Y_{et} representam as deformações máximas na direção transversal em compressão e em tração e S_{ec} representa a deformação máxima em cisalhamento. Se as inequações acima são verificadas, a lâmina não se romperá devido as deformações ε_1 , ε_2 e γ_{12} .

Critério de Tsai-Hill

Num estado plano de tensões, tem-se:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \quad (29)$$

onde X é a tensão de ruptura em tração na direção longitudinal, Y é a tensão de ruptura em tração na direção transversal e S_{12} é a tensão de ruptura no cisalhamento no plano 1,2.

Critério de Tsai-Wu

O critério de Tsai-Wu foi desenvolvido de maneira a melhorar a correlação entre os resultados experimentais e teóricos a partir da introdução de parâmetros adicionais.

Considerando somente o estado plano de tensões, o critério se põe da seguinte forma:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + 2F_{12} \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_t X_c} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1, \quad (30)$$

onde F_{12} é um coeficiente de acoplamento expresso da forma:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ 1 - \left[X_c - X_t + \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} (Y_c - Y_t) \right] \sigma + \left(1 + \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right\} \quad (31)$$

Testes biaxiais diretos não são fáceis ou práticos de realizar. Uma forma mais fácil de produzir um estado biaxial de tensões é um teste de tração fora do eixo, ou seja, um carregamento uniaxial, σ_x a um ângulo θ com a direção da fibra. Para $\theta = 45^\circ$, tem-se:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_{45}^2} \left\{ 1 - \left[X_c - X_t + \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} (Y_c - Y_t) \right] \frac{\sigma_{45}}{2} + \left(1 + \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} + \frac{X_t X_c}{S_{12c}} \right) \frac{\sigma_{45}^2}{2} \right\} \quad (32)$$

onde σ (eq. 31) e σ_{45} (eq. 32), são as tensões de ruptura determinadas respectivamente em ensaio biaxial e de tração à 45° . [18]

O coeficiente de acoplamento F_{12} é normalmente utilizado para ajustar os resultados obtidos experimentalmente e pode variar de $-1 < F_{12} < 1$. Fazendo $F_{12} = -1/2$, o critério de Tsai-Wu se transforma no critério de Hoffman.

Se, além disso, fizermos $X_t = X_c = X$ e $Y_t = Y_c = Y$, o critério se transforma no critério de Tsai-Hill.[47]

Critério de Hoffman

No critério de Hoffman é levado em consideração a diferença do comportamento em tração e em compressão. Esse critério admite que a ruptura acontece quando a igualdade é verificada:[40]

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} + \frac{X_c - X_t}{X_t X_c} \sigma_1 + \frac{Y_c - Y_t}{Y_t Y_c} \sigma_2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 \geq 1 \quad (33)$$

II.7.2 FALHA DO LAMINADO

Os critérios de falha desenvolvidos para as lâminas não prevêm diretamente a falha do laminado completo, visto que as lâminas adjacentes ou circunjacentes são, muitas vezes, capazes de suportar as cargas excedentes causadas pela falha de uma única lâmina segundo um dado critério.

Além disso, o laminado pode continuar suportando um incremento individual de carga, mesmo que algumas lâminas já tenham falhado. Desta forma, a falha de um laminado é um processo progressivo, já que ocorre gradualmente, devido ao fato de que, quando uma lâmina falha, há uma redistribuição das cargas para as lâminas que permanecem intactas.

Diante dos aspectos apresentados, definir o que é relevante para causar a falha completa de um laminado é uma tarefa delicada. Entretanto, na prática, a resistência do laminado é calculada de acordo com a aplicação, determinando o método a ser utilizado na previsão da falha. [1]

Nesta análise, três tipos diferentes de falha são discutidos:

- (i) falha inicial ou primeira lâmina a falhar;
- (ii) última lâmina a falhar;
- (ii) falha entre as lâminas.

No primeiro caso, considera-se que o laminado falhou quando a primeira lâmina falhou [18]. Sabe-se, no entanto, que a falha de uma simples lâmina segundo um dado critério, não resulta na falha do laminado completo.[1]

No segundo caso, quando o nível de carregamento máximo ocorreu ou excedeu, seguido da falha das multicamadas.

No terceiro caso a falha é resultante da separação entre camadas contíguas, mesmo quando as camadas em si permanecem intactas.

As duas primeiras definições acima, representam dois níveis do processo de falha, o inicial e o final, que são análogos ao critério de escoamento e de máxima tração nos materiais elastoplásticos. A primeira aproximação é conservativa, mas pode ser usada com fatores de segurança mais baixos. A segunda é mais avançada e necessita de um conhecimento mais preciso das condições de carregamento e distribuição de tensões e então é usado com fatores de segurança mais altos. Uma prática geral em projetos de estrutura é manter o carregamento com níveis baixos para produzir a falha na primeira lâmina. Por exemplo, na indústria aeronáutica limita-se a deformação máxima num laminado carbono/epoxi abaixo de 4%. [18]

II.8 ANÁLISE NUMÉRICA - O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A teoria clássica de laminados de material compósito pode ser usada como uma ferramenta de projeto para calcular as deformações resultantes de uma dada tensão aplicada na estrutura, a partir das informações de um laminado básico.

Uma ferramenta de cálculo, amplamente usada atualmente, é a análise por elementos finitos, para simular o comportamento de estruturas. Essa metodologia, como outras metodologias numéricas, é um suporte indispensável a um projeto mecânico, sobretudo na primeira fase de estudo, que substitui a metodologia experimental, reduzindo tempo e custo. Naturalmente, como uma técnica que se baseia em um modelo matemático, que é uma aproximação da situação real, o resultado obtido será testado com base nos resultados fornecidos através dessa ferramenta.

As idéias e teorias que deram origem ao que hoje conhecemos como método de elementos finitos, surgiram no início do século passado. Não se atribui a ninguém especificamente a autoria deste método, nem a data precisa em que surgiu. Contudo, matemáticos, físicos e engenheiros trabalharam desde o início na elaboração e evolução do método.

Originalmente o método foi implementado no estudo de tensões em aeronaves. Em engenharia foi usado pela primeira vez no início dos anos 60, em estudos de elasticidade plana. A partir daí, o método de elementos finitos foi usado extensivamente para análise de tensões lineares, deflexão e vibração em diversas áreas de engenharia, já que na época começava a se reconhecer sua eficácia. [48]

O método de elementos finitos considera a região do problema formada por pequenos elementos interligados entre si. A região em estudo é modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Uma vez que estes elementos podem ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, pode-se modelar formas geométricas bastante complexas.

Além disso, possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises estruturais. [48]

A aplicação do método de elementos finitos pode ser resumida essencialmente em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

Pré-processamento

É a etapa onde se prepara o problema que está sendo solucionado. Modelam-se o fenômeno, introduzem-se as condições de contorno, carregamentos, escolhem-se os elementos, as propriedades dos materiais e são feitas as simplificações que venham a facilitar a análise sem influir negativamente nos resultados. Esta etapa subdivide-se em:

- discretização do modelo

O modelo é subdividido em um número equivalente de elementos, os quais podem ser triângulos ou quadriláteros para problemas em duas dimensões ou tetraedros e hexaedros para três dimensões. Os elementos possuem nós, no interior ou nas arestas do elemento. Assume-se que estes elementos estão interligados entre si por nós localizados nos contornos dos mesmos (os deslocamentos destes nós são as incógnitas básicas do problema).

- seleção das funções de interpolação

De acordo com o tipo e elemento escolhido na primeira etapa, existem funções de interpolação ou deslocamentos associados, classicamente aceitas. As funções assumidas representam aproximadamente a distribuição exata ou real dos deslocamentos.

Geralmente, a forma adotada para as funções de interpolação é a polinomial, pela simplicidade de manipulação matemática.

Existem três fatores inter-relacionados que influenciam a seleção da função de interpolação; escolha do tipo e do grau da função (como normalmente o tipo adotado é polinomial, apenas o grau deve ser escolhido), o tipo das variáveis de campo que descrevem o modelo (normalmente, os deslocamentos nos nós ou suas derivadas) e finalmente, o modelo deve satisfazer certos requisitos que garantam que o resultado numérico se aproxime da solução correta.

Solução

Esta etapa depende da configuração do modelo na etapa anterior. A solução baseia-se num algoritmo numérico que objetiva solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as restrições (condições) anteriormente impostas ao modelo. Divide-se em:

- obtenção da matriz de rigidez elementar

A matriz de rigidez é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades geométricas do material de um elemento e pode ser obtida pelo uso do princípio da mínima energia potencial. A rigidez relaciona os deslocamentos nodais às forças aplicadas nos nós. A relação de equilíbrio entre a matriz de rigidez $[k]$, o vetor de força nodal $\{F\}$ e o vetor deslocamento nodal $\{u\}$ é expressa como um conjunto de equações algébricas lineares simultâneas, $\{F\} = [k] \{u\}$.

A matriz de rigidez para um elemento depende da função de interpolação, da geometria do elemento e das propriedades locais do material selecionadas na etapa anterior.

- montagem das equações algébricas

Inclui a montagem da matriz de rigidez global para todo o modelo a partir das matrizes de rigidez elementares e do vetor força global a partir dos vetores força elementares. A base para um método de montagem é a exigência das interconexões nodais. Os deslocamentos em um nó devem ser os mesmos para todos os elementos adjacentes.

- soluções para os deslocamentos incógnitos

As equações algébricas montadas no passo anterior são resolvidas para os deslocamentos incógnitos. Em problemas lineares, esta é uma aplicação relativamente direta das técnicas de álgebra matricial. Entretanto, para os problemas não lineares, as soluções desejadas são obtidas por uma seqüência de passos, cada qual envolvendo a modificação da matriz de rigidez e/ou do vetor força.

- cálculo das deformações e tensões elementares a partir dos deslocamentos nodais

Em certos casos (deformação de corpos elásticos), os deslocamentos nodais são as variáveis em estudo para a solução. Muitas vezes, entretanto, outras quantidades derivadas das variáveis desconhecidas, tais como tensões e deformações, devem ser calculadas. Em geral, tensão e deformação são proporcionais às derivadas dos deslocamentos.

Pós-processamento

É a última etapa do método. Depende das necessidades advindas do problema da estrutura que está sendo modelada. Pode fornecer dados como:

- deslocamentos nodais
- deformações da geometria
- gradientes de tensão
- gradientes de temperatura
- deslocamentos nodais ao longo do tempo
- frequências naturais e modo de vibrar a estrutura [48] [49]

II.8.1 ANÁLISE NÃO LINEAR

Quando o comportamento da estrutura é não linear, a sua resposta varia de maneira desproporcional às forças aplicadas. Na realidade, todas as estruturas são não lineares por natureza, mas nem sempre a um nível que tenha um efeito significativo na análise. Contudo, se isto afeta seu comportamento, ela não pode ser ignorada.

Um comportamento dessa natureza surge por uma série de razões, que podem ser não linearidade geométrica relacionada a grandes deformações, grandes deflexões e grandes rotações e a não linearidade de material que refere-se a plasticidade, hiperelasticidade, viscoelasticidade, etc.

Para análise da não linearidade, o carregamento é subdividido em uma série de etapas de incrementos e, em cada uma delas, é executada uma série de aproximações lineares até atingir a condição de equilíbrio para cada um dos incrementos. A matriz de rigidez da estrutura é ajustada ao completar cada solução de incremento para refletir a resposta não linear.

Para resolver o problema, o programa Ansys® usa o procedimento iterativo baseado no método de Newton-Raphson, no qual uma série de aproximações convergem para a solução não linear real.

A subdivisão da carga e o número máximo de iterações de equilíbrio podem ser controlados. As iterações de equilíbrio irão continuar até alcançar a convergência dos resultados ou o limite máximo de iterações.[50]

CAPÍTULO III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão mostrados os resultados de toda a parte experimental do trabalho, desde a caracterização do material, levantamento das propriedades mecânicas, mapeamento dos tubos e fabricação dos defeitos, até os ensaios hidrostáticos.

A determinação das pressões de ruptura teóricas, os cálculos das espessuras de camada e os resultados numéricos também estão incluídos aqui.

III.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os materiais usados no presente trabalho, são tubos sem costura de aço ASTM A106 gr A, que possuem diâmetro nominal (D_{nom}) de 42,16 mm e espessura nominal (t_{nom}) de 2,77 mm, de acordo com a norma ASME B36.10. [51]

Foram cortados 20 tubos com 420 mm de comprimento de 4 varas de 6 m do material. Para identificá-los, uns foram nomeados com as letras TPC e outros com as letras TPF seguidas de um código alfanumérico.

Para determinar as propriedades mecânicas do material, foram retirados corpos de prova na direção longitudinal dos tubos, conforme estabelecido na norma ASTM E 8M-99.[58]

Os ensaios de tração de cinco corpos de prova foram realizados em uma máquina INSTRON, modelo TTDML-série 1766 da Universal Testing Instrument instrumentados com medidores de deformação marca INSTRON CAT n°G-51-12-A A325-25130, célula de carga de 10 kN e velocidade do travessão de 1mm/min.

Os resultados foram registrados através da placa de aquisição de dados, modelo Signal Conditioning Configurable Convector-National Inst. SC-2345.

As dimensões e o aspecto dos corpos de prova ensaiados podem ser vistos nas figuras 14 e 15 e as propriedades mecânicas, na tabela 11.



Figura 14. Corpo de prova usado no ensaio de tração

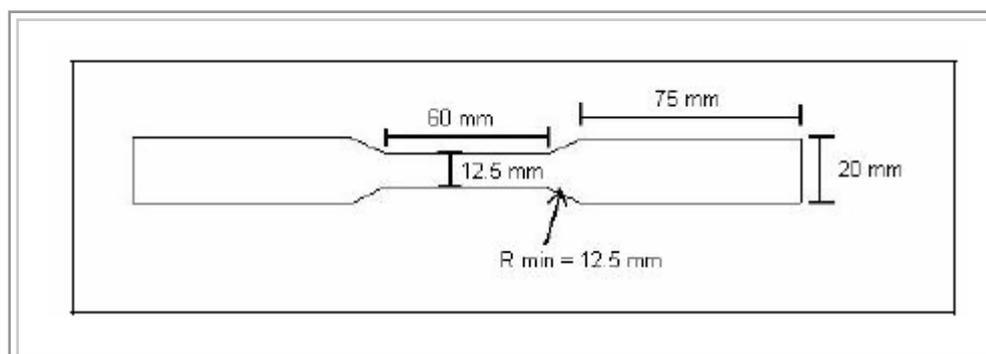


Figura 15. Dimensões dos corpos de prova confeccionados

Tabela 11 Propriedades mecânicas dos corpos de prova de aço

CORPOS DE PROVA	σ_{LE} (MPa)	σ_R (MPa)	e (%)	σ_f (MPa)
T1CP01	293,0	405,2	50,4	300,0
T1CP02	248,9	354,15	44,03	241,2
T2CP01	268,6	381,2	26,6	265,0
T2CP02	278,4	386,4	51,2	282,7
T2CP03	279,4	389,6	49,4	279,4

Os resultados dos corpos de prova CP02T1 e CP01T2 não foram considerados já que apresentaram valores dispersos dos demais. As curvas típicas do material podem ser visualizadas no gráfico da figura 16.

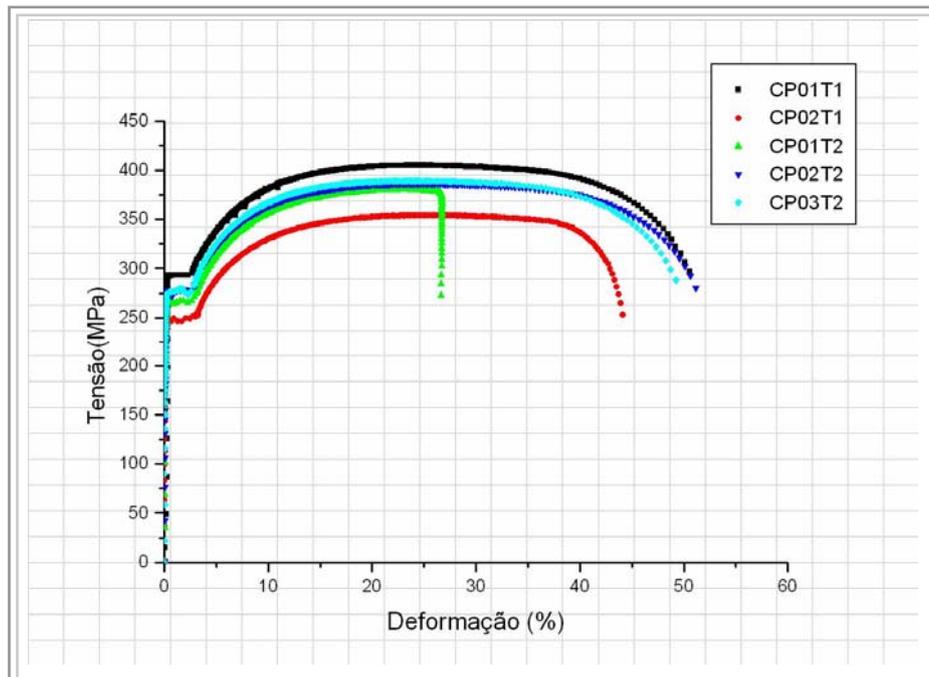


Figura 16. Curvas tensão x deformação de engenharia dos corpos de prova de aço

Para cálculo das pressões de ruptura teóricas, foram considerados os valores de limite de escoamento e de resistência do corpo de prova identificado por T2 CP02 .

III.2. MAPEAMENTO DOS TUBOS

Os 20 tubos com 420 mm de comprimento, que corresponde a dez vezes o diâmetro, foram mapeados. Desses, dezoito foram usinados para confecção dos defeitos e dois ficaram intactos. Treze tubos serão submetidos a ensaio hidrostático: seis sem reparo, seis com reparo e um intacto, a fim de determinar suas pressões de ruptura.

Para verificação dessas dimensões foram marcados, utilizando o dispositivo mostrado na figura 17, pontos a cada 36° na direção circunferencial, nas 9 seções igualmente espaçadas, estabelecidas ao longo do comprimento de cada tubo. Na figura 18, pode ser melhor visualizado o mapeamento em um dos tubos.

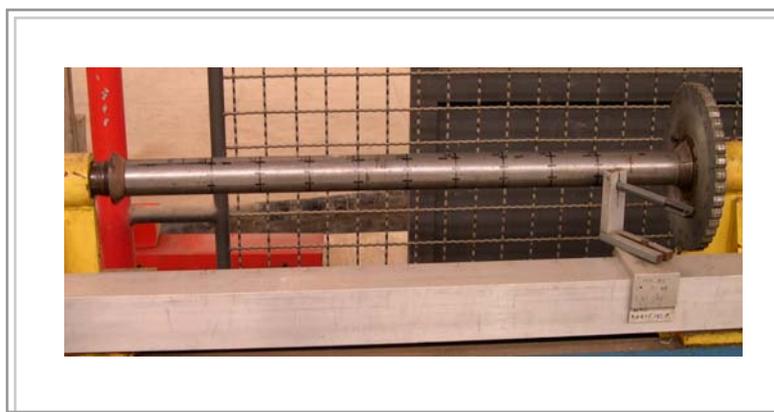


Figura 17. Dispositivo para mapeamento dos tubos



Figura 18. Tubo mapeado

Os diâmetros foram medidos com paquímetro digital e as espessuras com aparelho de ultrassom, modelo NOVA 100-D-Miniature Ultrasonic Thickness Gage, fabricado por NDT Systems.

Após o levantamento dimensional dos tubos, eles foram agrupados em função desses valores de acordo com as menores espessuras de parede na seção central visando, quando da fabricação dos defeitos, a obtenção de paredes remanescentes com valores também próximos. Os dois últimos tubos apresentados na tabela 12, não foram usados.

Para conhecimento das imperfeições geométricas e suas possíveis implicações nos resultados obtidos após o colapso, serão mostrados na tabela 12, a ovalização Δ e as espessuras (t) e diâmetros (D) máximos e mínimos, encontrados.

Os tubos TPC 163D, TPC 163E e TPC 163B são os que apresentam maiores diferenças de espessura. Os dois primeiros e o TPF 1A, apresentaram o maior número de pontos acima da espessura nominal (2,77 mm). Os demais mostraram variações menores e mais uniformes. Observa-se que os percentuais de ovalização apresentaram valores muito baixos.

Conhecer como estão distribuídas as imperfeições oriundas do processo de fabricação é importante para a interpretação dos resultados obtidos no ensaio hidrostático e para determinação das pressões de ruptura teóricas.

Como poderá ser visto mais adiante, uma variação de espessura acarreta diferenças significativas nos cálculos das pressões de ruptura de tubos com defeito, já que as profundidades são baseadas em percentuais da espessura de parede.

Analisando as fórmulas empíricas conhecidas, pode-se verificar o quanto elas são sensíveis a esses dois parâmetros. Variações de espessura em regiões ao longo do tubo podem indicar, também, o local onde este irá falhar.

Tabela 12 Levantamento dimensional dos tubos

TUBOS	t _{max} (mm)	t _{min} (mm)	t _{max} -t _{min} (mm)	% de medições acima de 2,77 mm	D _{max} (mm)	D _{min} (mm)	$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$ %
TPC 163 D	2,92	2,62	0,30	46	42,00	41,95	0,06
TPC 163 E	2,96	2,62	0,34	46	42,00	41,95	0,06
TPC 163 B	2,90	2,60	0,30	38	41,93	41,87	0,07
TPF 1B	2,86	2,70	0,16	36	42,00	41,95	0,06
TPC 165 E	2,88	2,68	0,20	36	41,90	41,87	0,035
TPF 1A	2,86	2,68	0,18	50	42,11	41,92	0,024
TPC 163A	2,88	2,66	0,22	36	42,00	41,97	0,035
TPC 163C	2,92	2,64	0,18	40	42,02	41,95	0,08
TPF 1C	2,84	2,68	0,16	38	42,02	41,97	0,06
TPC 164H	2,84	2,70	0,14	36	42,02	41,97	0,05
TPC 165D	2,84	2,68	0,16	34	42,02	41,96	0,06
TPC 164A	2,84	2,68	0,16	42	41,98	41,94	0,048
TPC 164E	2,84	2,68	0,16	38	41,98	41,91	0,083
TPC 164G	2,84	2,68	0,16	36	41,99	41,93	0,071
TPC 164B	2,86	2,68	0,18	44	41,95	41,90	0,06
TPC 165A	2,82	2,68	0,14	34	41,97	41,92	0,06
TPC 165C	2,84	2,68	0,16	42	41,95	41,88	0,084
TPF 1F	2,82	2,70	0,12	32	42,03	41,97	0,071
TPC 163F	2,92	2,62	0,30	42	41,98	41,88	0,12
TPF 1D	2,82	2,70	0,12	44	42,04	41,96	0,09

III.3 FABRICAÇÃO DOS DEFEITOS

O critério para a escolha do local do defeito na superfície externa, foi a seção central (seção 5), onde estava localizada a menor espessura de parede medida.

Os defeitos foram usinados por eletro-erosão a partir de ferramentas especialmente fabricadas para obtenção de profundidades máximas (d) de aproximadamente 60, 70 e 80 % da espessura (t) do tubo. O comprimento longitudinal (l), foi baseado em 50 e 100 % do diâmetro (D). O comprimento circunferencial (c) foi fixado em 0,31 do diâmetro (D). A figura 19, mostra o esquema dos defeitos fabricados nos tubos, com seus respectivos parâmetros (c), (l) e (d).

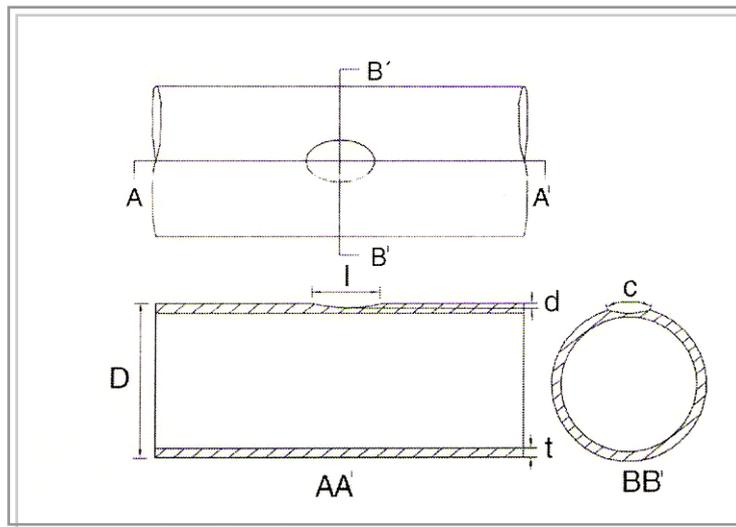


Figura 19. Esquema dos defeitos usinados nos tubos

A figura 20 mostra um defeito usinado na região central do tubo. Um relógio comparador, visto na figura 21, foi usado para medir as profundidades dos defeitos.

Com os resultados obtidos, foram calculados os percentuais reais e nominais da profundidade dos defeitos, considerando tanto a espessura real, quanto a espessura nominal da parede do tubo. Nos cálculos das pressões de ruptura serão analisados e interpretados os resultados levando em consideração as medidas de t e D , identificadas na tabela 13 como reais e nominais.

Os defeitos com menor profundidade se afastaram mais dos percentuais das espessuras estimadas para a sua fabricação, notadamente quando calculados em relação às espessuras nominais. Os defeitos mais profundos reproduziram melhor os valores esperados.



Figura 20. Defeito usinado em tubo



Figura 21. Medida da profundidade do defeito

Tabela 13 Levantamento dimensional dos defeitos usinados

% t	TUBOS	DIÂMETRO E ESPESSURA	t ⁽¹⁾ (mm)	d (mm)	l (mm)	D ⁽²⁾ (mm)	% t (real)
60	TPC 163 D	real	2,62	1,53	21,00	41,97	58
		nom	2,77	1,53	21,00	42,16	55
	TPC 163 E	real	2,62	1,52	21,00	41,98	58
		nom	2,77	1,52	21,00	42,16	55
	TPC 163B	real	2,62	1,51	21,00	41,91	58
		nom	2,77	1,51	21,00	42,16	54
	TPC 163 A	real	2,66	1,55	42,00	41,98	58
		nom	2,77	1,55	42,00	42,16	56
	TPC 163C	real	2,66	1,54	42,00	41,98	58
		nom	2,77	1,54	42,00	42,16	56
	TPF 1C	real	2,68	1,55	42,00	41,91	58
		nom	2,77	1,55	42,00	42,16	56
70	TPF 1B	real	2,70	1,85	21,00	41,98	68
		nom	2,77	1,85	21,00	42,16	67
	TPC 165 E	real	2,70	1,86	21,00	41,98	69
		nom	2,77	1,86	21,00	42,16	67
	TPF 1A	real	2,68	1,81	21,00	42,00	67
		nom	2,77	1,81	21,00	42,16	65
	TPC 164 E	real	2,68	1,81	42,00	41,94	67
		nom	2,77	1,81	42,00	42,16	65
	TPC 164G	real	2,68	1,82	42,00	41,96	68
		nom	2,77	1,82	42,00	42,16	66
	TPC 164B	real	2,68	1,81	42,00	41,92	67
		nom	2,77	1,81	42,00	42,16	65
80	TPC 164 H	real	2,70	2,16	21,00	42,00	80
		nom	2,77	2,16	21,00	42,16	78
	TPC 165 D	real	2,70	2,13	21,00	41,95	79
		nom	2,77	2,13	21,00	42,16	77
	TPC 164 A	real	2,70	2,14	21,00	41,97	79
		nom	2,77	2,14	21,00	42,16	77
	TPC 165 A	real	2,70	2,13	42,00	41,95	79
		nom	2,77	2,13	42,00	42,16	77
	TPC 165 C	real	2,70	2,11	42,00	41,93	78
		nom	2,77	2,11	42,00	42,16	76
	TPF 1F	real	2,70	2,12	42,00	42,01	78
		nom	2,77	2,12	42,00	42,16	76

(1) O valor da espessura real é o menor obtido na seção média em cada tubo.

(2) O valor do diâmetro real é a média de todos os valores medidos em cada tubo.

III.4 DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES DE RUPTURA TEÓRICAS DOS TUBOS

Para determinação das pressões de ruptura dos tubos com defeito, foram aplicados os códigos ASME B31G, 0,85dL ou B31G modificado e o DNV RP-F101, conforme visto no item 6 do Capítulo 2, onde estes métodos foram descritos.

Na equação do método DNV RP-F101, dentre os fatores de ajuste, foi definido um fator Y_B , que levou em consideração a deformação longitudinal existente no tubo. O fator foi definido da seguinte forma:

Tubo sem restrição (*unconstrained pipe*) - $Y_B = 1,0$

Tubo com restrição (*constrained pipe*) - $Y_B = 1,08$

Tubo com a extremidade fechada (*endcape pipe*) - $Y_B = 1,1$

Na prática recomendada DNV RP- F101, o fator Y_B não é citado para o cálculo da pressão de ruptura. Portanto, entende-se que ele é considerado como sendo a unidade, ou seja, para uma situação em que um tubo não teria restrição na sua extremidade. [36]

Como os ensaios hidrostáticos foram realizados com os tubos tamponados nas extremidades, os valores obtidos foram multiplicados por 1,1.

O objetivo de utilizar todos esse códigos para calcular as pressões de ruptura dos tubos com defeito originados por corrosão, é o de avaliar qual mais se aproxima dos resultados experimentais e numéricos e para análise do comportamento dos tubos reparados com material compósito. Para os cálculos, foram utilizadas as espessuras e os diâmetros nominais e reais e as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração do material.

Na tabela 14 são mostradas as pressões de ruptura teóricas dos tubos com defeitos usinados, calculadas pelos métodos referidos.

Tabela 14 Cálculo das pressões de ruptura dos tubos com defeito

			PRESSÕES DE RUPTURA				
%t	Comp.	TUBOS	D e t (mm)	ASME B31G (MPa)	0,85dL (MPa)	DNV RPF-101 (MPa)	DNV x 1,1 (MPa)
60	L=21 mm	TPC 163 D	real	27,33	29,79	35,09	38,60
			nom.	29,63	32,73	39,05	42,95
		TPC 163 E	real	27,39	29,90	35,25	38,77
			nom.	29,70	32,84	39,21	43,13
		TPC 163B	real	27,51	30,07	35,50	39,05
			nom.	29,77	32,96	39,39	43,33
	L=42 mm	TPC 163 A	real	25,15	26,32	28,70	31,57
			nom.	26,77	28,35	31,39	34,53
		TPC 163 C	real	25,23	26,46	28,93	31,82
			nom.	26,85	28,47	31,60	34,76
		TPF 1C	real	25,44	26,69	29,21	32,13
			nom.	26,77	28,47	31,41	34,55
70	L=21 mm	TPF 1B	real	26,19	27,29	31,06	34,16
			nom.	27,30	28,75	33,14	36,45
		TPC 165 E	real	26,17	27,20	30,88	33,97
			nom.	27,23	28,61	32,91	36,20
		TPF 1A	real	26,49	27,82	31,92	35,11
			nom.	27,60	29,28	33,98	37,38
	L= 42 mm	TPC 164 E	real	23,25	23,10	23,76	26,14
			nom.	24,57	24,78	26,05	28,65
		TPC 164 G	real	23,15	22,94	23,51	25,86
			nom.	24,49	24,63	25,81	28,39
		TPC 164 B	real	23,26	23,11	23,77	26,15
			nom.	24,57	24,78	26,05	28,65
80	L= 21 mm	TPC 164H	real	23,64	22,66	23,01	25,31
			nom.	24,82	24,26	25,50	28,05
		TPC 165 D	real	23,92	23,16	23,94	26,33
			nom.	25,06	24,73	26,35	28,98
		TPC 164 A	real	23,82	23,00	23,64	26,00
			nom.	24,98	24,57	26,07	28,68
	L= 42 mm	TPC 165 A	real	20,69	18,71	16,67	18,34
			nom.	21,74	20,10	18,59	20,45
		TPC 165 C	real	20,88	19,02	17,19	18,91
			nom.	21,92	20,38	19,10	21,01
		TPF 1F	real	20,75	18,83	16,91	18,60
			nom.	21,83	20,22	18,85	20,73

São mostrados, nas figuras 22 e 23, os resultados das pressões de ruptura calculadas através dos diferentes códigos, para 6 dos tubos, nas três profundidades, em função das espessuras de parede reais e nominais nos dois comprimentos longitudinais (L) dos defeitos.

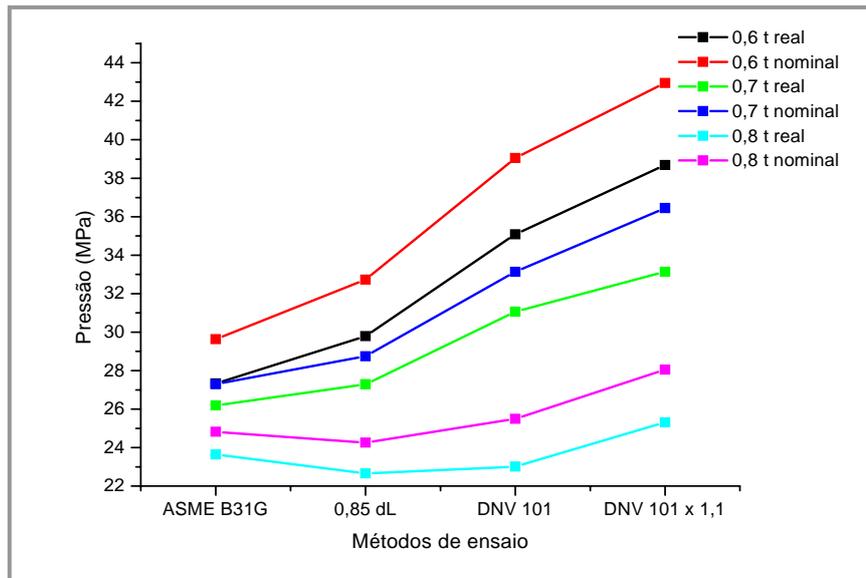


Figura 22. Pressões de ruptura calculadas pelos diferentes métodos para L= 21 mm

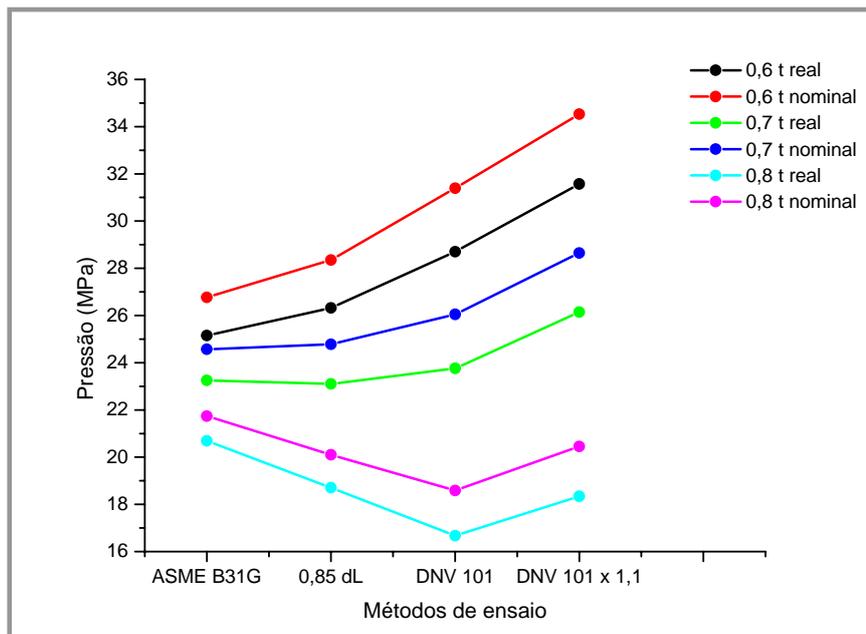


Figura 23. Pressões de ruptura calculadas pelos diferentes métodos para L=42 mm

Analisando os resultados, constata-se que as pressões calculadas através do código ASME B31G, apresentam os resultados mais conservativos para defeitos com profundidade igual a 60 e 70 % da espessura de parede (t) para os dois comprimentos longitudinais (L). O código 0,85dL, mostrou-se ainda conservativo para os mesmos tipos de defeitos.

Para dutos cuja profundidade do defeito (d) se aproxima de 80% da espessura (t), somente o critério DNV RP-F101, considerando o fator 1,1 para tubos com extremidade fechada, supera os valores previstos no ASME B31G, para comprimentos (L) de 21 mm. Para comprimentos (L) de 42 mm e profundidade máxima de defeito, todos os códigos apresentam-se mais conservativos que o ASME B31G.

Para estimar as pressões de ruptura dos vinte tubos, foi utilizada a fórmula de Barlow, conforme equação (34), usando o limite de resistência à tração do material para cálculo da pressão de ruptura.

A equação (35) adotada por Armor Plate já mostrada no item 5 do Capítulo 2 para cálculo da espessura do compósito, faz uma estimativa da pressão requerida para romper o tubo reparado. Os valores obtidos são mostrados na tabela 15 para comparar, posteriormente, com os resultados dos ensaios hidrostáticos e os numéricos.

i) Fórmula de Barlow [36] [53]

$$P_{UTS} = \frac{2\sigma_{uts}t}{D}, \text{ onde} \quad (34)$$

σ_{UTS} é o limite de resistência à tração do aço, t é a espessura de parede e D é o diâmetro externo do tubo.

ii) Armor Plate [45]

$$P_{reqrup} = 1,44 \frac{2(SMYS)t}{D}, \text{ onde} \quad (35)$$

SMYS é a tensão de escoamento do aço, t é a espessura de parede e D é o diâmetro externo do tubo.

Tabela 15 Pressões de ruptura do tubo intacto e dos tubos com defeito reparados

TUBOS ¹	TUBO INTACTO	TUBO REPARADO
	P_{UTS} (MPa)	P_{regrup} (MPa)
TPC 163 D	48,24	50,05
TPC 163 E	48,23	50,03
TPC 163 B	48,31	50,12
TPC 163 A	48,97	50,80
TPC 163 C	48,97	50,80
TPF 1C	49,32	51,17
TPF 1B	49,70	51,56
TPC 165 E	49,82	51,68
TPF 1A	49,68	51,54
TPC 164 E	49,38	51,23
TPC 164 G	49,36	51,20
TPC 164 B	49,41	51,25
TPC 164 H	49,68	51,54
TPC 165 D	49,74	51,60
TPC 164 A	49,71	51,57
TPC 165 A	49,74	51,60
TPC 165 C	49,76	51,62
TPF 1F	49,67	51,52
TPC 163F	48,20	50,01
TPF1D	49,68	51,53

¹Os valores nominais para P_{uts} , P_{regrup} são 50,97 e 52,87 MPa, respectivamente.

III.5 CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA DE COMPÓSITO

Para calcular a espessura de camada de compósito a ser aplicada nos tubos com defeito, empregou-se a fórmula empírica introduzida no item 5 do Capítulo 2, que será rerepresentada a seguir, para análise dos resultados mostrados na tabela 16.

Os números em destaque, são os valores máximos obtidos e que serão utilizados para efetuar o reparo, bem como no modelo numérico.

1. Pressão para gerar a tensão de escoamento

$$P_{SMYS} = \frac{2 \cdot SMYS \cdot t}{D}, \quad (36)$$

onde SMYS é a tensão de escoamento do material.

2. Pressão para gerar a máxima resistência à tração

$$P_{UTS} = \frac{2 \cdot UTS \cdot t}{D}, \quad (37)$$

onde UTS é a máxima resistência à tração do material

3. Pressão máxima de operação

$$P_{MAOP} = 0,72 P_{SMYS} \quad (38)$$

4. Pressão requerida para romper

$$P_{reqrup} = 2 P_{MAOP} \quad (39)$$

5. Fator de redução de pressão

$$k = \frac{\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M}\right)} \quad (40)$$

$$M = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{0,8L^2}{Dt}\right)\right]} \quad (41)$$

6. Cálculo da pressão de ruptura da seção corroída

$$P_{rupcorr} = k \cdot P_{UTS} \quad (42)$$

7. Cálculo da espessura de camada

$$X = P_{reqrup} - P_{rupcorr} \quad (43)$$

$$t_c = \frac{D}{(2\sigma_c)} \frac{1}{\frac{1}{X} - \frac{1}{2\sigma_c}} \quad (44)$$

Como pode ser visto nas equações (36) e (37), foram consideradas as pressões circunferenciais que causam as tensões de escoamento e de máxima resistência à tração. Considerou-se, também, como pressão máxima de operação a que induz uma tensão de 72% da tensão de escoamento.

No cálculo da pressão requerida para romper o duto com o reparo de material compósito, que é apresentada na equação (39) como igual a 2 vezes a pressão máxima de operação, pode ser verificado nas tabelas 15 e 16, que esses valores estão bem próximos das pressões responsáveis pela obtenção das tensões de ruptura do material sem defeito, nos níveis daquelas de duto intacto.

O fator k , é calculado em função do perfil do defeito. A profundidade da área corroída, a espessura de parede do duto e o fator de dilatação, fornecem a redução da pressão na região corroída.

Conforme visto aqui, a equação (44), desenvolvida para o cálculo da espessura de camada, com esses parâmetros e a informação da resistência do material compósito empregado, $\sigma_c = 316,96$ MPa, fornece uma condição idealizada de operação, para resistir às mesmas pressões de ruptura de um duto sem defeito. Note-se que a pressão de ruptura de corrosão apresenta resultados ainda mais conservativos que os obtidos através do ASME B31G, a exceção dos dutos com profundidade de defeito de $0,6t$ e comprimento de 21mm .

Tabela 16 Cálculo das espessuras de camada de compósito

% t	TUBOS	DIÂMETRO E ESPESSURA	P _{SMYS} (MPa)	P _{UTS} (MPa)	P _{MAOP} (MPa)	P _{reqrup} (MPa)	P _{rupcorr} (MPa)	Espessura da camada (mm)
60	TPC 163 D	real	34,75	48,24	25,02	50,05	28,06	1,51
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	31,47	1,47
	TPC 163 E	real	34,75	48,23	25,02	50,03	28,23	1,50
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	31,65	1,45
	TPC 163 B	real	34,80	48,31	25,06	50,12	28,46	1,48
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	31,8	1,44
	TPC 163 A	real	35,28	48,97	25,40	50,80	24,26	1,83
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	26,55	1,81
	TPC 163 C	real	35,28	48,97	25,40	50,80	24,45	1,82
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	26,73	1,80
	TPF 1C	real	35,53	49,32	25,58	51,17	24,67	1,83
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	26,55	1,82
70	TPF 1B	real	35,81	49,70	25,78	51,56	23,63	1,93
		nom.	36,72	50,98	26,44	52,87	25,36	1,91
	TPC 165 E	real	35,89	49,82	25,84	51,68	23,46	1,95
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	25,15	1,92
	TPF 1A	real	35,79	49,68	25,77	51,54	24,46	1,87
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	26,18	1,85
	TPC 164 E	real	35,58	49,38	25,61	51,23	19,63	2,20
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	21,55	2,18
	TPC 164 G	real	35,56	49,36	25,60	51,20	19,42	2,21
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	21,35	2,19
	TPC 164 B	real	35,59	49,41	25,63	51,25	19,64	2,20
		nom.	35,72	50,97	26,44	52,87	21,55	2,18
80	TPC 164 H	real	35,79	49,68	25,77	51,54	16,41	2,46
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	18,35	2,42
	TPC 165 D	real	35,83	49,74	25,80	51,60	17,18	2,41
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	19,08	2,36
	TPC 164 A	real	35,82	49,71	25,79	51,57	16,92	2,43
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	18,84	2,38
	TPC 165 A	real	35,83	49,74	25,80	51,60	13,38	2,69
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	14,95	2,67
	TPC 165 C	real	35,85	49,76	25,81	51,62	13,82	2,70
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	15,38	2,64
	TPF 1F	real	35,78	49,67	25,76	51,52	13,58	2,68
		nom.	36,72	50,97	26,44	52,87	15,16	2,66

III.6 APLICAÇÃO DO REPARO

O material para o reparo foi desenvolvido no Laboratório de Compósitos do PEMM/UFRJ.[54]

A matriz polimérica, a fração volumétrica das fibras, bem como o material de enchimento para o nivelamento da superfície dos tubos, foram escolhidos dentre os vários estudados.

Para isso, foram não só analisadas as propriedades mecânicas do compósito como algumas características dos materiais constituintes voltadas para a aplicabilidade no processo de laminação manual, tais como:

- tempo de gel da resina suficiente para molhar a tira de fibra de vidro em toda a extensão, até o término da aplicação e do enrolamento na superfície a ser reparada.
- um tecido de fibra de vidro cuja gramatura apresentasse uma boa resistência para suportar à tensão aplicada no enrolamento sem apresentar um deslizamento das fibras.
- um percentual de fibras possível de ser trabalhado em um processo de enrolamento manual.

Um breve resumo dos materiais constituintes utilizados na fabricação do reparo será mostrado a seguir.

A matriz polimérica

As matrizes poliméricas são constituídas de uma resina epoxi denominada D.E.R 8003, fabricada por Dow Química, à base de Diglicidil Éter de Bisfenol A (DGEBA), comercialmente modificada, com adição de 10% em peso de agente diluente.

Para atingir as propriedades requeridas, foi utilizado um agente de cura/modificador flexibilizador, reativo, de média viscosidade, à base de aduto de poliamina alifática glicidil DETA, denominado DY 104.

Estudou-se o efeito da variação da fração desse agente nas propriedades mecânicas de resistência e tenacidade da resina. Os corpos de prova para ensaio de tração e o procedimento de ensaio seguiram o disposto na norma ASTM D638M-93, na máquina INSTRON, com velocidade de travessão 1mm/min. Para aquisição de dados foi utilizado um medidor de deformação da marca INSTRON, modelo G-51-12-A e sistemas computacionais específicos.

O sistema D.E.R 8003 com a adição de 40% em peso de DY104 (8003+40%104) foi o que apresentou uma melhor combinação de alta resistência à tração e alta absorção de energia antes da fratura, avaliada através do limite de resistência e da tenacidade. A tabela 17, mostra as propriedades mecânicas obtidas. A formulação apresenta ainda uma flexibilidade média pós-cura, quando comparada às outras formulações estudadas.

Tabela 17 Propriedades mecânicas do sistema 8003+40%104 [54]

MATRIZ POLIMÉRICA	E (GPa)	σ_R (MPa)	DUTILIDADE (%)	TENACIDADE À FRATURA (J)	$\sigma_R \times$ TENACIDADE (MPa.J)	ENERGIA DE FRATURA (kJ/m^2)
8003+40%104	0,99	18,61	11,64	3,89	72,39	110,47

A fibra de vidro

Para caracterização dos tecidos de fibra de vidro, foram testadas três diferentes gramaturas (peso/unidade de área) - 120, 180 e 326 g/m^2 , variando-se o percentual de fibras.

Os tecidos com menor gramatura, possuem uma razão do número de tecelados por unidade de área maior que os tecidos de maior gramatura, o que afeta as propriedades mecânicas, diminuindo os valores da tensão média em função do aumento da gramatura.

O material de enchimento

As propriedades importantes para este material são o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Como o material é totalmente restrito pelo reparo, a resistência à compressão torna-se um fator chave a ser considerado.[39]

O material polimérico estudado foi uma formulação única de resina D.E.R.331, comercializada por Dow Química, que é um epoxi diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), sem adição de agente diluente. É introduzido um agente de cura/modificador flexibilizador, reativo de média viscosidade, à base de poliamida, denominado DY 12, produzido por Ciba Especialidades Químicas. A resina recebeu diferentes tipos de enchimento (*fillers*) - quartzo feldspático (pó de quartzo), talco magnesita (pó de talco magnesita) e sílica *fumed* (pó de Aerozil®) e foi estudada sua influência nas propriedades mecânicas.[54]

O sistema escolhido, formado pela resina 331, com 50% em peso de endurecedor DY12 e 5% em peso de partículas de quartzo (331+12+5%Q), apresentou boa flexibilidade e o maior valor obtido para o produto do limite de resistência pela tenacidade à fratura, que será visto na tabela 18 de propriedades mecânicas.[54]

Tabela 18 Propriedades mecânicas do enchimento [54]

ADESIVO POLIMÉRICO	E (GPa)	σ_R (MPa)	DUTILIDADE (%)	TENACIDADE À FRATURA (J)	$\sigma_R \times$ TENACIDADE (MPa.J)	ENERGIA DE FRATURA (kJ/m^2)
331+12+5%Q	1,44	35,82	5,37	1,32	47,28	38,23

O material compósito

Analisando as propriedades mecânicas dos compósitos estudados, a arquitetura do material utilizando um tecido de gramatura de 120 g/m^2 ou 180 g/m^2 com 65% de fração de fibras e a resina epoxi, forneceu o maior valor do produto do limite de resistência e tenacidade à fratura entre os arranjos estudados.

A tabela 19 mostra as propriedades mecânicas dos compósitos com diferentes arranjos em função do percentual de fibras.

Tabela 19 Propriedades mecânicas das configurações de compósito [54]

MATERIAL COMPÓSITO	E (GPa)	σ_R (MPa)	DUTILIDADE (%)	TENACIDADE À FRATURA (J)	σ_R X TENACIDADE (MPa.J)	ENERGIA DE FRATURA (kJ/m ²)
gramatura/% fibra						
120/55	29,81	190,2	0,66	2,69	513,89	32,81
120/60	34,84	265,40	0,76	4,16	1104,42	50,56
120/65	40,14	364,33	0,94	6,16	2244,49	89,17
180/55	28,49	259,60	0,92	4,91	1274,52	60,40
180/60	36,71	316,96	0,88	5,55	1758,78	71,16
180/65	59,11	278,51	0,48	2,58	717,93	33,72

A escolha recaiu no compósito especificado como 180/60, que apesar de não ser o material com o maior produto entre a resistência e tenacidade, preencheu alguns dos aspectos apontados no terceiro parágrafo deste item, importantes para aplicabilidade do reparo.

Preparação dos tubos para aplicação do compósito

Antes da aplicação do reparo, os tubos foram submetidos a um jateamento superficial com granalha de escória de alumínio de 60 mesh, conhecida como Ancoblast[®].

Esse tratamento foi escolhido em função de estudo anterior feito no Laboratório de Compósitos, cujos resultados obtidos mostraram que essas condições de jateamento produziam ótimos resultados de adesão de compósitos sobre substratos de aço.[55]

Para preenchimento do defeito foi aplicado o adesivo polimérico com o objetivo não só de nivelar os tubos para posterior aplicação do compósito, como para transferir o carregamento para a fina região de ligamento do defeito e distribuí-lo uniformemente para o reparo. A figura 25 mostra o duto com o defeito preenchido pelo adesivo.



Figura 24. Defeito nivelado com material de enchimento

Após um tempo de cura médio do material de enchimento de (sete) dias, o material compósito foi aplicado nos tubos através da técnica de laminação manual. A distribuição da resina foi feita de forma cuidadosa a fim de se obter uma camada homogênea e uniforme sobre a tira de tecido de fibra de vidro.

A tira, que tem 63 mm de largura embebida com a resina, é aplicada sobre a superfície limpa do duto, ligeiramente tensionada, para evitar a formação de vazios entre camadas e para assegurar uma perfeita aderência ao substrato de aço.

Terminada a aplicação, o reparo foi coberto com filme de Teflon[®], também tensionado para auxiliar na compactação das camadas.

O tempo médio de cura foi de uma semana, à temperatura ambiente. A figura 21 mostra um duto com defeito, após a aplicação do reparo com material compósito.



Figura 25. *Tubo com defeito reparado com material compósito*

As espessuras das camadas aplicadas foram medidas com paquímetro digital e mostradas na tabela 20.

Tabela 20 *Espessura de camada de compósito aplicada*

TUBOS	ESPESSURA DE CAMADA CALCULADA (mm)	ESPESSURA DE CAMADA APLICADA (mm)	NÚMERO DE VOLTAS APLICADO
TPC 163E L=21 mm d=0,6 t	1,49	1,4	9
TPC 163C L=42 mm d=0,6 t	1,82	1,8	11
TPC 165E L=21 mm d=0,7 t	1,95	1,9	12
TPC 164G L=42 mm d=0,7 t	2,21	2,2	14
TPC 165D L=21 mm d=0,8 t	2,41	2,2	15
TPC 165 C L=42 mm d=0,8 t	2,66	2,4	17

III.7 MODELAGEM DOS TUBOS

O objetivo desta etapa é simular, através de um modelo numérico, o comportamento do reparo aplicado e analisar o estado de tensões da estrutura e de cada material que a compõe. Para validar os modelos, os resultados serão comparados com aqueles obtidos nos ensaios hidrostáticos. Para isso foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS®.

Seguindo a metodologia descrita no item 8 do Capítulo 2, serão definidas a seguir as etapas necessárias para realizar a análise numérica, que consistem na modelagem da estrutura, escolha dos elementos, especificação das propriedades dos materiais, geração da malha, aplicação das condições de contorno e carregamentos e, as considerações da análise. A partir daí, são efetuadas pelo programa, a resolução numérica das matrizes de rigidez e das equações algébricas para o cálculo das deformações e tensões elementares e a obtenção dos resultados, cuja apresentação será feita no capítulo seguinte.

Considerações da análise

Optou-se por uma análise estática com não linearidade geométrica e de material da estrutura.

Devido a sua complexidade envolvendo materiais com diferentes comportamentos, algumas considerações foram feitas, conforme o que se segue:

- sendo o reparo formado de tecido de fibra de vidro embebido em resina, pode-se considerar que todas as camadas formam um único material homogêneo isotrópico.
- assim, tendo em vista que os três materiais são considerados numericamente isotrópicos, foi usado um único elemento, o SOLID 45.
- a curva tensão x deformação de engenharia do aço foi fornecida ao programa, bem como a curva tensão x deformação do material de enchimento e do material compósito, obtidas experimentalmente.

- o perfil elíptico do defeito foi explicitamente modelado, reproduzindo exatamente o que foi usinado.
- considera-se que as conexões entre material do tubo, enchimento em resina reparo em compósito, contínuas e coladas.
- ficou estabelecida como espessura de parede do tubo, a menor espessura medida em cada um deles, conforme mapeamento efetuado.
- devido as características dos modelos (modelos tridimensionais, malha refinada e elementos sólidos) com grande quantidade de graus de liberdade, o solver *Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)* foi utilizado para uma convergência mais rápida da solução.

Modelagem geométrica

Para simulação do comportamento de cada estrutura, foram efetuados 7 diferentes modelos: o tubo intacto e seis tubos com reparo. Os desenhos em 3-D, foram importados do programa AutoCAD® e utilizada a interface de transferência .sat, para o intercâmbio de dados geométricos entre os sistemas CAD/AutoCAD® e CAE/ANSYS®.

Esse procedimento foi adotado devido as dificuldades encontradas na elaboração dos defeitos elípticos nos tubos quando se utilizava as operações *booleanas* inseridas no próprio programa ANSYS®.

A tabela 21 mostra a geometria dos modelos, reproduzidos com as mesmas dimensões obtidas que foram obtidas do mapeamento efetuado nos tubos.

Condições de contorno

Tendo em vista que a estrutura possui simetria geométrica e de carregamento, somente um quarto dos tubos foi modelado. As condições de contorno aplicadas foram simetria nas faces na região do defeito onde o tubo está cortado longitudinalmente e radialmente. Na extremidade do tubo, os nós foram impedidos de se deslocarem longitudinalmente e radialmente. A pressão foi homoganeamente distribuída nas áreas internas.

Tabela 21 Geometria dos modelos de elementos finitos

Corpos de prova		D (mm)	t (mm)	L (mm)	d (mm)	c (mm)	t _c (mm)
Intacto	TPC 163F	41,94	2,62	-	-	-	-
Com defeito e com reparo	TPC 163 E	42	2,62	21	1,52	13	1,50
	TPC 163 C	42	2,66	42	1,54	13	1,82
	TPC 165 E	42	2,70	21	1,86	13	1,95
	TPC 164 G	42	2,68	42	1,82	13	2,21
	TPC 165 D	42	2,70	21	2,13	13	2,41
	TPC 165 C	42	2,70	42	2,11	13	2,66

Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados são apresentadas na tabela 22 e nas curvas mostradas nas figuras de 26 a 30.

Tabela 22 Propriedades dos materiais da estrutura

MATERIAIS	PROPRIEDADES MECÂNICAS		
	E (GPa)	Poisson	σ_R (MPa)
Matriz epoxi	0,99	0,35	18,61
Material compósito 180/60	36,71	0,17	316,96
Material de enchimento	1,44	0,35	35,82
Aço	210	0,3	386,40

A escolha do elemento

Tendo em vista as considerações do modelo, o elemento escolhido para elaboração da malha de elementos finitos foi o Solid 45, que é usado para modelagem de estruturas sólidas em 3-D e é definido por oito nós, tendo três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais, x, y, e z. O elemento tem, dentre outras características, plasticidade, fluência, dilatação, endurecimento por tensão, grandes deflexões, grandes deformações.

A geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas são mostrados na figura 30.

As pressões podem ser introduzidas como cargas de superfície nas faces do elemento e as pressões positivas atuam dentro do elemento.

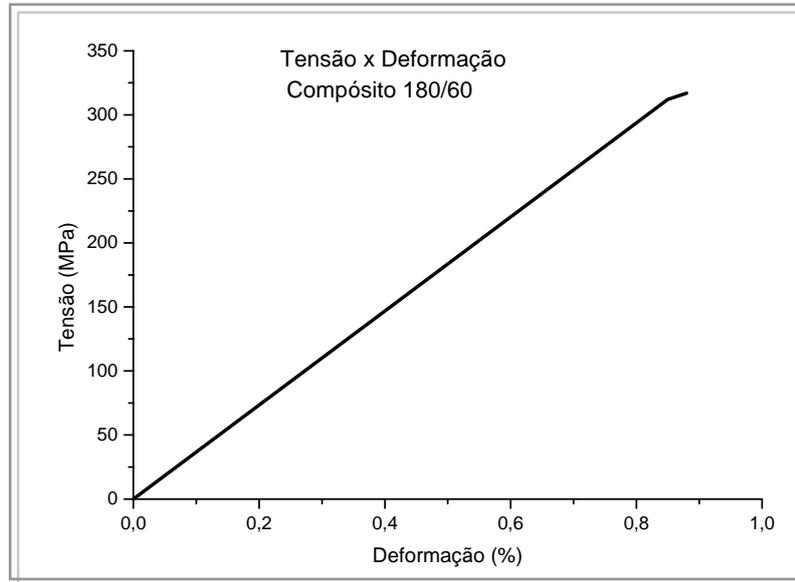


Figura 26. Curva tensão x deformação do material compósito

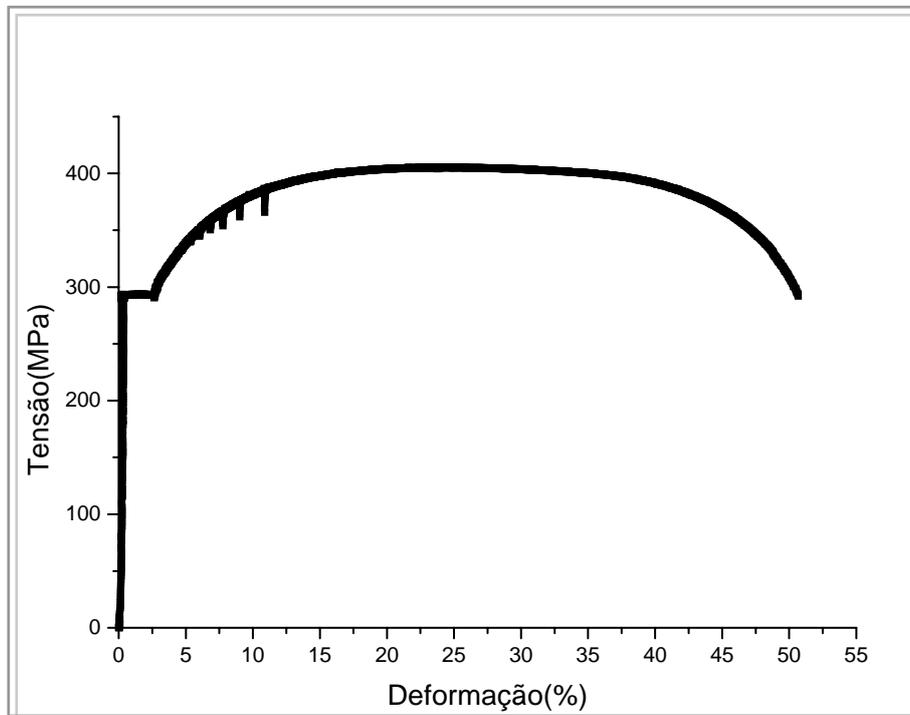


Figura 27. Curvas tensão x deformação de engenharia do aço

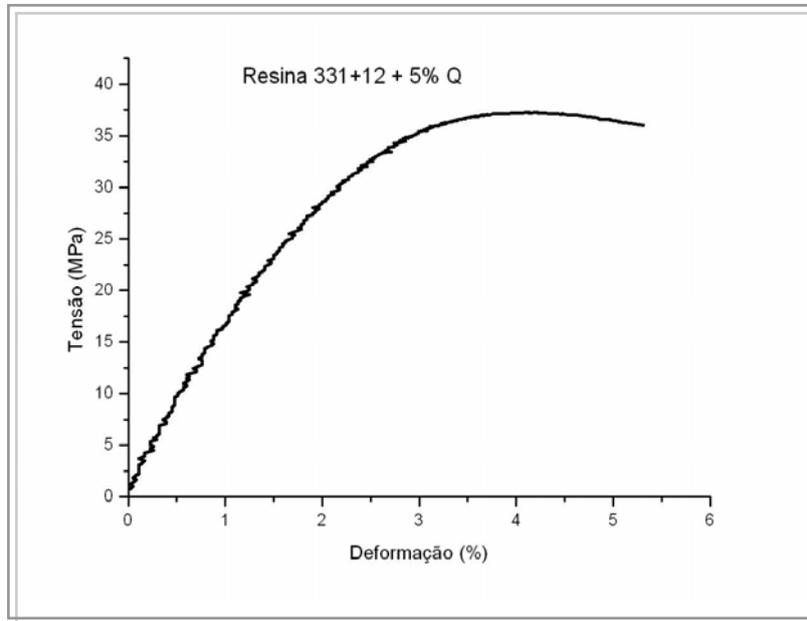


Figura 28. Curva tensão x deformação do material de enchimento

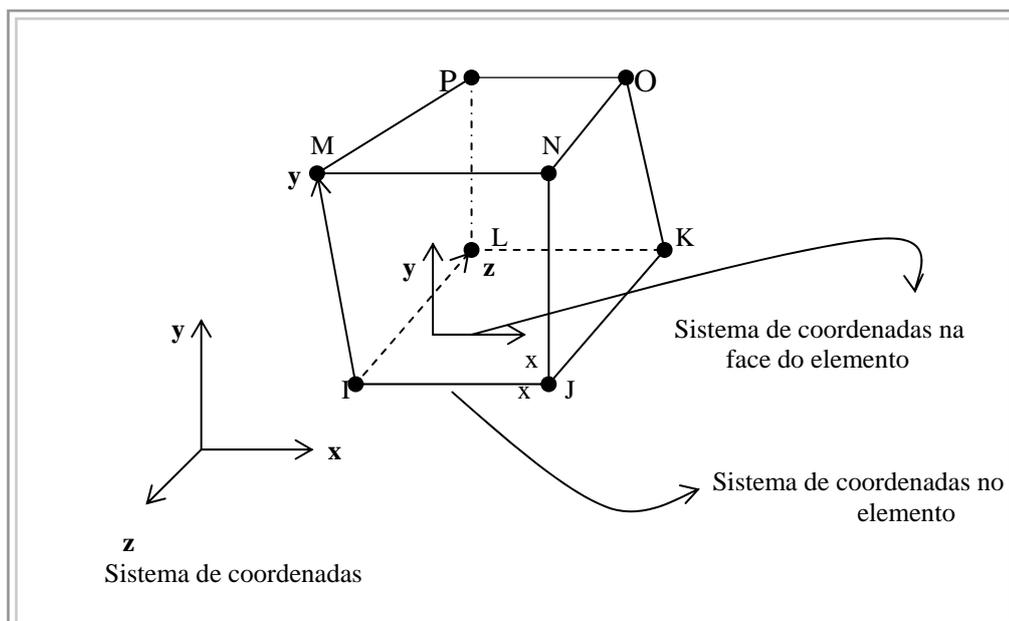


Figura 29. Elemento estrutural SOLID 45

Geração das malhas

O aspecto da malha mapeada dos tubos com reparo é mostrado na figuras 30, com a região do defeito refinada e na tabela 23 são mostrados o número de elementos e nós de cada modelo. Os modelos ficaram com quantidades diferentes de elementos e nós, devido às diferentes definições de divisão de linhas em vista da geometria dos defeitos. Uns ficaram mais refinados que os outros. Os resultados, contudo, mostraram-se bastante aproximados daquele obtidos experimentalmente, o que valida os modelos.

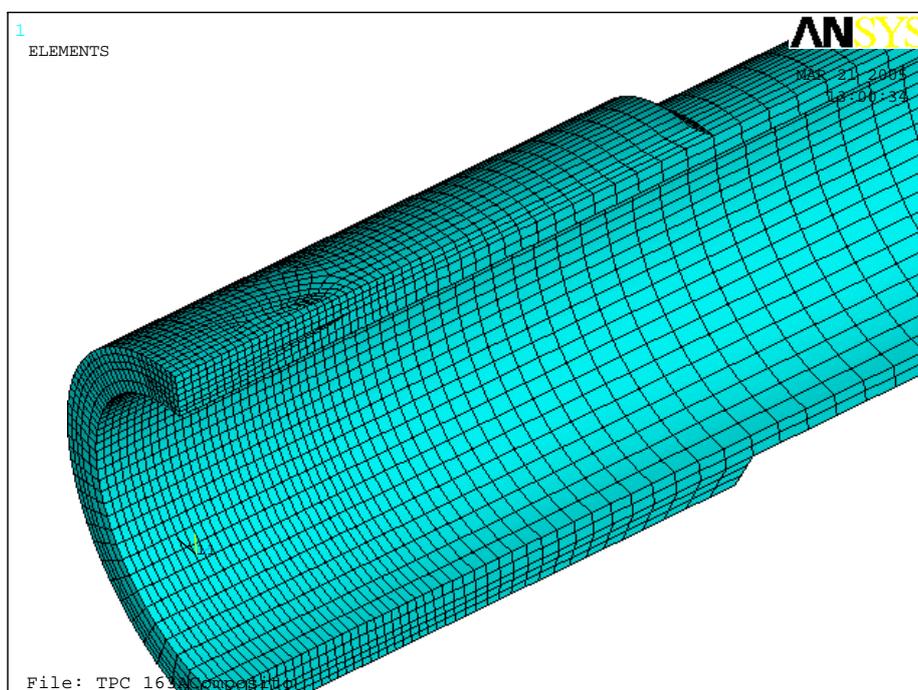


Figura 30. Malha mapeada da estrutura

Tabela 23 Número de elementos e de nós de cada modelo

TUBOS	NÚMERO DE ELEMENTOS	NÚMERO DE NÓS
TPC 163 C	77283	97342
TPC 163 E	35688	45119
TPC 164 G	69186	85983
TPC 165 C	77637	97746
TPC 165 D	61314	76679
TPC 165E	41219	53023
TPC 163 F	29640	40492

III.8 ENSAIOS HIDROSTÁTICOS DOS TUBOS

Para obter as pressões de ruptura e estudar o comportamento da estrutura, foram efetuados ensaios hidrostáticos no tubo intacto, nos 6 tubos com defeito e sem reparo e nos 6 tubos reparados com material compósito.

O dispositivo para ensaio foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Submarina - LTS, do Programa de Engenharia Naval e Oceânica, especialmente para simular um processo de carregamento de pressão interna em tubos em escala reduzida.

As figuras 31 e 32 esquemáticas, mostram com detalhes, as partes que o compõem. O corpo de prova a ser ensaiado é preenchido com água e vedado por dois conectores internos unidos por uma barra axial rígida para garantir que nenhuma outra tensão seja transferida ao corpo de prova devido à pressão hidrostática. Na parte externa, em ambas as extremidades, duas garras cônicas são montadas e rigidamente ligadas às placas de apoio circulares. Essas placas são conectadas entre si por 4 barras rosqueadas. O dispositivo simula, assim, uma condição de contorno de restrição no tubo sob pressão interna radial.[56]

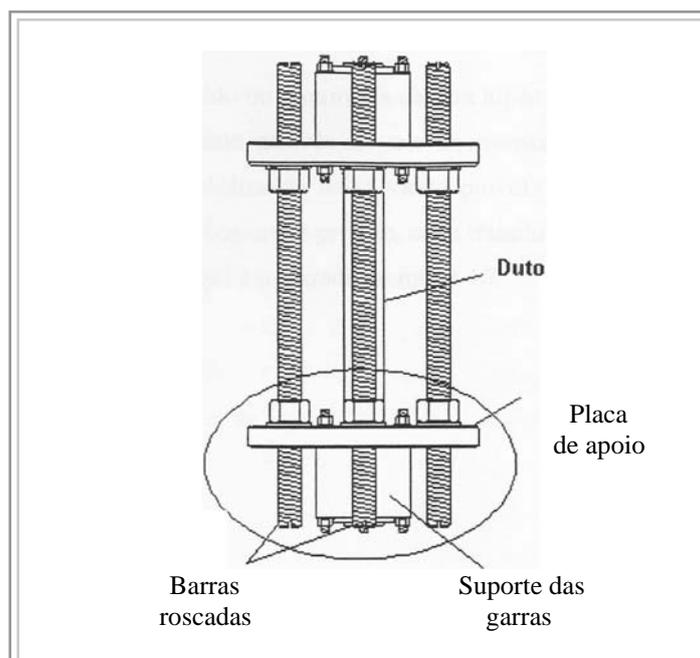


Figura 31. Esquema do dispositivo de ensaio

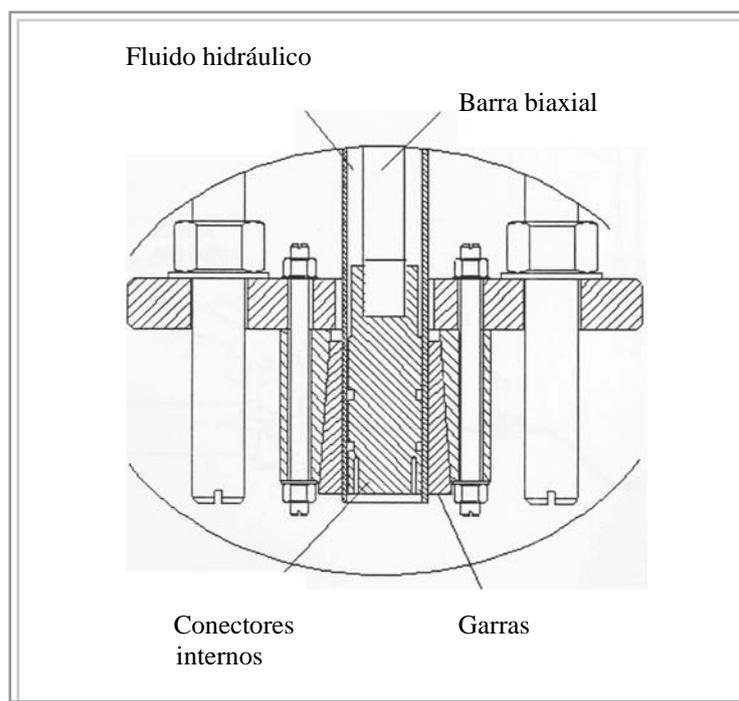


Figura 32. Detalhes do dispositivo de ensaio

Para acompanhar o seu comportamento durante o ensaio, os tubos foram instrumentados. Aqueles sem reparo foram instrumentados com dois medidores de deformação biaxiais, um colado no centro do defeito e o outro na região diametralmente oposta, conforme figura 33.

Os tubos com reparo foram instrumentados, como visto na figura 34, com três medidores de deformação biaxiais no reparo, um no centro do defeito, um em cada extremidade do bordo e dois biaxiais na área íntegra do aço, em seções imediatamente adjacentes ao bordo do reparo, em locais de menor espessura de parede obtidos no mapeamento dos tubos. O tubo intacto não foi instrumentado.

Os extensômetros instalados são da marca KYOWA, tipo KFP-5-120-C1-65 para o compósito, KFG-2-120-D16-11 para o aço íntegro e KFG-5-120-D16-11 para o centro do defeito, colados com adesivo cianoacrilático Loctite 496 sobre as superfícies lixadas superficialmente e rigorosamente limpas.

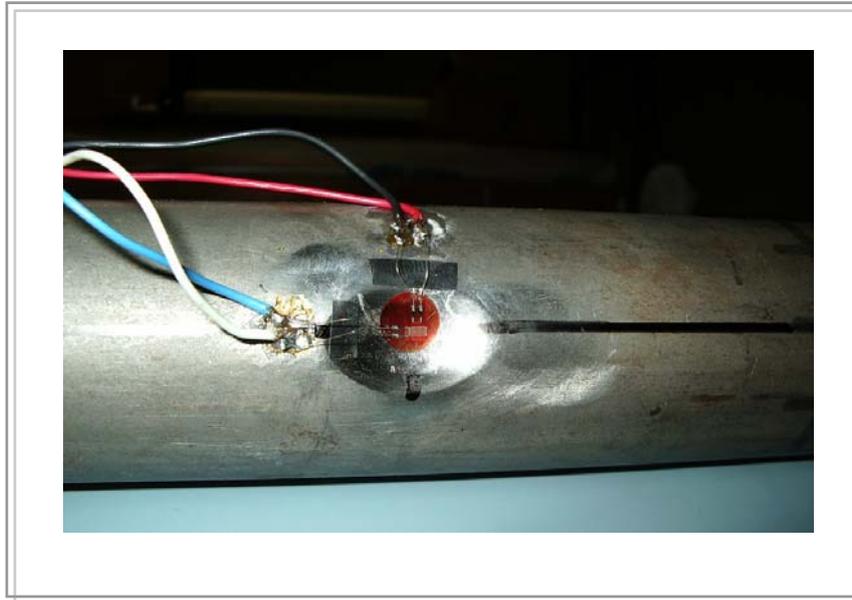


Figura 33. *Tubo com defeito e sem reparo instrumentado*

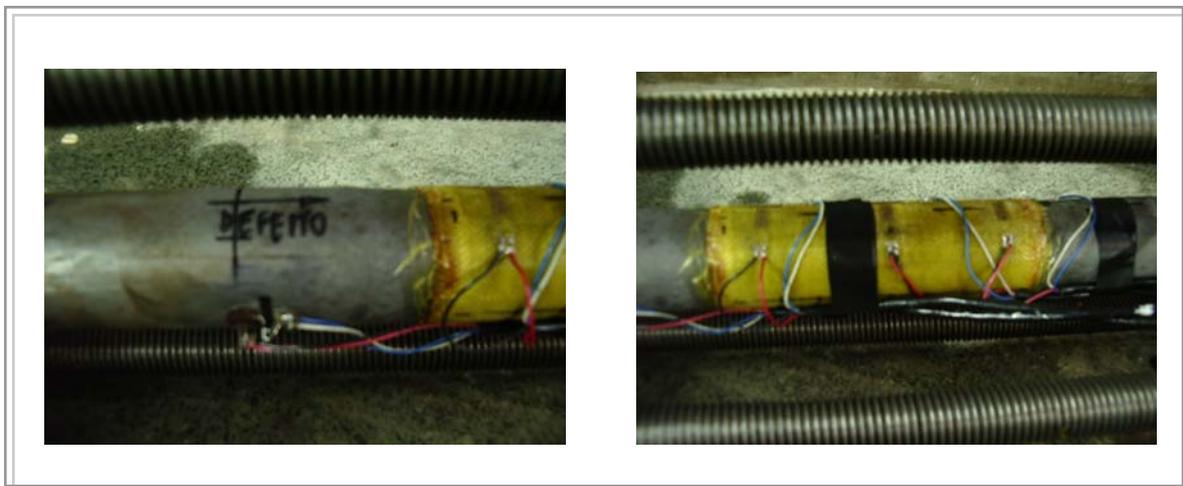


Figura 34. *Tubo com reparo instrumentado*

As figuras 35 e 36 mostram o esquema de localização dos medidores de deformação no tubo com defeito e no tubo com defeito e com reparo em compósito.

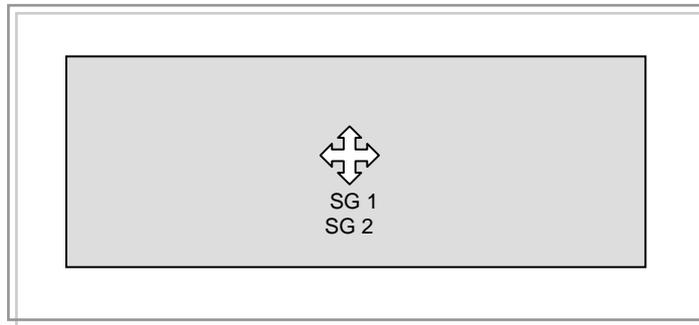


Figura 35. Esquema da seção do tubo sem reparo com os medidores de deformação

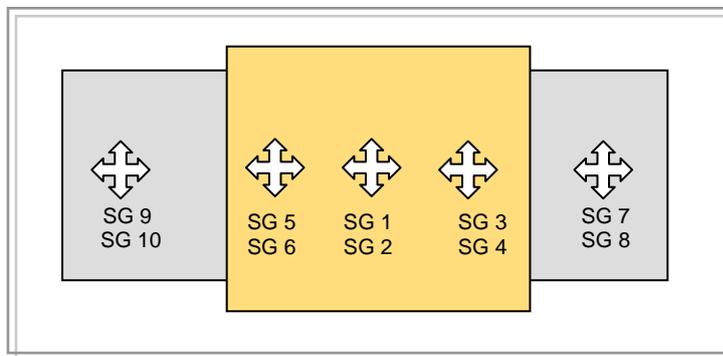


Figura 36. Esquema da seção do tubo com reparo com os medidores de deformação

Os extensômetros identificados com números ímpares fornecem as deformações longitudinais e com os números pares as deformações circunferenciais.

O tubo, então, é pressurizado internamente através de um equipamento de injeção de óleo, constituído por uma bomba hidráulica equipada com uma válvula de agulha micrométrica, um calibrador analógico digital e um transdutor de pressão elétrico, conforme figura 37. A figura 38 mostra o dispositivo com o tubo pronto para ser ensaiado.

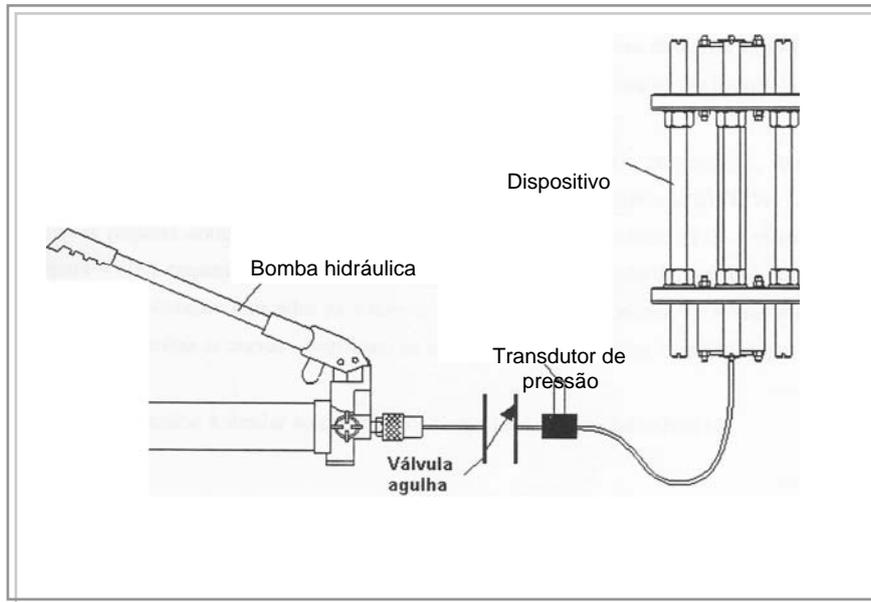


Figura 37. Esquema do dispositivo ligado à bomba hidráulica

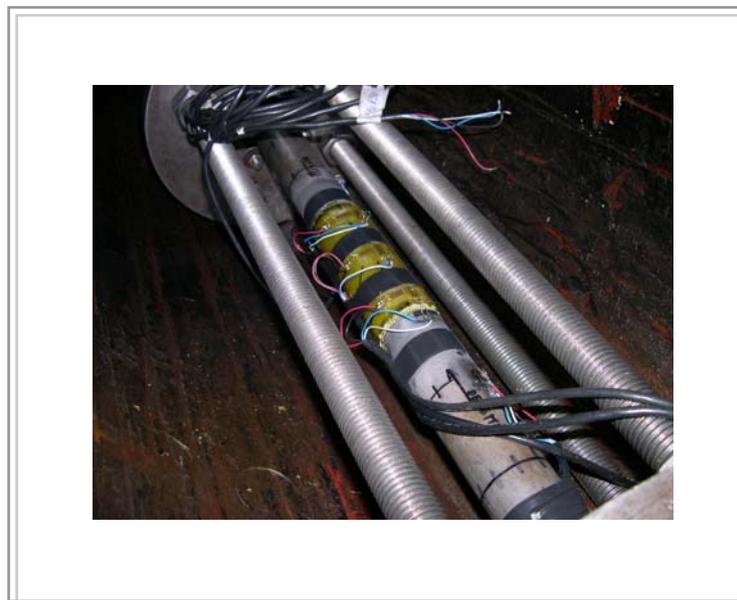


Figura 38. Dispositivo pronto para ensaio



Figura 39. Bomba hidráulica e sistema de aquisição de dados

Durante o ensaio, o fluido hidráulico é bombeado lentamente no interior do tubo, com elevação de pressão a uma taxa de aproximadamente 1 MPa/min, ou seja, pressão quase estática, com volume controlado.

Até o término do ensaio, os sinais do transdutor de pressão e dos medidores de deformação são monitorados através de um computador, por um sistema de aquisição de dados LABVIEW, conforme a figura 39 mostra.

Foram registrados o carregamento aplicado, as deformações longitudinais e circunferenciais e o tempo de duração do teste.

Comportamento dos tubos sem reparo

Na tabela 24 são mostradas as pressões de ruptura de tubo TPC 163 F intacto, dos tubos com defeito e sem reparo e a relação entre as respectivas pressões de ruptura daquele tubo, (P_{rup}) e a pressão de ruptura do tubo intacto (P_{rupi}). Na figura 40 uma curva típica do comportamento da pressão ao longo do tempo, obtida para o tubo intacto.

Tabela 24 Pressões de ruptura de tubo intacto e tubos sem reparo

Profundidade do defeito	Tubos sem reparo	D (mm)	t (mm)	d (mm)	L (mm)	c (mm)	P_{rup} (MPa)	P_{rup}/P_{rupi}
	TPC 163 F	41,94	2,76	-	-		53,4	1
0,6 t	TPC 163D	41,97	2,62	1,53	21,00	13	41,94	0,78
	TPC 163A	41,98	2,66	1,55	42,00	13	38,16	0,71
0,7 t	TPF 1B	41,98	2,70	1,85	21,00	13	39,88	0,75
	TPC 164E	41,94	2,68	1,81	42,00	13	33,94	0,63
0,8 t	TPC 164H	42,00	2,70	2,16	21,00	13	35,24	0,65
	TPC 165A	41,95	2,70	2,13	42,00	13	27,17	0,50

Pode-se verificar, de acordo com uma curva típica de pressão tubo intacto TPC 163 F, que nos primeiros dez minutos o material apresenta um comportamento linear, com uma deformação uniforme, seguido de um patamar em torno de 40 MPa, caracterizando possivelmente o escoamento do material..

Dos resultados obtidos para os tubos com defeito vistos na tabela 24, observa-se que a profundidade (d) tem uma influência na pressão de ruptura mais significativa que o comprimento (L) do defeito. Para um defeito com $L = D$ e $c = 0,31 D$, quando d é aumentado em 0,20 t, a relação entre as pressões de tubo intacto e a de tubo com defeito diminui em 21 %. Quando L é 0,5 D, essa relação é um pouco mais suave e passa para 13 %.

Se fixarmos a profundidade e dobrarmos o comprimento, as diferenças entre as pressões de ruptura são de 7, 12 e 15 % para 0,6 t, 0,7 t e 0,8 t, sendo o maior valor encontrado entre os tubos com a maior profundidade de defeito.

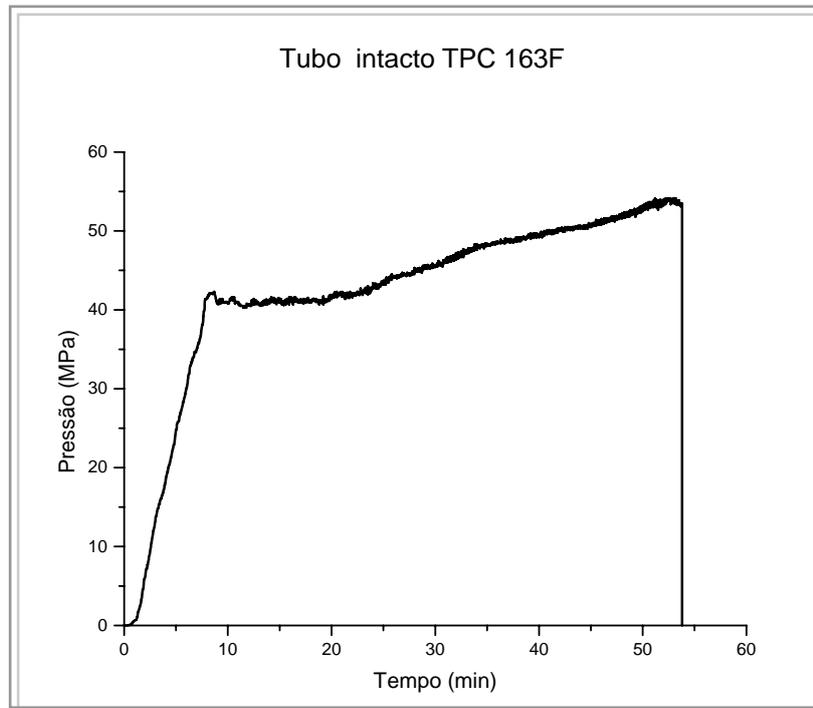


Figura 40. Curva pressão x tempo do duto intacto

Na figura 41 verifica-se o aspecto dos tubos após o teste. Eles estão agrupados de acordo com o comprimento do defeito e as respectivas profundidades. Os de maior profundidade localizados à esquerda e os de menor profundidade à direita e, por último, o tubo sem defeito.

No tubo intacto, o rasgamento ocorreu na região central, após pronunciado abaulamento. Nos tubos com defeito, este resultado é mais visível naquele de maior comprimento (L) e menor profundidade (d). Quando o comprimento de defeito é menor, observa-se também um abaulamento, mas em menor grau que os anteriormente mencionados. (ver figura 41 C e F). Nestes dois casos, em que a espessura remanescente é maior, a energia de deformação absorvida é maior, ou seja, o material tem maior expansão antes da falha. Com a maior profundidade de defeito (ver figura 41 A e D) isto é menos visível pela mesma razão, ou seja, o nível de energia de deformação armazenado no tubo é mais baixo antes da falha.

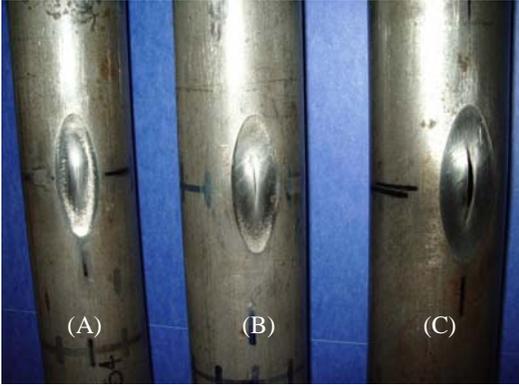
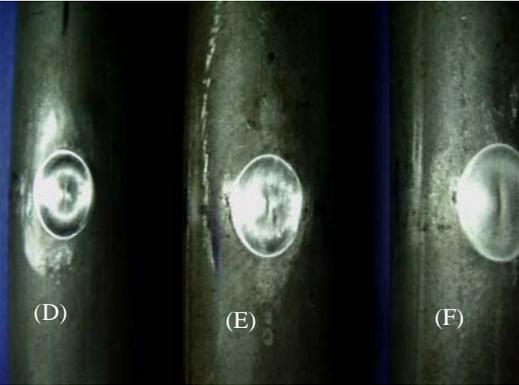
	<p>(A) TPC 165 A 0,8 t (B) TPC 164 E 0,7 t (C) TPC 163 A 0,6 t</p> <p>Tubos com maior comprimento de defeito</p>
	<p>(D) TPC 164 H 0,8 t (E) TPF 1B 0,7 t (F) TPC 163 D 0,6 t</p> <p>Tubos com menor comprimento de defeito</p>
	<p>Tubo intacto</p>

Figura 41. Aspecto das falhas após ensaio hidrostático

Tubos com reparo

Na tabela. 25 são mostrados os resultados das pressões de ruptura (P_{rup}) dos tubos com reparo. Pode ser verificado que a espessura de camada aplicada imprimiu um ganho substancial em resistência, com pressões de ruptura superiores às do tubo intacto em todos os tipos de defeitos, através da relação entre as pressões de ruptura dos tubos com reparo e do tubo intacto, iguais ou superiores a unidade.

Tabela 25 Pressões de ruptura de tubos com reparo

Profundida de do defeito	Tubos com reparo	D (mm)	t (mm)	d (mm)	L (mm)	c (mm)	P_{rup} (MPa)	Prup/Prupi
0,6 t	TPC 163 E	41,98	2,62	1,52	21,00	13	53,38	=1
	TPC 163 C	41,98	2,66	1,54	42,00	13	53,72	>1
0,7 t	TPC 165 E	41,98	2,70	1,86	21,00	13	54,07	>1
	TPC 164 G	41,96	2,68	1,82	42,00	13	53,65	>1
0,8 t	TPC 165 D	41,95	2,70	2,13	21,00	13	53,38	=1
	TPC 165 C	41,93	2,70	2,11	42,00	13	53,65	>1

A seguir, serão analisados os comportamentos de todos os tubos ensaiados. Os resultados serão agrupados aos pares de acordo com o tipo de defeito, num total de seis casos.

Os três primeiros casos são dos defeitos com 21 mm de comprimento nas três profundidades estudadas, seguidos dos três últimos relativos aos de comprimento igual a 42 mm.

As curvas obtidas da instrumentação dos tubos sem reparo serão comparadas com as dos tubos com reparo e verificadas as pressões e deformações nos pontos instrumentados, a fim de caracterizar o ganho em resistência que o material compósito, com a espessura de camada aplicada, trouxe para os tubos reparados e o quanto esta mostrou-se efetiva para a finalidade proposta.

CASO 1

L=21 mm d=0,6 t	Tubo TPC 163 D Sem reparo	Tubo TPC 163 E Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	41,94	53,38

Nas figura 42 pode-se observar o aspecto do tubo TPC 163 D, após o ensaio hidrostático, com um abaulamento significativo no centro do defeito antes do rasgamento. Os resultados da instrumentação foram perdidos devido a um problema na aquisição dos dados.



Figura 42. *Tubo TPC 163 D após ensaio hidrostático*

Aplicada a pressão no duto reparado, note-se o rasgamento dos bordos do compósito acompanhado da falha do duto após a expansão do material, que levou o reparo a romper no defeito, conforme figura 43.



Figura 43. Ruptura do material compósito no tubo TPC 163 E após ensaio



Figura 44. Abaulamento do tubo TPC 163 E fora do reparo

No tubo TPC 163 E, pode-se notar, conforme figuras 43 e 44, o nítido abaulamento do aço além da área reparada, progredindo para a região central do tubo, refletida na degradação nos bordos do compósito, com rasgamento do tecido de fora para dentro. É interessante verificar, ainda, que o compósito continuou suportando incrementos de carga mesmo após a falha das camadas no bordo do compósito. Na região central do reparo as fibras permaneceram intactas, com o rompimento localizado do compósito no defeito, tendo em vista que há um abaulamento significativo antes da falha do aço.

Observa-se que o reparo não impediu a ruptura do tubo no local do defeito, mas a uma pressão acima daquela obtida no tubo sem reparo.

A curva da figura 45 corresponde à deformação circunferencial no centro do defeito do tubo TPC 163 E com reparo. A deformação circunferencial registrada no compósito foi da ordem de 0,1% quando o aço atingiu a máxima pressão de ruptura, que foi de 53,38 MPa.

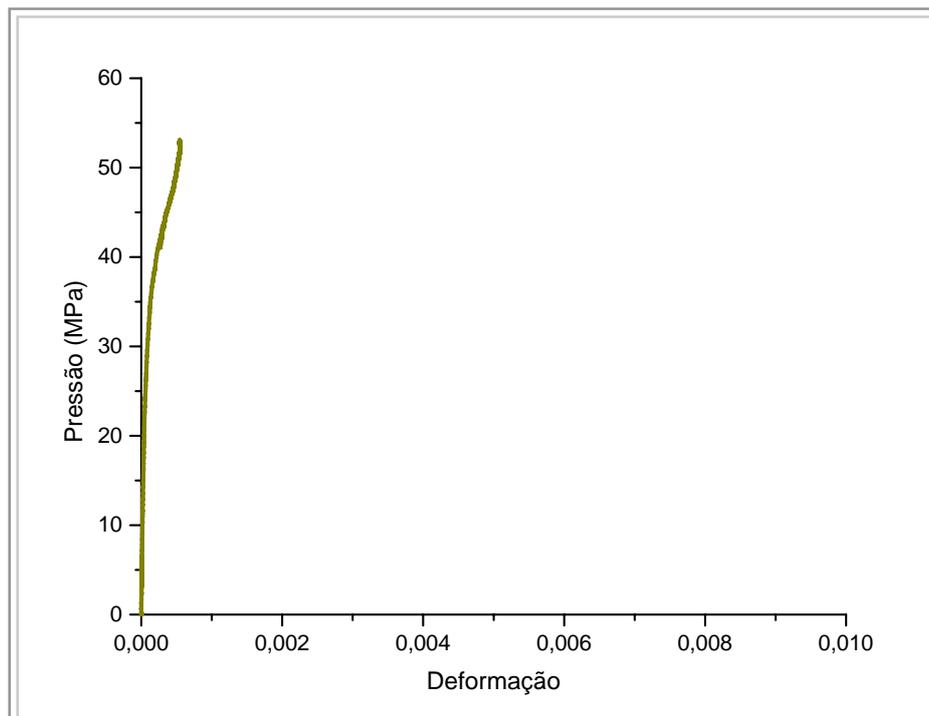


Figura 45. Curva pressão x deformação do tubo TPC 163 E com reparo

CASO 2

L=21 mm d=0,7 t	Tubo TPF 1B Sem reparo	Tubo TPC 165 E Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	39,88	54,07

Na figura 46, observa-se o tubo TPF 1B, após ensaio hidrostático, com um abaulamento no centro do defeito menos acentuado que o tubo anterior, antes da falha. Com o reparo aplicado e o tubo sujeito à pressão interna, o material compósito manteve-se íntegro, conforme figura 47 e a ruptura se deu fora do compósito, conforme figura 49.

Note-se, nas figuras 48 e 49, o abaulamento do aço fora do reparo, e a seção onde a ruptura ocorreu, respectivamente. No gráfico da figura 50 são mostradas as deformações circunferenciais no centro do defeito nos dois tubos, com e sem reparo, e registrado o comportamento do material compósito aplicado, que se comportou de forma quase linear sem romper, a uma pressão de 54,07 MPa.



Figura 46. Tubo TPF 1B após ensaio hidrostático



Figura 47. *Reparo do tubo TPC 165 E após ensaio hidrostático*



Figura 48. *Abaulamento do tubo TPC 165 E fora do reparo*



Figura 49. Ruptura do tubo TPC 165 E fora do reparo

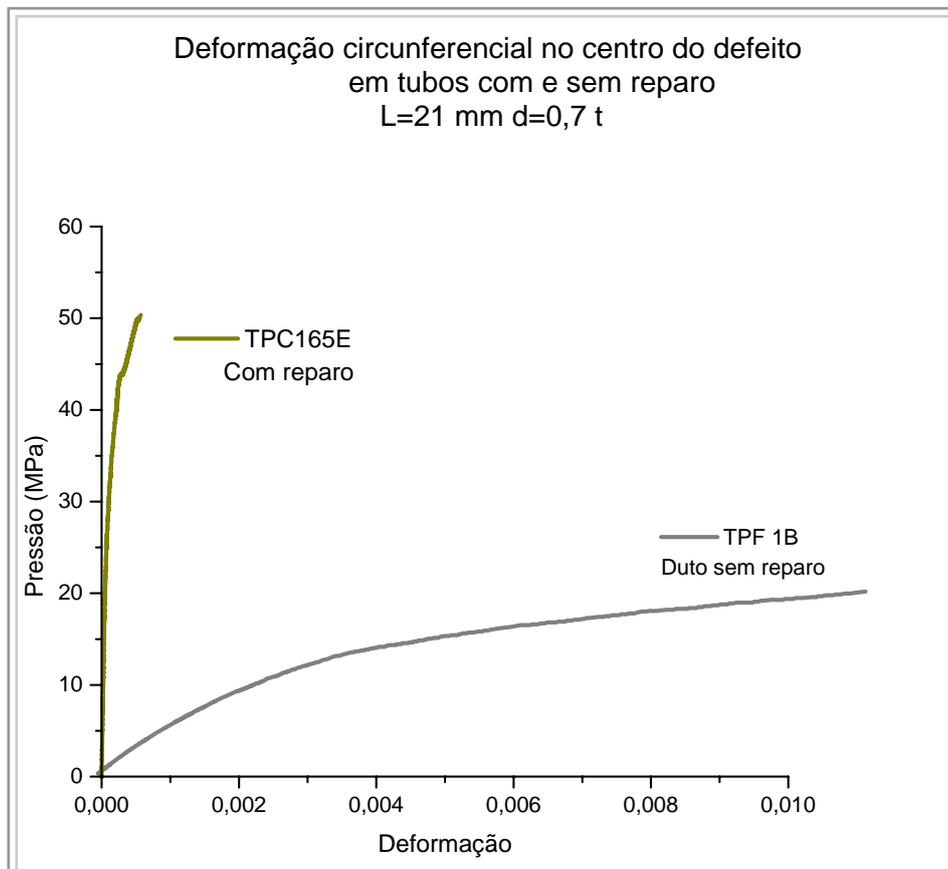


Figura 50. Curvas pressão x deformação dos tubos TPF 1B e TPC 165 E

CASO 3

L=21 mm d=0,8 t	Tubo TPC 164H Sem reparo	Tubo TPC 165 D Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	35,24	53,38

Na figura 51, observa-se o defeito do tubo TPC 164 H após ensaio hidrostático e fica evidente que é o que apresenta o menor abaulamento antes da falha. O aspecto do tubo TPC 165 D com reparo e após o ensaio, pode ser visualizado através das figuras 52, 53 e 54.



Figura 51. Tubo TPC 164 H após ensaio hidrostático

Note-se que não houve degradação do material compósito. O abaulamento do aço é bem visível nas regiões fora do reparo, conforme figura 53 e a falha ocorreu na região livre do tubo. O reparo forneceu restrição adequada, o que está nitidamente revelado na figura 52.

O curva da figura 55 mostra o comportamento das deformações circunferenciais dos tubos TPC 165 D com reparo e TPC 164 H sem reparo.



Figura 52. *Reparo do tubo TPC 165 D após ensaio hidrostático*



Figura 53. *Abaulamento do tubo TPC 165 D após o ensaio*



Figura 54. Tubo TPC 165 D com a falha do material fora do reparo

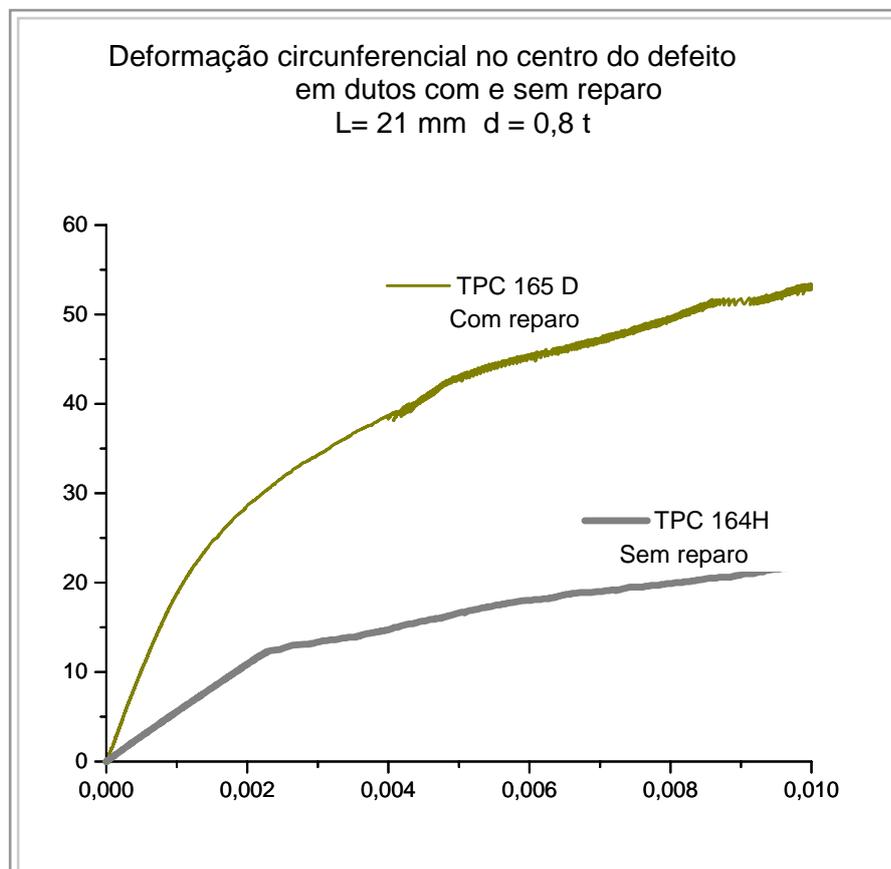


Figura 55. Curvas pressão x deformação circunferencial dos tubos TPC165 D e TPC 164H

CASO 4

L=42 mm d=0,6 t	Tubo TPC 163 A Sem reparo	Tubo TPC 163 C Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	38,16	53,74

Na figura 56, observa-se o aspecto do defeito do tubo TPC 163 A, após ensaio hidrostático, apresentando o maior abaulamento no centro do defeito antes da falha com este comprimento de defeito, igualmente ao que ocorreu no caso 1 apresentado anteriormente. Aplicado o reparo e submetido o tubo ao ensaio hidrostático, o aspecto do compósito pode ser observado através das figuras 57, 58 e 59.



Figura 56. Tubo TPC 163 A após ensaio hidrostático

O reparo apresentou degradação com o visível rasgamento dos bordos do compósito, de fora para dentro. Conforme o caso 1, a região do defeito apresenta um abaulamento significativo antes da falha.



Figura 57. Ruptura do material compósito após ensaio do tubo TPC 163 C



Figura 58. Abaulamento do tubo TPC 163 C fora do reparo



Figura 59. Abaulamento do tubo TPC 163 C fora do reparo

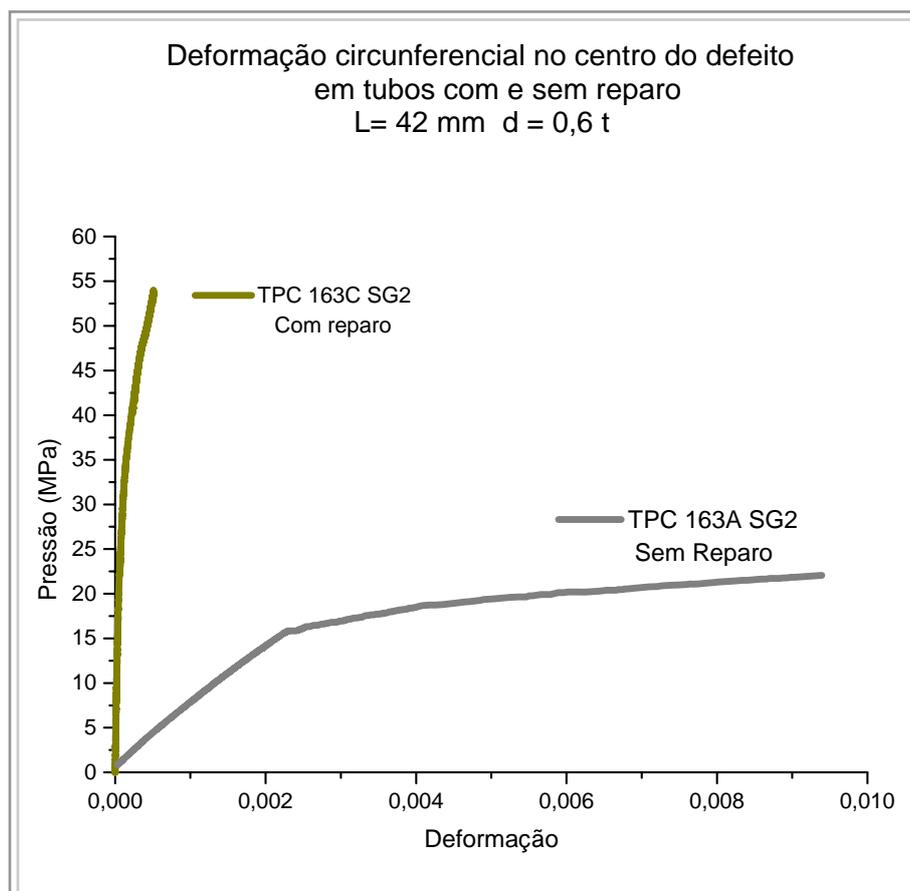


Figura 60. Curvas pressão x deformação circunferencial dos tubos TPC 163 C e TPC 163 A

Note-se através da curva da figura 60, o comportamento da deformação circunferencial no centro do defeito em ambos os tubos, com e sem reparo.

De acordo com o gráfico, o compósito suportou a pressão de ruptura do tubo intacto antes de romper na região do defeito.

CASO 5

L=42 mm d=0,7 t	Tubo TPC 164 E Sem reparo	Tubo TPC 164 G Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	33,94	53,65

Na figura 61, observa-se o aspecto do defeito do tubo TPC 164 E, após ensaio hidrostático, apresentando abaulamento no centro do defeito antes da falha. Posteriormente à aplicação do reparo e após ensaio hidrostático, o aspecto do compósito pode ser observado através das figuras 62, 63 e 64.



Figura 61. *Tubo TPC 164 E após ensaio hidrostático*



Figura 62. *Tubo TPC 164 G após ensaio hidrostático*



Figura 63. *Abaulamento do tubo TPC 164 G fora do reparo*



Figura 64. Abaulamento do tubo TPC 164 G na ruptura fora do reparo

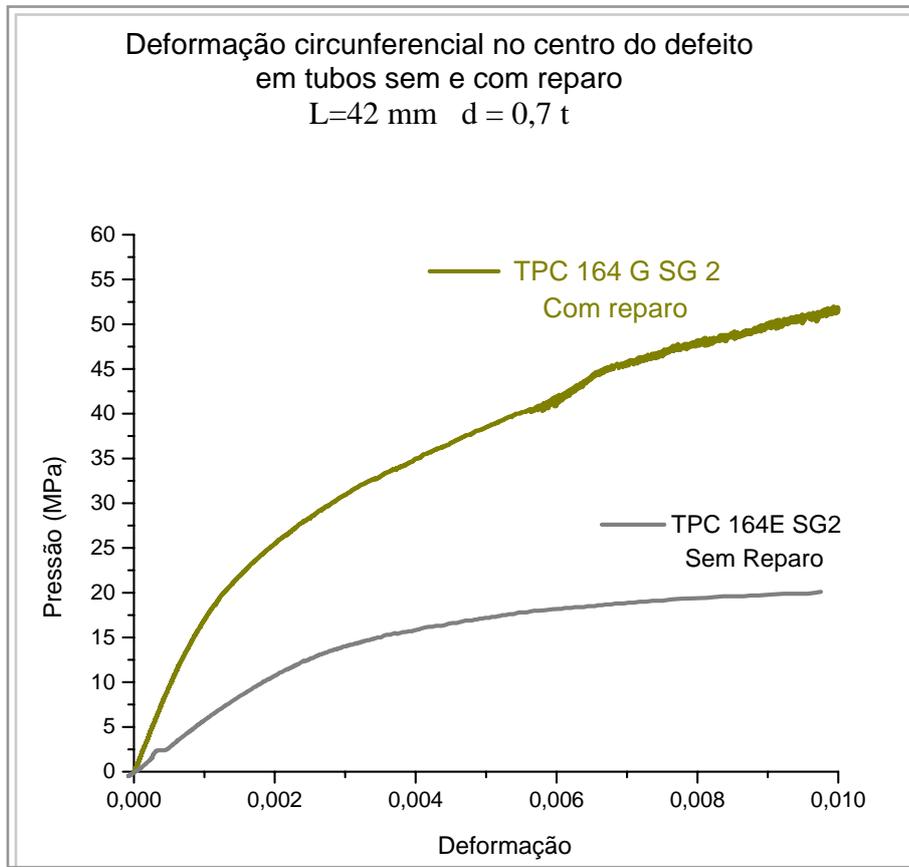


Figura 65. Curvas pressão x deformação circunferencial dos tubos TPC 164 G e TPC 164 E

Na figura 63 pode ser observado que o material compósito não apresentou degradação e mostrou-se intacto após ensaio hidrostático. Entende-se que a espessura de camada aplicada foi suficiente para impedir ruptura do tubo na região do defeito. Note-se, através da figura 64, o abaulamento significativo sofrido pelo aço devido à pressão interna aplicada antes de romper e a resistência oferecida pelo compósito na região reparada. A fratura ocorreu fora da região do defeito a uma pressão de 53,65 MPa, ou seja, ligeiramente superior à pressão de ruptura do tubo intacto.

CASO 6

L=42 mm d=0,8 t	TPC 165 A Sem reparo	TPC 165 C Com reparo
Pressão de ruptura (MPa)	27,17	53,65

Na figura 66, observa-se a falha no centro do defeito do tubo TPC 165 A, com um abaulamento antes da falha menos expressivo que os dois casos anteriores.



Figura 66. Tubo TPC 165 A após ensaio hidrostático

Nas figuras 67, 68 e 69, verifica-se o mesmo comportamento do caso anterior, onde o compósito mostrou-se intacto na região reparada e a ruptura ocorreu fora do defeito e do reparo.



Figura 67. *Tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático*



Figura 68. *Falha do tubo TPC 165 C fora do reparo*



Figura 69. Abaulamento do tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático

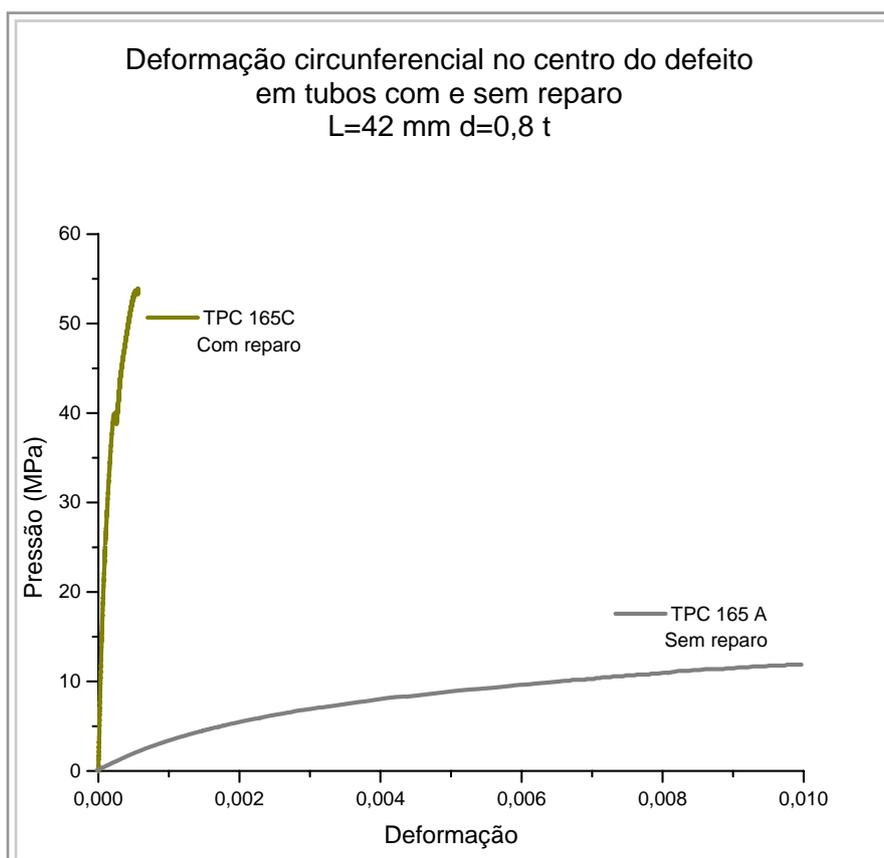


Figura 70. Curvas pressão x deformação circunferencial dos tubos TPC 165 C e TPC 165 A

O curva da figura 70 mostra que o material compósito suportou a pressão de ruptura do tubo intacto.

Os casos onde houve a ruptura do reparo foram aqueles com menor profundidade de defeito, ou seja, maiores espessuras de parede remanescente, capazes de suportar pressões de ruptura mais altas com deformações significativas antes do rasgamento.

Nos defeitos com menor espessura remanescente, o material compósito mostrou ganhos em resistência mais expressivos, chegando a serem alcançados aumentos de até 97,5 %, se comparadas as pressões de ruptura obtidas nos dutos sem reparo. Isto pode ser confirmado pelos valores mostrados na tabela 26.

Tabela 26 *Ganhos em resistência dos tubos reparados*

Profundidade do defeito	Corpos de prova sem reparo	L (mm)	P_{rup} (MPa)		Corpos de prova com reparo	L (mm)	P_{rup} (MPa)	Ganho (%)
0,6 t	TPC 163 D	21,00	41,94		TPC 163 E	21,00	53,38	27,27
	TPC 163 A	42,00	38,16		TPC 163 C	42,00	53,72	40,77
0,7 t	TPF 1B	21,00	39,88		TPC 165 E	21,00	54,07	35,58
	TPC 164 E	42,00	33,94		TPC 164 G	42,00	53,65	58,07
0,8 t	TPC 164 H	21,00	35,24		TPC 165 D	21,00	53,38	51,47
	TPC 165 A	42,00	27,17		TPC 165 C	42,00	53,65	97,46

Observa-se dos experimentos, que a espessura do reparo aplicada forneceu ao tubo restrição suficiente para diminuir a deformação na seção reforçada nos quatro casos em que a ruptura ocorreu fora do compósito. Nos dois casos em que isto não se caracterizou, pode-se atribuir o abaulamento sofrido pelo aço antes da falha culminando com a ruptura do compósito. Contudo, ainda que tenha ocorrido degradação progressiva primeiro dos bordos do compósito e posteriormente no local do defeito, o reparo suportou incrementos de pressão até que a ruptura tenha, como nos outros casos, ocorrido à pressão de ruptura do tubo intacto.

III.9 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste item serão abordadas as análises numéricas em modelos que simulam duas situações obtidas no ensaio hidrostático: a do tubo TPC 164 G no qual a ruptura ocorreu na área livre, fora do reparo e a do tubo TPC 163 C, em que a ruptura ocorreu no compósito, no local do defeito.

No presente estudo são mostrados os resultados dos modelos em regiões importantes da estrutura envolvendo os três materiais. As tensões e deformações circunferenciais numéricas foram analisadas e o comportamento da estrutura comparado com aquele obtido experimentalmente.

Os resultados dos tubos restantes estão no Anexo I. No Anexo II encontram-se os pontos das curvas dos materiais usadas no programa de elementos finitos.

III.9.1 TUBO TPC 164 G - RUPTURA FORA DO REPARO



Figura 71. Ruptura do tubo TPC 164 G

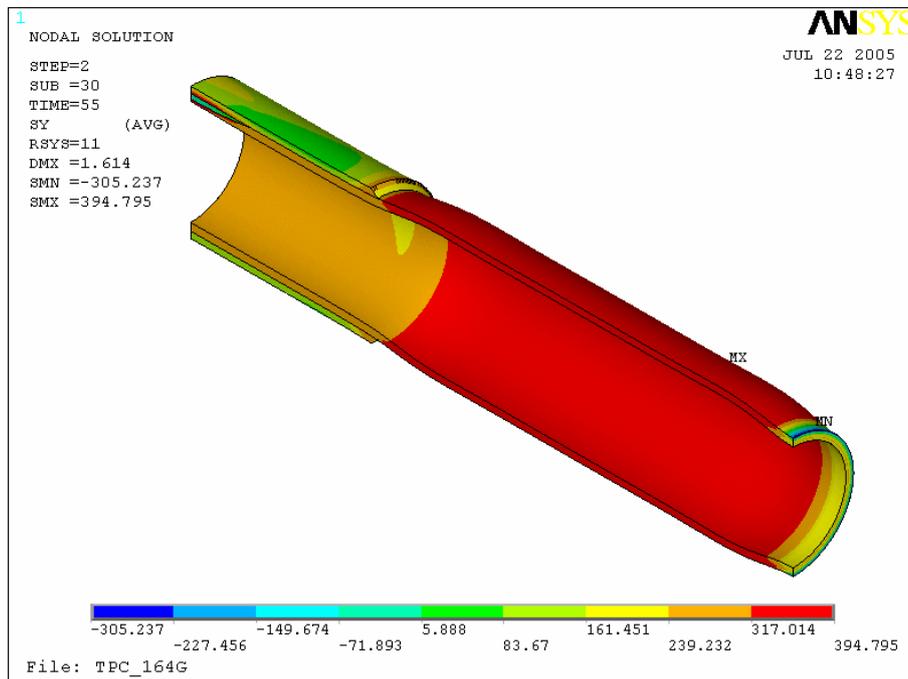


Figura 72. Tensões circunferenciais na estrutura

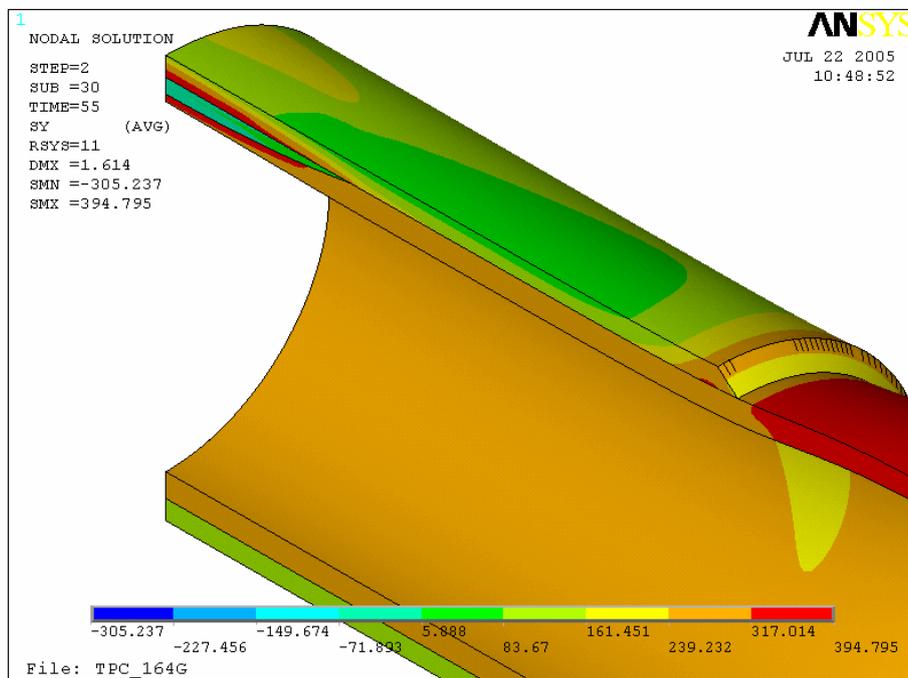


Figura 73. Detalhes das tensões circunferenciais do tubo

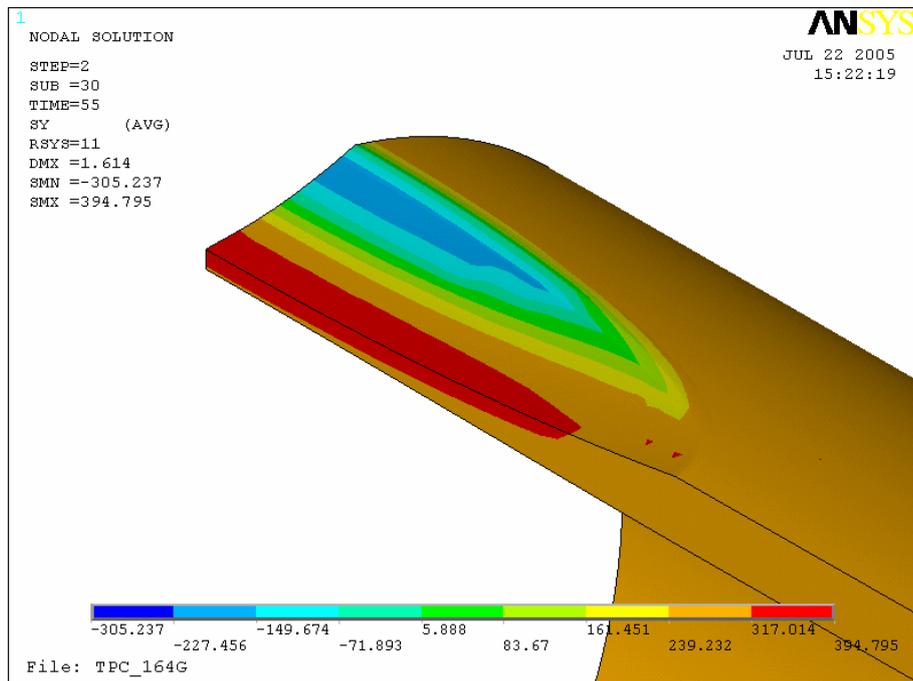


Figura 74. Detalhes da região do defeito sem o reparo

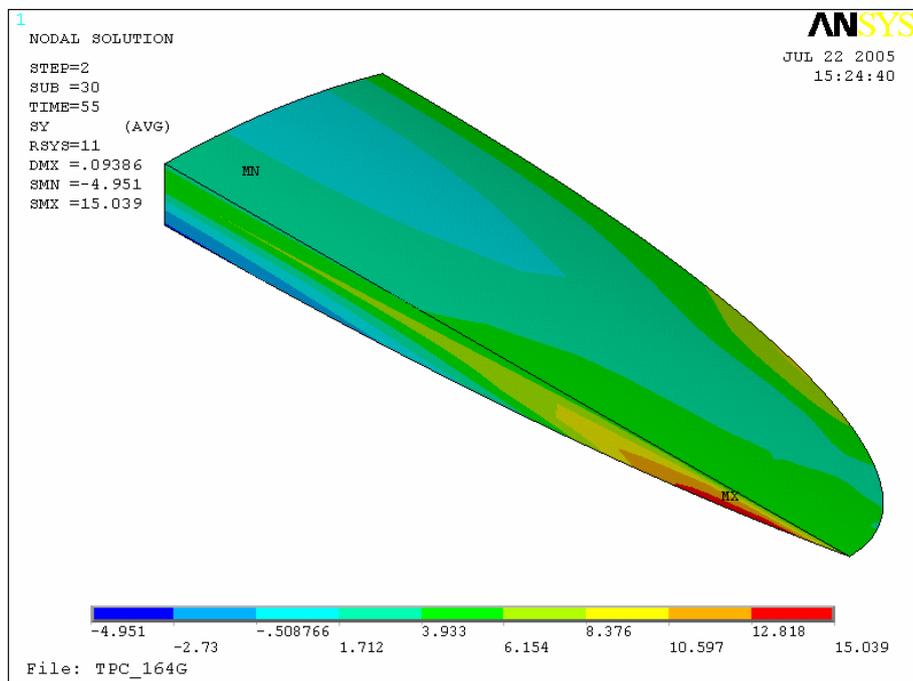


Figura 75. Tensões circunferenciais no material de enchimento

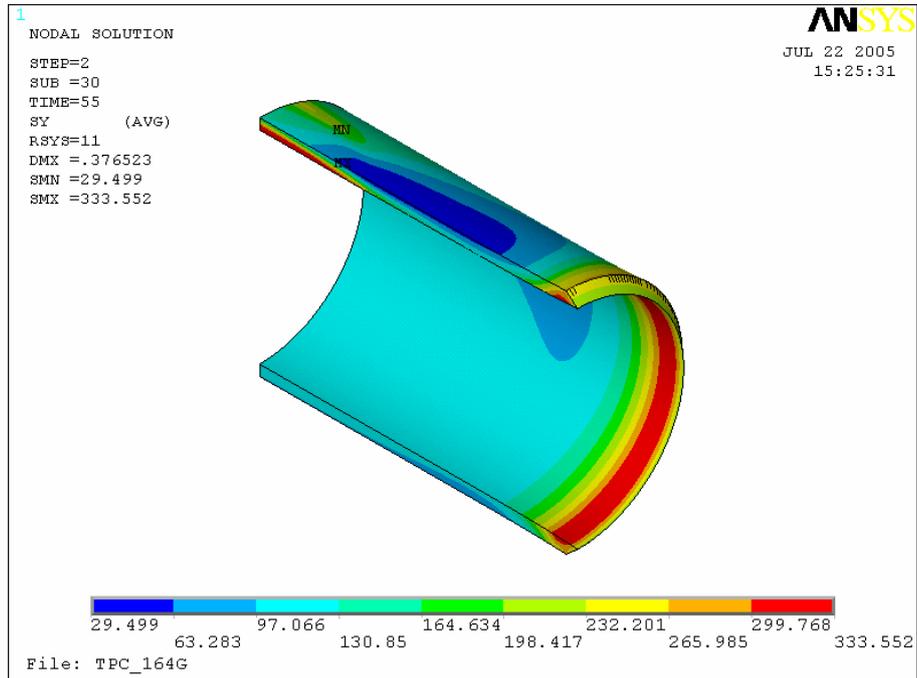


Figura 76. Tensões circunferenciais no reparo

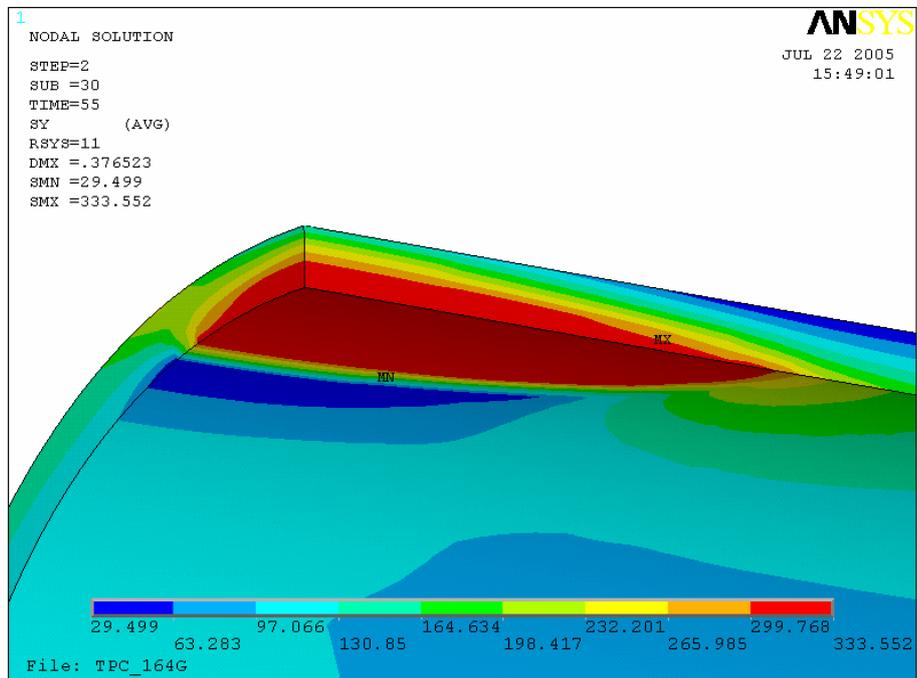


Figura 77. Detalhes das tensões circunferenciais no reparo

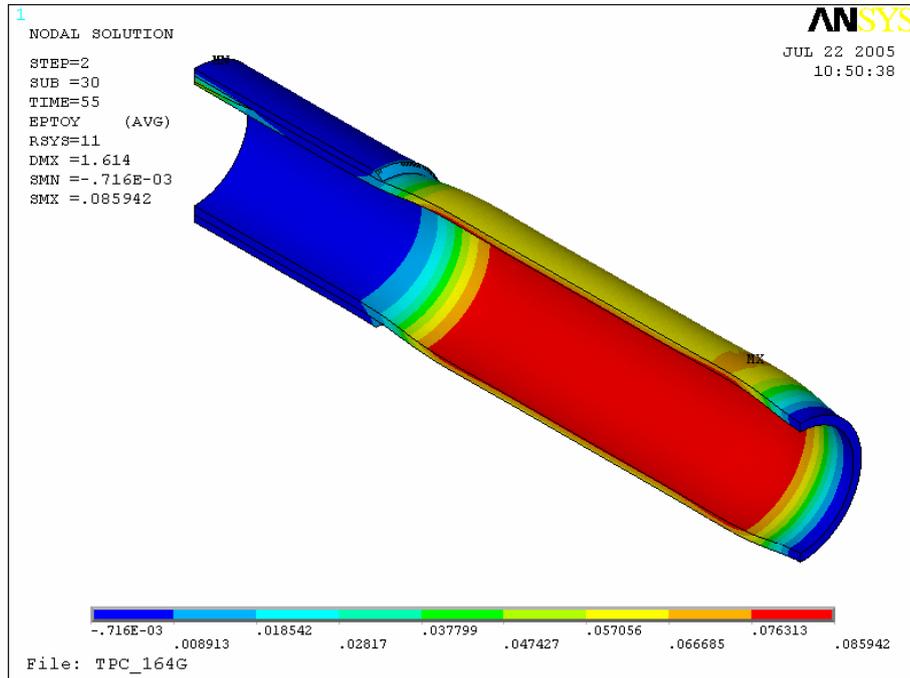


Figura 78. Deformações plásticas circunferenciais do tubo TPC 164 G

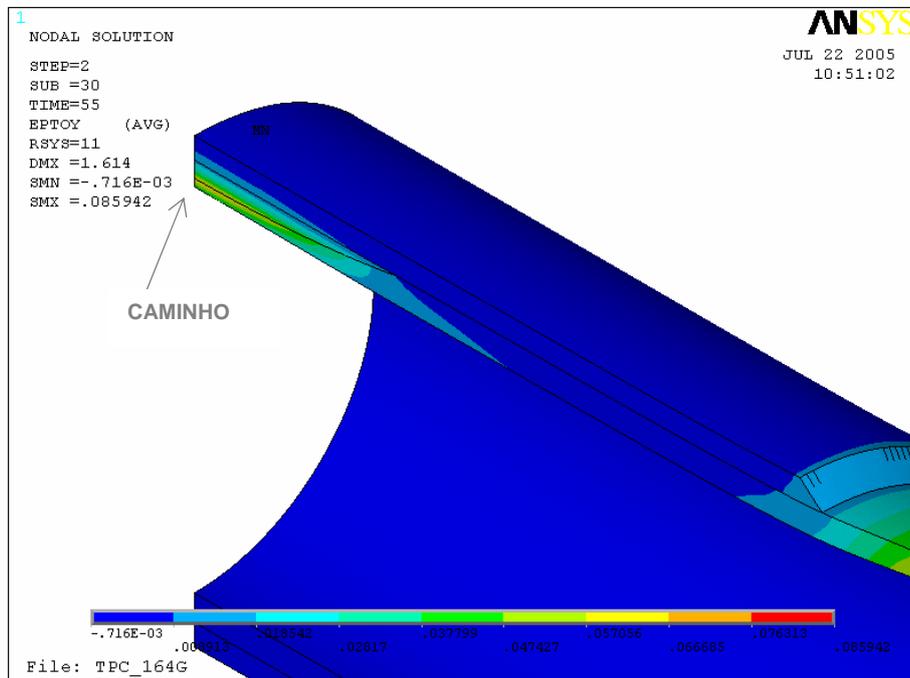


Figura 79. Detalhes das deformações circunferenciais na área reparada

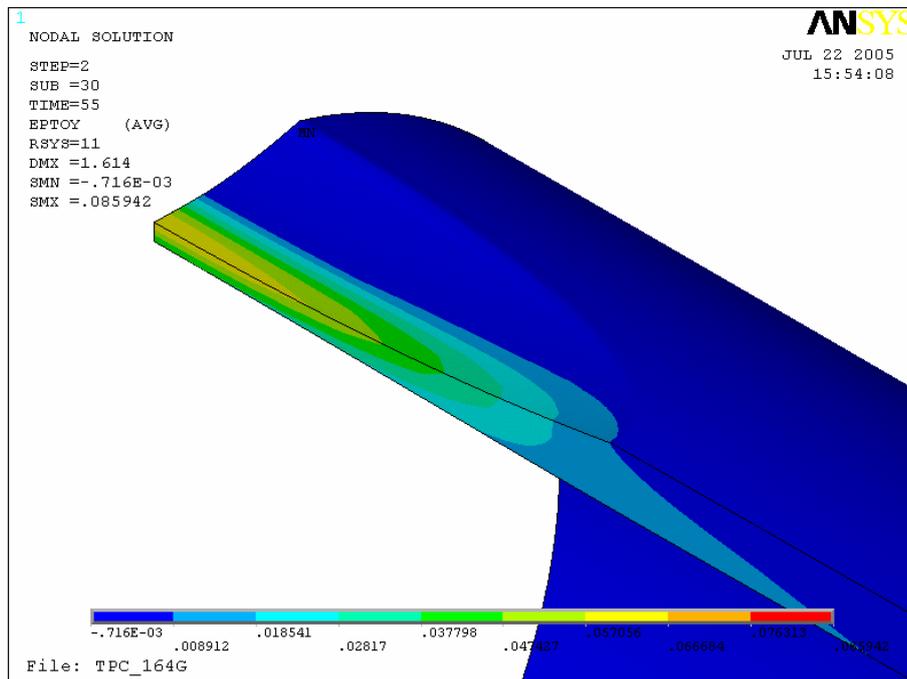


Figura 80. Deformações circunferenciais no centro do defeito

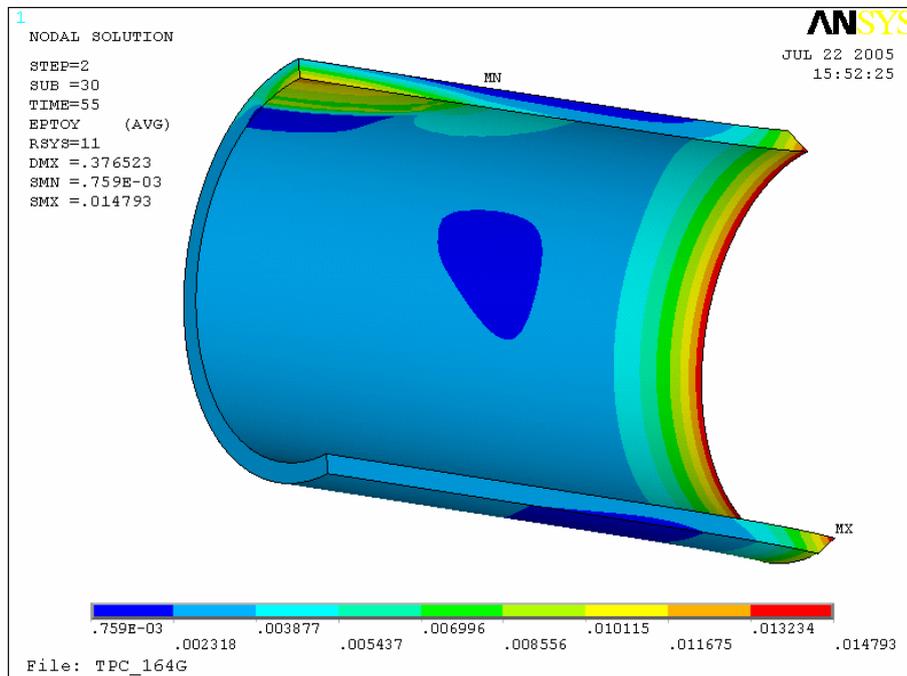


Figura 81. Deformações circunferenciais no compósito

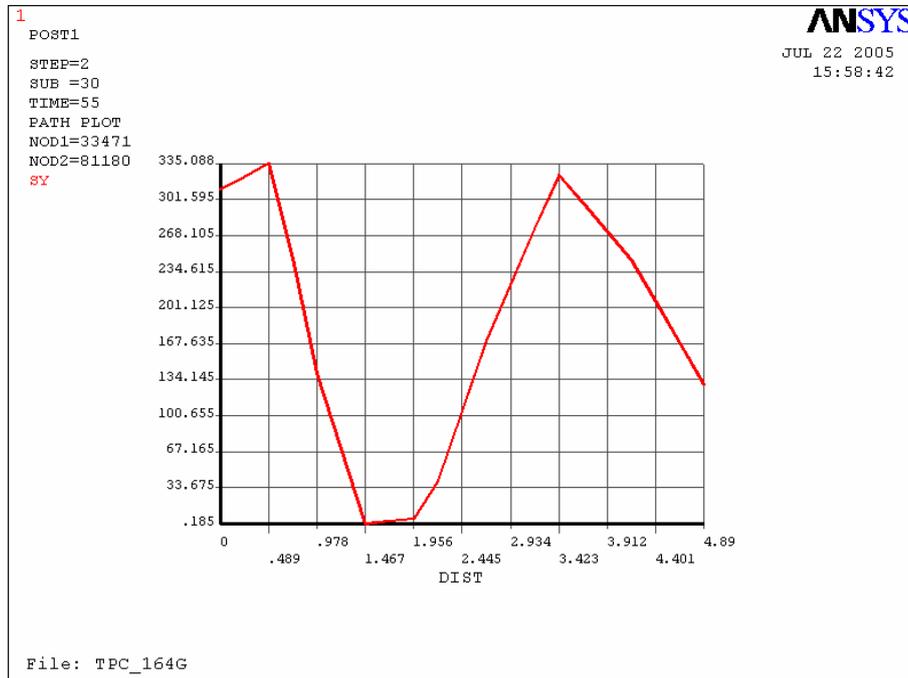


Figura 82. Tensões circunferenciais ao longo da espessura no centro do defeito

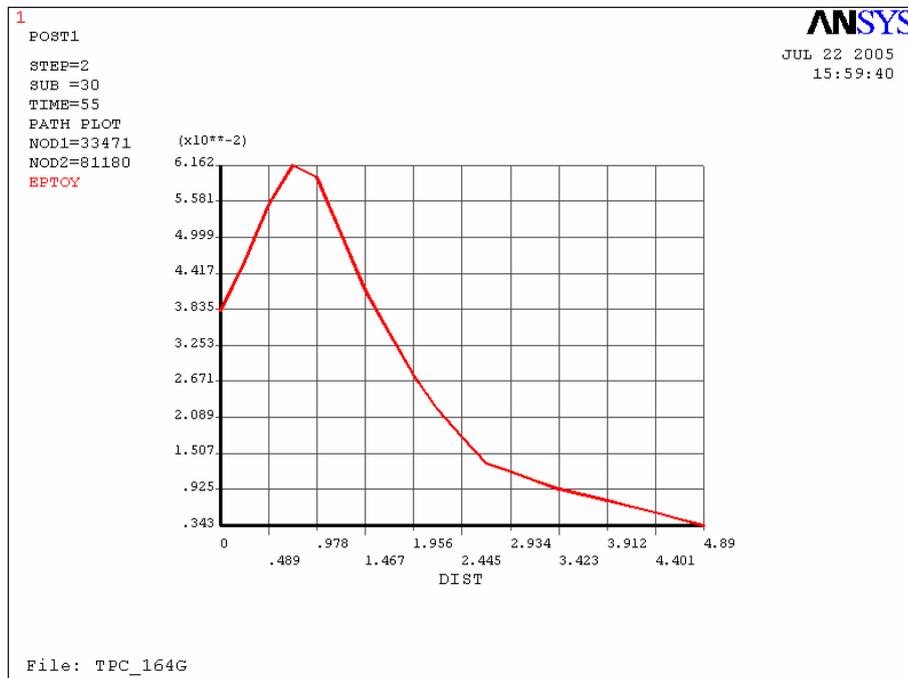


Figura 83. Deformações circunferenciais ao longo da espessura no centro do defeito

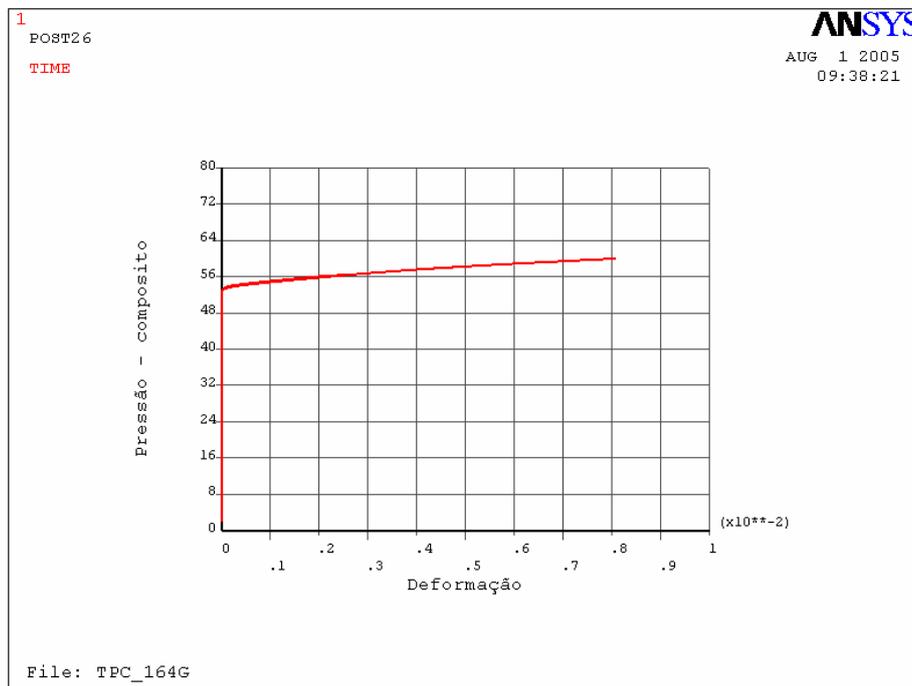


Figura 84. Pressão x deformação no material compósito

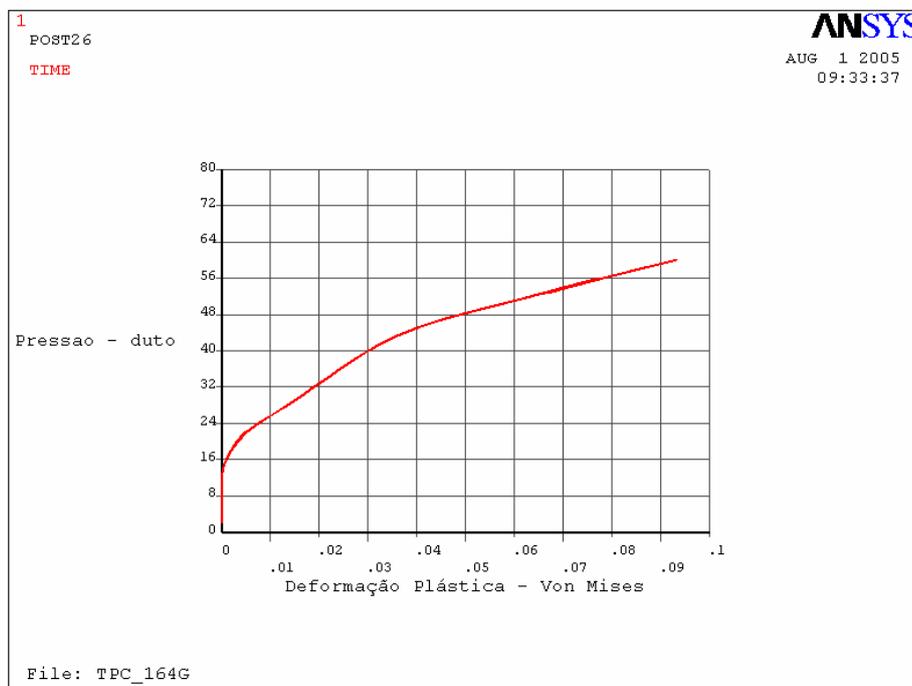


Figura 85. Pressão x deformação plástica no tubo

A figura 71 mostra o tubo TPC 164 G, com a ruptura na região livre, fora do reparo, que ocorreu a uma pressão de ensaio de 53,65 MPa. Observa-se um abaulamento que se inicia a partir dos bordos do compósito e é visivelmente acentuado onde houve a falha do material. O reparo suportou a pressão aplicada e não sofreu qualquer degradação aparente.

Os resultados apresentadas a seguir, mostram as distribuições das tensões e das deformações resultantes das solicitações impostas à estrutura, reproduzindo as condições a que esta foi submetida no dispositivo de ensaio hidrostático. A pressão de 55 MPa aqui considerada é aquela na qual os valores das tensões circunferenciais do tubo são superiores ao limite de resistência do aço. Neste passe de carga é analisado o comportamento da estrutura.

Conforme a figura 72, as tensões circunferenciais máximas aparecem na região livre do tubo. Esses valores estão situados entre 317,86 e 394,79 MPa. A figura 73 mostra com detalhes a região do reparo.

O valor máximo da tensão circunferencial é superior ao limite de resistência médio do aço, que é de 393 MPa, um indicativo de que naquela região o tubo já teria rompido, o que coincide com os resultados experimentais.

Observando-se o reparo, note-se que em todas as regiões da sua superfície externa, as tensões mais altas variam de 83,67 a 239,23 MPa, valores ainda inferiores ao limite de resistência do compósito, o que indica que este suportaria a pressão interna aplicada.

Em uma análise mais detalhada do tubo sem a presença do material compósito, conforme figura 74, as tensões na região onde o reparo foi aplicado variam desde tensões de compressão onde a espessura de parede começa a aumentar até 317,01 MPa, valor este inferior ao limite de resistência do aço.

A figura mostra, ainda, que no centro do defeito, os valores de tensão estão em torno de 317,01 MPa no centro do defeito, mas em uma região relativamente pequena em comparação às demais.

Na figura 75 são visualizadas as tensões no material de enchimento que foi aplicado no defeito e que tem um limite de resistência de 35,82 MPa.

As máximas tensões alcançadas estão entre 12,82 e 15,04 MPa e, próximo ao centro do defeito, aparecem tensões de compressão provenientes do reparo quando o tubo é submetido a pressão interna.

Na figura 76 são mostradas as tensões circunferenciais no reparo, cujos resultados estão entre 299 e 333,55 MPa, valor este alcançado em um ponto afastado do centro do defeito. Outra região importante a ser analisada é a parte interna dos bordos, que apresenta tensões elevadas. Verifica-se, contudo, no restante do reparo, grandes regiões com valores entre 29,49 a 130,85 MPa.

Na figura 77 é destacado o local do reparo com as regiões de tensão máxima e mínima. No bordo, estas ficam limitadas à sua parte interna e no contato com o defeito ficam restritas a uma pequena área, não atingindo toda a espessura da camada, o que parece não ter comprometido a resistência do material, conforme o resultado obtido experimentalmente.

Na figura 78 podem ser vistas as deformações circunferenciais na estrutura. Os valores máximos aparecendo igualmente fora do reparo, onde ocorreu a ruptura do tubo e valores próximos de zero, na extremidade do tubo presa ao dispositivo de ensaio.

A figura 79 contém detalhes das deformações no local do reparo. No centro do defeito, onde há o contato do aço com o material de enchimento aparecem valores baixos de deformação, mas à exceção dessa região, em todas as outras são encontrados valores próximos de zero.

Na figura 80, podem ser vistos detalhes da deformação no tubo na região do defeito, sem a presença do reparo. Os maiores valores de deformação plástica aparecem no centro do defeito na região de menor espessura de parede.

Na figura 81 podem ser visualizadas as respostas das deformações circunferenciais no reparo. As maiores ocorrem no bordo do compósito e no centro do

defeito, perfeitamente delimitadas. Nas demais regiões são observados os menores valores alcançados

. Para verificar todos estes dados, foram gerados os gráficos das tensões e das deformações circunferenciais no caminho ao longo da espessura do tubo reparado, no centro do defeito, que vai desde a superfície interna do tubo até a superfície externa do compósito, conforme mostrado na figura 79.

Na figura 82 observa-se que as maiores tensões aparecem no tubo e atingem o valor máximo de 335 MPa. No material de enchimento essas tensões diminuem e voltam a aumentar no reparo, alcançando valores em torno de 317 MPa para novamente caírem até valores em torno de 134 MPa.

O gráfico apresentado na figura 83 é referente às deformações em função da pressão interna aplicada na estrutura, e são encontrados valores em torno de 6 %, passando por valores menores no enchimento. No compósito esses valores decrescem a partir de 1 %, indicando a restrição imposta na região reparada.

Pode-se verificar a partir dos gráficos das figuras 84 e 85 nos quais estão registradas as maiores deformações em função da pressão aplicada no compósito e no tubo, cujos valores estão em torno de 0,8 % e 8 % respectivamente.

III.9.2 TUBO TPC 163 E - RUPTURA NO COMPÓSITO

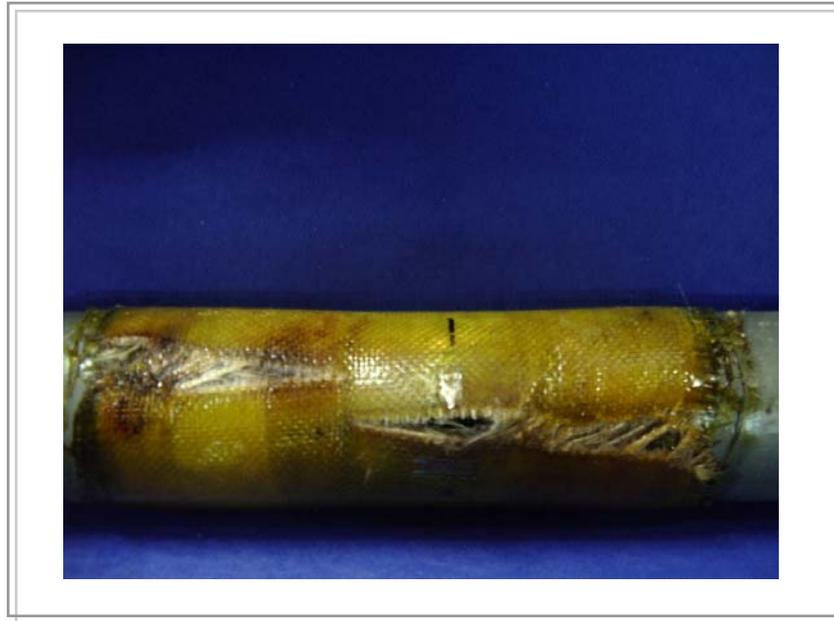


Figura 86. Ruptura do tubo TPC 163 E

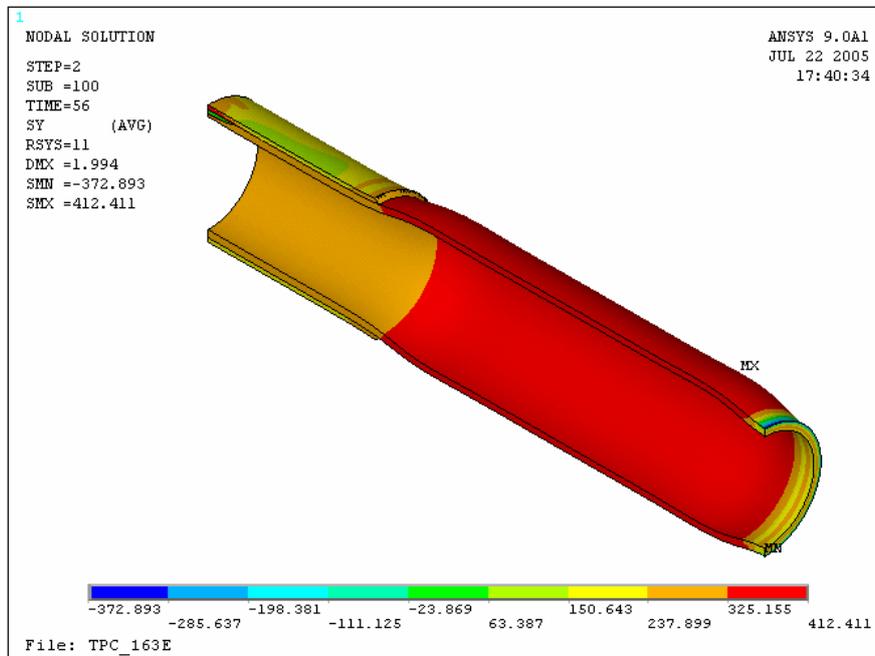


Figura 87. Tensões circunferenciais na estrutura

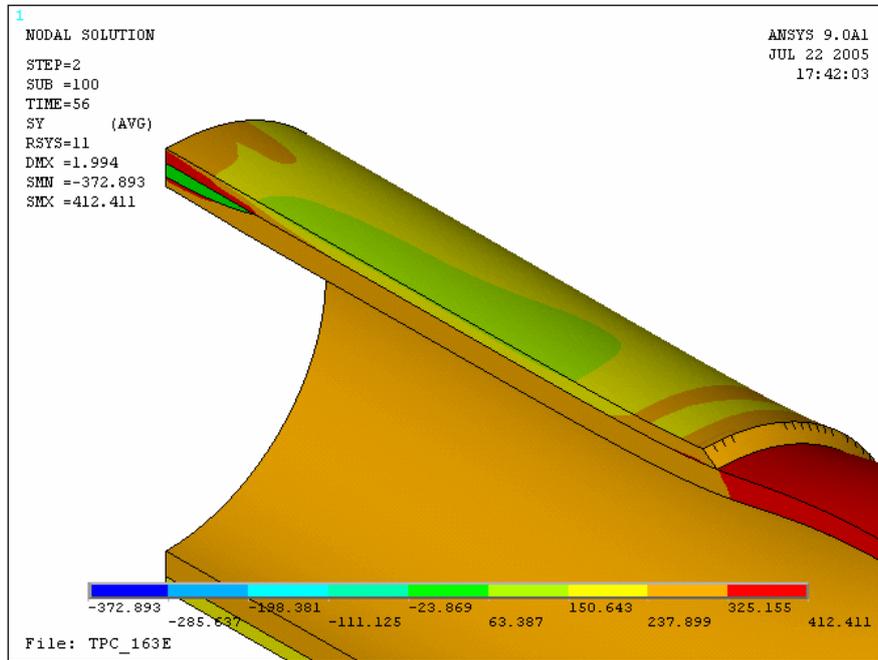


Figura 88. Tensões circunferenciais no tubo

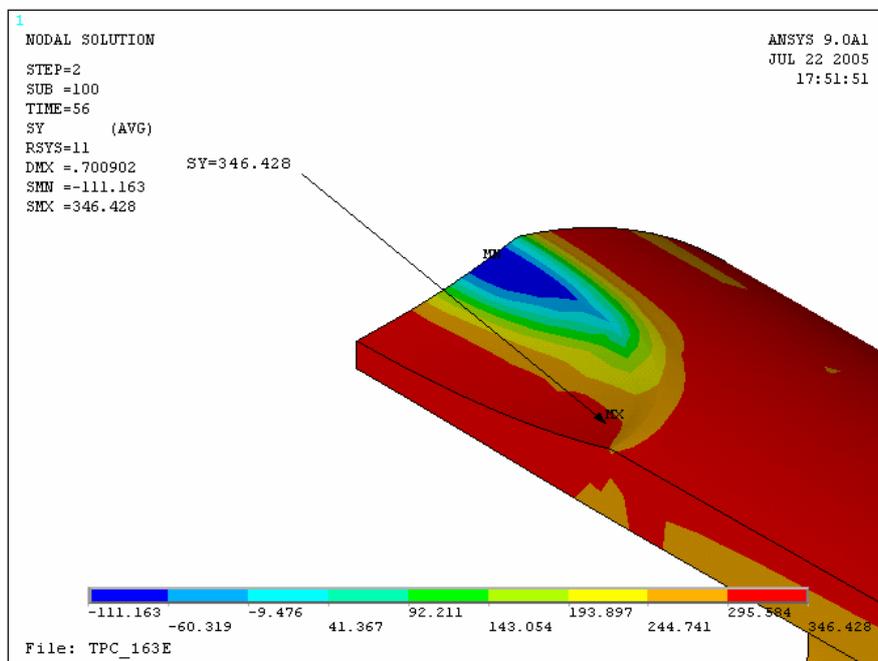


Figura 89. Tensões circunferenciais máximas na região do defeito

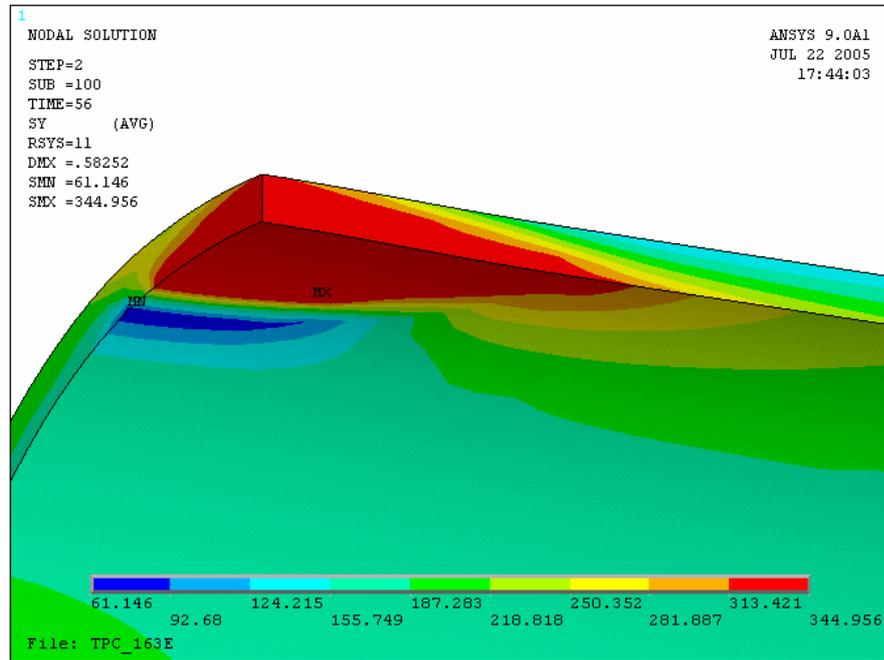


Figura 90. Tensões circunferenciais máximas no reparo

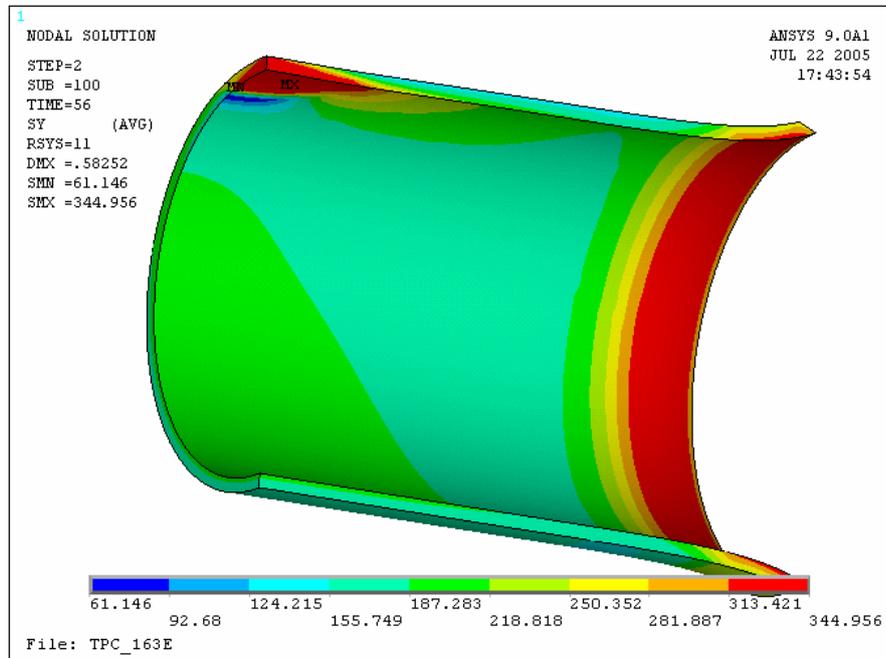


Figura 91. Detalhes das tensões no bordo do compósito

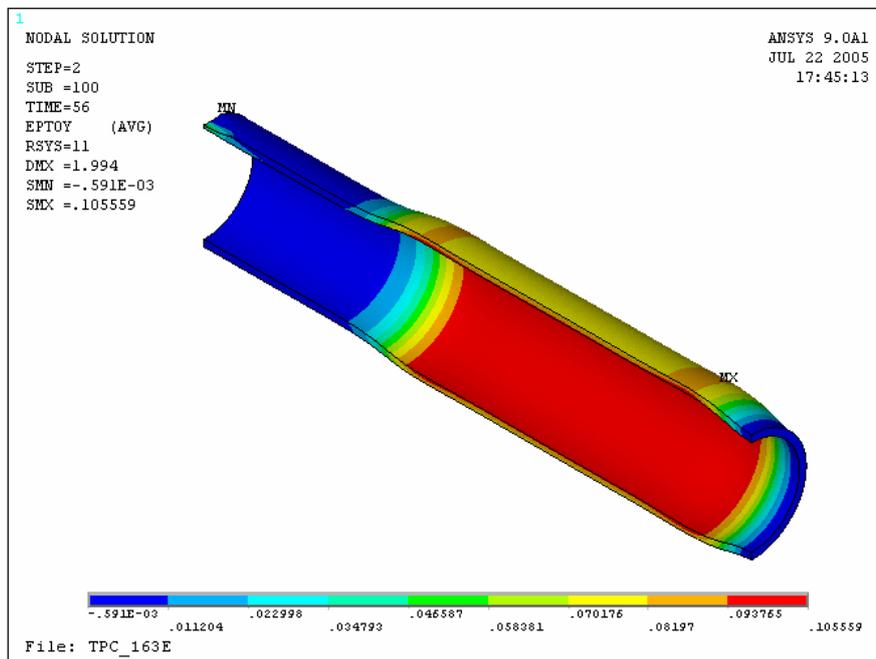


Figura 92. Deformações circunferenciais no tubo

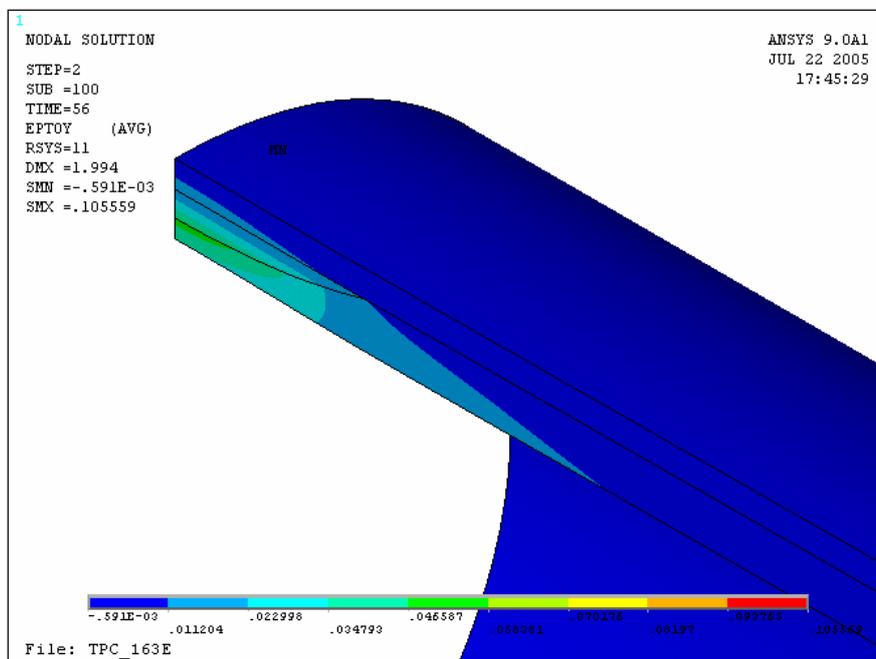


Figura 93. Detalhe das deformações circunferenciais no tubo

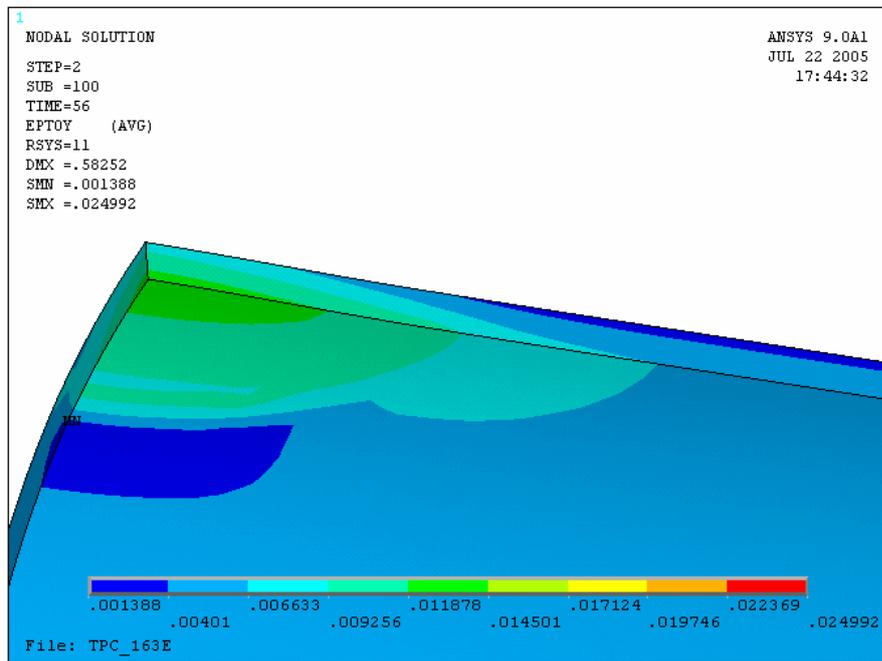


Figura 94. Deformações circunferenciais no material compósito

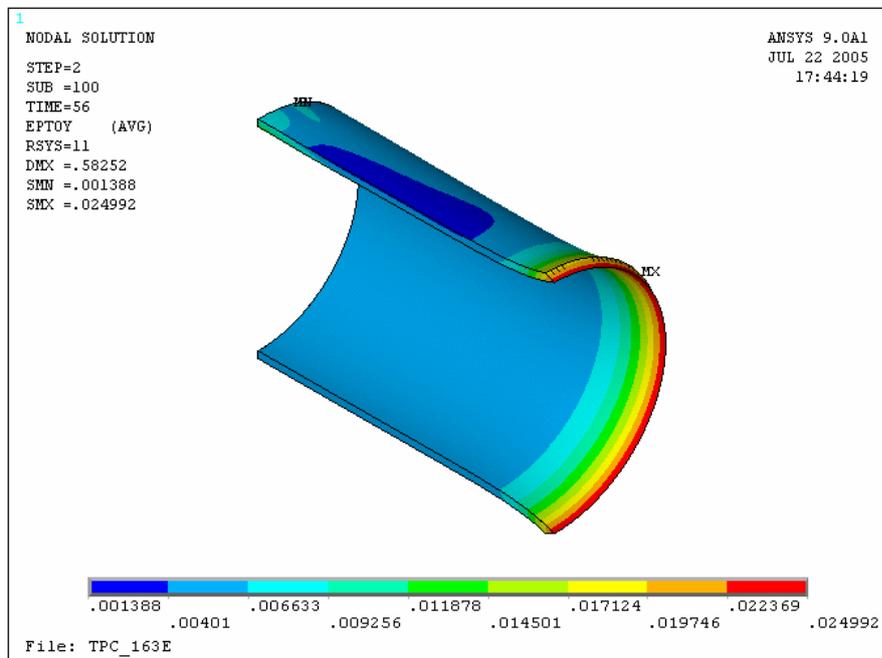


Figura 95. Detalhes das deformações circunferenciais no bordo do compósito

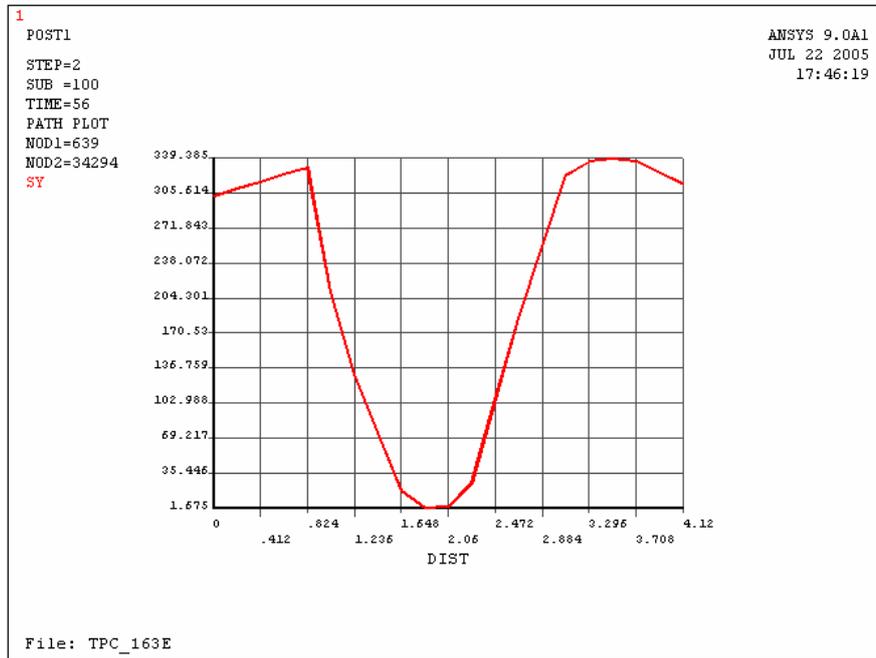


Figura 96. Tensão circunferencial ao longo da espessura

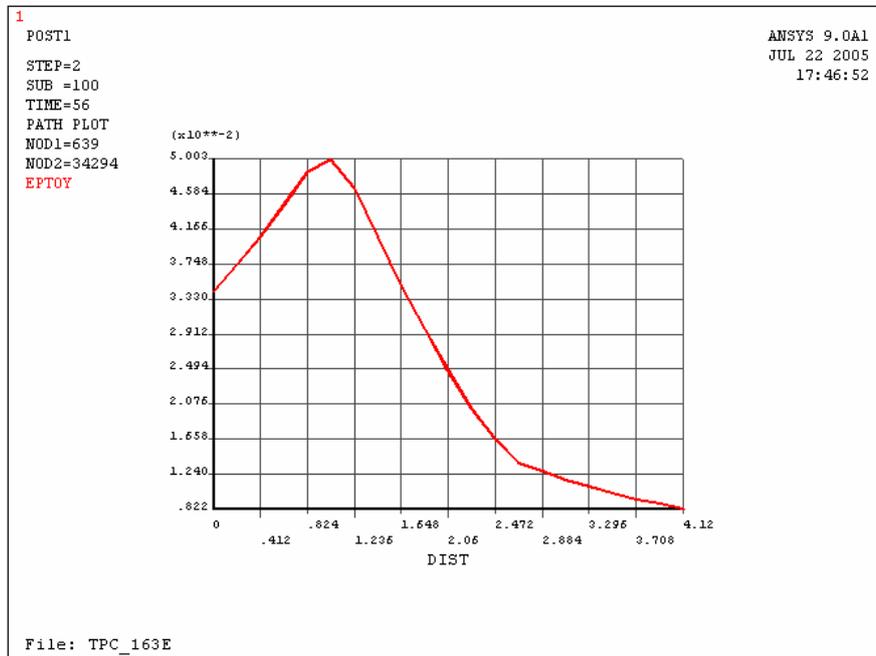


Figura 97. Deformação circunferencial ao longo da espessura

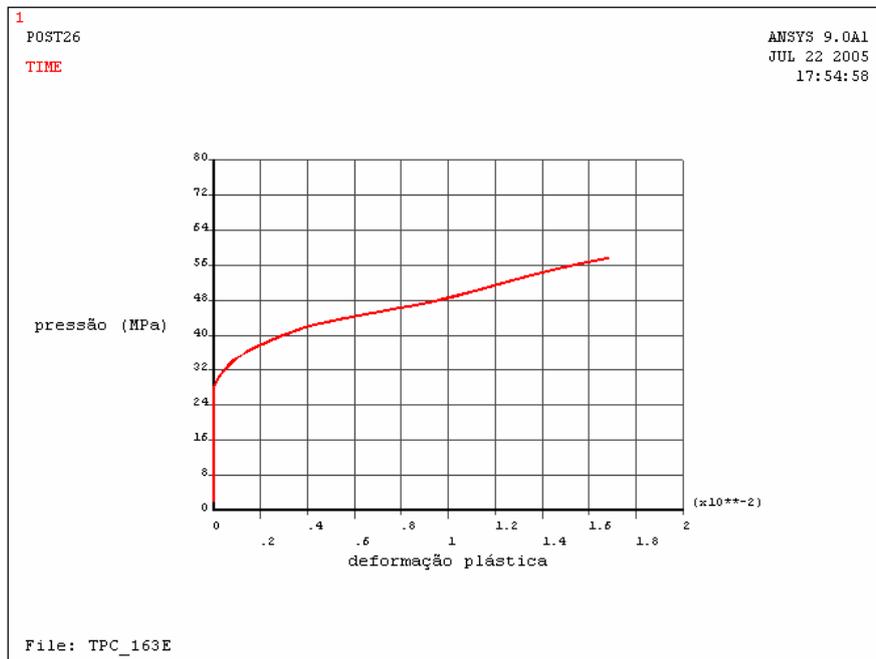


Figura 98. Pressão x deformação no compósito

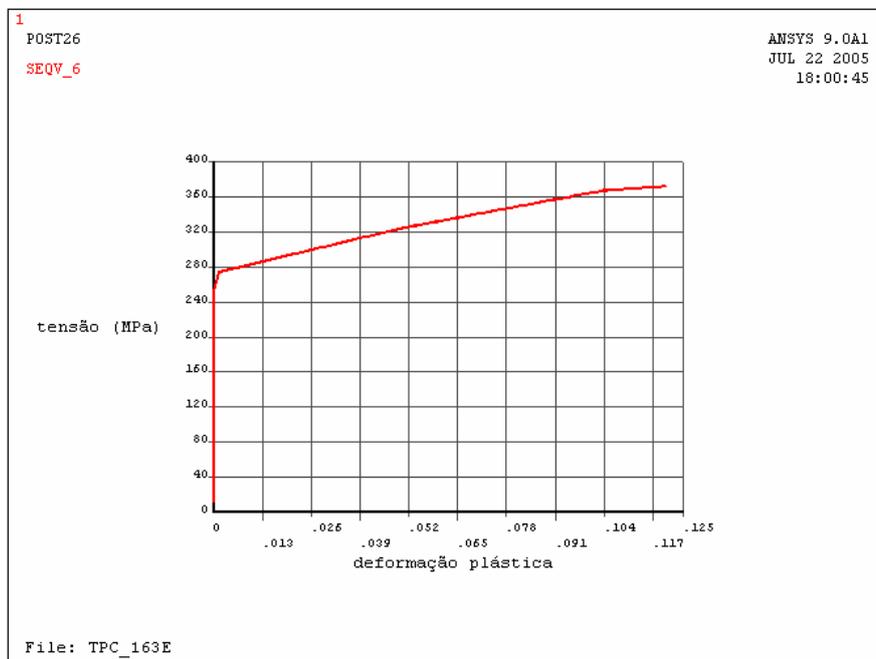


Figura 99. Tensão x deformação no tubo

A figura 86 mostra o tubo TPC 163 E após o ensaio hidrostático, onde podem ser vistos o abaulamento fora do reparo, o rasgamento dos bordos do compósito e a ruptura no local do defeito.

A pressão de análise foi 56 MPa e os valores obtidos são analisados a seguir. Observa-se que não serão comentados os resultados alcançados pelo material de enchimento, já que seu comportamento é semelhante ao que foi mostrado anteriormente.

Na figura 87, são apresentadas as tensões circunferenciais da estrutura. O local de máxima tensão é visto na região livre do tubo, com um valor em torno de 412,41 MPa.

Na figura 88, pode-se ver detalhes das distribuições das tensões circunferenciais da estrutura. Na superfície externa do compósito, especialmente nos bordos e no centro aparecem tensões altas, entre 237,89 e 325,15 MPa.

Na figura 89 vê-se o tubo sem o reparo. Em regiões extensas do material pode-se verificar tensões entre 295,58 e 346,42 MPa, com valores de pico no defeito. Nos locais onde a espessura de parede do defeito começa a aumentar, surgem tensões de compressão.

Na figura 90 podem ser visualizados detalhes da distribuição das tensões no reparo. Vê-se que as tensões máximas estão entre 313,4 e 344,96 MPa e estendem-se em toda a sua espessura, indicando um possível comprometimento do material na pressão aplicada.

Na figura 91, podem ser visualizadas também as distribuições das tensões nos bordos do reparo, que mostram que essa região também não suportou a pressão aplicada.

Nas figuras 92 e 93, são mostradas as deformações circunferenciais no tubo, com regiões onde a deformação é baixa devido a compressão ainda imposta pelo reparo.

Analisando somente o reparo, visto com mais detalhe na figura 94, verifica-se que as deformações no centro do defeito estão entre 1,1 e 1,4%.

Na figura 95 pode-se ver detalhes do bordo do compósito com deformações em torno de 2,4 %, o que indica que o compósito já perdeu a sua integridade, já que esse valor de deformação está acima daquele registrado nos gráficos obtidos no ensaio hidrostático.

A figura 96 mostra o gráfico das tensões circunferenciais gerado no mesmo caminho anteriormente definido, ou seja, no centro do defeito ao longo da espessura da região reparada.

Analisando os resultados, constata-se que as tensões no tubo se mostram ainda baixas em relação limite de resistência do material, não configurando numericamente a sua ruptura naquela região. Por outro lado, com os valores alcançados no compósito acima de 318 MPa em toda a sua espessura, indica um comprometimento da sua resistência, levando o duto a romper no defeito.

As deformações circunferenciais no aço, mostradas na figura 97 atingem um pico em torno de 5 % no centro do defeito e no compósito em torno de 1,4 %.

O gráfico da figura 98 mostra os valores de pressão x deformação no compósito, na região do defeito, com deformações em torno de 1,6 %.

O gráfico da figura 99, mostra que na pressão aplicada, as tensões no aço são da ordem de 390 MPa, ou seja, bem próximas do limite de resistência médio do aço.

III.10 COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES DE RUPTURA NUMÉRICAS, TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

Nas tabelas 27 e 28 são comparadas as pressões de ruptura obtidas teórica, numérica e experimentalmente de acordo com a metodologia usada no trabalho.

Conforme pode ser visualizado, os valores teóricos e numéricos dos tubos com reparo, estão próximos daqueles obtidos experimentalmente para os tipos de defeito estudados.

Observou-se que na aplicação do reparo, a medida da espessura aplicada efetuada após a cura da resina nos dois tubos cuja espessura de reparo era maior, apresentou valores ligeiramente inferiores à espessura calculada.

Contudo, estes resultados não implicaram em um comportamento da estrutura no ensaio hidrostático diferente do previsto no modelo numérico, em que a espessura considerada foi a teórica.

Tabela 27 Comparações das pressões de ruptura dos tubos com reparo

% t	L (mm)	TUBOS REPARADOS	d (mm)	t (mm)	t _c (mm)	PRESSÃO TEÓRICA ¹ (MPa)	PRESSÃO DE ENSAIO (MPa)	PRESSÃO NUMÉRICA (MPa)
60	21	TPC 163 E	1,52	2,62	1,50	50,03	53,38	54
	42	TPC 163 C	1,54	2,66	1,82	50,80	53,72	54
70	21	TPC 165 E	1,86	2,70	1,95	50,03	54,07	56
	42	TPC 164 G	1,82	2,68	2,21	51,20	53,65	55
80	21	TPC 165 D	2,13	2,70	2,41	51,60	53,68	54
	42	TPC 165 C	2,11	2,70	2,66	51,62	53,65	56

¹ Fórmula da Armor Plate

Para os valores nominais de t e D o valor da pressão de ruptura é 52,87 MPa

Por outro lado, o reparo com as menores espessuras de camada aplicadas não apresentaram diferenças daquelas calculadas teoricamente, mas os tubos romperam no reparo, de acordo com o previsto no modelo numérico. Isto mostra que a fórmula empírica utilizada é não conservativa para o reparo de defeitos com menor profundidade, ou seja, que apresentam maiores espessuras remanescentes de parede.

Nos tubos sem reparo, todos os resultados teóricos se mostraram bastante conservativos em relação aos experimentais. Observa-se, ainda, que para os defeitos com 42 mm de comprimento e profundidade igual a 80 % da espessura de parede do tubo, o código ASME é o que apresenta os resultados menos conservativos.

Tabela 28 Comparação das pressões de ruptura dos tubos sem reparo

% t	Comp.	TUBOS	D e t (mm)	PRESSÕES DE RUPTURA				
				ASME B31G (MPa)	0,85dL (MPa)	DNV RPF-101 (MPa)	DNV x 1,1 (MPa)	ENSAIO (MPa)
60	L=21 mm	TPC 163 D	real	27,33	29,79	35,09	38,60	41,94
			nom.	29,63	32,73	39,05	42,95	
	L=42 mm	TPC 163 A	real	25,15	26,32	28,70	31,57	38,16
			nom.	26,77	28,35	31,39	34,53	
70	L=21 mm	TPF 1B	real	26,19	27,29	31,06	34,16	39,88
			nom.	27,30	28,75	33,14	36,45	
	L=42 mm	TPC 164 E	real	23,25	23,10	23,76	26,14	33,94
			nom.	24,57	24,78	26,05	28,65	
80	L=21 mm	TPC 164H	real	23,64	22,66	23,01	25,31	35,24
			nom.	24,82	24,26	25,50	28,05	
	L=42 mm	TPC 165 A	real	20,69	18,71	16,67	18,34	27,17
			nom.	21,74	20,10	18,59	20,45	

CAPÍTULO IV. CONCLUSÕES

❖ Foi considerado, para efeito dos cálculos numéricos, que as camadas de reparo, constituídas de tecido de fibra de vidro e resina, formavam um material homogêneo e isotrópico. Essa simplificação possibilitou o emprego de um único elemento, o Solid 45 para os diferentes materiais da estrutura.

Outras considerações foram feitas na construção do modelo numérico, tais como a geometria do defeito reproduzindo o modelo real e a espessura do tubo igual a menor espessura de parede medida.

O grau de refinamento da malha é de grande importância para obtenção de resultados mais próximos dos experimentais. As curvas dos materiais, as condições de contorno e as considerações de análise estabelecidas, foram também responsáveis pela obtenção desses resultados satisfatórios.

❖ A espessura de camada de reparo foi suficiente para que fosse alcançada uma pressão de ruptura igual ou ainda superior à do tubo intacto em todos os perfis de defeito.

Dos seis casos estudados, dois (profundidade igual 60% da espessura e comprimento de defeito de 21 mm e 42 mm) apresentaram ruptura do material compósito no local do defeito.

Embora tenha ocorrido a degradação do material compósito, a falha das camadas não levou a falha total do laminado, que suportou incrementos de carga até a pressão atingir a pressão de ruptura do tubo intacto.

❖ A equação empírica mostrou que nos casos em que os defeitos são mais profundos, a camada aplicada foi suficiente para que o material compósito impedisse a ruptura do tubo no defeito.

❖ Nos casos em que a espessura remanescente da parede do tubo é maior, a espessura de camada foi estritamente calculada e mostrou-se pouco conservativa para este tipo de defeito.

- ❖ Os critérios adotados na escolha dos constituintes para a fabricação do material compósito resultaram em uma resposta do material bastante satisfatória. Os ganhos em resistência obtidos nos tubos reparados variaram de 51,57 a 97,46 %.
- ❖ As propriedades do material de enchimento mostraram-se adequadas para nivelar o tubo e transferir apropriadamente o carregamento aplicado no tubo para o material compósito.
- ❖ Em relação às estimativas das pressões de ruptura do tubo, observa-se, que todas as pressões calculadas através dos diferentes métodos são inferiores às reais, o que demonstra o conservadorismo dos mesmos.
- ❖ O método de cálculo considerando os perfis dos defeitos usinados que mais reproduziu o experimento foi o definido na norma DNV RPF 101.
- ❖ Para defeitos com profundidade de 80 % da espessura do tubo, os outros métodos ainda são mais conservativos que o B31 G.
- ❖ O método de cálculo da pressão requerida para romper os tubos com reparo, proposto pela Armor Plate se aproximou dos valores obtidos experimentalmente.

Sugestões para trabalhos futuros

- ❖ A espessura de camada do compósito pode ser redimensionada nos dois casos em que houve a ruptura do reparo no defeito.
- ❖ Novos modelos numéricos devem ser testados com diferentes espessuras de camadas a fim de analisar o comportamento da estrutura.
Pode-se propor, assim, uma equação com um fator de correção para ajustar a espessura do reparo tendo em vista defeitos dessa natureza.
- ❖ Fazer um estudo de fadiga do material, tendo em vista às solicitações da estrutura.

CAPÍTULO V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Silvestre Filho, G. D., *Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril*, Tese de M.Sc. , USP, São Carlos, SP, Brasil, 2001.
2. disponível em <http://www.compositesworld.com>, acessado em 15/03/2005
3. Composite Week News Board, 22 March 2005, disponível em, <http://www.compositesnews.com>, acessado em 23/04/2005.
4. V. Tita, J. de Carvalho, J. Lirani, "Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Fiber Reinforced Composite Beams", *Journal of the Braz. Soc. of Sci. & Eng.*, Vol. XXV, N° 3, pp. 306-310, July-September 2003.
5. Laughlin, S., "Providing New Solutions to Maximize Pipeline Safety", disponível em <http://www.clockspring.com>- acessado em 15/04/2005.
6. Frassine, R., "Long-term Performance of a Polymer Composite Repair System for Gas Pipelines, *Advances in Polymer Technology*, 16-1, 33-43, 1997.
7. European Paten Application EP 574060, publicada em 15/12/93
8. Barra, G., *Compósitos Poliméricos*, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, disponível em <http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5706/PDF/COMPOSITOS.PDF>.
9. Chawla, K. K. , *Composite Materials*, 1st ed., New York, Springer-Verlag, 1987.
10. Roylance, D., "Introduction to Composite Materials", Department of Materials Science and Engineering, MIT, Cambridge, March, 2000.
11. Callister Jr, W. D., *Materials Science and Engineering: an Introduction*, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
12. Resin Systems, Published courtesy of David Cripps, SP Systems, disponível em <http://www.netcomposites.com> - acessado em 15/03/2005.

13. Boyle, Maureen A., Martin, Cary J., Neuner, John D., "Epoxy resins", In: ASM Handbook/extraction, *Composites*, DE, Oct. 2003.
14. disponível em <http://www.silaex.com.br>, acessado em 15/04/2005.
15. disponível em <http://geocities.yahoo.com.br>, acessado em 15/04/2005.
16. Loureiro, S. M. N. A., *Reforço de vasos de pressão por material compósito de matriz polimérica*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
17. Billmeyer, Jr., F.W., *Textbook of Polymer Science*, 2nd ed., Wiley International Edition, 1971.
18. Daniel, I. M., Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, Inc., 1994.
19. Fujiyama, R. T., *Materiais compósitos para reparos de dutos terrestres*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
20. Hull, D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, London, 1981.
21. disponível em www.saint-gobain-vetrotex.com.br, acessado em 15/04/2005
22. Cosham, A., Kirkwood, M., "Best practice in pipeline defect assessment" *Proceedings of IPC 2000: International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2000.
23. De Leon, D., Macías, O. F., "Effect of spatial correlation on the failure probability of pipelines under corrosion", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82, pp.123-128, 2005.
24. Pipeline Failure, updated 15/09/2004, disponível em <http://www.primis.rspa.dot.gov>, acessado em 27/09/2004.

25. Pipeline Integrity, ICGTI-USA, Jan. 2003, disponível em <http://www.ctgas.com.br>, acessado em 10/09/2004.
26. Loureiro, J. F., *Influência da corrosão na resistência limite de dutos sob pressão interna*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
27. Gentil, V., *Corrosão*, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 3ª ed., 1996.
28. Srikanth, S., Sankaranarayan, T. S. N., Gopalakrishna, K., et al., "Corrosion in a buried pressure water pipeline", *Engineering Failure Analysis*, Feb. 2004.
29. Lee, O. S., Kim, D. H. , "Reliability of buried pipelines with corrosion defects under varying boundary conditions", *The 15th Conference of Fracture - Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety Assessments*, Stockholm, Sweden, August 11-13, 2004.
30. Ahammed, M., Melchers, R. E., "Reliability estimation of pressurized pipelines subject to localised corrosion defects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 69, pp. 267-272, 1996.
31. ASME B31 G, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, A Supplement to ANSI/ASME Code for Pressure Piping, New York, 1991.
32. Kiefer, J. F., Vieth, P. H., "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe", Pipeline Research Council International, Inc., American Gas Association, Dec. 1989.
33. Stephens, D. R., "Material and geometry factors controlling the failure of corrosion defects in piping", *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Orlando, FL, July, 1997.
34. Choi, J. B., Goo, B. K., Kim, J. C., et al., "Development of limit load solutions for corroded gas pipelines" , *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80, pp. 121-128, 2003.

35. *Appraisal and Development of Pipeline Defect Assessment Methodologies*, MSL Engineering Limited, DOC REF CH109R001, Final Report, June 2000.
36. Souza, R. D., *Avaliação estrutural de dutos com defeitos de corrosão reais*, Tese de M. Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
37. DNV Recommended Practice- DNV-RP-F101 - Corroded Pipelines - Det Norske Veritas, Norway, 2004.
38. Alexander, C. R., Wilson, F. D., "Assessing the use of composite materials in re-rating liquid and gas transmission pipelines", disponível em <http://www.armorplatepipewrap.com>, acessado em 15/04/2005.
39. Quick, E. C., Porter, P., "A composite approach", *World Pipelines*, Oct/Nov. 2003.
40. Freire, J. L. F., *Research on Structural Integrity of Oil and Gas Pipelines*, PUC- RJ, 2004.
41. Chavez, O., "Composite repairs - Design, Properties and New Applications" *Congreso Internacional de Ductos*, OMA-014, Puebla, 12-14 Noviembre, 2003.
42. Disponível em www.armorplateonline.com, acessado em 06/05/2005.
43. Disponível em www.stronbackcorp.com, acessado em 06/05/2005.
44. Disponível em www.rust.com.br, acessado em 06/05/2005.
45. Handbook for Armor Plate Pipe Wrap - Armor Plate, Inc., Pasadena, Texas, jun., 1998.
46. Ochoa, O. O., Reddy, J. N., *Finite Element Analysis of Composites Laminates*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992.

47. Pereira, J. C., *Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
48. Sánchez, C., A, A., *Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear*, Tese de M.Sc., São Carlos, 2001.
49. ANSYS User's Manual
50. Análise Não linear de Estruturas com o Programa ANSYS, Software Technology, 1999.
51. ASTM. International - *Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High - Temperature Service*.
52. ASTM International - *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
53. Roylance, D., *Pressure Vessels*, Department of Materials Science and Engineering, MIT, Cambridge, Aug, 2001.
54. Sousa, A. N., *Desenvolvimento de sistema para reparo de dutos utilizando materiais compósitos*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
55. Afonso, R. C. O. M., *Estudo da adesividade de material compósito em substrato de aço para dutos*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
56. Netto, T. A., Ferraz U. S., Estefen S. F., "The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipeline", *Journal of Constructional Steel Research*, Article in Press, 2005.

ANEXO I

A I.1 TUBO TPC 165 D



Figura A1. Tubo TPC 165 D após ensaio hidrostático

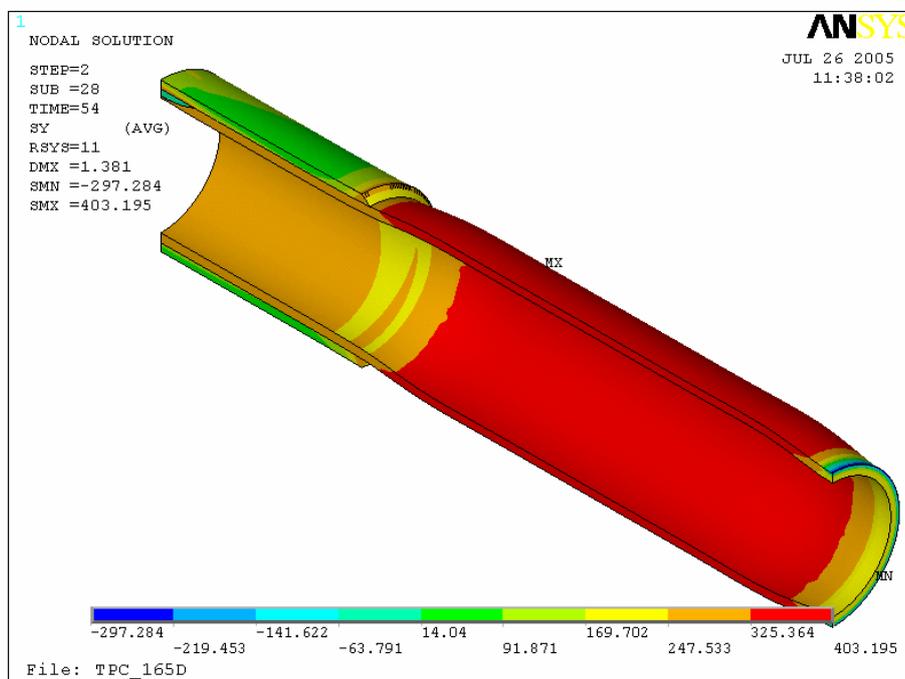


Figura A2. Tensões circunferenciais na estrutura

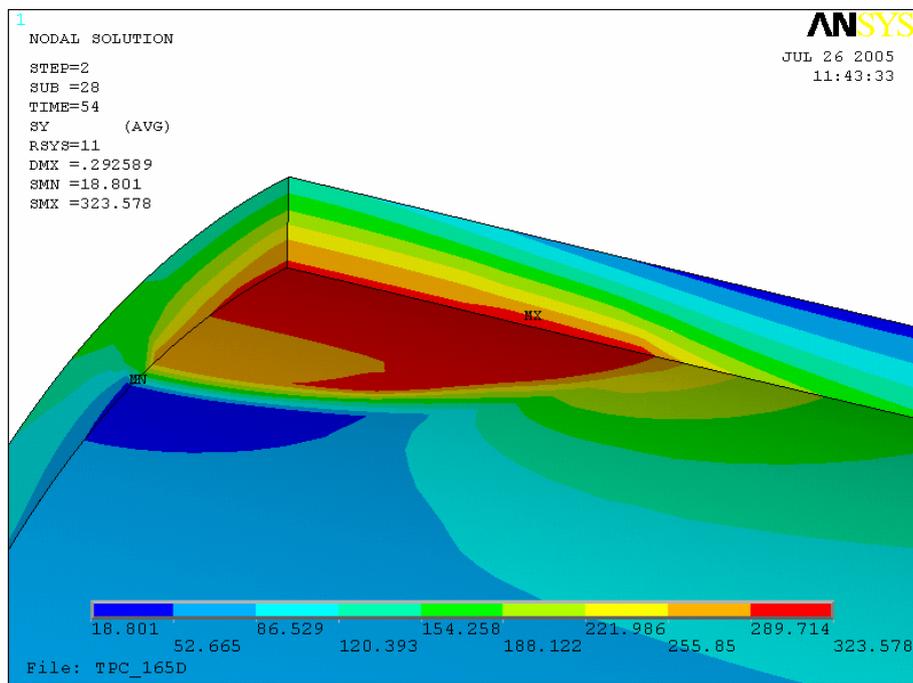


Figura A3. Detalhes das tensões circunferenciais no reparo

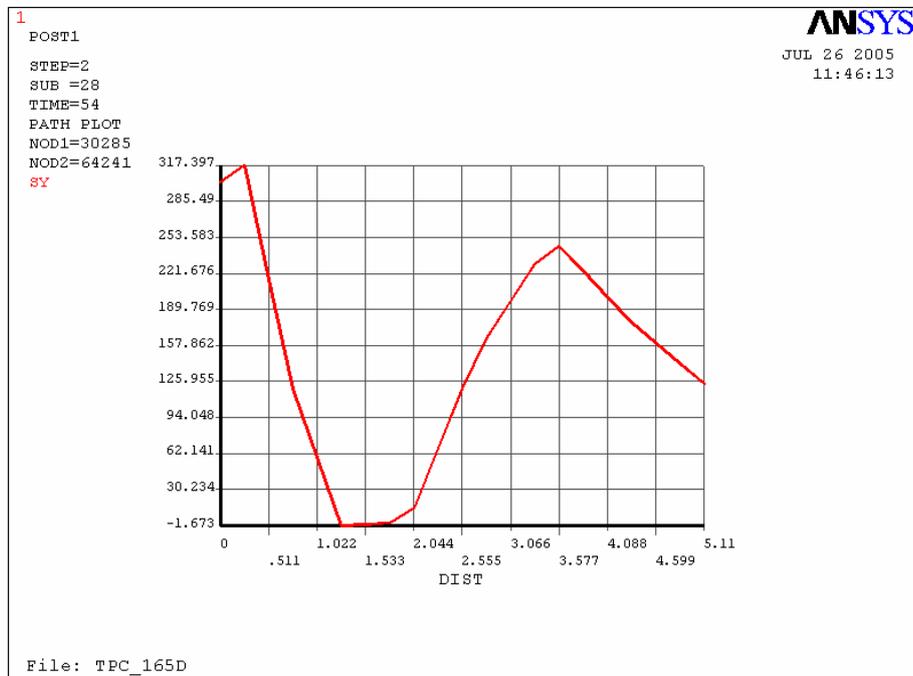


Figura A4. Tensões circunferenciais no centro do defeito

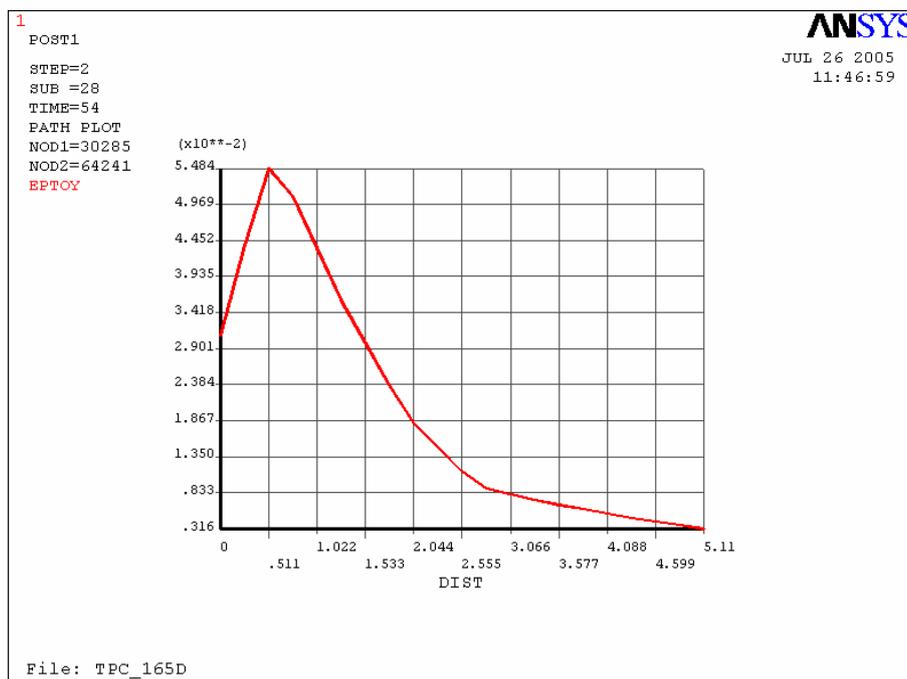


Figura A5. Deformações circunferenciais no centro do defeito

A figura A1 mostra o tubo TPC 165 D após ensaio hidrostático. O reparo não apresentou nenhum sinal de degradação e a ruptura ocorreu na região livre do tubo. Note-se um abaulamento após o término da região reparada que é mais intenso no local do rasgamento.

A pressão estudada foi de 54 MPa. Os modelos numéricos da figuras A2 e A3 mostram, respectivamente, as distribuições das tensões circunferenciais da estrutura e detalhes dessas tensões no compósito.

Verifica-se que o reparo apresenta uma pequena área em que as tensões estão entre 289,71 e 323,57 MPa. em uma pequena área indicada.

Os gráficos das figuras A4 e A5 mostram as tensões e as deformações circunferenciais ao longo da espessura no centro do defeito, e os valores obtidos podem ser visualizados na tabela A1 abaixo.

Tabela A1 Tensões circunferenciais do modelo

TUBO TPC 165 D	PRESSÃO (MPa)	TENSÃO CIRCUNFERENCIAL (MPa)			
		Gráfico		Modelo	
	54	Tubo 317	Compósito 237	Tubo 247-403	Compósito 289-323

As tensões circunferenciais máximas mostradas na estrutura, estão fora da região reparada, com valores próximos a 403 MPa, ou seja, acima do limite de resistência médio do aço.

A partir desses resultados, conclui-se que o compósito suportaria a pressão aplicada e a tendência seria a ruptura acontecer na região livre do tubo, conforme foi verificado no experimento.

AI.2 TUBO TPC 165 C



Figura A6. Tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático

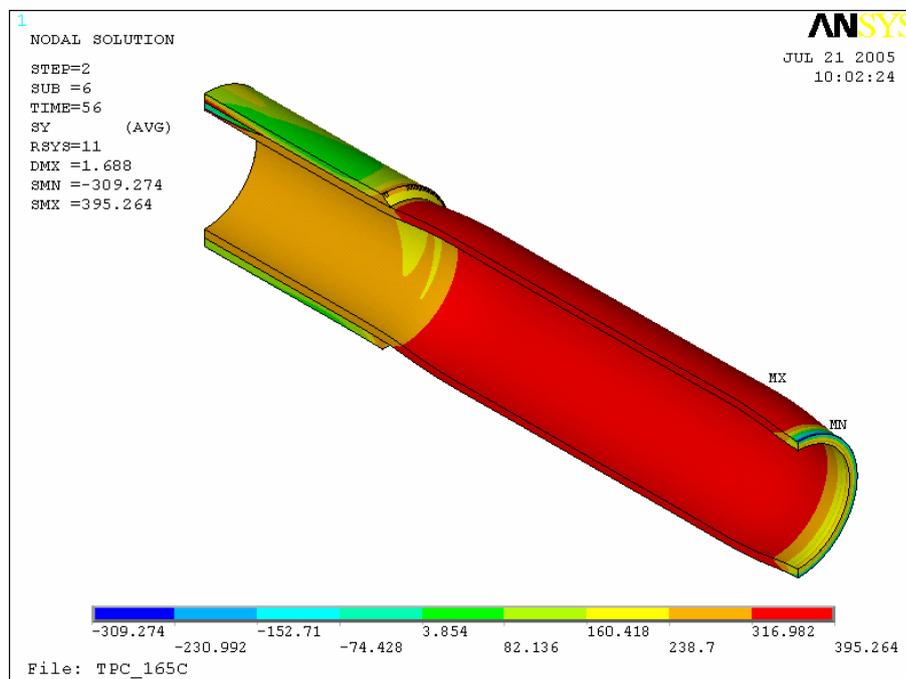


Figura A7. Tensões circunferenciais na estrutura

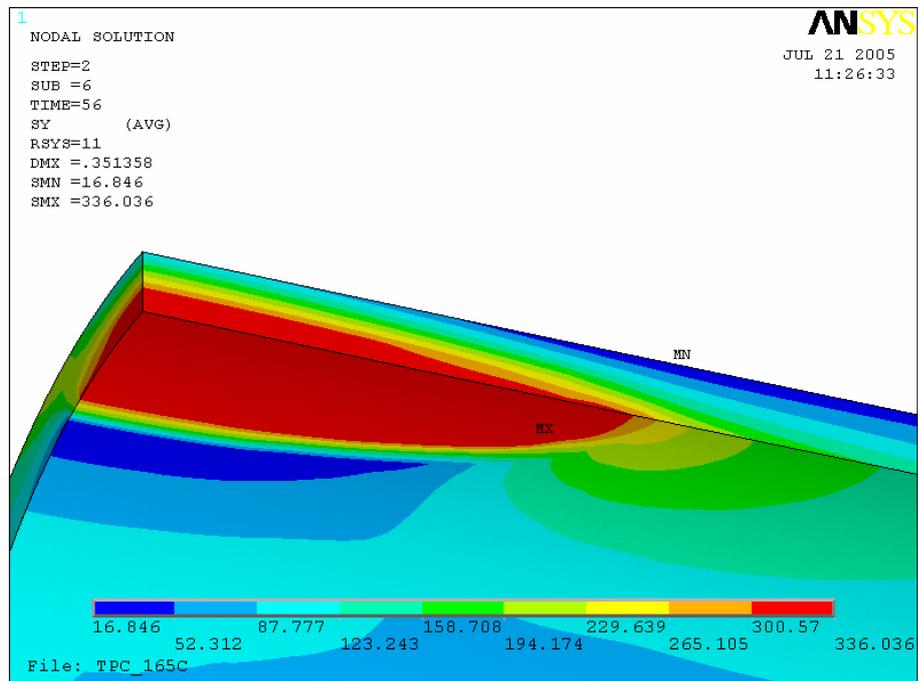


Figura A8. Detalhes das tensões circunferenciais no reparo

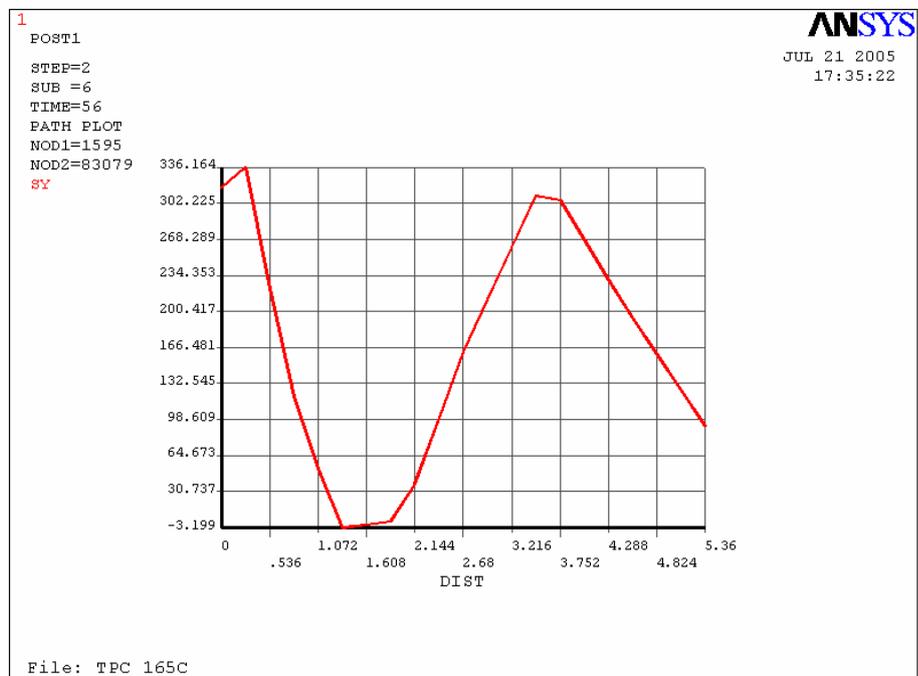


Figura A9. Tensões circunferenciais ao longo da espessura

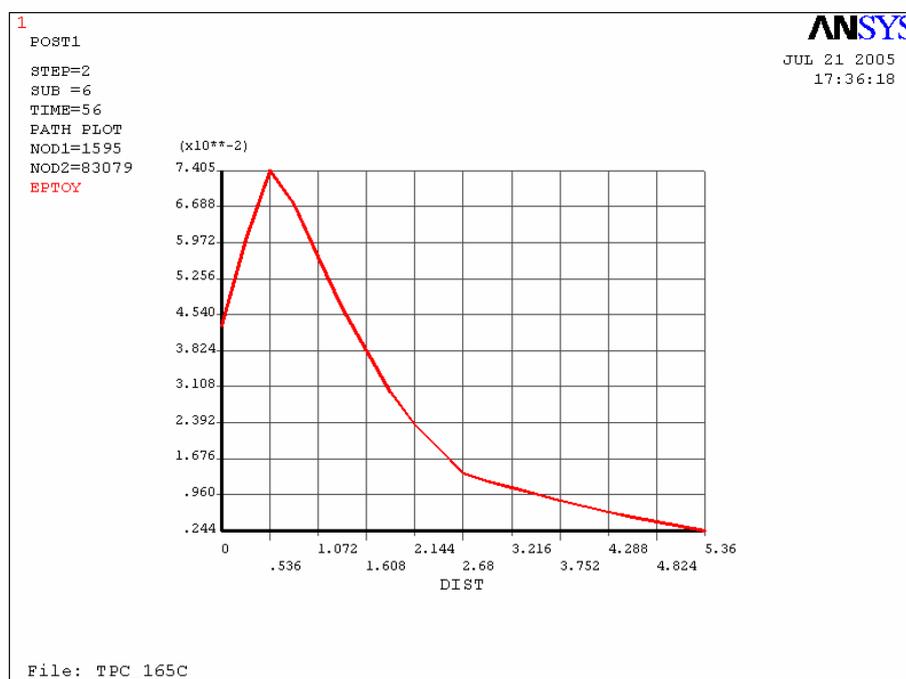


Figura A10. Deformações circunferenciais ao longo da espessura

A figura A6 mostra o tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático. O reparo não apresentou nenhum sinal de degradação e a ruptura ocorreu na região livre do tubo. Note-se um abaulamento surgindo logo após o término do reparo aumentando no local da falha.

A pressão estudada foi 56 MPa. Os modelos numéricos das figuras A7 e A8 mostram as distribuições das tensões circunferenciais da estrutura e detalhes dessas tensões no compósito, respectivamente.

Através da análise dos resultados mostrados na figura A7, verifica-se que a indicação da máxima tensão recai na parte livre do tubo, fora do reparo, cujo valor está em torno de 395 MPa, acima do limite de resistência do aço, mostrando a tendência do rompimento nessa região.

Verifica-se, ainda, na figura A8 que o reparo apresenta uma pequena área onde aparecem tensões altas entre 300 e 336 MPa.

Mas, verificando-se os resultados do gráfico da figura A9, que define os valores ao longo da espessura do reparo no centro do defeito, constata-se que as tensões estão na faixa de 302 MPa, o que significa que não houve o comprometimento da resistência do material compósito.

O gráficos da figura A10 mostra as deformações circunferenciais ao longo da espessura no centro do defeito, e os valores obtidos revelam as deformações da ordem de 7,4 % no aço e 0,9 % no compósito.

Na tabela A2 são mostrados os resultados das tensões circunferenciais na estrutura. Os resultados numéricos estão

Tabela A2 Tensões circunferenciais na estrutura

TUBO TPC 165 C	PRESSÃO (MPa)	TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS (MPa)			
		Gráfico		Modelo	
	56	Tubo 336	Compósito 302	Tubo 287-356	Compósito 300-356

A partir desses resultados, conclui-se que o compósito suportaria a pressão aplicada e a tendência seria a ruptura acontecer na região livre do tubo, conforme foi verificado no experimento.

AI.3 TUBO TPC 163 C



Figura A11. Tubo TPC 163 C após ensaio hidrostático

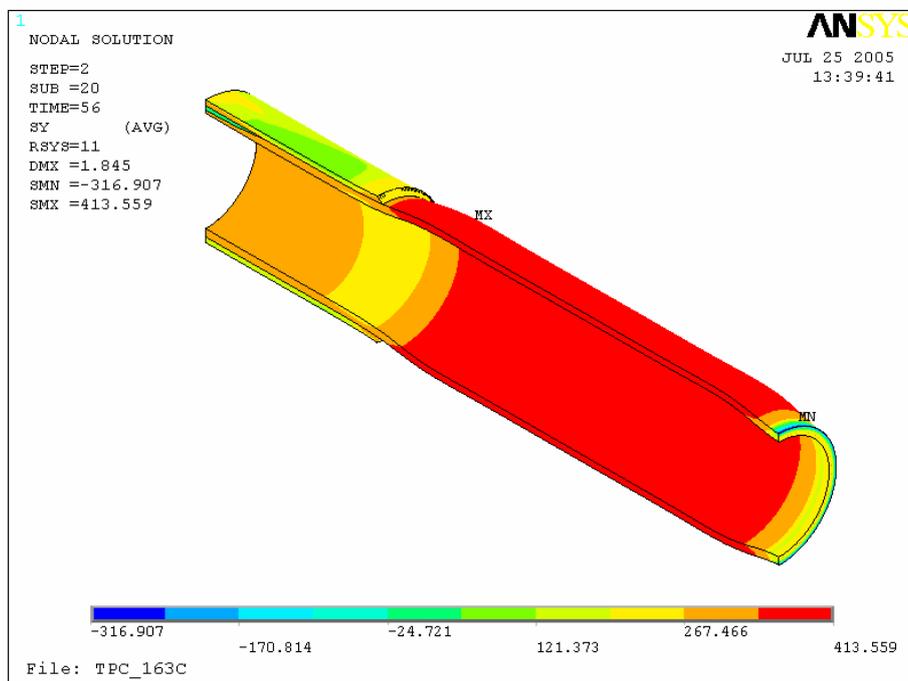


Figura A12. Tensões circunferenciais na estrutura

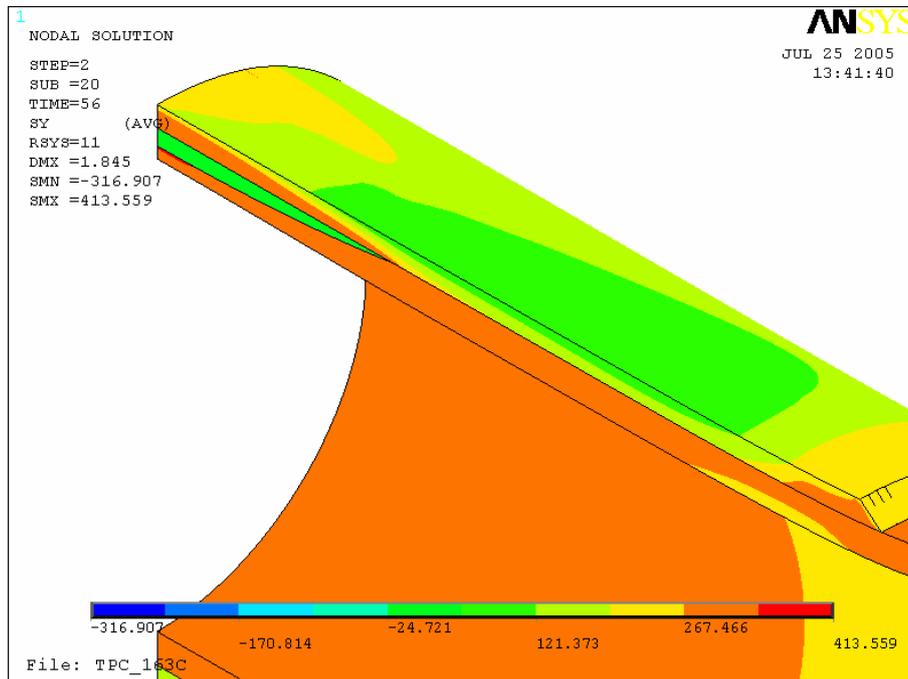


Figura A 13. Detalhes das tensões circunferenciais na estrutura

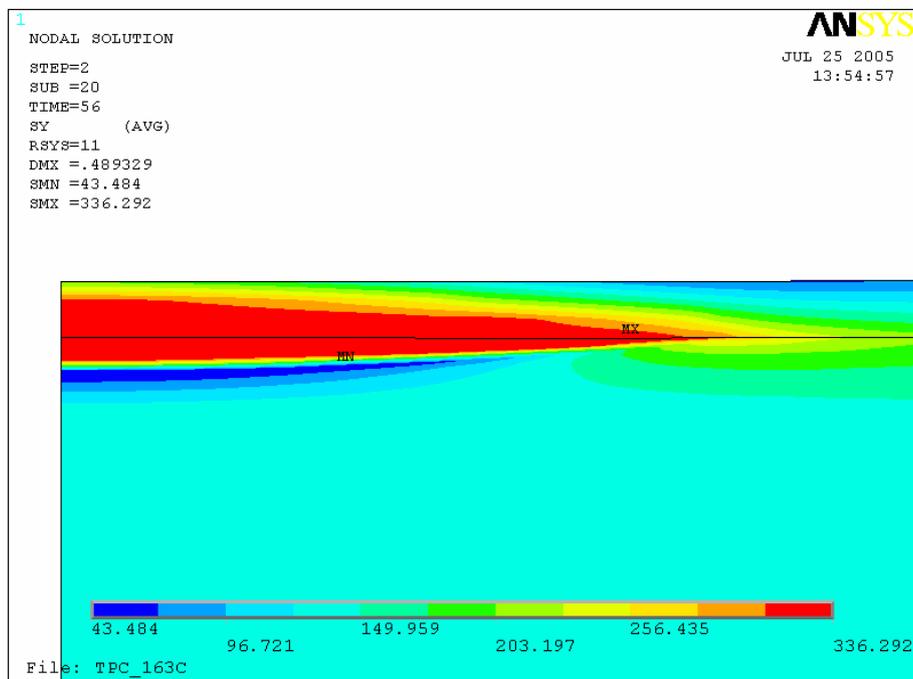


Figura A14. Detalhes das tensões circunferenciais no reparo

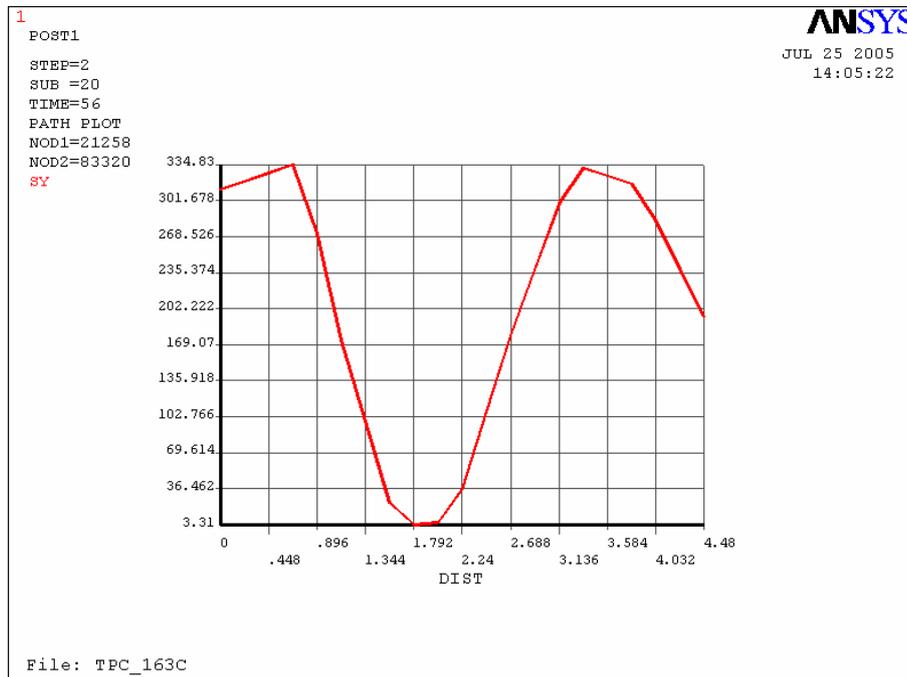


Figura A15. Tensões circunferenciais ao longo da espessura

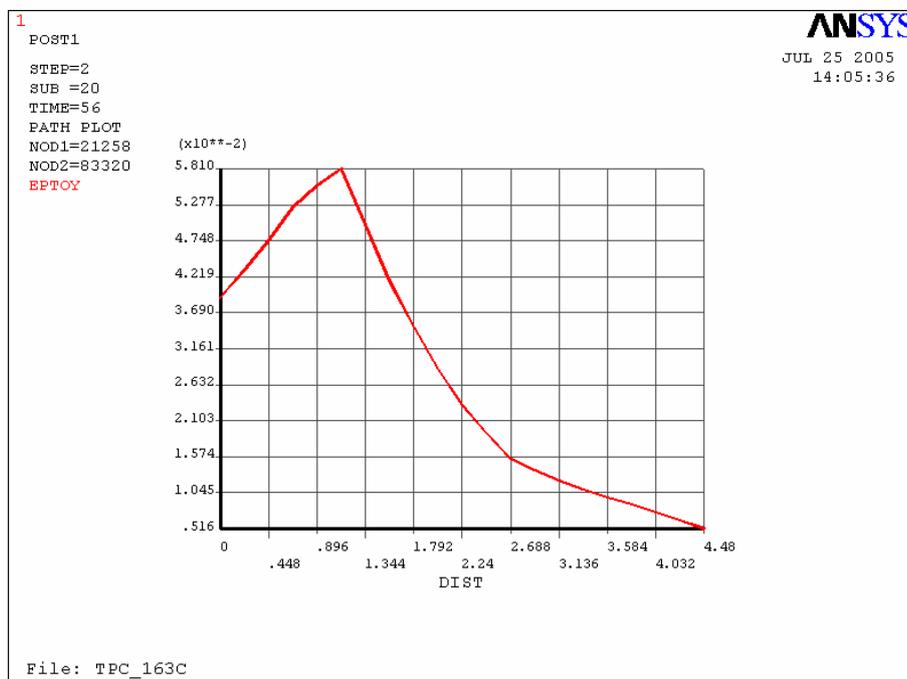


Figura A16. Deformações circunferenciais ao longo da espessura

A figura A11 mostra o tubo TPC 165 C após ensaio hidrostático. A ruptura do reparo teve início nos bordos do compósito. Ainda podem ser vistas áreas intactas do reparo. Note-se, também, o acentuado abaulamento na falha, o rasgamento do compósito no defeito e fibras do tecido que ainda não romperam, onde houve a falha da matriz.

A pressão estudada foi de 56 MPa e os modelos das figuras A12, A13 e A14 mostram, as distribuições da tensões circunferenciais da estrutura e detalhes dessas tensões no compósito.

Através da análise dos resultados mostrados na figura A12, verifica-se que a indicação da máxima tensão recai na parte livre do tubo, fora do reparo, cujo valor está em torno de 413 MPa, acima do limite de resistência do aço.

Mas verifica-se, na figura A14, que o reparo apresenta em uma área significativa ao longo da sua espessura, tensões altas em torno de 336 MPa.

Através do gráfico da figura A15, que define os valores alcançados, verifica-se que as tensões estão na faixa entre 317 e 334 MPa indicando que houve, assim, um comprometimento da resistência do material compósito.

O gráfico da figura A16 mostra as deformações circunferenciais na região estudada. As deformações no aço são da ordem de 5,8 % e no compósito de 1,5 %.

Os valores obtidos podem ser acompanhados na tabela A3 abaixo.

Tabela A3 Tensões circunferenciais na estrutura

TUBO TPC 165 C	PRESSÃO (MPa)	TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS (MPa)			
		Gráfico		Modelo	
	56	Tubo 334	Compósito 334	Tubo 267-413	Compósito 256-336

A partir desses resultados, conclui-se que o compósito não suportaria a pressão aplicada e a tendência seria a ruptura acontecer na região do defeito, conforme foi verificado no experimento.

AI.4 TUBO TPC 165 E



Figura A17. Tubo TPC 165 E após ensaio hidrostático

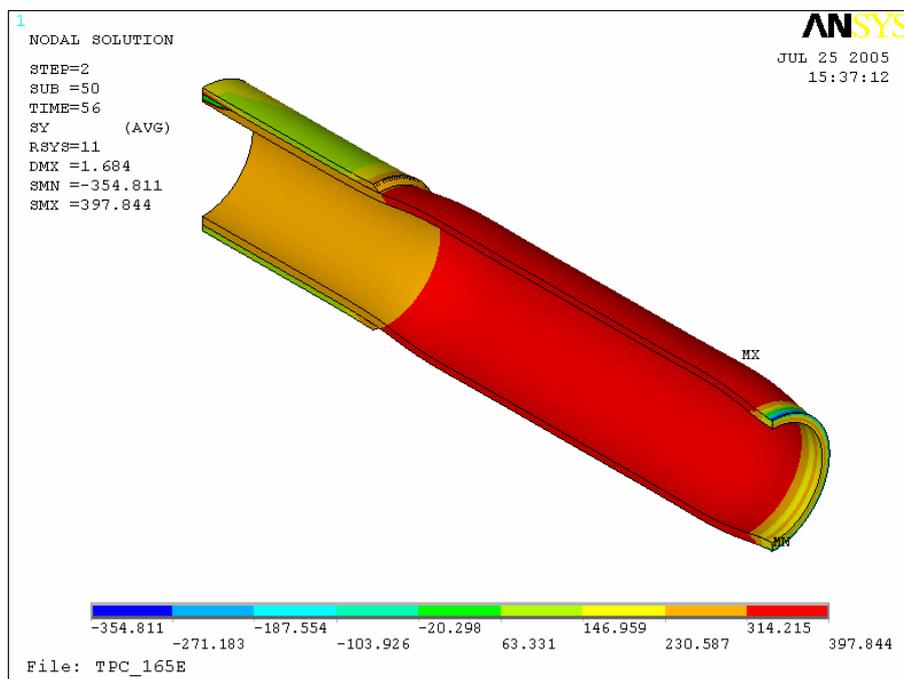


Figura A18. Tensões circunferenciais na estrutura

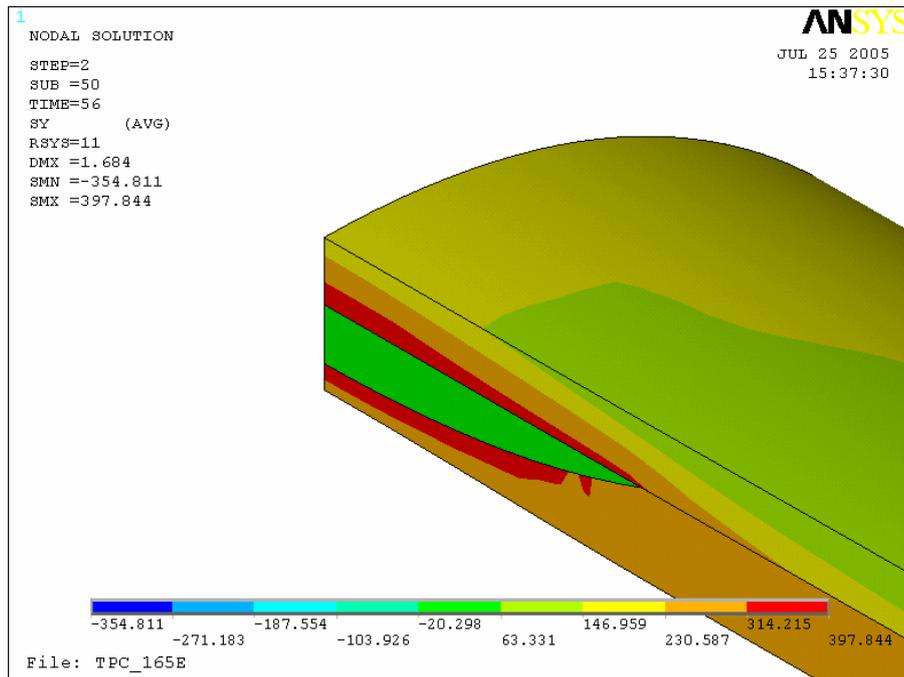


Figura A19. Detalhes das tensões circunferenciais da estrutura

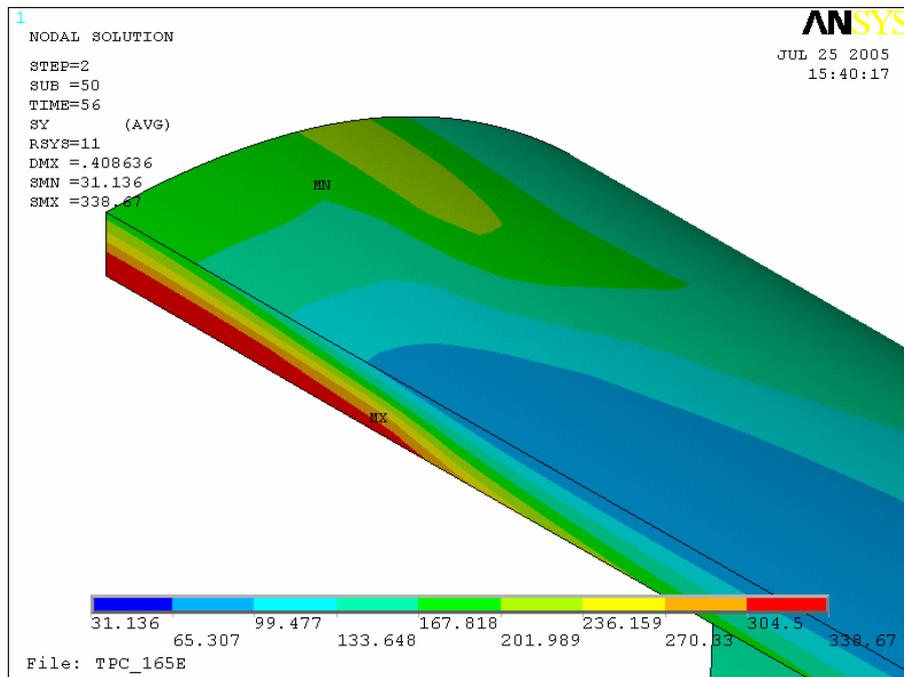


Figura A20. Detalhes das tensões circunferenciais no compósito

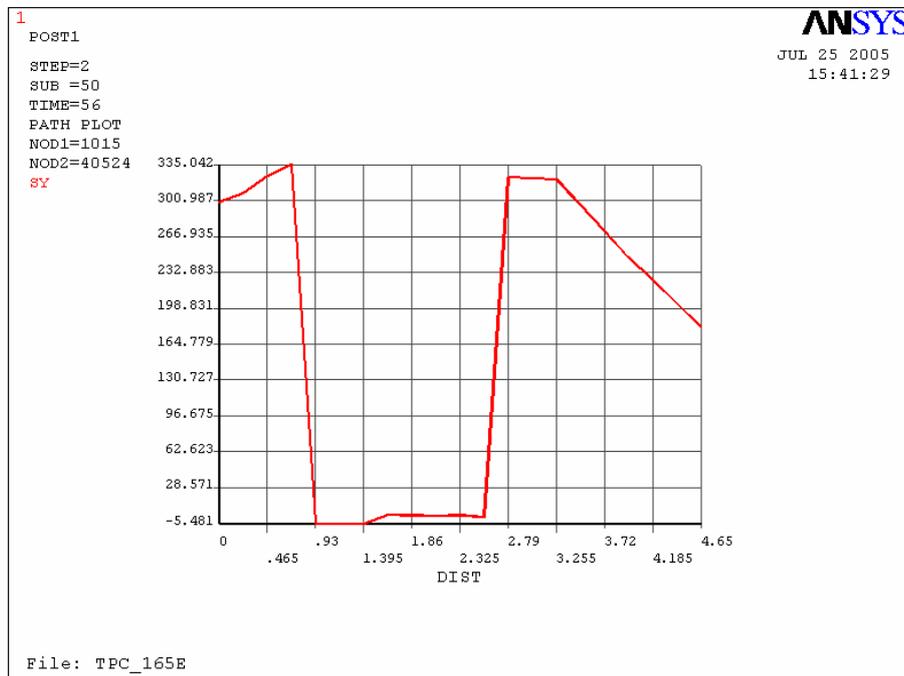


Figura A21. Tensões circunferenciais ao longo da espessura

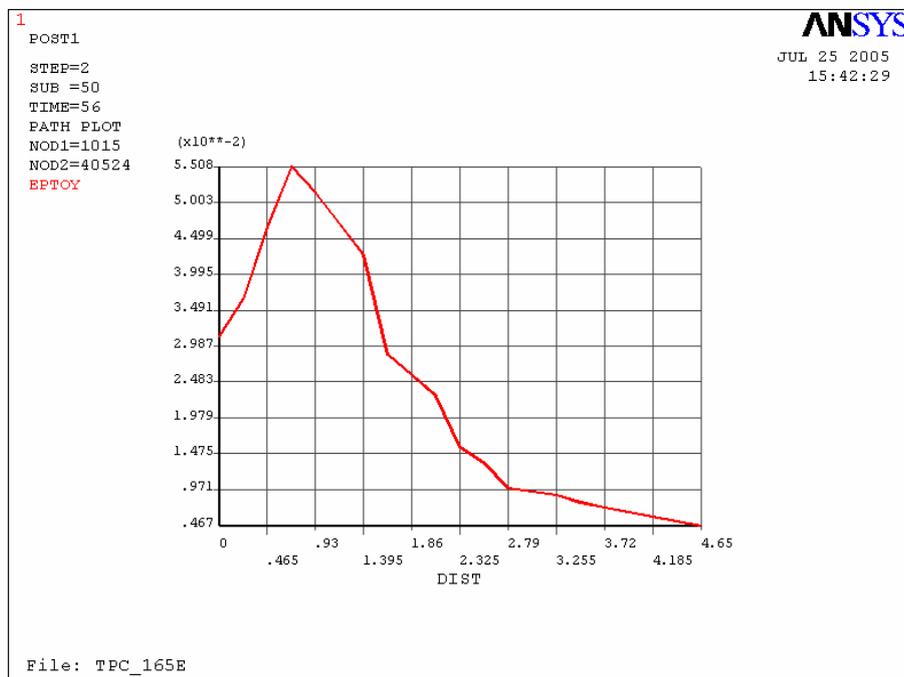


Figura A22. Deformações circunferenciais ao longo da espessura

A figura A17 mostra o tubo TPC 165 E após ensaio hidrostático. O reparo permaneceu intacto. Note-se abaulamento na falha, na área livre do tubo.

A pressão estudada foi de 56 MPa e os modelos das figuras A18 e A19 mostram, respectivamente, as distribuições das tensões circunferenciais da estrutura e detalhes dessas tensões no compósito.

Através da análise dos resultados mostrados na figura A18, verifica-se que a indicação da máxima tensão recai na parte livre do tubo, fora do reparo, cujo valor está em torno de 397 MPa, acima do limite de resistência do aço.

Mas verifica-se, na figura A19, que o reparo apresenta em uma área relativamente pequena, ao longo da sua espessura, tensões entre torno de 304,5 e 338,67 MPa. Através do gráfico da figura A20, que define os valores alcançados, verifica-se que as tensões estão na faixa entre 317 MPa caindo para valores em torno de 181 MPa, na sua superfície externa. Não houve, assim, um comprometimento da resistência do material compósito.

O gráfico da figura A21 mostra as deformações circunferenciais na região estudada, com valores no tubo em torno de 5 % e no compósito desde 0,97 % na parte interna em contato com o material de enchimento até 0,4 % na superfície mais externa.

Os valores das tensões circunferenciais obtidos podem ser vistos na tabela A4 abaixo.

Tabela A4 Tensões circunferenciais na estrutura

TUBO TPC 165 C	PRESSÃO (MPa)	TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS (MPa)			
		Gráfico		Modelo	
	56	Tubo 335	Compósito 317	Tubo 314-397	Compósito 304-338

A partir desses resultados, conclui-se que o compósito suportaria a pressão aplicada e a tendência seria a ruptura acontecer fora do reparo, conforme foi verificado no experimento.

ANEXO II

C*** DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO DUTO - AÇO SAE 1020

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,21e4
MPDATA,PRXY,1,,.3
TB,MISO,1,1,8,
TBTEMP,0
TBPT,,0.0013,273.00
TBPT,,0.0515,324.70
TBPT,,0.1052,367.89
TBPT,,0.1629,385.50
TBPT,,0.2219,392.95
TBPT,,0.2840,395.89
TBPT,,0.3499,396.92
TBPT,,0.3939,393.36
```

C*** DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO ENCHIMENTO DO DEFEITO - RESINA

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1440
MPDATA,PRXY,2,,0.35
TB,MISO,2,1,11
TBTEMP,0
TBPT,,0.0197,28.368
TBPT,,0.0218,30.10
TBPT,,0.0296,35.10
TBPT,,0.0305,35.37
TBPT,,0.0317,36.01
TBPT,,0.0398,37.23
TBPT,,0.0421,37.33
TBPT,,0.0448,37.23
TBPT,,0.0474,36.81
TBPT,,0.0508,36.30
TBPT,,0.0537,35.82
```

C*** DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO COMPÓSITO

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,36710
MPDATA,PRXY,3,,0.17
TB,MISO,3,1,3,
TBTEMP,0
TBPT,,0.008,293.68
TBPT,,0.0085,310
TBPT,,0.0088,317
```