

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ANÉIS COMPÓSITOS
ÍNTEGROS OU COM DEFEITOS SUBMETIDOS A ENSAIO DE TRAÇÃO

Irwin Guedes Alves

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

Aprovada por:

Prof^a. Lavinia Maria Sanabio Alves Borges, D.Sc.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida, D.Sc.

Prof. Nestor Zouain Pereira, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph. D.

Prof. Carlos Alberto de Almeida, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2006

ALVES, IRWIN GUEDES

Análise do Comportamento Mecânico de
Anéis Compósitos Íntegros e com Defeitos
Submetidos a Ensaio de Tração [Rio de
Janeiro] 2006

XIV, 138 p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Mecânica, 2006)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE

1. Material Compósito
 2. Ensaio de tração em anéis
- I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Pelo que Deus o exaltou
soberanamente,
e lhe deu um nome que é
sobre todo o nome,
para que ao nome de Jesus se
dobre todo joelho
dos que estão nos céus, na
terra e debaixo da terra,
e toda língua confesse que
Cristo Jesus é o Senhor,
para glória de Deus Pai.

(Filipenses 2:9-11)

AGRADECIMENTOS

À Deus Pai, Filho e Espírito Santo por ser meu conselheiro, por me dar força, disposição, paciência, persistência, saúde, enfim por tornar possível a concretização dessa etapa.

Aos meus orientadores Lavinia M. S. Alves Borges e José Roberto M. d'Almeida pela irrestrita disponibilidade, pelo acompanhamento contínuo durante a dissertação, pelos conhecimentos transmitidos, pela amizade, pela confiança e oportunidade que me foi dada de desenvolver esse trabalho.

À minha noiva Ana Beatriz S. Camussi. Obrigado por você existir, pela paciência, pela compreensão, pela ajuda, pelas orações, pelo companheirismo e por ser a mulher que é. Eu amo você.

Aos meus pais. Obrigado mãe pelo incentivo, paciência e orientação. Obrigado pai pelo apoio e confiança.

À minha irmã Virna e meu cunhado por fazerem parte da minha família e pela grande amizade que temos.

Ao professor Romildo Toledo, do PEC, por ter cedido o equipamento para realização dos ensaios mecânicos e os técnicos que auxiliaram os ensaios.

Ao professor José Stockler, do PEM, por permitir o corte dos corpos de prova e aos técnicos pelo empenho e profissionalismo na realização dessa tarefa.

À professora Verônica Calado, da Escola de Química, por ceder o Laboratório de Compósitos para as inúmeras tentativas do ensaio hidrostático e por toda ajuda no tratamento estatístico.

Ao professor Fernando Luiz Bastian, do PEMM, por transmitir seus conhecimentos de forma muito competente, pela amizade e por ter cedido o Laboratório para preparação dos corpos de prova.

Ao professor Juan Blás, do PEMM, por permitir a utilização do forno para tratamento térmico das garras.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Sólidos Julio Cesar, Fabio Comes, Erb, Daniel, Shirley, Leandro pelas conversas de onde por muitas vezes surgiam novas idéias e pela descontração do grupo.

Ao aluno Bruno Reis pelo auxílio e conhecimento transmitidos do Abaqus.

Aos funcionários da secretaria do PEM pelo apoio quando necessário.

À todos os meus parentes que direta ou indiretamente participaram dessa etapa da minha vida.

À CAPES pela bolsa de pós-graduação à nível de Mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ANÉIS COMPÓSITOS
ÍNTEGROS OU COM DEFEITOS SUBMETIDOS A ENSAIO DE TRAÇÃO

Irwin Guedes Alves

Junho/2006

Orientadores: Lavinia Maria Sanabio Alves Borges
José Roberto Moraes d'Almeida

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho tem como objetivo determinar a influência de defeitos na resistência mecânica de anéis compósitos, através da determinação das tensões de colapso dos anéis experimental e computacionalmente. Os anéis são obtidos a partir de tubos compósitos reforçados com fibra de vidro, fabricados pelo método de *filament winding*. Adota-se uma metodologia baseada em ensaios laboratoriais de anéis íntegros e com defeitos simulados por furos de dimensões variadas. Os experimentos consistem em ensaios de tração em anéis conforme o especificado pela norma ASTM D2290-00. Os dados obtidos são tratados estatisticamente, para avaliar a influência dos parâmetros geométricos dos defeitos na resistência dos anéis e comparados com os resultados da simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos e software específico. Resultados satisfatórios obtidos nos ensaios mecânicos experimentais, assim como nos modelos analíticos propostos, corroboraram com a hipótese da viabilidade da aplicação de tais ensaios de tração em anéis como meio de simplificação de testes hidrostáticos em tubos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE RINGS WITH OR WITHOUT DEFECTS
SUBMITTED TO SPLIT DISK TESTING

Irwin Guedes Alves

June/2006

Advisors: Lavinia Maria Sanabio Alves Borges
José Roberto Moraes d'Almeida

Department: Mechanical Engineering

This work aims to evaluate the influence of defects on the strength of machined composite rings, through the determination of their collapse stresses both experimental and computationally. The rings were obtained from glass-fiber reinforced pipes, manufactured by the filament winding process. The methodology used is based on laboratorial tests of rings presenting no defects or with cylindrical defects, which are intended to simulate damages of various dimensions. The rings tensile tests were performed following ASTM D2290-00 standards. The experimental data was statistically treated to evaluate the influence of the defect geometric parameters and the results were compared with solutions from computational simulations using finite elements a specific software. Satisfactory results obtained from the mechanical experiments and the analytical model are strong evidences to the proposed thesis that the split disk method is a way of simplification of burst tests in pipes.

SUMÁRIO

Capítulo I Introdução	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Metodologia	5
1.3 Conteúdo da Dissertação	7
Capítulo II Revisão da Literatura	8
2.1 Materiais Compósitos	8
2.1.1 Matriz Polimérica	12
2.1.1.1 Resina vinil-éster	15
2.1.2 Fibras de Vidro	17
2.1.2.1 Fibra de Vidro do Tipo E	19
2.1.3 Fabricação de Tubos Compósitos	20
2.1.4 Aplicações	25
2.1.5 Análise Comparativa entre materiais metálicos e compósitos	30
2.2 Estado de Tensões em Tubos submetidos à Pressão Interna	35
2.3 Mecanismos de Falha	38
2.3.1 Interface Matriz/Reforço	41
2.3.2 Efeito da Temperatura	42
2.3.3 Efeito da Absorção de Água, Petróleo e Derivados (Envelhecimento)	
.....	41
2.4 Ensaio de Tração e de Pressão Hidrostática	46
2.5 Análise numérica pelo método dos elementos finitos	50
Capítulo III Procedimento Experimental	52
3.1 Ensaio de Tração em Anéis	52
3.1.1 Confeção dos Corpos de Prova	52
3.1.2 Metodologia Adotada no Ensaio	58
3.1.3 Descrição do Equipamento de Ensaio de Tração em Anéis	60
3.1.4 Realização do Ensaio	62
3.2 Ensaio Hidrostático	64
3.2.1 Descrição do Equipamento de Ensaio Hidrostático	64
3.2.2 Problemas e possíveis soluções para realização do ensaio	64
3.3 Análise Estatística	69
3.4 Simulação computacional	69

Capítulo IV Resultados e Discussões	73
4.1 Considerações iniciais	73
4.2 Análise de tensões	74
4.2.1 Comparação entre os anéis modelados numericamente	79
4.2.2 Análise da região do plano médio	81
4.2.3 Análise comparativa relativa a posição da redução de seção	83
4.3 Análise Estatística	88
4.3.1 Tensão e módulo de elasticidade circunferenciais	88
4.3.2 Posições (girado ou não-girado) da redução de seção.....	90
4.4 Simulação Computacional	92
Capítulo V Conclusões	97
Capítulo VI Propostas Futuras	98
Referências	99
Apêndice A Dimensões da garra	105
Apêndice B Análise de Tensões da Garra – Solução Analítica	106
Apêndice C Análise de Tensões da Garra e no Pino – Solução Numérica	110
Apêndice D Dimensões dos anéis e forças de ruptura dos corpos de prova para efeito de cálculo	112
Apêndice E Resultados calculados para todos os corpos de prova	116
Apêndice F Cálculo da tensão circunferencial de referência ($\sigma_{\theta R}$) e pressão interna máxima (p).....	121
Apêndice G Análise de Tensão dos corpos de prova.....	122
Apêndice H Simulação computacional - Análise de tensões	124
Apêndice I Análise Estatística	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação entre os compósitos reforçados por fibra e os materiais metálicos, no que se refere a tensão específica (resistência/densidade) e módulo específico (rigidez ou módulo de elasticidade/densidade)	9
Figura 2: Comportamento do limite de resistência da fibra. Fonte: GIBSON (1994)	11
Figura 3: Gráfico tensão versus deformação para o compósito e suas fases.....	12
Figura 4: Ilustração de mantas de fibra de vidro	18
Figura 5: Ilustração de “roving” contínuo de fibra de vidro	19
Figura 6: Equipamento de enrolamento filamental (“filament winding”)	21
Figura 7: Processo de cura e remoção do mandril	21
Figura 8: Fabricação de riser por filament winding	22
Figura 9: Pressão de colapso versus ângulo de enrolamento	24
Figura 10: Aeronave de combate V22 Osprey	26
Figura 11: Helicóptero alemão BK117	26
Figura 12: Compósitos aplicados em torres de resfriamento	27
Figura 13: Dutos compósitos em aplicação marítima	28
Figura 14: Dutos compósitos em aplicações terrestres	29
Figura 15: Componentes da plataforma	33
Figura 16: Representação de tensões atuantes em uma tubulação	36
Figura 17: Danos locais em compósitos laminados	39
Figura 18: Tensão longitudinal do CFRP versus pressão hidrostática para os modos de falha A (●), B (■), C (◇) e D (□)	40
Figura 19: Tensão longitudinal do GFRP versus pressão hidrostática para os modos de falha A (●), B (■), C (◇) e D (□)	40
Figura 20: Gráfico de absorção de água das resinas epóxi, vinil éster e de poliéster devido a imersão em água à temperatura ambiente	43
Figura 21: Absorção de água em função do tempo de exposição e temperatura para os compósitos de matriz polibutileno tereftalato (PBT)	44
Figura 22: Tensão máxima em função do tempo de exposição e temperatura para os compósitos de matriz polibutileno tereftalato (PBT)	44
Figura 23: Garra utilizada no ensaio de tração em anéis compósitos	47
Figura 24: Ilustração da flexão localizada na região do plano médio, através do gráfico Distância circunferencial a partir do plano médio versus deformação circunferencial	48
Figura 5: Tubo de material compósito	53

Figura 26: Vistas do anel obtido a partir do corte dos tubos	54
Figura 27: Vistas do anel com suas dimensões principais	55
Figura 28: Posições do defeito e da redução de seção para: (a) anel com defeito na posição I (não-girado), (b) anel com defeito na posição II (girado), (c) anel íntegro alinhado (IAlinhado)	58
Figura 29: Extensômetro colado e soldado	60
Figura 30: Prensa para o ensaio de tração	61
Figura 31: Condicionador de aquisição de dados dos extensômetros	61
Figura 32: Tela de dados e configuração da prensa	62
Figura 33: Esquema ilustrativo do ensaio de tração em anéis	63
Figura 34: CLP do equipamento para ensaio hidrostático	65
Figura 35: Tubo engastado por flanges e o poço	66
Figura 36: Principais componentes eletro-mecânicos	66
Figura 37: Vazamentos devido ao escorregamento das borrachas de vedação	67
Figura 38: Molde de madeira e resina para aumento de espessura quebrada	68
Figura 39: Condições de contorno	70
Figura 40: Deslocamento aplicado nos semi-discos	71
Figura 41: Tensão circunferencial aparente <i>versus</i> deformação circunferencial	75
Figura 42: Tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para os corpos de prova (I#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (I [*])	76
Figura 43: Tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV4D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV4D [*])	77
Figura 44: Tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV8D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV84D [*])	77
Figura 45: Tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para os corpos de prova (CD5P12D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CD5P12D [*])	78
Figura 46: Tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV12D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV12D [*])	78
Figura 47: Gráfico tensão circunferencial <i>versus</i> deformação circunferencial para o modelo teórico (Tubo) e o anel na configuração alinhado (IAlinhado [*])	79
Figura 48: Tensão circunferencial na largura da redução de seção (L_{RedSec})	80
Figura 49: Tensão circunferencial <i>versus</i> distância circunferencial a partir do plano médio	81
Figura 50: Tensão circunferencial <i>versus</i> espessura	82
Figura 51: Tensão circunferencial <i>versus</i> ângulo a partir do plano médio	83
Figura 52: Anel CDV4D [*] - Tensão circunferencial <i>versus</i> ângulo a partir do plano médio	84

Figura 53: Tensão circunferencial versus ângulo a partir do plano médio: (a) anel CDV8D*, (b) anel CD5P12D*, (c) anel CDV12D*	85
Figura 54: Tensão circunferencial no comprimento do tubo com defeito	86
Figura 55: Tensão circunferencial em 1/3 do comprimento do tubo	87
Figura 56: Tensão circunferencial versus ¼ da circunferência do tubo	87
Figura 57: Valores médios da tensão em função do tipo de corpo de prova	89
Figura 58: Valores médios do módulo de elasticidade em função do tipo de corpo de prova	90
Figura 59: Valores médios tensão em função do posicionamento	91
Figura 60: Valores médios do módulo de elasticidade em função do posicionamento	91
Figura 61: Tipos de falhas: A – trincas perpendiculares às fibras, B – trincas circunferenciais pequenas e C – trincas paralelas às fibras	92
Figura 62: Características apresentadas nas proximidades da região de fratura	93
Figura 63: Tensão máxima de ruptura circunferencial aparente <i>versus</i> tipo de fratura .	96
.....	96
Figura 64: Valores médios da tensão em função do tipo de falha	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos sistemas de resina em compósitos	14
Tabela 2: Propriedades típicas da resina vinil éster	16
Tabela 3: Propriedades típicas da fibra de vidro tipo E	20
Tabela 4: Características de diferentes fibras	20
Tabela 5: Principais aditivos usados em compósitos	31
Tabela 6: Faixa de custo para componentes offshore fabricados em compósitos	31
Tabela 7: Comparação de custos entre RTP e aço carbono	32
Tabela 8: Comparação de peso entre componentes fabricados em aço e em materiais compósitos	33
Tabela 9: Comparação de peso e custo para decks de plataformas feitos em componentes metálicos e em compósitos	34
Tabela 10: Comportamento de diferentes resinas poliéster e éster vinílica submetidas a exposição em diferentes agentes químicos por um período de um ano	45
Tabela 11: Quantidade de anéis ensaiados para cada tipo de anel	56
Tabela 12: Deslocamento máximo médio para cada grupo de corpo de prova	70
Tabela 13: Tipo de elemento, número de elementos e nós para os modelos numéricos	71
Tabela 14: Tensões circunferenciais aparente média para cada grupo de corpos de prova	73
Tabela 15: Tipo de falha em função da tensão de ruptura	95

LISTA DE SÍMBOLOS

FRP	<i>Fiber-reinforced Plastics</i>
GFRC	<i>Glass Fiber-Reinforced Composite</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
I#	anéis íntegros
SRS#	anéis íntegros e sem redução de seção
CDV4D#	anéis com defeitos vazantes e de 4mm de diâmetro
CDV8D#	anéis com defeitos vazantes e de 8mm de diâmetro
CD5P12D#	anéis com defeitos de 5mm de profundidade e 12mm de diâmetro
CDV12D#	anéis com defeitos vazantes e de 12mm de diâmetro
σ_{θ}	tensão de ruptura circunferencial
E_{θ}	módulo de elasticidade circunferencial
F_r	força de ruptura
$\sigma_{\theta Ap}$	tensão de ruptura circunferencial aparente
A_m	área média
ε_{θ}	deformação circunferencial
u_x	deslocamento em relação ao eixo cartesiano x
u_y	deslocamento em relação ao eixo cartesiano y
u_z	deslocamento em relação ao eixo cartesiano z
d_m máx	deslocamento máximo médio
$\sigma_{\theta R}$	tensão circunferencial de referência
F	força de tração média
t	espessura do corpo de prova
Δz	largura do corpo de prova
p	pressão interna
R_i	raio interno do anel
I*	modelo numérico para os anéis I#
CDV4D*	modelo numérico para os anéis CDV4D#
CDV8D*	modelo numérico para os anéis CDV8D#
CD5P12D*	modelo numérico para os anéis CD5P12D#
CDV12D*	modelo numérico para os anéis CDV12D#

I	modelo numérico do anel íntegro no posicionamento alinhado
L_{RedSec}	largura da redução de seção
l	distância l na largura da redução de seção
α	ângulo que percorre uma distância circunferencial a a partir do plano médio
t	espessura
a	distância a na espessura

Capítulo I

Introdução

Nas últimas décadas, o surgimento de novos materiais assumiu maior destaque em relação às décadas anteriores. Assim, tanto os polímeros quanto os compósitos, principalmente os de matriz polimérica, têm sido largamente pesquisados e utilizados na fabricação de componentes em todos os ramos da engenharia e, principalmente, em projetos inovadores.

Observa-se, com incidência crescente, a aplicação de compósitos na substituição de materiais convencionais, principalmente os metálicos, devido a propriedades como alta rigidez e resistência específica, baixo peso e durabilidade pela capacidade de proteção corrosiva, somadas ao amortecimento de choques e vibrações. Tais benefícios os fazem presentes nas indústrias naval, petrolífera, química, aeronáutica e automobilística em aplicações civil e militar.

Autores, como JEYAPALAN (1990) destacam a relevância desses materiais dentre aqueles que são utilizados em dutos para o escoamento de água, petróleo, gás natural, vapor e outros fluidos sob pressão. De fato, diante da produção de petróleo e o consumo de derivados crescente a cada ano, é preciso também que o cuidado com o transporte e transferência desses produtos acompanhe esse crescimento.

A atualidade e interesse crescente desse tema estão evidentes em estudos, similares ao da Bacia de Santos, sobre a possibilidade de transportar o gás natural diretamente para o continente, sem passar por plataformas de produção, como ocorre normalmente em projetos de produção de petróleo. Essa tecnologia é denominada de *subsea to beach* (do fundo do mar para a praia). Essa forma de transporte permitirá redução no custo de exploração do gás. O sistema prevê a produção seguindo por um único duto até o continente, para depois ser distribuída para a malha de transporte de gás.

Além disso, devido a crescente demanda energética, a construção de termelétricas por todo o território nacional é a principal alternativa para minimizar o déficit de energia elétrica. Esta iniciativa irá contribuir para uma maior participação do gás na matriz energética brasileira e, conseqüentemente, maior consumo de gás (também consumido pela indústria) transportado por novos gasodutos.

O avanço tecnológico, aliado às alterações da matriz energética, causou impacto positivo na aplicação de dutos de materiais compósitos no setor industrial. Atualmente, adota-se uma abordagem mais rigorosa quanto à avaliação desses materiais, para assegurar melhor desempenho quando em serviço, em comparação com outros materiais reconhecidamente utilizados – e.g. o aço e o ferro galvanizado.

Considerando os dutos, para transporte de petróleo e seus derivados, que estão em fase de construção e outros projetos que já estão sendo implantados, estima-se que a malha nacional passe dos atuais 20 mil quilômetros para cerca de 30 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos até 2008 (PETROBRAS, 2005).

Existem dutos de várias modalidades e fabricados com diferentes materiais, cada qual com características únicas e utilizados com diversas finalidades. Dentre esses estão os tubos compósitos, que se beneficiam de sua alta resistência à corrosão e abrasão, rapidez de montagem, menor custo de fabricação, além do baixo peso.

Alguns fatores causam restrições para a aceitação de plásticos reforçados por fibras (FRP – *Fiber-reinforced Plastics*) pela indústria naval e petroquímica. Essas restrições estão relacionadas:

- ao conhecimento insuficiente do comportamento mecânico, em parte, devido à pequena quantidade de estudos teórico-experimentais para analisar o comportamento do material compósito reforçado por fibra de vidro (GFRC – *Glass Fiber-Reinforced Composite*), quando submetido às condições de carregamento hidrostático;
- às influências dos defeitos, e,
- a ausência de dados consistentes em determinadas aplicações específicas.

Dessa forma, sob um enfoque estrutural, o comportamento dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra de vidro deve ser investigado e analisado, estabelecendo-se, as condições de serviço a que podem ser submetidos. Isto significa uma grande demanda por pesquisas cientificamente fundamentadas.

Atualmente, o desenvolvimento da tecnologia de dutos apresenta os seguintes desafios:

- aumentar a confiabilidade operacional dos dutos,
- aumentar a vida útil da malha de dutos existentes,

- aumentar a capacidade operacional dos dutos,
- minimizar o risco de vazamentos,
- minimizar os custos operacionais e de investimentos, e
- reduzir o tempo de reparo.

Uma das principais justificativas para a adoção dos testes hidrostáticos está na possibilidade de obtenção de dados relativos às características primordiais dos compósitos quando empregados em dutos. Dentre estas, pode-se destacar: a rigidez, o carregamento, a pressão hidrostática e a tensão de ruptura.

Um exemplo de aplicação de vantagens do material compósito, tais como alta dureza e resistência, são vasos de pressão (LIFSHITZ *et al.*, 1995). Destaca-se que, antes dos vasos de pressão serem aprovados para uso comercial, são requeridas considerações de segurança, como testes sob condições severas. Um teste essencial é o de pressão de colapso, que deve ser muito mais elevada do que a pressão de operação (LIFSHITZ *et al.*, 1995).

Todos esses dados podem ser analisados por programas computacionais, que são grandes ferramentas para análise e comparação de dados. Tais programas permitem a simulação de situações reais ou hipotéticas, possibilitando, assim, a previsão da tensão de colapso, isto é, estabelecendo as condições limítrofes para o material, para evitarem-se acidentes, por vezes de proporções catastróficas.

1.1 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa é estudar o comportamento de anéis compósitos íntegros ou com defeitos.

Para consecução desse objetivo foi necessário:

- investigar as tensões de colapso dos anéis experimental e computacionalmente;
- analisar os resultados obtidos em laboratório e nas simulações;
- determinar o limite de resistência conforme especificado pela norma ASTM D2290-00; e
- analisar o comportamento do limite de resistência dos corpos de prova, quando submetidos a diferentes tipos de defeitos.

Os objetivos foram delineados considerando-se a maior facilidade do ensaio de tração em anéis, para obtenção das propriedades mecânicas, em relação a outros ensaios mecânicos como, por exemplo, o teste hidrostático, são realizados ensaios de tração em anéis para determinação da tensão circunferencial e do módulo de elasticidade circunferencial do material compósito em estudo.

1.2 Metodologia

A metodologia do trabalho se concentrou em ensaios laboratoriais em anéis. Estes forma obtidos a partir de dutos de material compósito fabricados em resina éster-vinílica e reforçados com fibra de vidro.

A metodologia adotada será a seguinte:

(A) Procedimento experimental

Este procedimento consistiu no ensaio de tração em anéis.

- Determinação do limite de resistência dos anéis, os íntegros e os com defeitos, por ensaios de tração, conforme o especificado pela norma ASTM D2290-00; e
- submissão dos corpos de prova a diferentes tipos de defeitos para análise do comportamento do limite de resistência dos mesmos.

A determinação do módulo de elasticidade circunferencial foi efetuada através do uso de extensômetros localizados na região da fratura.

(B) Tratamento estatístico dos dados

Os dados obtidos experimentalmente ou calculados a partir destes, através de formulações da mecânica dos sólidos, foram tratados estatisticamente, por meio do *software* específico. Então, analisou-se o grau de influência dos defeitos sobre o limite de resistência, tanto nos dutos como nos anéis, para determinação do tipo de defeito e da variável geométrica que mais afeta a estrutura.

(C) Simulação computacional

A tensão de colapso obtida experimentalmente no ensaio de tração em anéis foi comparada com simulações computacionais em tubos e anéis. Para tanto, utilizado o *software* Abaqus®, apropriado para solucionar problemas de engenharia utilizando o método dos elementos finitos.

A abordagem em relação aos anéis simulados computacionalmente e ensaiados será tanto qualitativa como quantitativa.

A análise do duto é realizada a fim de estabelecer comparações qualitativas entre os modelos computacionais de anéis e tubo.

1.3 Conteúdo da Dissertação

O Capítulo II se refere à revisão bibliográfica. Neste, foi enfatizado os materiais compósitos e suas fases, citando, principalmente, as características dos constituintes presentes no material analisado. É abordado ainda,

O Capítulo III é caracterizado pelo seu estilo descritivo. Toda etapa experimental é explicada, apresentando nomenclaturas utilizadas, quantidade de corpos de provas, variáveis a serem analisadas e entre outros pontos primordiais ao entendimento da consecução experimental.

No Capítulo IV são apresentados os resultados primordiais para entendimento e posterior discussão.

As conclusões, recomendações com sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos são expostas no Capítulo V.

Nos Anexos são mostradas algumas características dimensionais dos corpos de prova, assim como resultados calculados. São apresentadas, ainda, figuras de análise de tensões das simulações computacionais complementares.

Capítulo II

Revisão da Literatura

2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos têm se tornado uma importante classe de materiais de engenharia, encontrando aplicações em vários setores, e em muitos casos substituindo materiais tradicionais como os aços.

As vantagens destes materiais sobre os metais são:

- menor densidade, permitindo significativa redução de peso significativa;
- elevadas propriedades mecânicas, no que se refere a resistência e rigidez;
- melhor resistência à corrosão, ao ataque químico e ao meio exterior;
- maior razão de resistência por densidade e módulo de elasticidade por densidade;
- menor custo de produção;
- flexibilidade nos projetos;
- a possibilidade de dispor os constituintes de forma a dar ao material as propriedades requeridas em função da direção de solitação.

A Figura 6 mostra uma comparação das tensões e módulos específicos (resistência/densidade) para os compósitos e os metais. Como pode ser observado, os compósitos podem adquirir propriedades superiores as dos metais.

Os materiais compósitos são formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz. Alguns consideram um compósito como uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, havendo uma interface entre eles. Porém, ainda hoje, não existe uma definição realmente adequada para materiais compósitos (SILVESTRE FILHO, 2001).

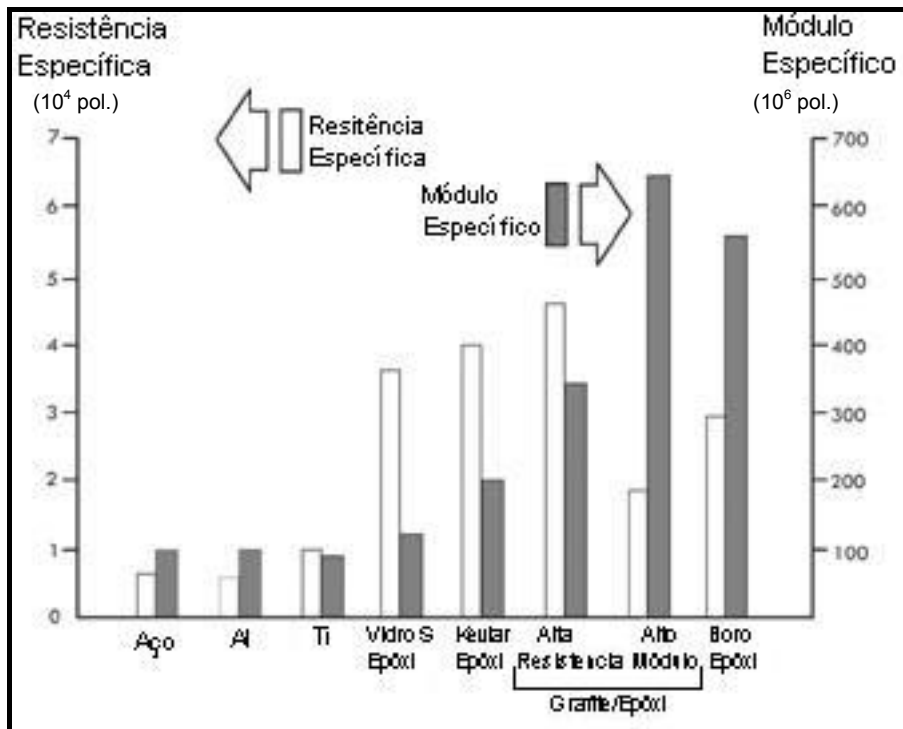


Figura 6: Comparação entre os compósitos reforçados por fibra e os materiais metálicos, no que se refere a tensão específica (resistência/densidade) e módulo específico (rigidez ou módulo de elasticidade/densidade).

Fonte: modificado de MARGOLIS (1985).

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 com propriedades diferentes aos componentes puros, podendo ser obtidos por combinação de metais, cerâmicos ou polímeros (UFSCar, 2005).

Por dependerem da proporção relativa entre as fases, foram desenvolvidas equações de análises micromecânicas que representam o comportamento do material. A partir dessas equações pode-se inferir sobre algumas propriedades do material, tais como módulo de elasticidade, razão de Poisson, módulo de cisalhamento e comportamento higrotérmico, de cada uma das partes e do produto final (VIZINHA, 2004).

Resultante dessas análises são algumas equações como a regra das misturas direta e inversa, que determinam, por exemplo, o comportamento do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de cisalhamento, conforme as Equações 1a e 1b, respectivamente, onde v_f e v_m são as frações volumétricas de fibra e matriz

respectivamente. Tal modelo micromecânico já se mostrou suficientemente preciso através de comparação com dados experimentais (GIBSON, 1994).

$$E_1 = E_{f1}v_f + E_m v_m \quad (1a)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_{f12}} + \frac{v_m}{G_m} \quad (1b)$$

Contudo, outras análises são discutidas. KRENCHER (1964) propõe a inclusão de um fator de eficiência variando de 1 a 0 de acordo com o tipo de reforço: fibras exclusivamente paralelas a força; dois ou mais grupos de fibras paralelas; fibras uniformemente distribuídas em todas as direções; fibras em planos paralelos e uniformemente distribuídas. Então, a partir deste fator determina-se um novo módulo de elasticidade, por exemplo.

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a matriz (metálica, cerâmica ou polimérica) e pelo tipo de reforço usado (fibras ou partículas).

As fibras que reforçam os materiais compósitos são constituídas, na verdade, por inúmeros filamentos. Esta configuração se deve ao fato de que determinados materiais são mais resistentes sob a forma fibrosa (GIBSON, 1994).

À medida que barras de vidro com diferentes diâmetros são submetidas à tração, estas apresentam maior resistência com a diminuição do diâmetro (CHAWLA, 1998), conforme o gráfico da Figura 7.

Aparentemente, este aumento de resistência se deve ao fato de que quanto menor for o diâmetro da fibra, menor a probabilidade desta apresentar defeitos superficiais indutores de falha, devido à fabricação ou manuseio.

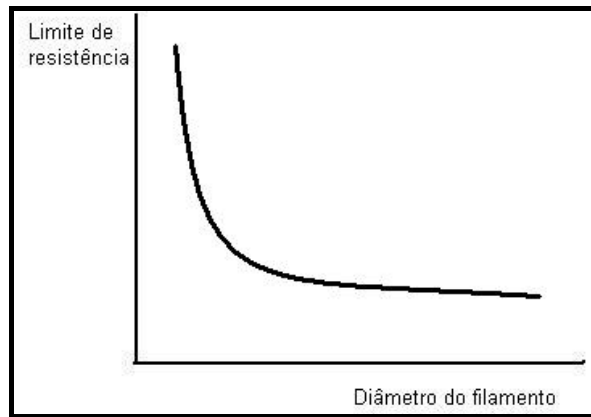


Figura 7: Comportamento do limite de resistência da fibra. Fonte: GIBSON (1994).

A flexibilidade de propriedades para aplicações específicas é um dos atributos mais importantes dos compósitos. Outra vantagem em relação aos materiais convencionais é que os compósitos podem ser fabricados para exibir propriedades específicas em direções preferenciais.

O uso de reforço contínuo da fibra confere um caráter direcional (anisotropia) às propriedades dos compósitos. O material compósito é mais resistente quando a força aplicada é paralela ao sentido das fibras (sentido longitudinal) e menos resistente quando a força é perpendicular às fibras (sentido transversal). Na prática, a maioria das estruturas está sujeita a cargas complexas, necessitando o uso de fibras orientadas em diversos sentidos (OCHOLA *et. al.*, 2004).

O compósito é projetado de modo que as cargas mecânicas a que está submetido em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades, de maneira geral, são influenciadas por vários fatores, entre os quais pode-se citar (JONES, 1998): tipo, orientação e distribuição das fibras, seqüência de empilhamento das fibras, geometria das fibras (comprimento, diâmetro, seção), fração volumétrica das fibras, características da interface entre fibra e matriz, propriedades da matriz e método de cura.

Desta forma, há muitas variáveis a considerar ao se projetar um compósito. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias sob as quais este será utilizado (GIBSON, 1994).

O conhecimento das propriedades mecânicas individuais dos componentes do material compósito, ou seja, da matriz e do reforço, é de fundamental importância na previsão das propriedades mecânicas.

Na Figura 8, é ilustrada a comparação das curvas tensão x deformação para o compósito e seus constituintes, a fibra e a matriz.

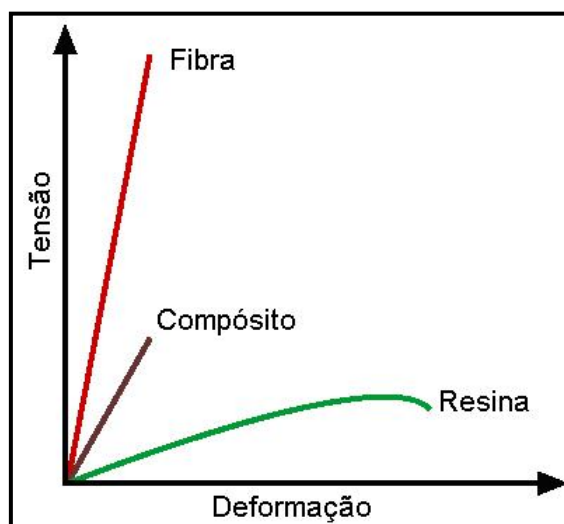


Figura 8: Gráfico tensão versus deformação para o compósito e suas fases.

Fonte: modificado de SPSYSTEM (2005).

Disponível em <http://www.spsystems.com>, A GUIDE OF COMPOSITE.

Para avaliar o desempenho total dos materiais compósitos, é essencial conhecer individualmente o papel da matriz do material, visto que os danos iniciais em um compósito são controlados pelo trincamento da matriz, que por sua vez depende de suas propriedades mecânicas (KHAN *et. al.*, 2002).

A seguir é feita uma explanação das matrizes poliméricas e das fibras de vidro, em especial a resina vinil-éster e a fibra do tipo E, pois os mesmos são os mais adotados para a fabricação de materiais compósitos, sendo o material utilizado nos tubos analisados no presente trabalho.

2.1.1 Matriz Polimérica

Materiais compósitos que possuem matriz polimérica são utilizados em uma grande diversidade de aplicações em engenharia. A literatura sobre resinas, como são

chamados comumente os polímeros, utilizadas como matriz na área de compósitos é muito extensa.

Quando as resinas são reforçadas por fibras, estas são comumente chamadas de plásticos reforçados por fibra (*FRP – fiber-reinforced plastic*) ou compósitos reforçados por fibra. A maior parte das resinas reforçadas com fibras de vidro tem propriedades, como resistência à corrosão e resistência térmica, variando em função de cada tipo de resina.

Nos compósitos reforçados com fibras, a fase matriz tem várias funções. Primeiramente, a matriz serve para transferir os esforços externos às fibras e promover um carregamento distribuído uniforme sobre as fibras. A matriz também mantém as fibras posicionadas e separadas, contribuindo no controle das propriedades do material compósito, pois previne a abrasão e corrosão das fibras, fenômenos esses que podem iniciar a fratura (PILATO e MICHNO, 1994).

Outras características importantes das resinas são absorver energia e reduzir a concentração de tensões, aumentando a tenacidade à fratura ou a ductilidade dos compósitos, maximizando a tolerância a danos e a durabilidade (PILATO e MICHNO, 1994).

Existe uma variedade de polímeros utilizados como matriz em compósitos. Estes podem ser termorrígidos (termofixos) ou termoplásticos, cada tipo possuindo propriedades que devem ser avaliadas.

Os polímeros termorrígidos são formados por uma reação química onde a resina e endurecedor ou resina e catalisador são misturados, e então sofrem uma reação química irreversível, formando um produto rígido e infusível. Uma vez curados, os termorrígidos não retornam ao estado líquido se aquecidos, entretanto, acima de uma temperatura, conhecida como temperatura de transição vítrea (T_g), suas propriedades mecânicas são significativamente alteradas (AZOM, 2005).

Estes polímeros são muito empregados como matriz em compósitos, porém apresentam algumas deficiências, como baixa tenacidade, vida útil reduzida e sensibilidade a umidade (CHAN *et. al.*, 1993).

Entretanto, uma nova classe de materiais, denominados termoplásticos, foi fabricada, atendendo as necessidades não oferecidas pelos termofixos. Assim, para

algumas aplicações, os polímeros termoplásticos são mais adequados para uso como matrizes em compósitos.

As resinas termoplásticas, se comparadas às termorrígidas oferecem melhora na processabilidade e maior tolerância ao dano (CHAN *et. al.*, 1993). Estas, como os metais, amolecem com o calor e endurecem novamente com o resfriamento. Entretanto, possuem custo elevado, além de apresentarem grandes variações quanto à resistência e limitações quando aplicados como matriz em compósitos (CHAN *et. al.*, 1993).

Portanto, as propriedades de cada resina, termorrígida ou termoplástica, devem ser consideradas. Nota-se que a seleção dos sistemas de resinas para uso em materiais compósitos estruturais é determinada por uma série de características (LAPIQUE e REDFORD, 2002), que serão analisadas a seguir.

Na etapa de seleção, devem ser obtidas informações a respeito da aplicação, temperatura de serviço e ambiente, método de fabricação, condições de cura e nível de propriedades requerido (PILATO e MICHNO, 1994).

Uma comparação das principais vantagens e desvantagens dos compósitos com os diferentes sistemas de resina está mostrada na Tabela, o que auxilia a escolha da resina mais adequada.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos sistemas de resina em compósitos.

Componente	Características	Termorrígidas	Termoplásticas
Compósito	Processamento (tempo, temperatura, pressão)	Reduzido à moderado	Elevado
	Propriedades estruturais	Satisfatório à bom	Satisfatório à bom
	Resistência ambiental e a solventes	Boas à excelente	Ruins à excelentes
	Tolerância ao dano	Ruins à excelentes	Satisfatório à bom
	Tenacidade à fratura	Baixa	Alta

Fonte: modificado de PILATO e MICHNO (1994).

Um outro aspecto relevante para a seleção de um sistema de resina é o custo. Dados comerciais mostram que dentre três resinas mais utilizadas em compósitos

para indústria, a resina epóxi apresenta maior valor, aproximadamente 1,5 vezes maior que o custo da resina vinil éster e 3,5 vezes maior que o da resina poliéster.

Considerando-se, ainda, a seleção de resinas poliméricas para utilização em compósitos estruturais, as principais características requeridas, geralmente, são boas propriedades mecânicas, como resistência e rigidez, boas propriedades adesivas, boas propriedades de tenacidade e boa resistência a degradação ambiental (durabilidade) (CLARKE, 1996).

O desempenho de compósitos estruturais é função das propriedades do polímero e dos produtos manufaturados. Polímeros de baixa viscosidade devem ser utilizados para assegurar a molhabilidade das fibras e completa impregnação para obtenção de compósitos com baixa concentração de vazios (CLARKE, 1996).

Em seguida, é apresentada a resina vinil-éster, que é a matriz utilizada no presente estudo.

2.1.1.1 Resina vinil-éster

Embora existam vários tipos de resinas utilizadas em compósitos, a maioria das partes estruturais é fabricada, principalmente, com resinas termorrígidas. Dentre essas resinas, a poliéster, epóxi e vinil-éster são as mais utilizadas.

As resinas de base epóxi são consideradas as mais clássicas, entretanto apresentam dificuldade de processamento, em virtude da alta viscosidade, longo ciclo de cura e toxicidade de alguns de seus endurecedores; e as resinas poliéster são as mais econômicas, mas possuem fraca resistência química, principalmente à hidrólise (ABADIE *et. al.*, 2001).

A necessidade de materiais compósitos destinados a diversos tipos de ambientes agressivos, em particular para ambientes úmidos, tem promovido, nos últimos anos, numerosos trabalhos com o objetivo de obter uma matriz mais adequada a esses materiais.

Segundo ABADIE *et. al.* (2001) as resinas vinil éster têm despontado como uma boa opção para matriz de materiais compósitos destinados a ambientes agressivos, visto que superam as desvantagens das resinas epóxi e poliéster,

apresentando boas propriedades químicas após a cura, além de combinar as propriedades mecânicas das resinas epóxi com o fácil processamento dos poliésteres, custo intermediário entre as resinas epóxi e poliéster, e por consistir de uma combinação química da tecnologia poliéster e epóxi (LANEY, 2002).

HOLLIDAY (1966) relata que as resinas vinil-éster formam o grupo mais importante, comercialmente falando, para compósitos reforçados por fibras. Essas resinas apresentam um conteúdo de grupos éster, susceptíveis a degradação devido à absorção de água, relativamente menor do que a resina poliéster.

Deste modo, a resina vinil éster, com a redução do número de grupos éster, é menos propensa a danos por hidrólise e por muitos outros produtos químicos do que a resina poliéster. Assim, são freqüentemente encontradas em aplicações, tais como tubulações e tanques de armazenamento (LANEY, 2002).

As resinas vinil éster são versáteis e são processadas da mesma forma que os poliésteres, na fabricação de compósitos (LANEY, 2002). Entre outras características, destacam-se a excelente resistência química/corrosiva, as altas propriedades mecânicas e a resistência a elevadas temperaturas (LANEY, 2002). Algumas de suas propriedades são mostradas na Tabela.

Tabela 2: Propriedades típicas da resina vinil éster.

Propriedades	Valor
Resistência (MPa)	82,7
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,07
Alongamento (%)	2,0

Fonte: modificado de LUBIN (1969).

NAZARETH *et. al.* (2001) relatam que muitas propriedades positivas da resina vinil éster são resultado de sua estrutura molecular, sendo as hidroxilas secundárias, presentes na cadeia da resina, responsáveis pela produção de uma resina termorrígida com bom desempenho mecânico e térmico e com excelente resistência a uma ampla faixa de produtos químicos.

De acordo com GRISON (1994), a principal característica desse tipo de resina é a resistência química, que é boa tanto em meio ácido quanto em meio alcalino,

possibilitando seu uso na fabricação de equipamentos e estruturas onde seja requerida alta resistência à corrosão, alta resistência mecânica, bem como propriedades elétricas e de isolamento térmico.

Portanto, as resinas vinil-éster fornecem propriedades aos compósitos que os tornam bastante atrativos para uma variedade de aplicações (MARGOLIS, 1985).

2.1.2 Fibras de Vidro

As fibras de vidro exibem propriedades superiores aos materiais tradicionais, como: alta resistência, baixo coeficiente de dilatação térmica; boas propriedades mecânicas; retenção destas em altas temperaturas; facilidade de processamento e baixo custo, fazendo com que sejam um excelente reforço para matrizes poliméricas (CHAN *et. al.*, 1993). Assim sendo, houve um crescimento em sua produção e utilização, principalmente nos compósitos estruturais (MARGOLIS, 1985).

Vários fatores contribuem para a utilização das fibras de vidro como reforço de materiais compósitos, e a fibra de vidro é o reforço mais utilizado em compósitos de matriz polimérica por diversas razões, a saber: é facilmente produzida, pode ser utilizada através do emprego de diversas técnicas de fabricação, produz materiais com alta resistência específica, e quando associada com diferentes resinas, possui uma inércia química que torna o compósito útil para aplicações em meio a uma variedade de ambientes corrosivos (MARGOLIS, 1985).

As fibras de vidro podem ser classificadas, de acordo com a composição química dos vidros a partir dos quais são fabricadas, em fibras do tipo A, C, D, M, S, Z e E, cada qual com características próprias (CHAN *et. al.*, 1993). Esta última é o tipo de fibra mais usada e contida no material analisado nesta tese.

O vidro do tipo A é tipicamente usado para a fabricação de vidrarias (GIBSON, 1994), e as fibras de vidro C possui resistência química satisfatória, porém não são usadas como reforço de materiais compósitos (CHAN *et. al.*, 1993).

A designação S deve-se ao alto índice de sílica que permite ao vidro do tipo S suportar temperaturas superiores a outros tipos de vidros (CHAWLA, 1998).

A fibra do tipo D possui baixa densidade e resistência a água, apesar de apresentar boas propriedades elétricas, e a do tipo M tem módulo de elasticidade superior ao tipo E, e resistência similar (CHAN *et. al.*, 1993).

A designação E, a mais difundida em aplicações na fabricação de materiais compósitos, se caracteriza por aliar propriedades mecânicas com resistência a vários tipos de ambientes (GIBSON, 1994).

Outros tipos de fibras de vidro têm sido desenvolvidas, como a do tipo E-CR que apresenta propriedades elétrica e mecânica semelhante a fibra de vidro do tipo E, aliada a boa resistência aos ácidos.

As fibras de vidro usadas em compósitos são comercializadas em duas formas principais – contínuas e picadas (ou descontínuas) (CHAWLA, 1998). Esses tipos de reforço podem ser combinados em diferentes arranjos (LUBIN, 1969).

Os compósitos reforçados com fibras picadas apresentam propriedades mecânicas e físicas que variam pouco em função da direção estudada no material. Já os compósitos de fibras longas, normalmente apresentam anisotropia, havendo, por exemplo, direções de maior e menor resistência à tração.

As fibras picadas se caracterizam pelo corte dos fios de fibra em dimensões de 3 a 40mm de comprimento. Estas são sobrepostas umas sobre as outras com uma distribuição aleatória, formando a manta.

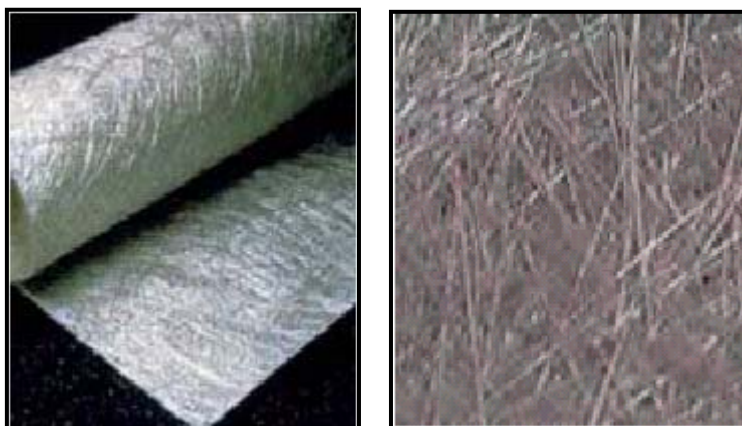


Figura 9: Ilustração de mantas de fibra de vidro.

Fonte: disponível em <http://www.owenscorning.com.br>.

Os filamentos ou “*rovings*” referem-se a um conjunto de fios de fibras de vidro contínuos e enrolados em carretéis. Podem ser utilizados na fabricação de compósitos pelo método de “*filament winding*” (enrolamento filamentar), utilizados por exemplo em tanques, dutos, ou em uma variedade de outros processos de fabricação. Estes são utilizados quando se deseja privilegiar alguma direção com determinada propriedade.

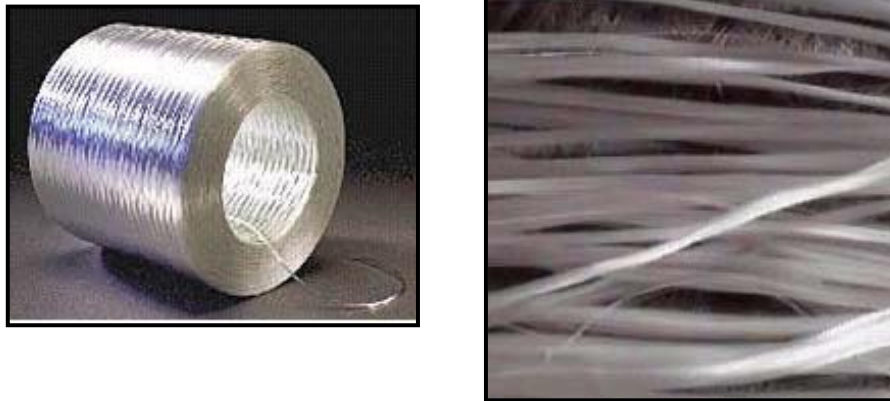


Figura 5: Ilustração de “roving” contínuo de fibra de vidro.

2.1.2.1 Fibra de Vidro do Tipo E

Propriedades como resistência à corrosão, baixa densidade, resistência ao calor e ao fogo, resistência à oxidação e resistência a soluções químicas são características que exercem grande influência na escolha das fibras de vidro para a fabricação dos materiais compósitos (GIBSON, 1994).

Além de não absorver água, não sofrer dilatação, não alongar e não sofrer desintegração na presença de ambientes úmidos, a fibra de vidro do tipo E é inerte e resistente a material orgânico e ácidos, com exceção do ácido fosfórico (H_3PO_4) e ácido fluorídrico (HF).

Propriedades como baixa densidade e baixo coeficiente de expansão e condutividade térmica garantem aos materiais compósitos feitos com essas fibras maior estabilidade dimensional e baixa densidade (GIBSON, 1994).

As principais características da fibra de vidro tipo E estão listadas na Tabela.

Tabela 3: Propriedades típicas da fibra de vidro tipo E.

Fibras	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁷ °C ⁻¹)
Tipo E	2,54-2,55	72,4-76	0,20-0,22	49-60

Fonte CHAWLA (1998) e LUBIN (1969).

As propriedades das fibras são afetadas não somente pela composição, mas também pelas condições de processo e dimensões da fibra.

Apesar de possuírem propriedades mecânicas inferiores a outras fibras, como kevlar e carbono, o uso inquestionável da fibra de vidro do tipo E em grande quantidade de aplicações em compósitos, deve-se ao reduzido custo dessas fibras; como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Características de diferentes fibras.

Fibra	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Custo (\$/kg)
Tipo E	2400	73	3,4	1,21
Tipo S	3450	89,6	4,0	5,07
Kevlar	2750	124	2,2	19,84
Carbono	2750	220	1,2	70,55

Fonte: modificado de MARGOLIS (1985).

2.1.3 Fabricação de Tubos Compósitos

A fabricação dos compósitos pode se dar por vários processos distintos. Dentre estes pode ser citado o método de enrolamento filamentar (*filament winding*). Esta técnica se caracteriza por produzir compósitos reforçados por fibras contínuas, através do enrolamento das fibras num mandril giratório ao mesmo tempo que é impregnada com resina, conforme mostrado na Figura 6. Este processo permite o enrolamento de camadas sobrepostas, com ângulos definidos em função do carregamento dominante a que o material será submetido. A produção é finalizada com a cura do produto e a remoção do mandril (Figura 7).

Esse método é especialmente usado para estruturas cilíndricas, tais como tubos e vasos de pressão, que na maioria das vezes são usados sob pressão interna, conduzindo a elevadas tensões circunferenciais.



Figura 6: Equipamento de enrolamento filamental (“filament winding”).
Fonte: disponível em <http://www.polyplaster.com.br>.



Figura 7: Processo de cura e remoção do mandril.

A Figura 8 mostra algumas fases da fabricação de um riser de perfuração com 56 cm de diâmetro e 15 m de comprimento, utilizando a técnica de enrolamento filamental. Para assegurar a precisão, o processo é todo automatizado e controlado por computadores.



Figura 8: Fabricação de riser por filament winding.

Fonte: STORHAUG *et. al.* (2001).

A Figura 8 apresenta a fabricação de riser por filament winding (56 cm diâmetro por 15 m comprimento) constituindo-se de. (a) conjunto metálico do duto que serve como mandril para aplicação do compósito; (b) camada helicoidal de fibra de carbono aplicada pela técnica de enrolamento filamental; (c) duto de compósito finalizado (STORHAUG, 2001).

Na produção de tubos compósitos, há algumas variáveis que afetam as propriedades mecânicas e a qualidade do produto final. Algumas destas variáveis levam em consideração as condições do carregamento e do ambiente durante a fabricação. Assim, para conhecer parâmetros como (EGBERT, 2004):

- ângulos de enrolamento;

- seqüência de empilhamento de camadas;
- número de camadas para cada ângulo;
- número total de camadas;
- espessura de cada camada;
- espessura total da parede do tubo;
- presença de *liner*, com função de dividir carregamento ou de proporcionar uma barreira contra ataque químico;
- velocidade de enrolamento;
- tensão de enrolamento;
- viscosidade da resina;
- intervalo de tempo entre o enrolamento das camadas;
- regulagem do orifício para retirada do excesso de resina; e
- utilização de fibras pré-impregnadas (*prepregs*);

é necessário conhecer as condições de serviço e fabricação.

A escolha dos ângulos de enrolamento será função do carregamento dominante que o tubo deverá suportar. Deste parâmetro depende a característica anisotrópica do material compósito que permite ao tubo apresentar máxima resistência na direção de maior solicitação (EGBERT, 2004).

PARNAS e KARTICI (2002) propõem uma solução para paredes finas e grossas do tubo submetido à pressão interna. Observa-se que a pressão de colapso é quase a mesma para ambas as soluções. Além disso, nota-se que o pico de pressão é obtido no intervalo 52°-55° de ângulo de enrolamento.

CARVALHO (1992) demonstra que o ângulo de enrolamento ótimo obtido é de 54,75°, sendo válida apenas se:

- a estrutura cilíndrica for fechada e submetida à pressão interna;
- a estrutura for construída sem laminado interno ou intermediário; e
- for ignorada a influência da resina nas propriedades mecânicas.

Porém, as duas últimas condições não podem ser ignoradas. Assim, o ângulo deverá variar com a espessura da parede do vaso de pressão (CARVALHO, 1992).

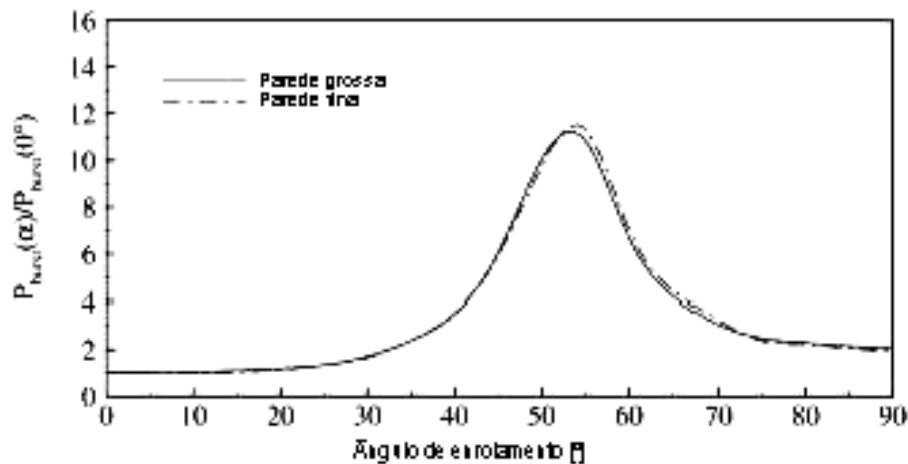


Figura 9: Pressão de colapso versus ângulo de enrolamento.

Fonte: PARNAS e KARTICI (2002).

Para estruturas cilíndricas submetidas apenas a solicitações circunferenciais, o ângulo de enrolamento ótimo é 90°. Apesar de na prática isso não ser possível, opta-se, então, por um valor o mais próximo possível de 90° (CARVALHO, 1992).

Devido ao grande número de variáveis a serem determinadas nos projetos, além de combinações entre elas, foram desenvolvidos métodos que auxiliam na fabricação - um deles é o *carpet plot*. Os *carpet plots* são gráficos que associam as propriedades finais desejadas com a proporção de camadas entre três ângulos escolhidos para o método de enrolamento filamentar (EGBERT, 2004).

As principais vantagens do processo de enrolamento filamentar são:

- fácil automatização;
- facilidade de colocar grandes quantidades de compósito numa posição sem grande uso de força humana;
- boa compressão e compactação das fibras, produzindo elevadas frações volumétricas;
- bom controle do volume de resina;
- o custo do mandril pode ser menor do que o de outras ferramentas;
- menor custo de produção para um grande número de componentes, por utilizar menos mão-de-obra do que em outros processos; e
- o custo da fibra é minimizado, uma vez que não há processos secundários para convertê-la num tecido prévio para uso.

As principais desvantagens associadas a este processo são (SPSYSTEMS, 2005):

- a fibra não é facilmente colocada na posição exata ao longo do comprimento do componente;
- o custo do mandril para componentes muito grandes pode ser elevado;
- e
- a superfície externa não é moldada, não deixando uma boa aparência superficial.

2.1.4 Aplicações

Diante dos benefícios da junção dos polímeros, em especial a resina vinil-éster, e das fibras de vidro, esses materiais são usados em uma variedade de aplicações (MARGOLIS, 1985).

Os materiais compósitos têm sido empregados largamente nas indústrias automotiva, aeronáutica, civil, petroquímica, naval, entre outras. Dentre todas as aplicações dos compósitos reforçados por fibras podem ser citados em destaque os componentes aeroespaciais, tubos, vasos de pressão, tanques de armazenamento e linhas resistentes à corrosão (LANEY, 2002).

A indústria automotiva, apesar de ser considerada muito tradicional no que tange os materiais e a tecnologia, iniciou o processo de substituição de materiais tradicionais por plásticos e materiais compósitos avançados, guiada principalmente pela redução de custos, visto que se trata de um setor completamente sensível aos custos dos materiais empregados nos componentes (PILATO e MICHNO, 1994).

Para os novos projetos, a substituição dos aços por compósitos, trouxe muitas vantagens, dentre elas a redução de custos, diminuição de peso e conseqüente aumento na economia de combustíveis, entre outros benefícios (MARGOLIS, 1985).

A indústria aeronáutica, atualmente, utiliza largamente os materiais compósitos. Tecnologistas e futuristas asseguram-nos que os compósitos são os mais novos e, possivelmente, os mais importantes materiais de aviação desde que as ligas de alumínio foram descobertas em 1920, e dominarão a indústria.

Na aviação comercial, grandes empresas de fabricação de aeronaves acreditam na expansão do uso de materiais compósitos, em substituição ao alumínio, promovendo redução de peso na proporção de 25% a 40%. Os materiais avançados são utilizados, principalmente em componentes estruturais nos quais são necessárias grandes tolerâncias a danos (PILATO e MICHNO, 1994).

O desenvolvimento de tecnologias e de aplicações dos materiais compósitos foi governado, inicialmente, pelas necessidades militares. O emprego dos materiais compósitos avançados representa reduções de peso da ordem de 20%, como por exemplo na aeronave de combate V22 Osprey, ou reduções ainda maiores como no helicóptero alemão BK117 que possui toda sua estrutura de compósito, utilizando fibra de carbono (75%), aramida (22%) e fibra de vidro (3%).



Figura 10: Aeronave de combate V22 Osprey.

Fonte: disponível em <http://membres.lycos.fr/aerodata/photos.html>.



Figura 11: Helicóptero alemão BK117.

Fonte: Disponível em <http://www.eurocoptersusa.com/Product/bk117/BK117.asp#>.

A indústria civil também emprega largamente os compósitos, mais especificamente os plásticos reforçados com fibras (FRP), sujeitos a carregamentos permanentes e cíclicos, requerendo durabilidade e integridade estrutural.

Porém, ainda, existem restrições ao FRP, uma vez que se possui informações limitadas sobre seus mecanismos de falha e durabilidade quando submetidos a carregamentos sob severas condições ambientais e elevadas temperaturas.

Dentre as aplicações na construção civil podem ser citados (MARGOLIS, 1985):

- torres de resfriamento, demonstrando que os compósitos lhe fornecem longa integridade sem exibir sinais de deterioração, além de ser mais conveniente para transporte e montagem; e
- dutos para distribuição de água em torres de resfriamento que requerem resistência à corrosão e baixas pressões.



Figura 12: Compósitos aplicados em torres de resfriamento.

Fonte: MARGOLIS (1985).

O crescimento dos materiais compósitos, particularmente dos reforçados por fibras de vidro, bem como seu alto desempenho e outros benefícios advindos tais como baixo peso, tolerância ao dano, alta resistência à corrosão e ao impacto, baixa condutividade térmica quando comparados ao aço e alumínio, por exemplo; fizeram com que seu emprego se estendesse as estruturas marítimas, sendo utilizados principalmente nos cascos de embarcações.

Adicionalmente a essas características, esses materiais oferecem ao engenheiro, vantagens adicionais quanto às suas aplicações, como por exemplo:

- construção sem remendo,
- minimização de vazamentos e problemas de montagem;
- maior durabilidade; e
- facilidade de reparo e manutenção.

O emprego desses materiais na indústria naval, principalmente em profundidades extremas, provavelmente será lento, devido à falta de experiência em tais estruturas e questionamentos no que tange a confiabilidade e o controle de qualidade. Porém com o elevado desempenho das resinas e o alto módulo de elasticidade do reforço, estes marcarão o futuro imediato nessa área, assegurando, portanto, o potencial dos compósitos, principalmente de *"filament wound"*, para construção de embarcações (LUBIN, 1969).

Na indústria petrolífera e química empregos comuns dos materiais compósitos reforçados por fibras de vidro são em tanques de armazenamento, vasos de pressão, dutos para escoamento e sistemas de distribuição de gás natural – Figura 13 e Figura 14.



Figura 13: Dutos compósitos em aplicação marítima.



Figura 14: Dutos compósitos em aplicações terrestres.

Os tanques de armazenamento são projetados com a superfície interna rica em resina para resistir a corrosão do conteúdo e no interior estão presentes camadas de fibras picotadas impregnadas com resina a fim de garantir a integridade estrutural dos tanques. Resinas poliésteres e vinil ésteres são comercialmente empregados nesses tanques de fibra de vidro, pois combinam baixo custo e facilidade de fabricação (MARGOLIS, 1985).

Vasos de pressão e tubos se inserem na categoria dos tanques e tubulações de fibra de vidro. Desde que equipamentos de fibras de vidro foram projetados, as primeiras considerações a serem analisadas são as pressões requeridas no projeto. Entre as aplicações dos tubos compósitos submetidos a pressões podem ser citadas os condensadores, aquecedores de ar, destiladores de óleo e trocadores de calor (MARGOLIS, 1985).

Em processamentos químicos, altamente corrosivos, têm sido utilizados tubos fabricados em resina reforçada com fibras de vidro para a condução de água, petróleo e seus derivados. E estes têm progredido para um sistema que fornecerá satisfatório desempenho em serviço (MARGOLIS, 1985). Tubos compósitos de pequenos diâmetros também são aplicados para o transporte de gás natural (*“onshore”*) em substituição aos tubos de aço em razão da economia proporcionada com a utilização dos materiais compósitos.

As mesmas formulações de resinas resistentes à corrosão, como o poliéster, vinil éster e o epóxi, são adaptadas aos tubos. Então, no futuro, é provável que esses

materiais em dutos tenham maior aceitação no mercado e assim sejam mais empregados (MARGOLIS, 1985).

A indústria de óleo e gás, particularmente, aprecia o baixo peso da fibra de vidro em aplicações de campo. Logo, a razão resistência-peso proporcional de 1/4 à 1/16 dos materiais tradicionais, traduz a facilidade de transporte destes. Além disso, os comprimentos das seções podem ser longos e são instalados manualmente por uma equipe.

Na indústria do petróleo, as pressões de operações máximas dos dutos de transmissão para transporte de gás natural são determinadas por órgãos reguladores federais que levam em consideração o tipo de material, o diâmetro, a espessura, o método de fabricação do tubo, e outros fatores.

As linhas de transmissão devem ser inspecionadas periodicamente e podem operar numa ampla faixa de pressão. A *Maritimes Northeast Transmission*, por exemplo, opera com taxas de 9,93 MPa (1440psi) para linhas de 24"-30" de diâmetro. Em contra-partida a *Maine Natural* que opera na distribuição de gás natural trabalha com taxas de 3,2 MPa (463psi).

2.1.5 Análise Comparativa entre materiais metálicos e compósitos

Comparando os compósitos e os aços, existe uma grande variedade de áreas nas quais os compósitos se mostram superiores.

Quando se comparam as características físicas, a vantagem dos dutos de aço é em relação à pressão, que pode exceder 5000psi, dependendo do diâmetro do duto.

Em relação aos compósitos, têm sido testados FRPs com pressões superiores a 24,13 MPa (3500 psi), com diâmetros variando de 2"-3". Além disso, já forma certificados FRPs de 2" para 25,85 MPa (3750 psi). Entretanto, ainda não foram descobertos exemplos em que o gás natural é transportado a altas pressões em dutos compósitos.

Quanto à resistência à flexão e a resistência química, os compósitos são significativamente mais flexíveis e resistentes do que os aços. Com isso, empresas têm adicionado compósitos enrolados aos dutos de aço, promovendo melhores

propriedades estruturais e simultaneamente adicionando resistência externa a corrosão, característica previamente ausente nos aços.

Em relação ao peso, os compósitos são extremamente mais leves do que os aços. Assim, quando a resistência específica é analisada, os compósitos apresentam relações resistência/peso muito mais elevadas do que os aços.

Um fator favorável aos aços é a resistência à abrasão. Entretanto, aditivos podem ser adicionados na fabricação dos compósitos de forma a aumentar a resistência à abrasão ou outras propriedades, conforme mostrado na Tabela:

Tabela 5: Principais aditivos usados em compósitos.

Tipo	Propriedades
Absorvedor de UV	Proteção às intempéries da ação solar
Anti Chamas	Auto extinção de chamas
Grafite	Condutibilidade elétrica
Cargas Minerais	Resistência à abrasão

Fonte: Disponível em <http://www.polyplaster.com.br>.

A vantagem mais significativa dos materiais compósitos sobre os metálicos se refere, entretanto, ao custo final de seu emprego. A Tabela fornece uma estimativa da faixa de custo de componentes fabricados em compósito para operações *offshore*.

A fim de serem economicamente competitivos aos aços, em aplicações com menores requisitos mecânicos, são usados compósitos, como por exemplo, pisos de compósitos de fibra de vidro que possuem custo da ordem de US\$ 2 a 5/lb.

Tabela 6: Faixa de custo para componentes offshore fabricados em compósitos.

Aplicações	Requisito de desempenho	Custo (US\$/lb)
Componentes dos decks	moderado	2 – 5
Riser, acumuladores	alto	10 – 20
Aplicações especiais	alto	> 20

Fonte: LO *et. al.* (2001).

Mesmo assim, os compósitos são uma alternativa para o mercado de dutos, pois oferecem benefícios comerciais, operacionais e ambientais. O custo por unidade

de peso dos componentes fabricados em compósito é superior ao dos componentes em aço.

As vantagens econômicas advêm de seu peso significativamente menor e também de um custo menor de instalação. Custos de manutenção mais baixos também são um incentivo importante ao emprego de compósitos, o que têm levado a substituição de componentes em aço. Normalmente, os componentes fabricados em compósito podem ser muito competitivos em termos de custo em relação aos componentes fabricados em aço, se o custo total do componente instalado for levado em consideração. A Tabela fornece um exemplo simplificado da comparação de custos entre aço carbono e compósitos termoplásticos.

Os materiais compósitos representam uma escolha potencial para novos desenvolvimentos de sistemas de dutos. A prioridade do mercado é a substituição dos dutos de aço existentes nos campos de óleo e gás por compósitos.

A flexibilidade dos materiais compósitos combate o custo de manutenção elevado e os escapamentos significativos tendo por resultado a perda de produção e danos ambientais.

Tabela 7: Comparação de custos entre RTP (compósitos termoplásticos) e aço carbono.

Duto: comprimento de 11500 metros (38000 pés) e produção de 800 barris por dia		
Descrição	Duto de aço carbono (OD=6 5/8")	Halliflow – A350 (ID=4 1/3")
Preço por pé (instalado)	US\$22,20	US\$34,00
Preço para 38500 pés	US\$843600,00	US\$1292000,00
Vida útil estimada por projeto	5 anos	20 anos
Preço por 5 anos de vida útil	US\$843600,00	US\$1292000,00
Substituição do aço após 5 anos	US\$843600,00	US\$ 0
Comparação de preço após 5 anos	US\$1687200,00	US\$1292000,00
Substituição do aço após mais 5 anos	US\$843600,00	US\$ 0
Comparação de preço para 10 anos	US\$2530800,00	US\$1292000,00
Comparação de preço para 20 anos	US\$5061600,00	US\$1292000,00

Fonte: MARTIN e AVERY (2003).

Para aplicações submetidas a tensões elevadas, tal como em acumuladores e *risers*, usam-se compósitos de fibra de carbono. Nesses casos, o custo pode alcançar US\$ 10 a 20/lb, mas ainda assim a relação custo/benefício desses materiais é competitiva em relação aos componentes fabricados em aço.

O menor peso dos componentes em compósito é sempre um fator de grande impacto nas aplicações *offshore*. A Tabela mostra a diferença de peso entre uma campânula de ar com 60ft de comprimento, usada no sistema de produção de petróleo, feita em aço e em compósito. Na tabela está mostrado também uma comparação entre a lança do queimador de gás feita com ambos os materiais.

Tabela 8: Comparação de peso entre componentes fabricados em aço e em materiais compósitos.

Material	Campânula com diâmetro de 8ft	Campânula com diâmetro de 11ft	Lança do queimador com 170 ft
Aço	47000 lbs	75900 lbs	106212 lbs
Compósito	32000 lbs	35000 lbs	17657 lbs
Diferença(%)	-31,1%	-53,9%	-83,3%

Fonte: HSU *et. al.* (2001).

A Figura 15 mostra a localização desses equipamentos em uma plataforma.

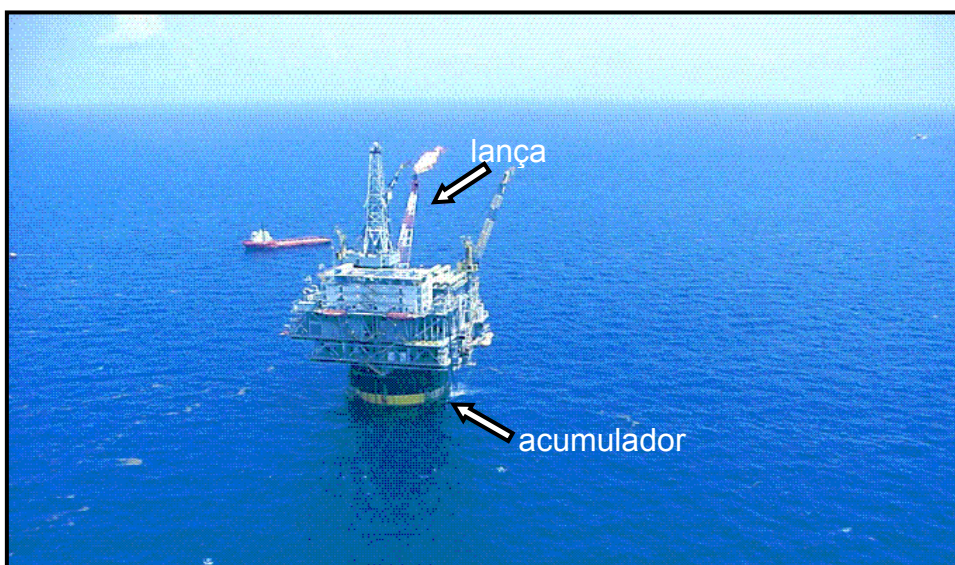


Figura 15: Componentes da plataforma.

Fonte: HSU *et. al.* (2001).

Na Tabela é mostrada uma comparação de peso e custo para substituição de partes do *deck* feitas em aço por componentes feitos em compósito. Na Petrobrás, por exemplo, todas as plataformas construídas após 1994 usam pisos de compósitos.

Tabela 9: Comparação de peso e custo para *decks* de plataformas feitos em componentes metálicos e em compósitos.

Propriedade	Estrutura em aço	Estrutura híbrida (aço + compósito)		Estrutura em compósito	
				Ganho (%)	Ganho (%)
Peso	187 t	116 t	38	84 t	55
Custo	£992.000	£920.000	7	£736.000	26

Fonte: DODDS *et. al.* (2001).

2.2 Estado de Tensões em Tubos submetidos à Pressão

Interna

Muitos autores têm estudado o comportamento dos materiais compósitos, para suas diferentes formulações.

Em se tratando da análise de estruturas cilíndricas, a abordagem principal utilizada é a Teoria Clássica dos Laminados. Dessa forma, é proposta uma simplificação que não compromete com os resultados alcançados.

As principais causas de esforços mecânicos em uma tubulação são descritas abaixo (TELLES, 1982):

- pressão interna exercida sobre o fluido;
- pressão externa (tubos em ambiente sob pressão);
- peso próprio do tubo, pesos do fluido contido, dos acessórios, válvulas, integrantes da tubulação e do isolamento térmico;
- sobrecargas diversas agindo sobre a tubulação, tais como pesos de outros tubos, plataformas e estruturas apoiadas nos tubos, peso da terra, pavimentação e veículos (no caso de tubos enterrados) e vento, ondas e correntes marítimas (no caso de tubos submersos);
- ações dinâmicas, provenientes do escoamento do fluido contido;
- dilatações ou contrações térmicas do próprio tubo ou de outros tubos ligados ao mesmo, devido a variações de temperatura;
- tensões residuais decorrentes da montagem, tais como alinhamentos forçados, desalinhamentos e desnivelamentos de suportes, tensões residuais causadas pela soldagem, aperto exagerado ou desigual de flanges e de roscas, etc;

No caso geral de um tubo submetido a uma série de esforços simultâneos, em cada elemento da parede do tubo aparecerão três tensões normais e três tensões cisalhantes.

As tensões normais são: a tensão longitudinal σ_{zz} , a tensão circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$, e a tensão radial σ_{rr} , como mostrado na Figura 16. As tensões de cisalhamento τ atuam em cada um dos planos ortogonais perpendiculares às tensões normais.

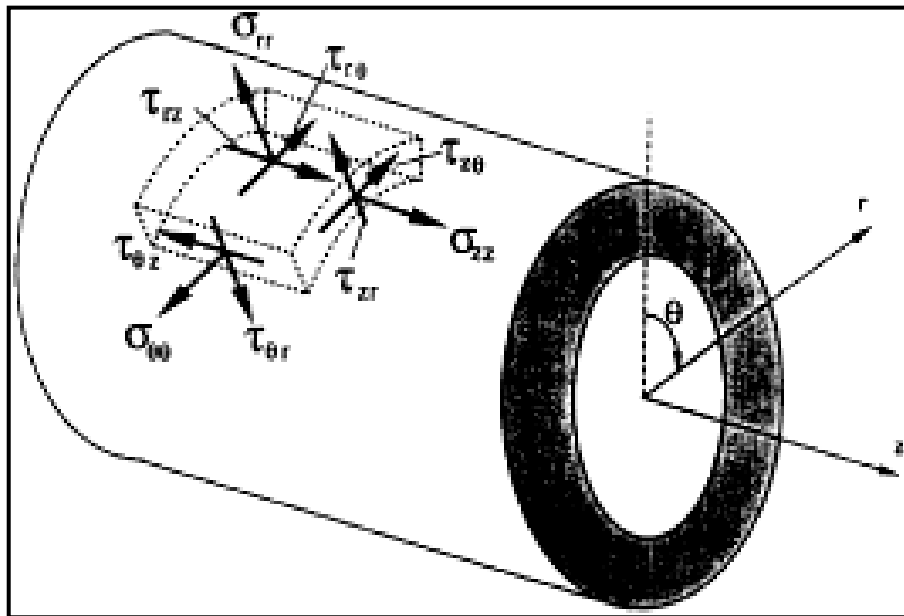


Figura 16: Representação de tensões atuantes em uma tubulação.

A tensão longitudinal σ_{zz} é composta das seguintes parcelas:

- tensão resultante da pressão;
- tensão resultante do momento fletor devido aos diversos pesos e sobrecargas;
- tensão resultante dos momentos fletores devidos às dilatações térmicas, aos movimentos dos suportes e pontos extremos, aos esforços de montagem, e outros.

A tensão circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ é composta das seguintes parcelas:

- tensão resultante da pressão (é geralmente a pressão predominante);
- tensão resultante do achatamento local do tubo em consequência dos diversos momentos fletores atuantes.

A tensão radial σ_r é causada exclusivamente pela pressão; o seu valor é geralmente baixo, e por isso costuma ser desprezado nos cálculos. Segundo AL-KHALIL *et. al.* (1996), a σ_r não possui efeito significativo sobre os resultados experimentais, podendo portanto ser considerada nula.

As tensões de cisalhamento que se desenvolvem no plano perpendicular ao eixo do tubo são provenientes dos momentos de torção. Esse momento só tem valor

apreciável nas tubulações não planas, em geral como conseqüência das dilatações térmicas. As demais tensões de cisalhamento são provenientes dos diversos momentos fletores que atuam sobre o tubo.

As tensões que aparecem nas paredes de um tubo, em conseqüência dos diversos esforços mecânicos, podem ser classificadas em duas categorias denominadas de tensões primárias e tensões secundárias.

Tensões primárias são provenientes de todos os esforços externos permanentes, tais como pressão interna ou externa, pesos, sobrecargas etc. Tensões secundárias são as devidas às dilatações do próprio tubo ou de outros tubos ligados ao tubo em questão, bem como aos movimentos de pontos extremos da tubulação em conseqüência de dilatações.

Considerando-se um cilindro de paredes delgadas sujeitas a uma pressão interna, deduzem-se teoricamente as seguintes expressões para as tensões desenvolvidas nas paredes - tensões de membrana (TELLES, 1982):

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pd_m}{2t}; \quad \sigma_z = \frac{Pd_m}{4t}, \quad (2)$$

A Equação 2 calcula as tensões circunferencial e longitudinal para vasos de pressão. Onde σ_{θ} é a tensão circunferencial de tração; σ_z é a tensão longitudinal de tração; P é a pressão interna; d_m é o diâmetro nominal médio do cilindro e t é a espessura de parede (TELLES, 1982).

2.3 Mecanismos de Falha

Um projetista definiria falha como o ponto no qual a estrutura ou componente pára de desempenhar suas funções. Entretanto, não existe ainda uma definição universal dos processos de falha para os materiais compósitos estruturais (HUANG *et. al.*).

A possibilidade de exposição dos materiais compósitos a situações ambientais que comprometam a sua durabilidade, como nos casos de aplicações nas indústrias naval, petroquímica e civil, ressalta a importância de estudar os mecanismos de degradação desses materiais.

Os mecanismos de degradação são apontados como causadores de falhas prematuras de elementos fabricados com polímeros e materiais compósitos (ZHOU e LUCAS, 1999), e dentre eles podem ser citadas a degradação química devido à presença de água e petróleo e a técnica de processamento durante a fabricação.

Na etapa de fabricação por enrolamento filamentar, a regulação do orifício para retirada do excesso de resina está diretamente relacionada com o controle da fração volumétrica de fibras do material compósito. Entretanto, reduzindo demasiadamente o seu diâmetro, com o objetivo de atingir altos valores de fração volumétrica de fibras, pode-se causar danos à superfície das fibras, introduzindo defeitos capazes de iniciar mecanismos de falha (EGBERT, 2004).

A fratura nos compósitos reforçados com fibras é caracterizada pela progressão de múltiplas falhas de diferentes modos, tais como: micro-trincas na matriz, descolamento interfacial, fratura da fibra e delaminações entre as camadas dos laminados (MARGOLIS, 1985). Essas falhas estão indicadas na Figura 17.

Os modos de falha dependem de muitos parâmetros, como as propriedades do sistema fibra/matriz, sequência de empilhamento, processo de cura, influência das condições ambientais, etc (MARGOLIS, 1985).

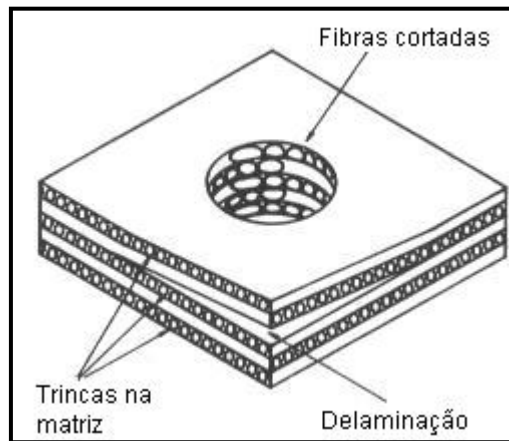


Figura 17: Danos locais em compósitos laminados.

BAI *et. al.* (1997) investigaram os mecanismos de danos em materiais compósitos sujeitos a carregamentos combinados e descreveu as microtrincas como responsáveis pela iniciação do dano e a delaminação entre as diferentes camadas surgindo após as trincas transversais quando o tubo é submetido ao carregamento simples de pressão interna.

Em outro trabalho BAI *et. al.* (1998) apresenta a análise das falhas por meio de um envelope de falhas, mostrando que as falhas dependem fortemente do ângulo de enrolamento. Descreve ainda, que os mecanismos de falha dependem da taxa de tensão aplicada e o principal modo de falha em seu trabalho é a delaminação.

A formação de trincas na matriz pode ser esperada nas camadas dos laminados sujeitos a tensões térmicas e mecânicas superiores aos valores de deformação críticos da resina. Delaminações centrais são formadas a partir das trincas na matriz ou devido à falta de adesão entre as camadas.

As fibras podem fraturar prematuramente de forma individual ou em pequenos grupos, devido a descontinuidades e imperfeições de forma e alinhamento, causando uma redistribuição de tensão e assim uma falha local (MARGOLIS, 1985). Para os materiais compósitos, a falha de uma camada não conduz a uma fratura catastrófica do material. O compósito pode ainda suportar um aumento de carga até que ocorra a falha completamente (HUANG *et. al.*).

ZINOV'EV *et. al.* (2001) estudaram experimentalmente a resistência de anéis compósitos reforçados por fibras de carbono e vidro dispostas unidirecionalmente ($\pm 88^\circ$) submetidos à pressão hidrostática. Dessa forma determinou quatro grupos (A, B, C e D) de modos de falha nos anéis com fibra de carbono (CFRP) e vidro (GFRP), conforme mostram as Figura 18 e Figura 19, em função da pressão aplicada. Esses modos de falha: A – trincas individuais paralelas às fibras ao longo do perímetro do anel, B – trincas circunferenciais em menor quantidade, com interrupções e mais localizadas, C – trincas curtas localizadas e superfície de fratura irregular, D – trincas perpendiculares à direção da fibra e ausência de trincas circunferenciais. O autor conclui que o modo de falha depende da magnitude da pressão aplicada e a pressão hidrostática impede o desenvolvimento de trincas transversais na interface fibra-matriz.

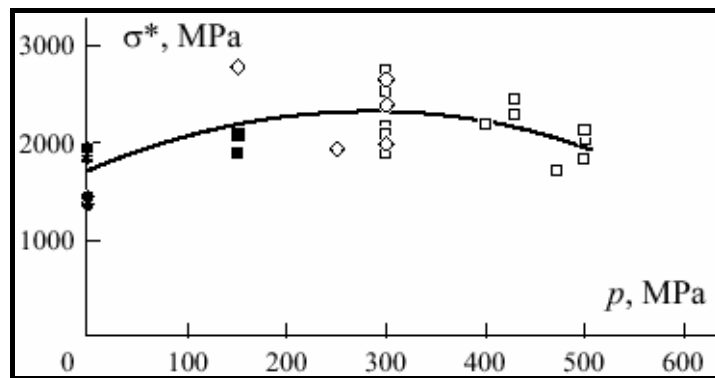


Figura 18: Tensão longitudinal do CFRP versus pressão hidrostática para os modos de falha A (●), B (■), C (◇) e D (□).

Fonte: ZINOV'EV *et. al.* (2001).

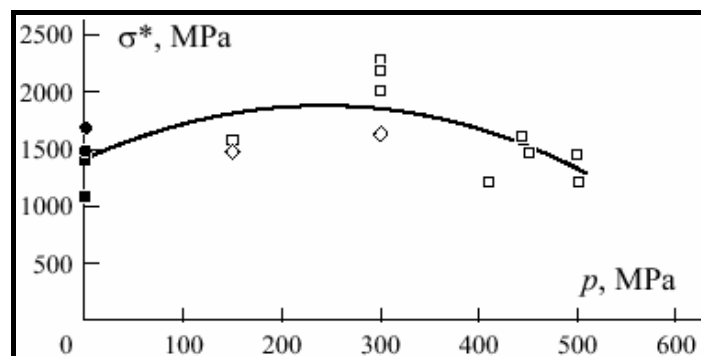


Figura 19: Tensão longitudinal do GFRP versus pressão hidrostática para os modos de falha A (●), B (■), C (◇) e D (□).

Fonte: ZINOV'EV *et. al.* (2001).

A pressão tende a manter as trincas fechadas, o que leva ao acréscimo da tensão e deformação de ruptura. O efeito benéfico da minimização do efeito da trinca e de defeitos é contra-balanceada pela tendência do material ao comportamento frágil, como resultado da diminuição do volume de vazios.

2.3.1 Interface Matriz/Reforço

Há uma região de grande importância nos materiais compósitos: a interface matriz/reforço. Melhorar esta interface significa aumentar significativamente as propriedades mecânicas do material compósito, pois desta forma a maior parte do carregamento estará sendo transmitida ao reforço, elemento responsável pela resistência do material.

A resistência na interface pode ser caracterizada pela tensão cisalhante requerida para causar deslizamento entre fibra e matriz. A ligação na interface pode ser mecânica e/ou química.

A natureza da ligação presente na interface também é um fator importante, uma vez que a interface também possibilita um caminho preferencial para difusão de oxigênio ou umidade, que pode facilitar a degradação de propriedades do compósito (HOLLIDAY, 1966).

2.3.2 Efeito da Temperatura

Se a matriz e as fibras apresentarem diferentes coeficientes de expansão térmica, o resfriamento proveniente de altas temperaturas durante o processo de fabricação pode causar contração térmica diferencial entre a matriz e a fibra, resultando em tensões térmicas na região de interface. Esse problema pode ser minimizado combinando-se os coeficientes de expansão térmica da fibra e da matriz. Entretanto, alguma expansão diferencial irá sempre existir e a interface fibra-matriz deve apresentar resistência suficiente para suportar as mudanças de temperatura.

Sob certas condições, a expansão térmica diferencial pode contribuir na formação de ligação mecânica entre a fibra e a matriz. Como a maior parte das matrizes possui um coeficiente de expansão térmica maior do que as fibras,

resfriamentos oriundos de altas temperaturas de processo resultam em ligação compressiva ou de fricção através da interface fibra-matriz.

As resinas termorrígidas, por exemplo, apresentam coeficiente de expansão térmica alto quando comparado com as fibras de vidro e carbono, as quais se constituem em reforços bastante comuns. Assim, esse tipo de ligação pode facilmente ocorrer nesses compósitos.

A resistência da ligação mecânica pode crescer aumentando-se a rugosidade superficial da fibra, o que deve ser feito cautelosamente a fim de que a resistência da fibra não fique comprometida. Entretanto, na maioria das vezes, apenas ligação mecânica não é o suficiente; uma resistência complementar pode ser adquirida a partir de interações químicas (ABADIE *et. al.*, 2001).

2.3.3 Efeito da Absorção de Água, Petróleo e Derivados (Envelhecimento)

Uma importante propriedade de um sistema com resina é a resistência à degradação pelo ingresso de água. Quando se tem o envelhecimento de matrizes orgânicas de materiais compósitos em atmosfera úmida ou em meio aquoso, várias conseqüências podem ocorrer com o material, entre as quais se pode citar:

- plastificação da matriz,
- dilatação do material devido à absorção,
- fragilização devido à degradação por hidrólise da estrutura macromolecular,
- trincamento, e
- danos localizados na interface fibra/matriz.

Esses mecanismos levam a uma gradual perda nas propriedades mecânicas (SHENOI e WELLICOME, 1993).

PERREUX e SURI (1997), tendo em vista a redução de custos com manutenção, estudaram a substituição de dutos de aço por dutos compósitos usados para o transporte de água. Em seu trabalho, verificaram que tanto as tensões mecânicas como tensões originadas a partir de alterações ambientais são responsáveis pela degradação da estrutura física e química do material, causada pelo

efeito higrotérmico e por danos mecânicos devidos as variações de temperatura e pressão.

As resinas poliéster e de vinil éster são mais propensas à degradação pela água devido à presença de grupos éster hidrolisáveis. A Figura 20 ilustra a comparação da quantidade de água absorvida pelas resinas epóxi, vinil éster e poliéster, em função do tempo de imersão em água.

As resinas vinil éster absorvem uma maior quantidade de água em comparação com as resinas epóxi devido à presença de grupos éster. Porém, absorvem menos moléculas de água em comparação com as resinas poliéster, em virtude dos grupos éster estarem presentes em menor quantidade.

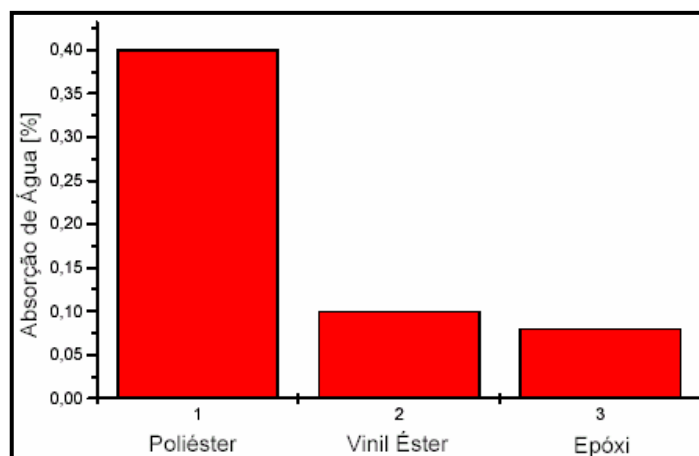


Figura 20: Gráfico de absorção de água das resinas epóxi, vinil éster e de poliéster devido a imersão em água à temperatura ambiente.

Fonte: Disponível em <http://www.barracudatec.com> (acessado em 2004).

A suscetibilidade da matriz à absorção de água e a redução de próprio desempenho em ambiente hostil é uma preocupação inerente ao uso de compósitos de matriz polimérica. O ciclo contínuo de exposição a ambiente seco e úmido pode causar um ligeiro aumento do volume da resina, que é denominado inchamento. O processo de expansão/contração reversível, decorrente da absorção e desorção de umidade, pode estimular a formação de micro-trincas fragilizando o material compósito.

A presença de micro-trincas na matriz polimérica de um material compósito reduz as propriedades finais da resina, e conseqüentemente do compósito (SPSYSTEMS, 2005). ZHOU e LUCAS (1995) mostraram que em um ambiente

agressivo tal como água, a resina micro-trincada absorverá consideravelmente mais água do que uma resina não trincada.

PIRES *et. al.* (2001) estudaram o efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de matrizes poliméricas reforçados com fibra de vidro. Os resultados mostraram decréscimo de 50% a 90% na tensão máxima de ruptura e na resistência ao impacto com o envelhecimento, de acordo com a natureza da matriz. A Figura 21 mostra a evolução do processo de absorção de água com o tempo de exposição e a Figura 22 mostra a evolução da tensão máxima com o tempo de exposição.

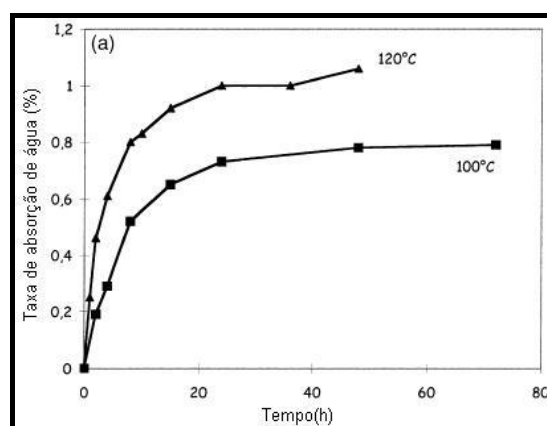


Figura 21: Absorção de água em função do tempo de exposição e temperatura para os compósitos de matriz polibutileno tereftalato (PBT).

Fonte: PIRES *et. al.* (2001).

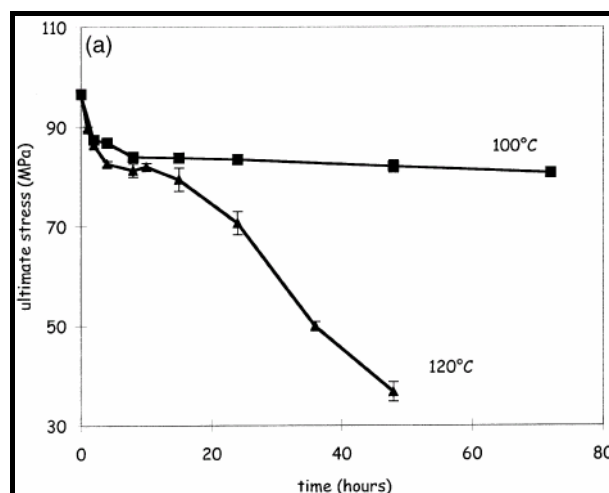


Figura 22: Tensão máxima em função do tempo de exposição e temperatura para os compósitos de matriz polibutileno tereftalato (PBT).

Fonte: PIRES *et. al.* (2001).

Em relação aos efeitos de substâncias químicas como os ácidos oxidantes e certos solventes, SHENOI e WELLICOME (1993) mostraram o decréscimo de aproximadamente 32% de alguns plásticos reforçados por fibras quando submetidos a envelhecimento por imersão no solvente tricloroetileno por 24 horas. Na Tabela é apresentada uma comparação do comportamento de diferentes resinas poliéster e éster vinílicas submetidas à exposição em diferentes agentes químicos por um período de um ano. É importante ressaltar que as resinas epóxi e éster vinílica são mais resistentes que as poliésteres.

Tabela 10: Comportamento de diferentes resinas poliéster e éster vinílica submetidas a exposição em diferentes agentes químicos por um período de um ano.

Agente Químico	Tipo de Resina					
	Isopoliéster Comercial		Poliéster Bisfenol A Atlac 382		Vinil Éster Derakane 411-45	
	Tensão de Flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)	Tensão de Flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)	Tensão de Flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)
Inicial	115	5800	95	5000	160	5800
Água destilada	90	4600	75	4100	100	5000
Ácido Nítrico - 5%	75	4200	85	4500	95	4000
Ácido Clorídrico - 5%	92	4800	68	4200	115	5000
Ácido Sulfúrico - 25%	70	5400	70	4800	125	5300
Óleo Combustível	98	5400	95	4800	140	4500
Gasolina	90	5100	92	5000	145	5000
Benzeno	90	3500	58	1800	40	900

Fonte: SHENOI e WELLICOME (1993).

Pesquisas envolvendo o envelhecimento de polímeros e materiais compósitos de matriz polimérica em petróleo são raros na literatura e quando se encontram trabalhos envolvendo o envelhecimento desses materiais em algum tipo de hidrocarboneto estão voltados aos solventes.

2.4 Ensaio de Tração e de Pressão Hidrostática

Na engenharia de materiais, as características de resistência são baseadas principalmente na relação entre as forças externas e o estado de tensões internas, as quais são necessárias para a produção da fratura. As condições limites, conhecidas como critério de resistência, têm sido formuladas principalmente a partir de observações do comportamento dos materiais sob diferentes estados de tensões.

A caracterização dos sistemas de materiais compósitos requer a realização de testes experimentais de forma a determinar as propriedades intrínsecas dos materiais, como resistência e rigidez. Muito esforço tem sido feito no desenvolvimento de métodos que avaliem, de forma apropriada, as variações dos materiais (CARLSSON *et. al.*, 1990).

Através do ensaio de tração em anéis compósitos, PARNAS *et. al.* (2005) determinaram a tensão de ruptura circunferencial (σ_θ) e o módulo de elasticidade circunferencial (E_θ) para diferentes compósitos, com o uso da garra mostrada na Figura 23.

Analisaram parâmetros distintos como resinas (2), fibras (5) e ângulos de enrolamento (5). E concluiu a eficiência do teste para se determinar o desempenho de estruturas tubulares sob pressão interna e o comportamento linear elástico para as amostras testadas.

PARNAS *et. al.* (2005) *apud* WANG *et. al.* realizaram testes de tração em anéis com redução de seção e concluiu que o teste é preciso para determinação das propriedades em amostras tubulares.

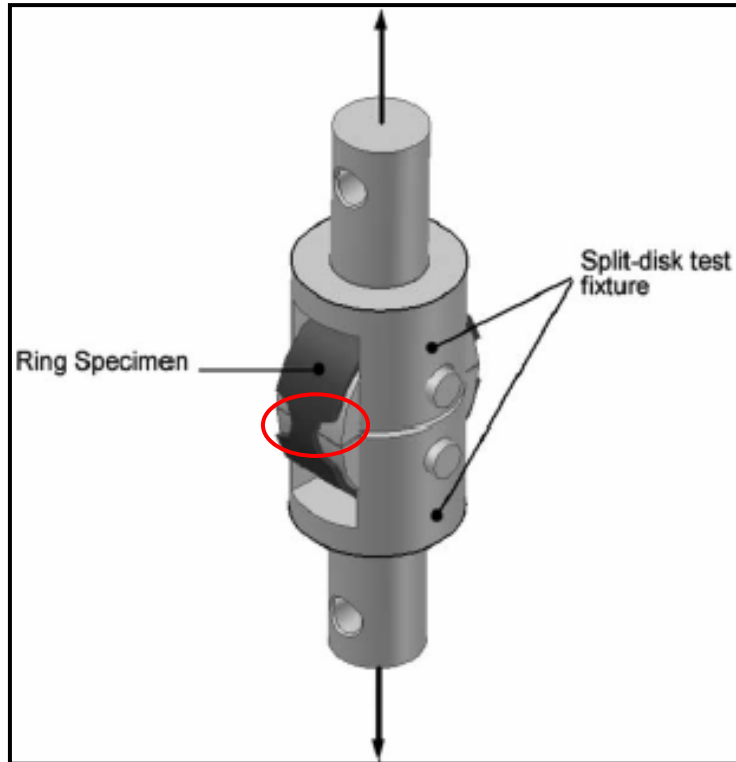


Figura 23: Garra utilizada no ensaio de tração em anéis compósitos.

Fonte: PARNAS *et. al.* (2005).

YWN-DE *et. al.* (1987) tiveram como objetivo prever a pressão de colapso utilizando o teste de tração em anéis, levando em consideração dois fatores:

- a tensão de flexão na região do plano médio (plano dos semi-discos – região destacada em vermelho na Figura 23), e
- a influência da variabilidade dos materiais, que resultam em diferentes dados experimentais entre os anéis e os tubos.

Os resultados obtidos, com o uso de extensômetros, comprovaram que a deformação no plano médio consiste de duas partes:

- deformação devido à tração proporcional a carga aplicada, e
- deformação devido à flexão que diminui com o aumento da deformação do anel.

Quando ignora-se a influência da tensão de flexão, a tensão de colapso circunferencial pelo ensaio de tração é menor do que a tensão de ruptura circunferencial obtida pelo teste hidrostático. Portanto, o ensaio de tração em anéis é considerado mais conservativo que o teste de pressão interna.

ZINOV'EV et. al. (2001) estudaram a resistência de anéis feitos de materiais compósitos e observou que a deformação axial é retardada (ou impedida) pelas forças de atrito entre a superfície dos semi-discos e a superfície interna do anel. A principal deformação observada foi na direção circunferencial. Para minimizar erros de medição, os extensômetros foram conectados aos instrumentos usando um circuito de semi-ponte. Obteve um estado de tensão não-homogêneo, porém foi possível diminuir essa não-homogeneidade com a lubrificação entre as superfícies.

Diante da questão do atrito entre as superfícies, JONES et. al. (1996) propõem ao ensaio de tração em anéis compósitos a introdução de rolamentos com a finalidade de reduzir o atrito, entre as superfícies em contato anel-disco, a um valor mínimo.

Através de modelos analíticos e por elementos finitos JONES et. al. (1996) mostram o efeito da flexão localizada, com a deformação circunferencial atingindo valores desprezíveis na região do plano médio e a partir de aproximadamente 20mm dessa região não há o efeito da flexão sobre a deformação circunferencial.

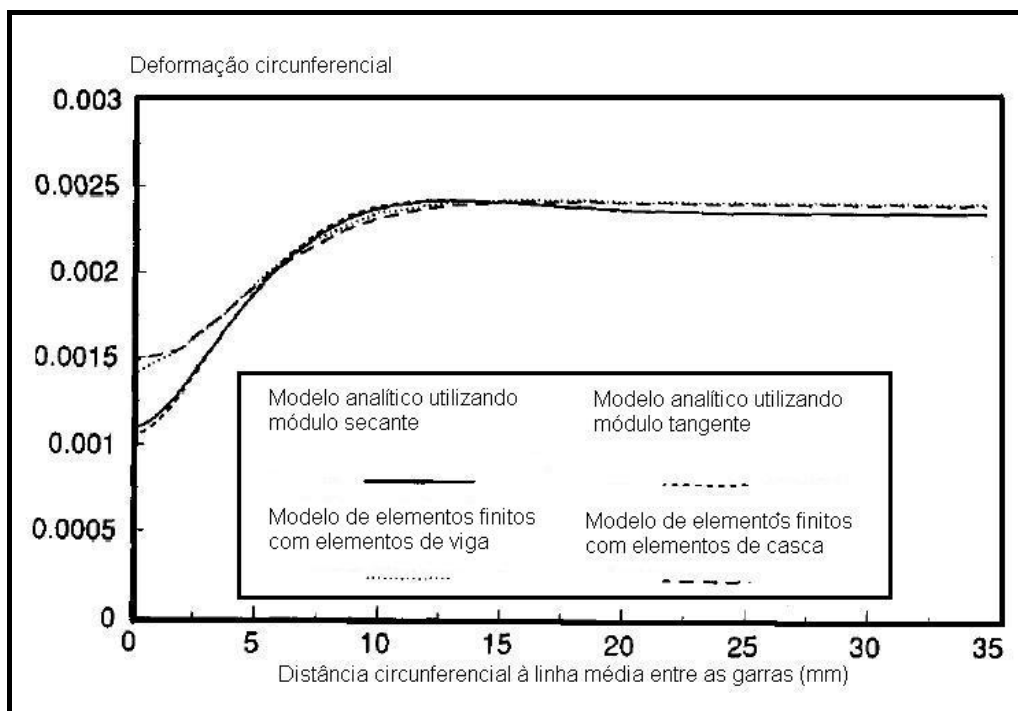


Figura 24: Ilustração da flexão localizada na região do plano médio, através do gráfico Distância circunferencial a partir do plano médio versus deformação circunferencial.

Fonte: JONES et. al. (1996).

Segundo JONES *et. al.* (1996) um outro método para obter a tensão circunferencial de um corpo de prova tubular é através da pressurização interna, porém é um teste complexo que requer corpos de prova grandes e necessita de cuidados particulares a fim de evitar vazamentos.

Para o teste de pressurização interna, o tubo fica engastado nas extremidades. Quando os deslocamentos são restringidos pelos flanges nas extremidades, uma tensão de flexão é induzida próxima a essas regiões. Tal concentração de tensão é confirmada analítica e experimentalmente, podendo provocar falhas prematuras e resultar numa resistência de ruptura sem sentido (CARLSSON *et. al.*, 1990).

SUN *et. al.* (1999) relatam a importância da predição da pressão de ruptura para os vasos de pressão. Descreve, ainda, que a maioria das pesquisas tem sido feita experimentalmente e poucos modelos analíticos foram desenvolvidos até então.

JONES *et. al.* (1996) citam, ainda, a freqüente utilização de estudos que envolvem o comportamento mecânico de materiais compósitos submetidos a carregamentos combinados, como tração e torção, por exemplo.

BAI *et. al.* (1997) avaliaram o comportamento mecânico de tubos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de vidro submetidos a carregamentos combinados, como tração axial e pressão interna. Observou um comportamento linear elástico no teste de tração e no teste de pressão interna, para deformações menores que 1,0% e 0,5%, respectivamente. Concluiu que o módulo de elasticidade independe do conteúdo de vazios, porém este influencia os critérios de falha. Observou que a taxa de carregamento nos teste de pressão interna tem pouca influência sobre o módulo de elasticidade.

2.5 Análise numérica pelo método dos elementos finitos

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 modelo matemático, que é uma aproximação da situação real, o resultado obtido será testado com base nos resultados fornecidos através dessa ferramenta.

No âmbito da Engenharia, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de uma estrutura de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores.

A formulação do MEF pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos. De todos estes métodos, aquele que apresenta uma maior simplicidade e, conseqüentemente, uma maior versatilidade é o método dos deslocamentos.

O MEF pode ser utilizado através de programas específicos de engenharia, que podem solucionar desde problemas simples envolvendo análises lineares ou mais complexos como simulações não-lineares.

A aplicação do MEF pode ser resumida basicamente em 3 etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento.

- Pré-processamento

É o estágio no qual se define o modelo, ou seja, a estrutura a ser analisada. Introduzem-se as propriedades do material, as condições de contorno, os carregamentos, os tipos de análise, elementos e respostas, a forma do elemento e as simplificações de forma a facilitar a solução. As modificações dessas variáveis afetam os resultados obtidos.

Neste estágio o modelo é discretizado, isto é, o modelo é subdividido em elementos, que podem ser lineares, quadráticos ou tetraédricos. Esses pequenos elementos são interligados entre si através de nós. O conjunto, nós e elementos, são

denominados de malha - “*mesh*”. Quanto maior o número de elementos na malha, mais preciso é o resultado obtido.

Para se determinar o tipo de análise, vale lembrar que as ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, na análise de uma estrutura deveriam ser considerados, obrigatoriamente, os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações, é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática.

- Simulação

Esta etapa é dependente do estágio de configurações descrito anteriormente. A solução do problema baseia-se num algoritmo numérico que objetiva solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as condições impostas ao modelo na etapa anterior.

Na análise de tensões, o deslocamento dos nós são as variáveis principais a serem calculadas. Uma vez que os deslocamentos são conhecidos, a tensão e a deformação em cada elemento podem ser determinadas.

- Pós-processamento

É o estágio de avaliação dos resultados obtidos e depende das necessidades requeridas para a estrutura modelada.

Capítulo III

Procedimento Experimental

Este capítulo relata o trabalho experimental realizado nesta pesquisa, assim, descreve os corpos de prova dos testes e o procedimento utilizado em detalhe. Discutem-se: o processo de desenvolvimento, a fabricação, as nomenclaturas dos corpos de prova e o procedimento do teste.

A seguir são ressaltados e descritos os testes experimentais realizados, abordando suas características, técnicas, dados a serem analisados, simplificações e métodos utilizados, são estes:

- ensaio de tração em anéis,
- ensaio hidrostático,
- simulação computacional, e
- tratamento estatístico.

3.1 Ensaio de Tração em Anéis

O ensaio de tração em anéis objetiva a caracterização mecânica de materiais compósitos. Esta é possível com a determinação da tensão circunferencial aparente de ruptura, com aplicação de uma força, dimensões do corpo de prova e do módulo de elasticidade, que é determinado por meio das tensões e deformações circunferenciais.

3.1.1 Confeção dos Corpos de Prova

O material compósito, objeto de ensaio, foi disponibilizado na forma de tubos cilíndricos com as seguintes dimensões: 12" (304,8mm) de diâmetro nominal e 1000mm de comprimento - Figura 10, os quais foram fabricados e fornecidos pela empresa Polyplaster. Todos os estudos e pesquisas prévios, relacionados à caracterização do material foram feitos por EGBERT (2004).



Figura 10: Tubo de material compósito.

O duto compósito é constituído por matriz de resina vinil-éster e fibras de vidro contínuas orientadas na direção circunferencial e picotadas ao longo do tubo e foi fabricado por laminação simultânea de fibras contínuas e picadas pelo processo “*hoop-chop*”.

No Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ foram fabricados anéis a partir da usinagem dos tubos – Figura 26.



Figura 26: Vistas do anel obtido a partir do corte dos tubos.

É previsto que os anéis tenham a geometria e o intervalo dimensional requeridos pela norma ASTM D2290-00, optando-se por 25mm de largura e reduções de seção de 4mm de raio, conforme esboço da Figura 27.

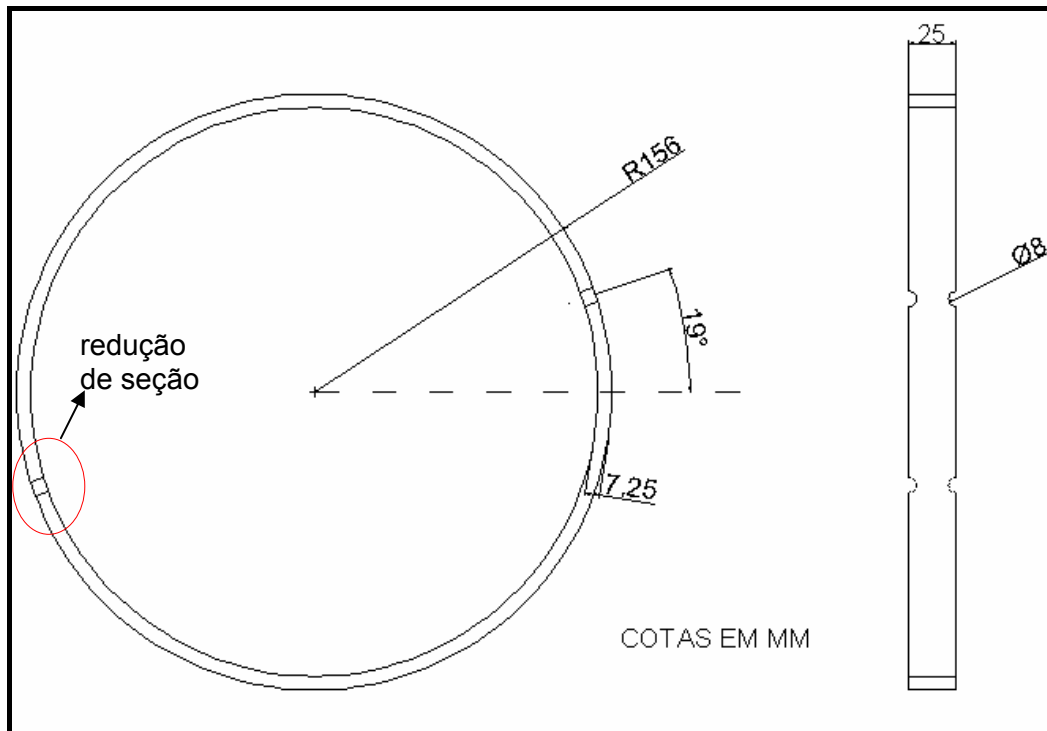


Figura 27: Vistas do anel com suas dimensões principais.

Em seguida, foram inseridos defeitos, tanto nos anéis como nos tubos. Os defeitos nos anéis possuem formato cilíndrico, variando-se o raio e a profundidade, obtendo-se seis grupos distintos de anéis.

- 13 anéis íntegros (I#):
 - 6 testados sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco (I02, I03 e I04),
 - 6 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco (I01, I05, I06, I07, I08, I09, I10, I11 e I12), e
 - 1 testado sem lubrificante e com a redução de seção localizada no plano médio (I13).
- 4 anéis íntegros e sem redução de seção (SRS#):
 - 1 testado sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco (SRS1, SRS2 e SRS3), e
 - 3 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco (SRS4).
- 5 anéis com defeitos vazantes e de 4mm de diâmetro (CDV4D#):
 - 1 testados sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição I (CDV4D2), e

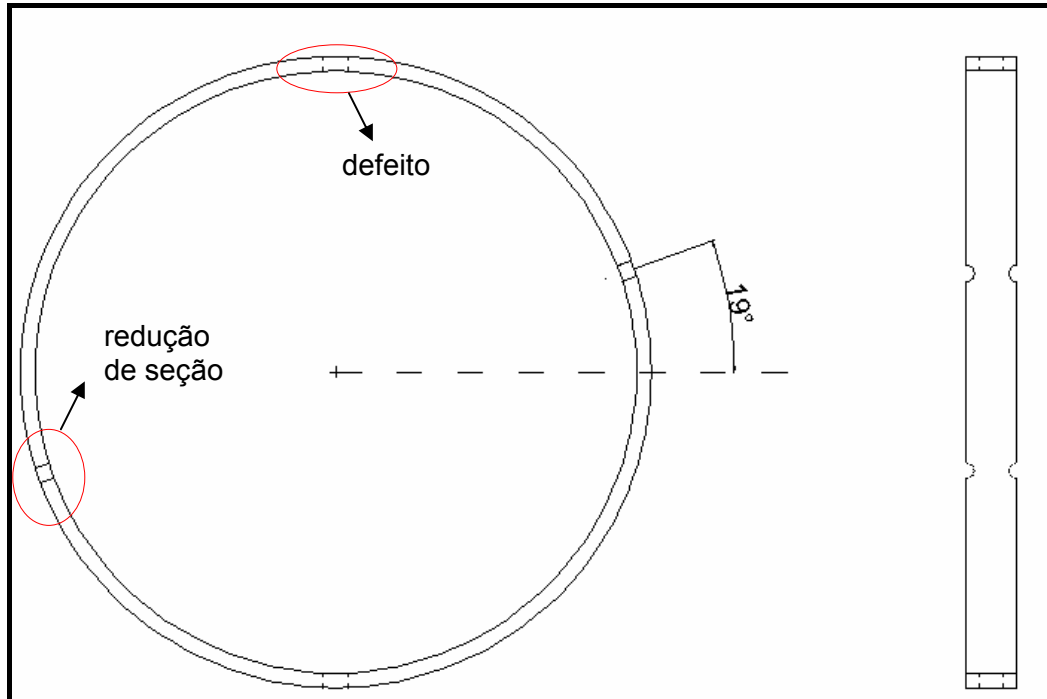
- 4 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição II (CDV4D1, CDV4D3, CDV4D4 e CDV4D5).
- 5 anéis com defeitos vazantes e de 8mm de diâmetro (CDV8D#):
 - 2 testados sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição I (CDV8D1 e CDV8D2), e
 - 3 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição II (CDV8D3, CDV8D4 e CDV8D5).
- 5 anéis com defeitos de 5mm de profundidade e 12mm de diâmetro (CD5P12D#):
 - 2 testados sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição I (CD5P12D1 e CD5P12D2), e
 - 3 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição II (CD5P12D3, CD5P12D4 e CD5P12D5).
- 5 anéis com defeitos vazantes e de 12mm de diâmetro (CDV12D#):
 - 2 testados sem a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição I (CDV12D1 e CDV12D2), e
 - 3 testados com a presença de lubrificante na interface anel/semi-disco e com defeito na posição II (CDV12D3, CDV12D4 e CDV12D5).

Abaixo, é apresentada uma tabela resumida:

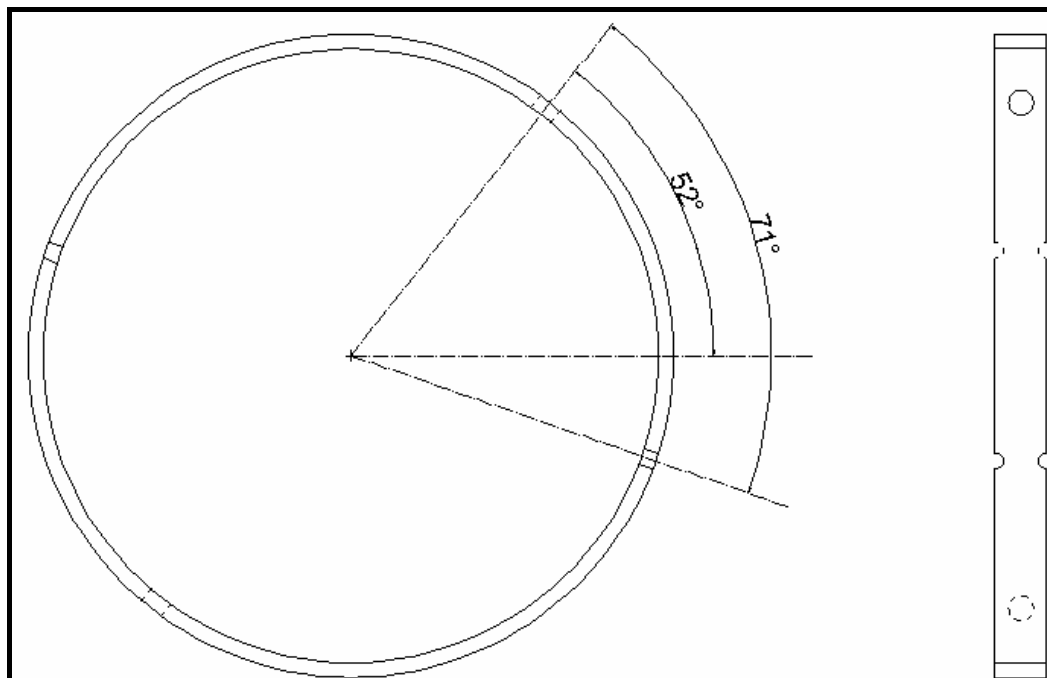
Tabela 11: Quantidade de anéis ensaiados para cada tipo de anel.

Tipos de Anéis			Com lubrificante	Sem lubrificante
Sem Defeito	Íntegros	Posição I (I#)	6	6
		Alinhado (IAlinhado)	-	1
	Sem Redução de Seção (SRS#)		3	1
Com Defeito	CDV4D#	Posição I	4	-
		Posição II	-	1
	CDV8D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2
	CD5P12D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2
	CDV12D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2

As configurações quanto aos posicionamentos utilizados nos ensaios experimentais são esboçadas abaixo – Figura 28, para anéis com defeito nas posições I (não-girado) e II (girado), e anel íntegro alinhado (IAlinhado).



(a)



(b)

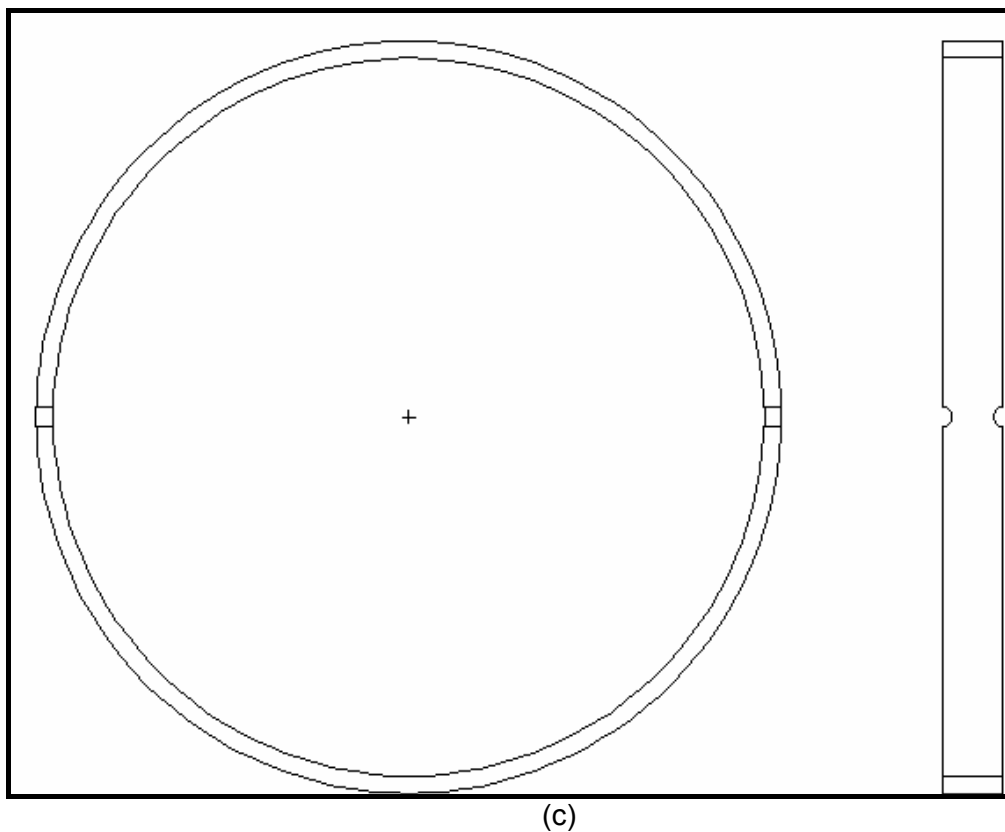


Figura 28: Posições do defeito e da redução de seção para: (a) anel com defeito na posição I (não-girado), (b) anel com defeito na posição II (girado), (c) anel íntegro alinhado (IAlinhado).

O anel íntegro na posição I é representado pela Figura 27.

Para cada grupo de anéis é feita a escolha dos 3 anéis mais representativos para fins de comparação, conforme estabelece a norma ASTM D2290-00.

3.1.2 Metodologia Adotada no Ensaio

Tendo como referência a norma ASTM D2290-00, procedimento **A** para avaliação de materiais termorrígidos reforçados, foram realizados ensaios de tração em anéis no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

Entre os objetivos estão a determinação: da tensão circunferencial aparente de ruptura de um compósito de formato tubular; do módulo de elasticidade circunferencial

e da influência de defeitos no comportamento mecânico. Para tanto, foi necessária a fabricação e o tratamento térmico de duas garras e dois pinos de aço SAE 8640, realizados no Laboratório de Fabricação Mecânica da COPPE/UFRJ e no Laboratório de Laminação e Tratamentos Térmicos do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, respectivamente.

As garras foram recebidas na forma de barras chatas e o pino em tarugo. As dimensões estabelecidas para a garra foram pré-definidas de acordo com a prensa a ser utilizada – Apêndice A. As garras foram tratadas termicamente, por têmpera (aquecimento até 865°C, encharque por 2 horas e 45 minutos e resfriamento em óleo) e revenido (aquecimento até 425°C, encharque por 5 horas e 30 minutos e resfriamento ao ar).

Da mesma forma, os pinos sofreram os mesmos tratamentos, porém com estágios diferentes: têmpera (aquecimento até 865°C, encharque por 55 minutos e resfriamento em óleo) e revenido (aquecimento até 425°C, encharque por 1 hora e 50 minutos e resfriamento ao ar).

A garra e o pino têm a finalidade de suportar os dois semi-discos, nos quais o anel é introduzido. A análise de tensões numérica e analítica, na garra e no pino, é feita no Apêndice B.

Após a confecção dos anéis, foi realizada a colocação dos extensômetros - *strain-gauges*, que consistiu de 3 etapas principais:

- preparação da superfície,
- colagem dos *strain-gauges*, e
- soldagem dos fios.

Para preparação da superfície, utilizaram-se 4 tipos de lixas diferentes (600, 400, 320 220). Em seguida, efetuou-se a limpeza da região lixada com estireno e a colagem com uma cola a base de cianoacrilato.

Finalmente, realizou-se a soldagem a frio dos fios aos extensômetros. Os *strain-gauges* utilizados foram do fabricante Vishay, modelo L2A-06-062LW-120, mostrado na Figura 29.

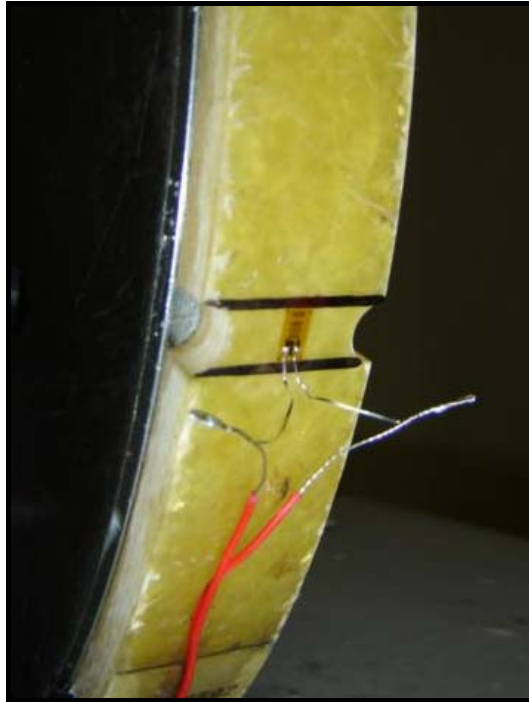


Figura 29: Extensômetro colado e soldado.

Vale ressaltar que o ensaio utilizando extensometria requer mais cuidados durante a montagem na prensa, devido à possibilidade de quebra da solda ou arrancamento da “perna” do extensômetro.

Do total de 37 corpos de prova, em 26 foi utilizado o recurso de extensometria o que permitiu a obtenção de alguns parâmetros, como por exemplo, módulo de elasticidade.

3.1.3 Descrição do Equipamento de Ensaio de Tração em Anéis

O equipamento para realização do ensaio de tração foi uma prensa universal Shimadzu, modelo UH-F1000kNI, com capacidade de até 1000kN (Figura 30).

A leitura do extensômetro é feita por um condicionador Linx (Figura 31). Este faz a leitura em volts e transforma em unidade de deformação.



Figura 30: Prensa para o ensaio de tração.



Figura 31: Condicionador de aquisição de dados dos extensômetros.

3.1.4 Realização do Ensaio

Conforme a norma ASTM D2290-00, os princípios e métodos deste ensaio baseiam-se na aplicação da carga de tração, controlando-se a taxa de carregamento sobre o anel.

Após a montagem anel-disco, é iniciada a configuração da prensa. Optou-se por uma taxa de carregamento de 5 mm/min (Figura 32), valor médio ao intervalo proposto pela norma e por ser o mesmo valor utilizado no trabalho realizado por EGBERT (2004).

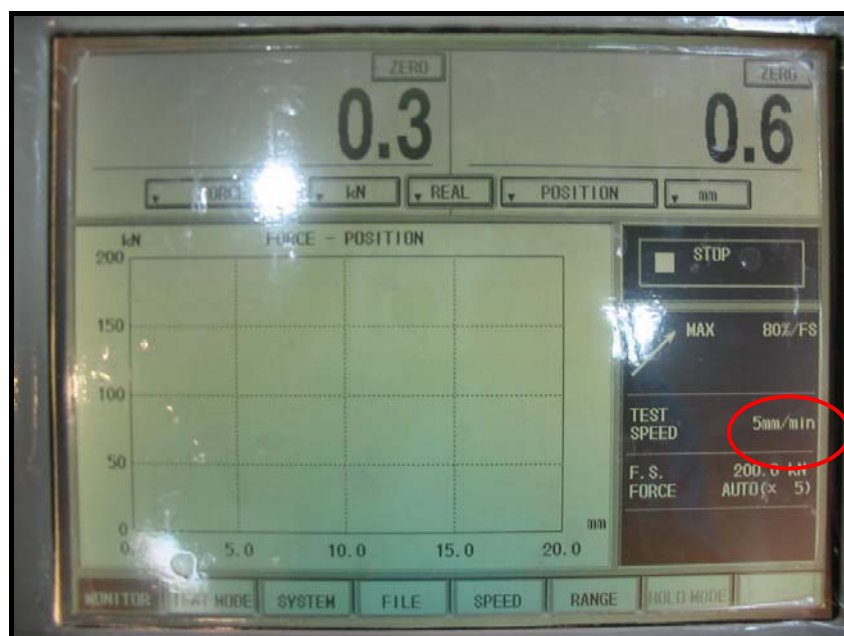


Figura 32: Tela de dados e configuração da prensa.

A Figura 33 ilustra os principais componentes do ensaio, como garra, pino, anel, semi-disco, e a região do plano médio.

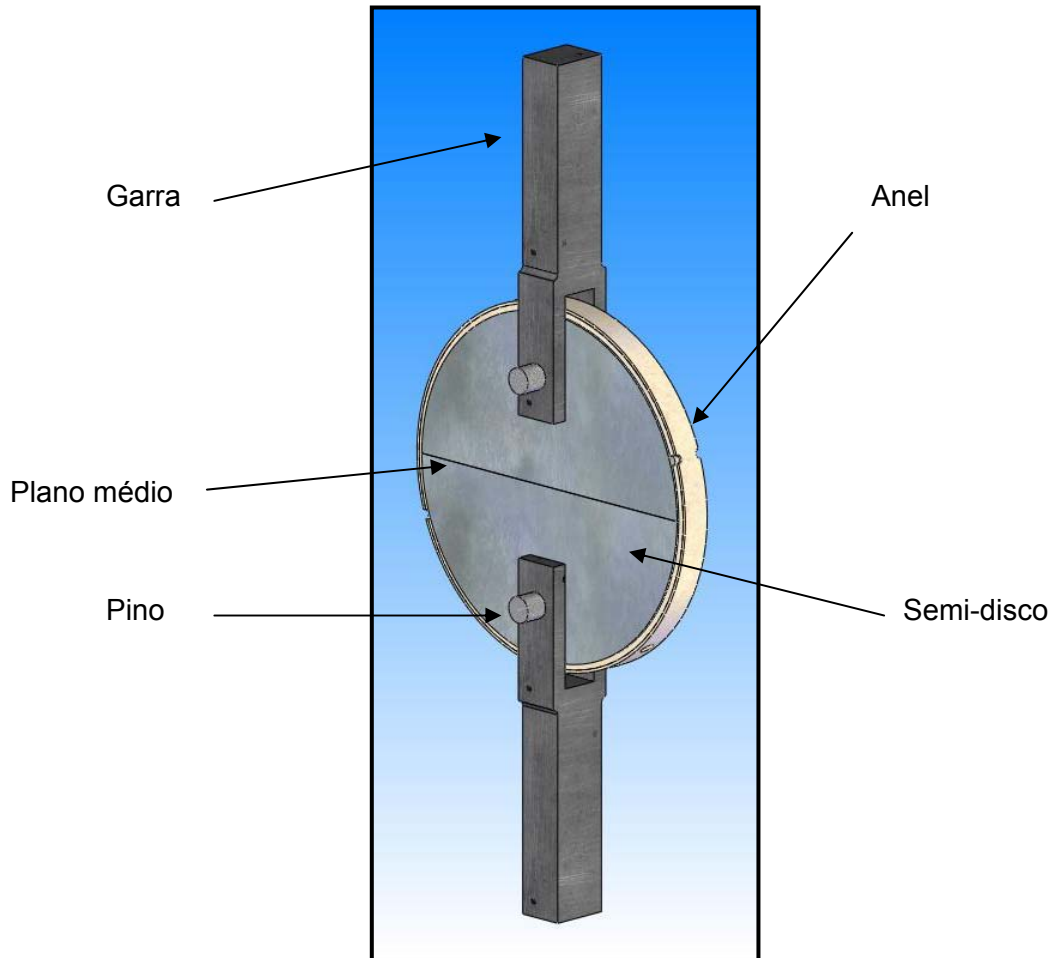


Figura 33: Esquema ilustrativo do ensaio de tração em anéis.

A partir da força obtida como dado de saída foi possível calcular alguns valores de propriedades do material compósito. Com a força de ruptura (F_r) e a área média (A_m) determinou-se a tensão de ruptura circunferencial aparente ($\sigma_{\theta Ap}$), através da seguinte expressão:

$$\sigma_{\theta Ap} = \frac{F_r}{2 \cdot A_m}.$$

Ainda, com o dado de saída deformação circunferencial (ε_{θ}) e $\sigma_{\theta Ap}$, traçou-se a linha de tendência, definindo-se, também, o módulo de elasticidade circunferencial (E_{θ}) para cada anel.

3.2 Ensaio Hidrostático

O ensaio hidrostático foi executado no Laboratório de Compósitos do Departamento de Engenharia Química da UFRJ, basicamente, a fim de quantificar a pressão interna necessária para a ruptura dos tubos, e em seguida determinar a tensão circunferencial de colapso, em função de formulações da mecânica dos sólidos.

O ensaio foi realizado baseado na norma ASTM D1599-99 (*Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings*).

No equipamento de ensaio é possível regular-se a taxa de pressurização na qual é submetido o tubo, de forma que sua ruptura se dê entre 60 e 70 segundos, de acordo com a norma. Entretanto, devido às limitações da bomba d'água, o intervalo de tempo para a ruptura do tubo não pôde ser respeitado.

O procedimento A foi o selecionado por ter a finalidade de determinar a pressão de colapso, assim como o modo de falha.

3.2.1 Descrição do Equipamento de Ensaio Hidrostático

O equipamento é constituído, basicamente, pelos seguintes componentes:

- computador,
- poço,
- central lógica de processamento (CLP),
- componentes eletro-mecânicos, e
- sistema de engastamento do corpo de prova.

O computador possui o software *Eclipse Scada* que recebe as informações do CLP (Figura 34). Através desse programa o operador configura e controla o ensaio de

pressurização. A taxa de pressão na qual submetemos o tubo, por exemplo, pode ser controlado a partir do tempo estimado e da pressão estimada de colapso da estrutura.



Figura 34: CLP do equipamento para ensaio hidrostático.

O tubo é colocado no poço, fixados por dois flanges, ligados por hastes, em suas extremidades (Figura 35). Num dos flanges há uma conexão com a mangueira que sai da bomba, que tem por finalidade transportar a água pressurizada para o interior da amostra.



Figura 35: Tubo engastado por flanges e o poço.

A bomba recebe a água de um reservatório de 5 litros para enviá-la ao tubo através da mangueira. Dentre outros componentes eletro-mecânicos estão: a bomba hidráulica, solenóides, dentre outros – Figura 36.



Figura 36: Principais componentes eletro-mecânicos.

Na montagem do tubo nos flanges, deve-se ressaltar o cuidado a ser tomado nesta etapa a fim de evitar vazamentos. Os flanges possuem rasgos circunferenciais,

e neste são colocados *o-rings* e silicone, a fim de assegurar a vedação. As porcas fixadas nas hastes também cumprem essa função por meio do aperto contra os flanges.

3.2.2 Problemas e possíveis soluções para realização do ensaio

A execução completa do ensaio, ou seja, a ruptura do tubo não foi possível ser alcançada por problemas de vedação da água em alta pressão.

O local crítico para vedação na interface entre o tubo e o flange é o rasgo circunferencial presente no flange. Este último não é o adequado para os tubos utilizados no presente trabalho porque permitem uma folga entre os componentes.

A aplicação de produtos, como silicone e/ou borrachas de diferentes durezas a fim de assegurar total vedação não foi suficiente. Estas últimas rasgavam quando se ajustavam os flanges ao tubo, apertando-os. Durante o ensaio, devido às altas pressões existentes essas borrachas escorregavam e saíam do posicionamento correto causando vazamento – Figura 37.



Figura 37: Vazamentos devido ao escorregamento das borrachas de vedação.

Uma nova tentativa foi elaborada e executada. Baseada em ensaios anteriores que obtiveram sucesso com tubos semelhantes. Estes possuíam extremidades de maiores espessuras que asseguravam um melhor encaixe no rasgo circunferencial do flange.

Portanto, a fim de se obter condições semelhantes, um molde de madeira com um rasgo circunferencial foi fabricado a fim de aumentar a espessura do tubo em suas extremidades – Figura 38. Porém, o aumento de espessura quebrou com a compressão, durante o aperto das porcas, não sendo suficiente para evitar o vazamento, apontando para o desenvolvimento de uma outra metodologia.

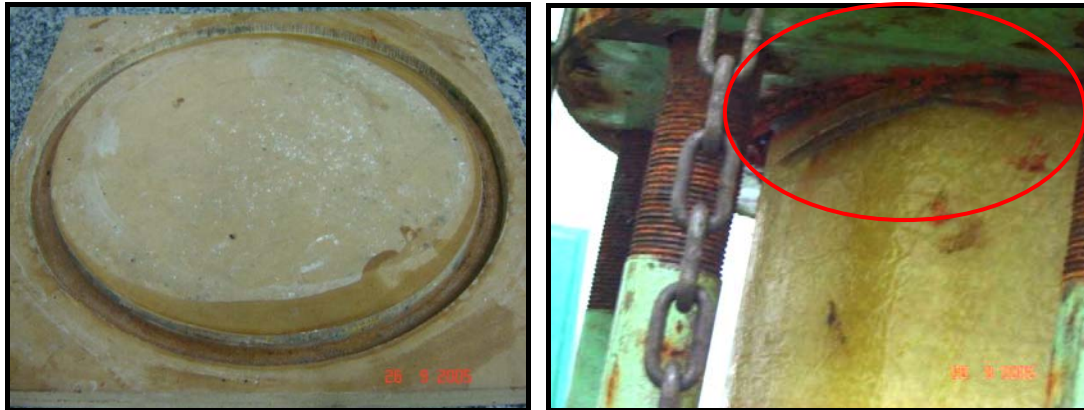


Figura 38: Molde de madeira e resina para aumento de espessura quebrada.

As principais modificações propostas são:

- substituição da bomba d'água possibilitando um aumento da vazão de água pressurizada, e
- criação de um novo sistema de engastamento do tubo.

A primeira modificação possibilitaria alcançar taxas de pressurizações maiores, respeitando dessa forma o intervalo de tempo total para ruptura do tubo a ser ensaiado e pré-definido pela norma. A proposta seguinte é a adequação de flanges para cada tipo de tubo ensaiado que possua diâmetros distintos. Outra opção seria a fabricação de um flange auto-ajustável. Com isso, a fabricação de apenas um flange para tubos diversos seria necessária.

3.3 Análise Estatística

Os dados obtidos experimentalmente ou calculados a partir destes, através de formulações da mecânica dos sólidos, foram tratados estatisticamente através do programa computacional *Statistica 7*. Neste foi conduzido o Teste F (análise de variância) e o Teste LSD Fisher a um intervalo de confiança de 95%, considerando a existência de dois fatores independentes (corpo de prova e posição) e duas variáveis resposta ($\sigma_{\theta Ap}$ e E_{θ}).

3.4 Simulação Computacional

A tensão de colapso obtida experimentalmente no ensaio de tração em anéis é alvo de comparações com simulações numéricas, de forma a comparar e validar os resultados obtidos experimentalmente, assim como, analisar a distribuição de tensão no corpo de prova. Para tanto, é utilizado o software modelagem computacional por elementos finitos *Abaqus 6.4*.

O modelo possui as dimensões dos anéis fabricados. Para cada grupo de anel e condição de ensaio um modelo foi elaborado.

Na etapa de pré-processamento, as partes anel e semi-discos são criadas separadamente, então é estabelecido apenas um contato entre as partes. Assim, a montagem é feita, considerando os semi-discos como corpos rígidos e o anel como corpo deformável.

As propriedades estipuladas para o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson basearam-se nos resultados obtidos nos teste de tração em anéis e nas literaturas específicas, respectivamente. O anel compósito para fins de análise numérica é considerado isotrópico.

Quanto às condições de contorno, ilustrada na Figura 39, fixou-se o semi-disco inferior e para o semi-disco superior se estabeleceu:

$$u_x = u_z = 0.$$

Para o anel, na seção do plano médio, a condição de contorno é:

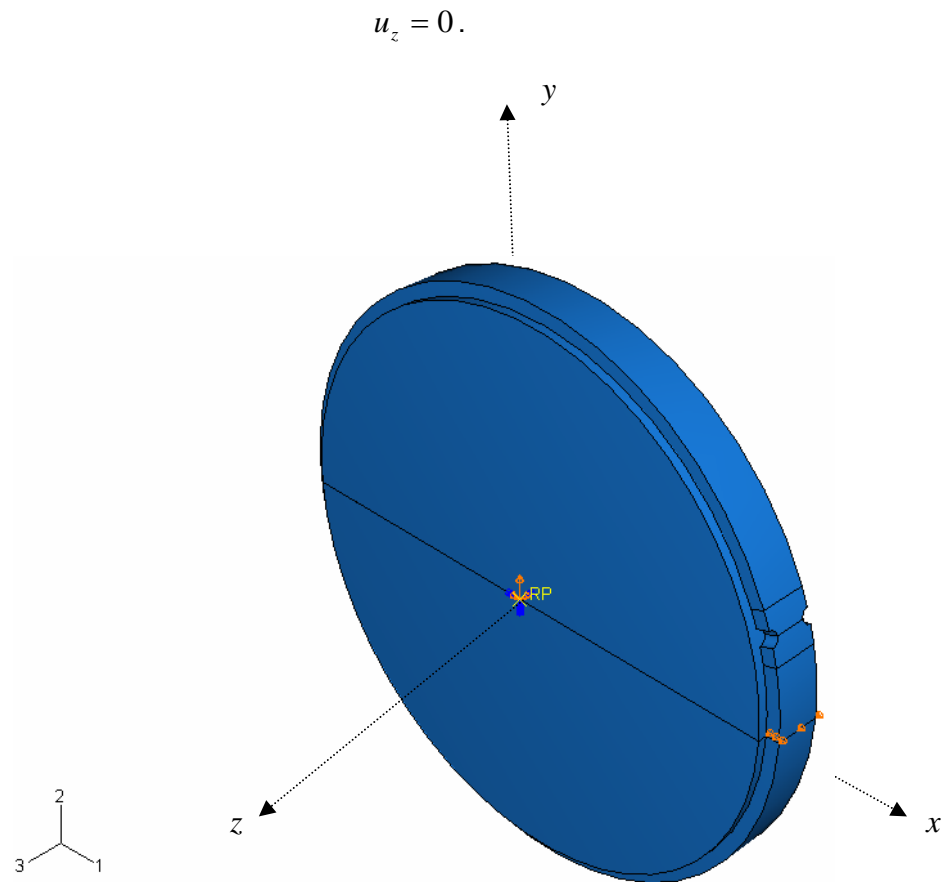


Figura 39: Condições de contorno

Para fins de carregamento é considerado o deslocamento máximo médio (d_m máx) obtido experimentalmente para cada grupo de corpo de prova conforme descrito na Tabela 12 e mostrado na Figura 40. Portanto, critérios de falha não são considerados.

Tabela 12: Deslocamento máximo médio para cada grupo de corpo de prova.

Corpo de Prova	d_m máx. (mm)
I#	6,37
SRS#	9,13
CDV4D#	6,65
CDV8D#	7,03
CDV12D#	6,03
CD5P12D#	6,52

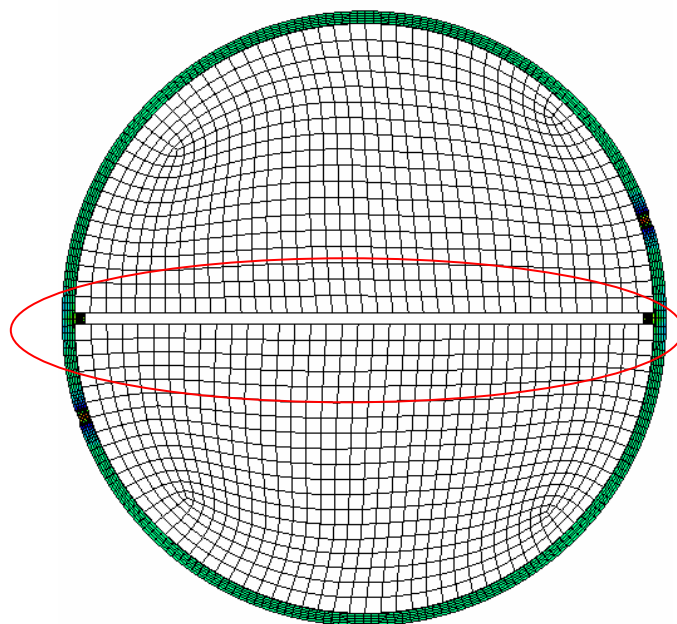


Figura 40: Deslocamento aplicado nos semi-discos.

Os tipos de elementos, quantidades de elementos e nós para cada modelo, considerando diferentes anéis, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Tipo de elemento, número de elementos e nós para os modelos numéricos.

Modelos	Tipo de elemento	Número de elementos	Número de nós
Anel I*	C3D20R	9468	49170
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel I Alinhado*	C3D8R	17536	22824
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel SRS*	C3D20R	8640	43946
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV4D*	C3D8R	6200	9384
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV8D*	C3D8R	5960	9192
Semi-discos	R3D4	780	948
Anel CD5P12D*	C3D8R	11400	15763
Semi-discos	R3D4	780	948
Anel CDV12D*	C3D8R	6520	10152
Semi-discos	R3D4	464	590

Modelos	Tipo de elemento	Número de elementos	Número de nós
Anel CDV4Dgirado*	C3D8R	5472	8605
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV8Dgirado*	C3D8R	8950	21414
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CD5P12Dgirado*	C3D8R	5544	8530
Semi-discos	R3D4	536	680
Anel CDV12Dgirado*	C3D8R	10630	15372
Semi-discos	R3D4	464	590

Na criação da malha, foram selecionadas análises linear e quadrática. Esta última aplicada somente aos anéis íntegros e sem redução de seção, porque na simulação não houve convergência da solução analítica. Acredita-se que a introdução do defeito possa ter provocado essa tendência.

Os semi-discos utilizaram elementos quadriláteros tridimensionais (R3D4). Nos anéis foram identificados elementos linear hexaédrico e quadrático hexaédricos, tipos C3D8R e C3D20, respectivamente. A diferença está no número de nós, onde no C3D8R existem nós nos vértices do elemento apenas, enquanto no C3D20 há nós nos vértices e no meio desses.

Capítulo IV

Resultados e Discussões

4.1 Considerações Iniciais

Os ensaios realizados contaram com um total de 37 corpos de prova fabricados seguindo variações, conforme descrito no Capítulo III relativo ao Procedimento Experimental. Estes foram submetidos ao ensaio mecânico de tração, de acordo com a metodologia descrita na norma ASTM D2099-00. Nos Apêndices D e E, respectivamente, constam tabelas com as dimensões e as forças de ruptura para cada anel testado e os principais parâmetros calculados.

Os resultados do ensaio de tração encontram-se na Figura E1 do Apêndice E. Nesta têm-se reunidos os gráficos tensão circunferencial aparente ($\sigma_{\theta Ap}$) versus deformação circunferencial (ε_{θ}) para os 5 grupos de anéis. Ressaltando-se que no grupo SRS não foi utilizada extensometria e, por isso, justifica-se a ausência deste.

Os gráficos da Figura E1 correspondem aos dados obtidos para os corpos de prova onde se utilizou extensometria. Para estes, na Tabela 14, listam-se os valores médios das tensões circunferenciais aparente ($\sigma_{\theta Ap}$) dos 3 anéis mais representativos de cada grupo.

Tabela 14: Tensões circunferenciais aparente média para cada grupo de corpos de prova.

Corpo de Prova	$\sigma_{\theta Ap}$ (MPa)
Média I# (I01, I03, I04)	231,77
Média CDV4D# (CDV4D1, CDV4D2, CDV4D4)	253,09
Média CDV8D# (CDV8D2, CDV8D4, CDV8D5)	277,64
Média CDV12D# (CDV12D3, CDV12D4, CDV12D5)	269,35
Média CD5P12D# (CD5P12D2, CD5P12D3, CD5P12D5)	231,91

Para elaboração dos gráficos da Figura E1, foi determinada analiticamente uma tensão circunferencial teórica para um tubo - Apêndice F - com a finalidade de tornar os parâmetros adimensionais. Esta tensão teórica adotada foi denominada tensão circunferencial de referência ($\sigma_{\theta R}$), obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_{\theta R} = \frac{F}{2 \cdot t \cdot \Delta z} \Rightarrow \sigma_{\theta R} = 244,05 MPa ,$$

onde:

- F é a força de tração média a que os anéis forma submetidos durante os ensaios, e,
- t e Δz a espessura e a largura do corpo de prova, respectivamente.

E a pressão interna a que pode ser submetido o tubo com estas dimensões é obtida pela expressão::

$$p = \sigma_{\theta R} \cdot \frac{t}{R_i} \Rightarrow p = 11,89 MPa ,$$

onde R_i é o raio interno do anel.

4.2 Análise de tensões

De acordo com os gráficos apresentados, notou-se que em todos os grupos de anéis os corpos de prova apresentaram comportamentos lineares semelhantes (Figura E1 – Apêndice E). Observa-se que não ocorreram grandes variações no comportamento, exceto para anel I02 que foi descartado em virtude da discrepância apresentada e justificada pelo possível descolamento do *strain-gauge* durante o teste – Figura 41.

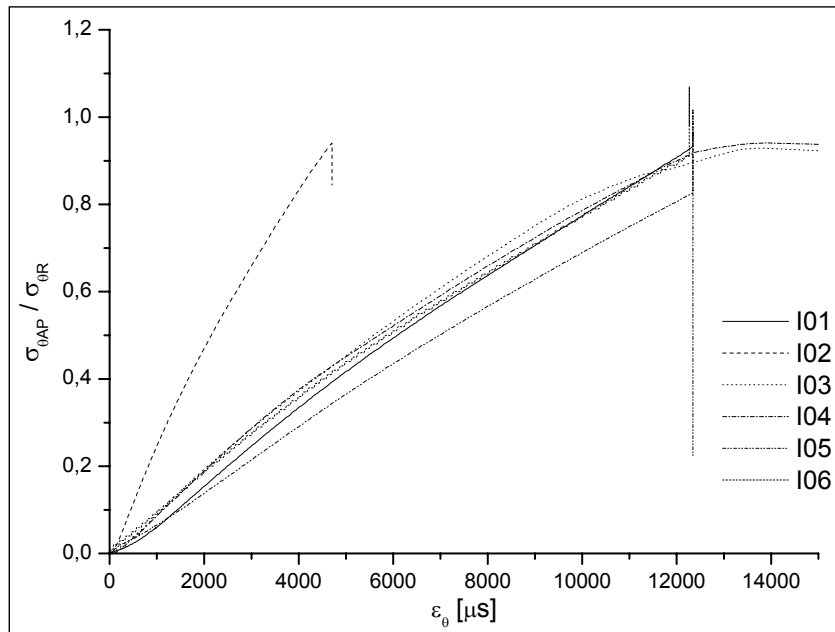


Figura 41: Tensão circunferencial aparente *versus* deformação circunferencial.

Outras 2 réplicas para cada grupo também foram descartadas, visando reduzir o desvio apresentado entre as réplicas. O critério adotado foi excluir anéis que apresentaram comportamentos diferentes, em relação às outras réplicas nos gráficos $\sigma_{\theta AP} \times \epsilon_{\theta}$, conforme sugerido pela norma ASTM D2290-00. Portanto, nas próximas figuras, as réplicas descartadas não são visualizadas.

Na Figura 42, são apresentadas as curvas características para o comportamento dos corpos de prova ensaiados experimentalmente, além da curva de comportamento do tubo e do anel íntegro modelados numericamente. Para os modelos numéricos, as nomenclaturas dos anéis são representadas com um asterístico (*).

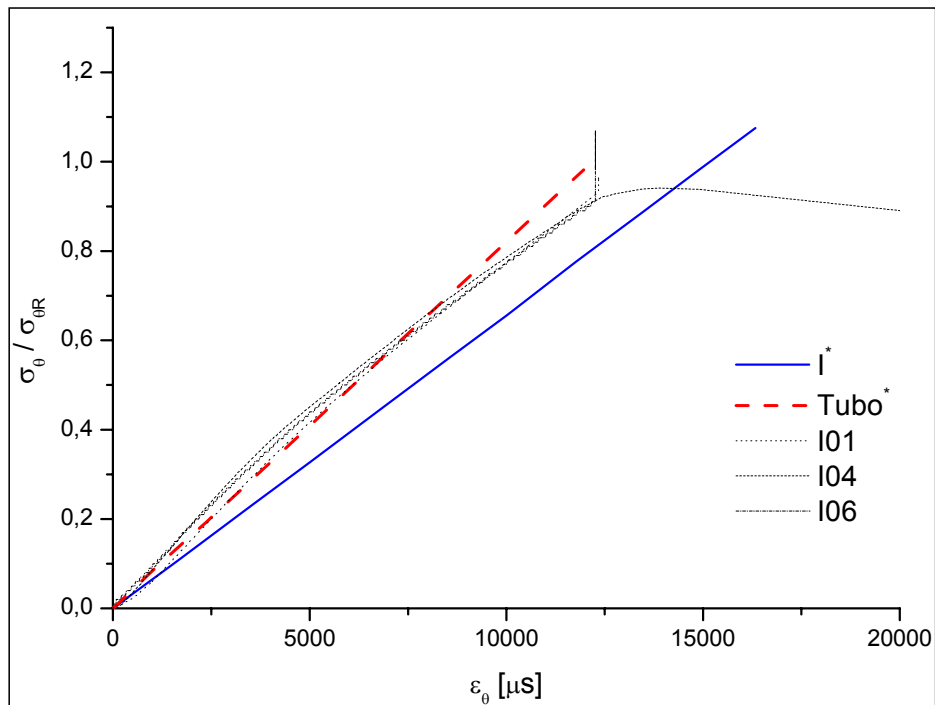


Figura 42: Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para os corpos de prova (I#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (I*).

Os anéis íntegros testados experimentalmente e o tubo numérico apresentaram comportamentos semelhantes para a seção analisada. PARNAS *et. al.* (2005) constatou que o ensaio de tração serve para determinar as propriedades de amostras tubulares.

Em relação aos demais anéis ensaiados, com defeitos, mostraram curvas semelhantes aos anéis íntegros. Estes gráficos são mostrados nas Figuras 42, 43, 44 e 45.

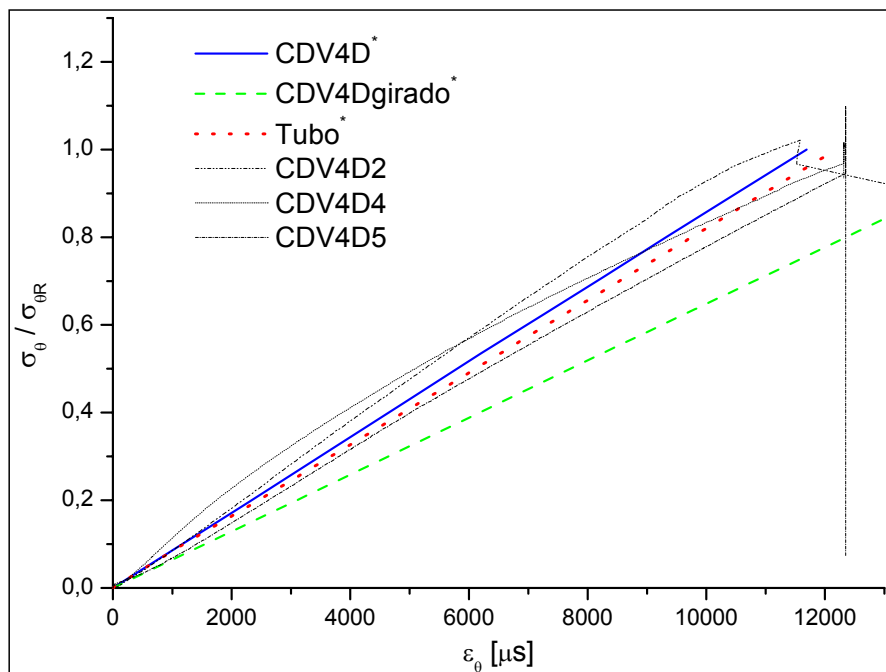


Figura 43: Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV4D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV4D*).

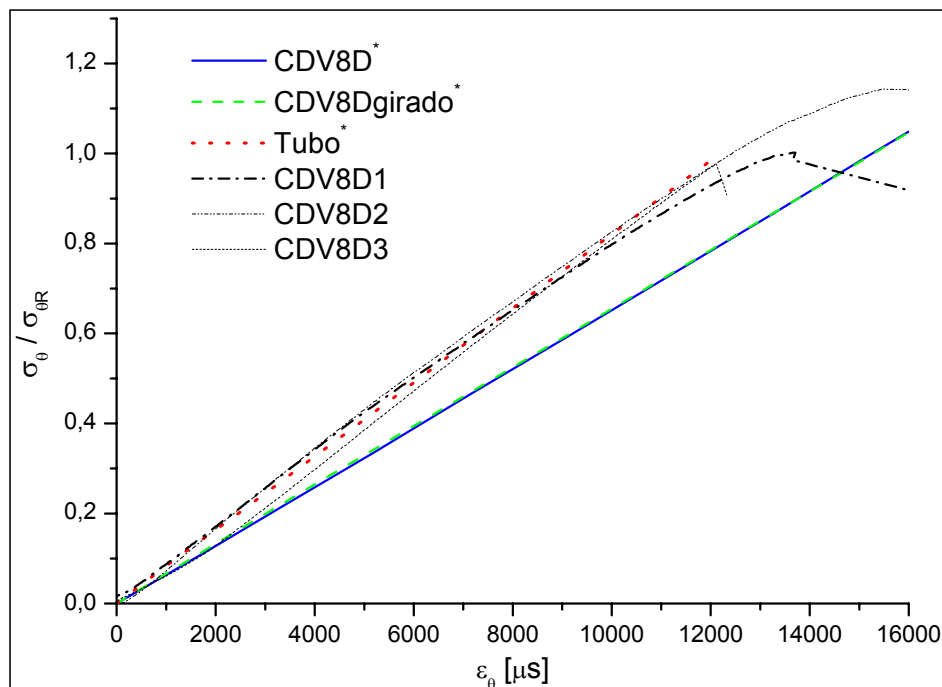


Figura 44: Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV8D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV8D*).

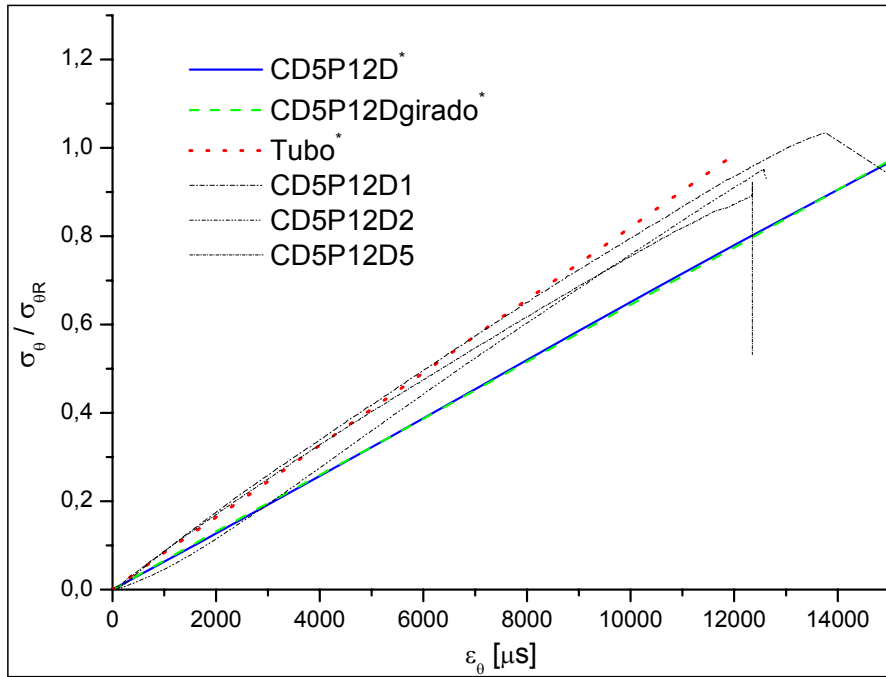


Figura 45: Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para os corpos de prova (CD5P12D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CD5P12D*).

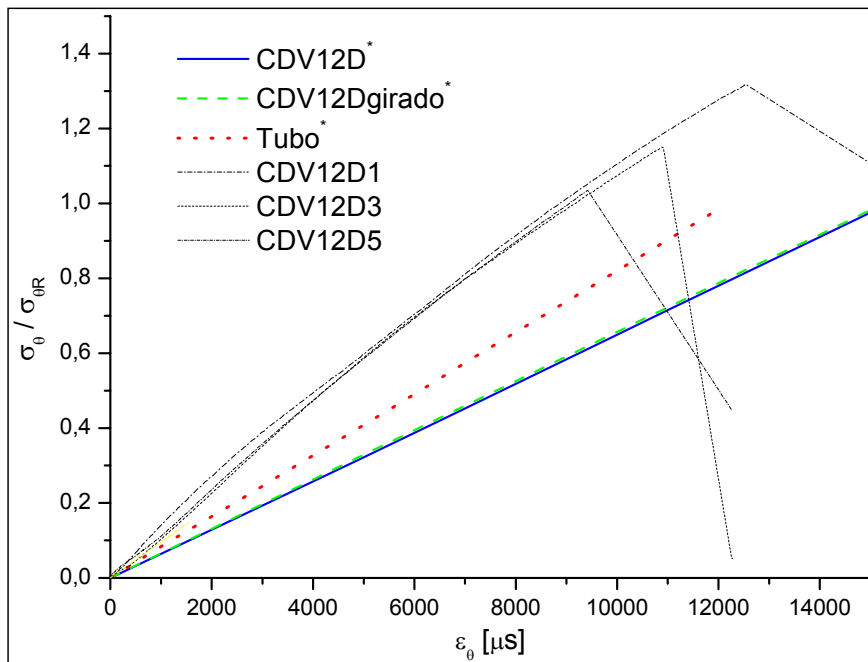


Figura 46: Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para os corpos de prova (CDV12D#), modelo teórico (Tubo) e modelo numérico (CDV12D*).

As figuras permitiram observar em relação aos anéis numéricos, na configuração posição I (não-girado) e posição II (girado), um comportamento semelhante ou até igual em alguns casos, para a seção analisada. Com exceção do

anel CDV4D, que apresentou uma discrepância no comportamento entre as configurações girado e não-girado. Fato explicado por não se ter conseguido alcançar uma distribuição uniforme dos elementos no modelo CDV4D*.

4.2.1 Comparação entre os anéis modelados numericamente

Realizando uma comparação entre os anéis modelados numericamente e os anéis ensaiados experimentalmente, os modelados apresentaram-se mais conservativos se comparado com os experimentais.

Em relação aos anéis que possuem defeitos de 12mm de diâmetro, notou-se que a profundidade do defeito alterou seu comportamento, quando comparados com o modelo numérico do tubo.

Como a norma indica para o procedimento de teste que a redução de seção do anel esteja ligeiramente girada do plano médio, por especulação, realizou-se a modelagem numérica do anel com a redução de seção alinhada ao plano médio (IAlinhado*). O resultado está exposto na Figura 47, onde se faz uma comparação com o tubo.

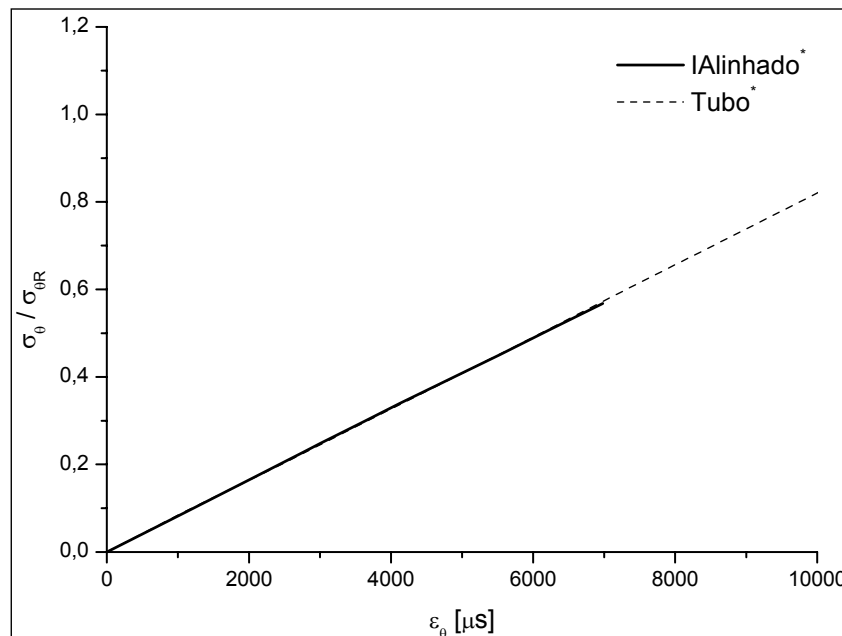


Figura 47: Gráfico tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial para o modelo teórico (Tubo) e o anel na configuração alinhado (IAlinhado*).

Foi observado que ambos possuem o mesmo comportamento, no que se refere à tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial. Entretanto, na modelagem numérica, quando a região da redução de seção é analisada percebe-se a proximidade do valor da tensão circunferencial, em relação ao valor da tensão de referência ao longo da largura do anel – Figura 48. Nas extremidades, também é observado o efeito de borda.

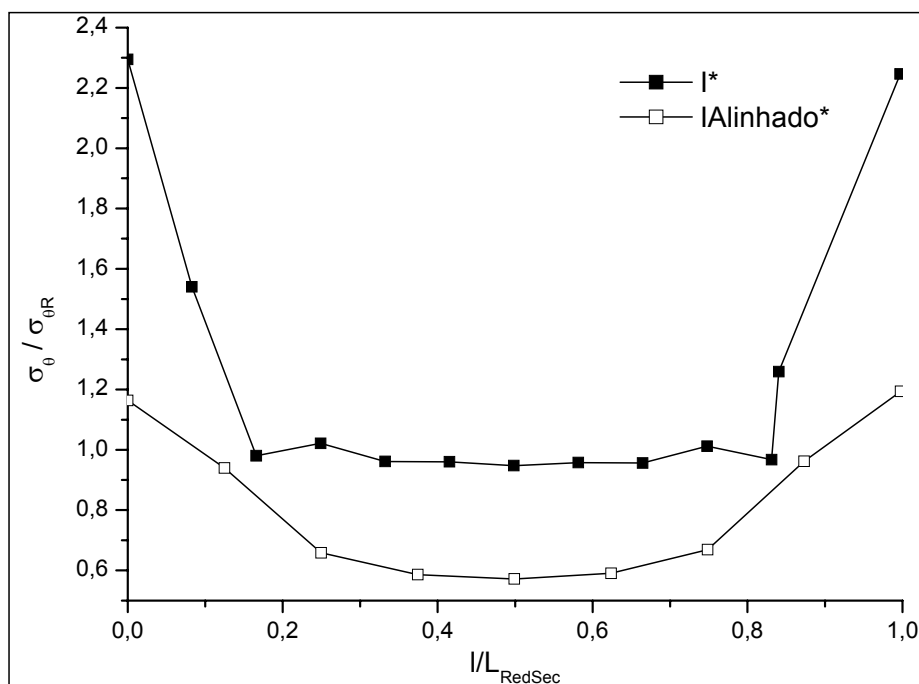


Figura 48: Tensão circunferencial na largura da redução de seção (L_{RedSec}).

Por ser a redução de seção a principal região a ser analisada, a Figura 48 acima justifica a opção adotada e vem comprovar o que a norma indica, a respeito do deslocamento da redução de seção em relação ao plano médio no teste experimental.

A figura onde se podem visualizar todas as tensões circunferenciais ao longo da redução de seção, para todos os anéis modelados computacionalmente, encontra-se no Apêndice G (Figura G1). Os resultados são semelhantes, para todos os anéis testados. Da mesma forma, para a espessura do anel na redução de seção, a análise de tensões, para os diversos anéis, teve um comportamento semelhante. Com exceção do anel CDV4D*, devido às razões apresentadas anteriormente. Tal fato é mostrado na Figura G2.

4.2.2 Análise da região do plano médio

Outro objetivo do trabalho foi analisar a região do plano médio e sua influência ao longo de todo o anel. Para tanto, foi feita a análise de tensões ao longo do anel. Na Figura 49, o ângulo α é considerado a partir do plano médio e está representado no eixo das abscissas.

Na mesma figura, para o anel integro alinhado, se observa que a partir de $\alpha=7^\circ$ aproximadamente, as tensões são estabilizadas, ocorrendo uma queda drástica na tensão quando $\alpha < 7^\circ$, na região da redução de seção, situada no plano médio. YWN-DE e CHIN-KUNG (1987) e JONES *et. al.* (1996) observaram o efeito da flexão no plano médio.

No caso do anel integro, da mesma forma, há uma queda drástica da tensão no plano médio e uma pequena oscilação da tensão na redução de seção, localizada a 18° do plano médio. Em seguida, a tensão estabiliza-se.

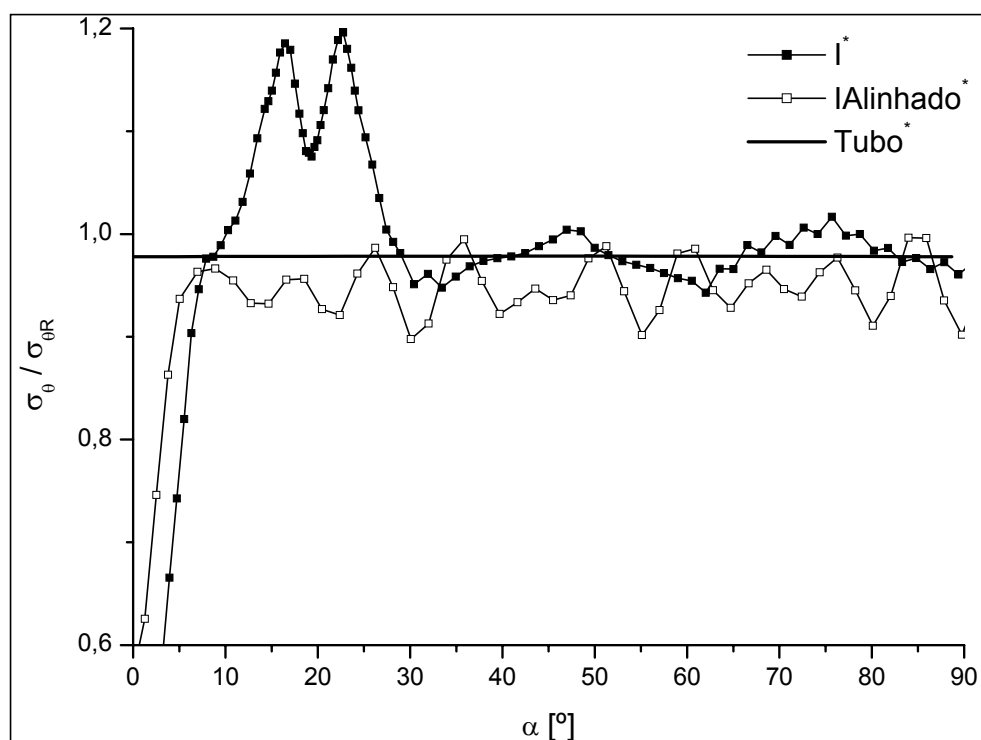


Figura 49: Tensão circunferencial *versus* distância circunferencial a partir do plano médio.

Portanto, justifica-se o uso do posicionamento do anel íntegro - posição I, visto que há um comportamento da tensão na redução de seção muito próxima da tensão de ruptura do tubo caracterizada pela tensão de referência ($\sigma_{\theta R}$), e mais confiável numa localização afastada do plano médio.

Outro ponto importante a ser debatido, é o de atenção para o efeito da flexão na redução de seção. A Figura 50 mostra uma queda brusca na tensão circunferencial na redução de seção localizada no plano médio para o IAlinhado*, diferentemente do anel I* - redução de seção. A utilização da redução de seção no plano médio poderia trazer resultados não confiáveis.

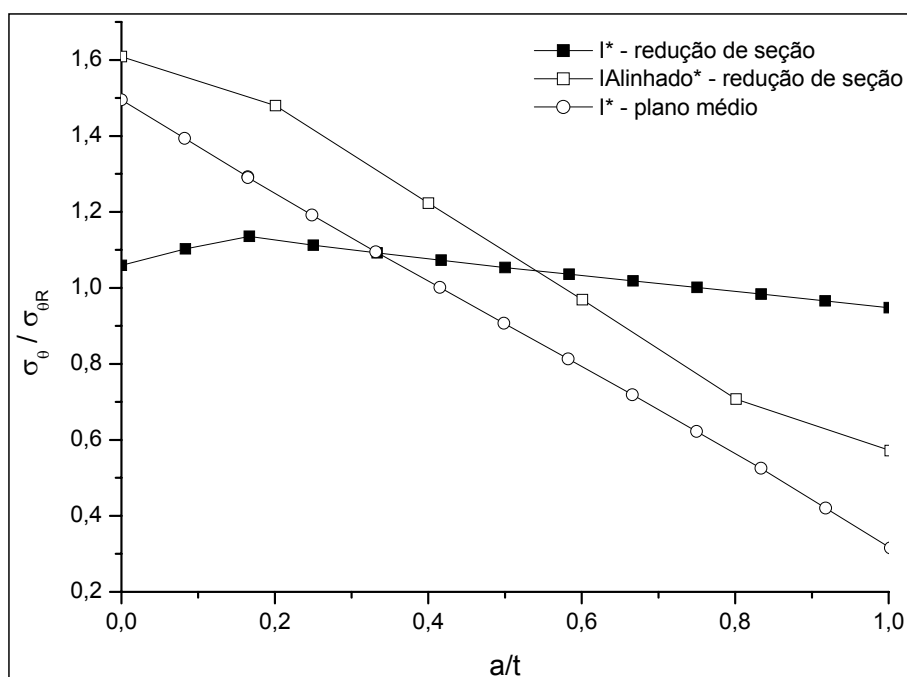


Figura 50: Tensão circunferencial *versus* espessura.

O fato da existência da redução de seção não é casual. Esta é totalmente necessária. Assim, com base em trabalhos anteriores, como EGBERT (2004), realizaram-se os ensaios computacionais e experimentais no tipo de anel sem redução de seção.

Através da análise numérica comprovou-se a discrepância nos comportamentos - Figura 51. O anel SRS* atingiu valores de tensões muito superiores as do Tubo*. Por outro lado, o anel íntegro (I*) atingiu valores de tensões bem próximos do Tubo*.

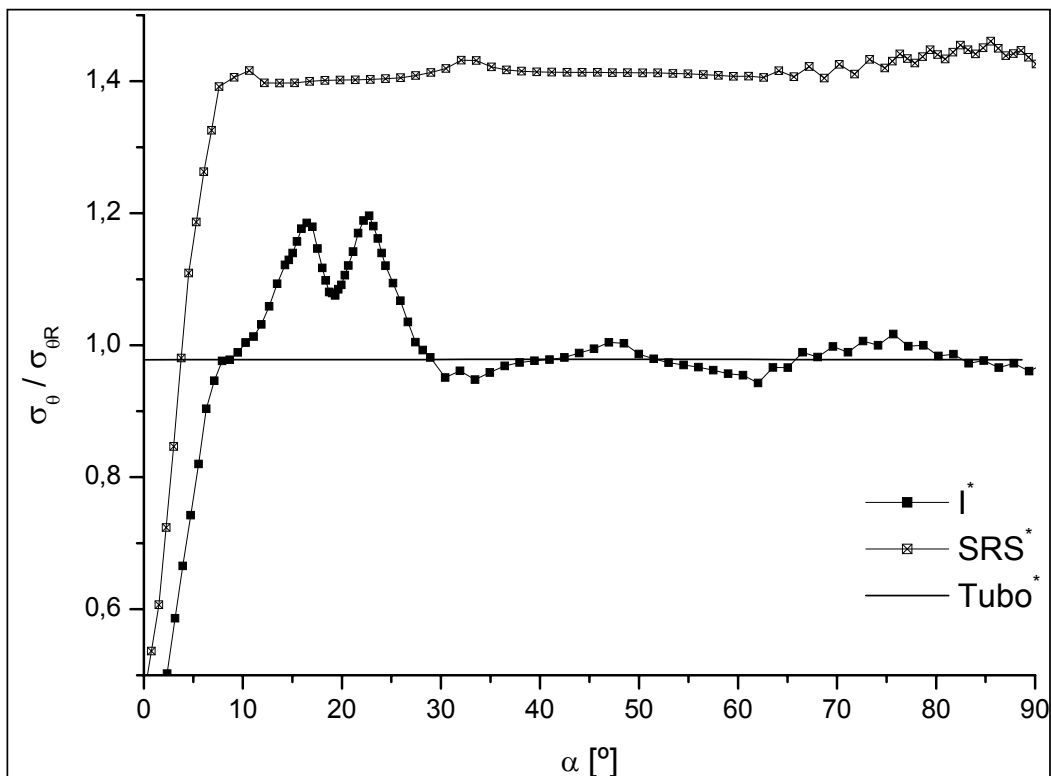


Figura 51: Tensão circunferencial *versus* ângulo a partir do plano médio.

4.2.3 Análise comparativa relativa à posição da redução de seção

Portanto, o anel íntegro se mostrou apropriado quando comparado ao ensaio do tubo hidrostático. Quanto ao comportamento do posicionamento girado (posição II), este não influenciou no resultado, apresentando comportamento semelhante aos girados ou não-girados (posição I).

Diante dos posicionamentos apresentados anteriormente, duas situações foram comparadas: anel não-girado (posição I) e anel girado (posição II), a fim de estudar se a posição da redução de seção influencia na distribuição de tensão ao longo do anel. Considerando a simetria, para os anéis girados o ângulo (α) “varrido” para análise está entre 0° e 180° e para os anéis não-girados entre 0° e 90°.

O anel CDV4Dgirado*, por exemplo, a redução de seção está localizada em $\alpha=160^\circ$ (aproximadamente) e o defeito em $\alpha=50^\circ$. Estes representados na curva do anel CDV4Dgirado* pelas oscilações da tensão circunferencial nos ângulos mencionados – Figura 52.

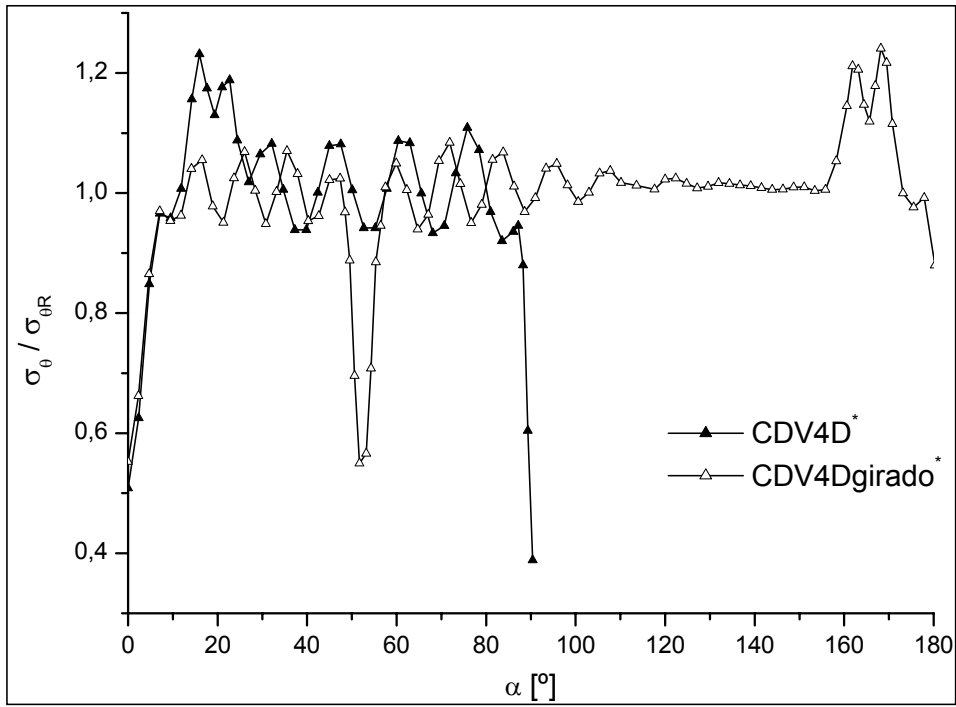
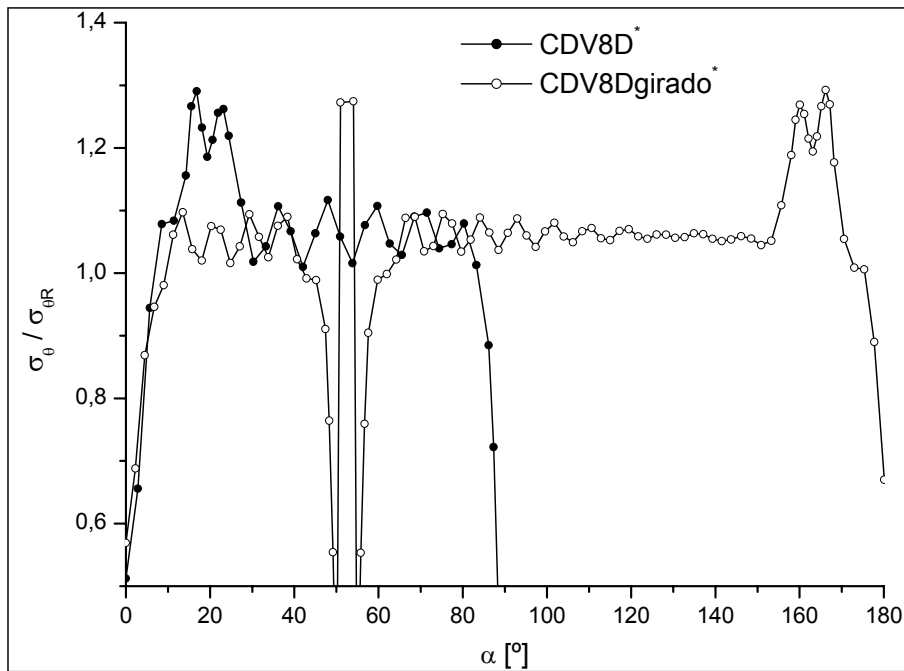
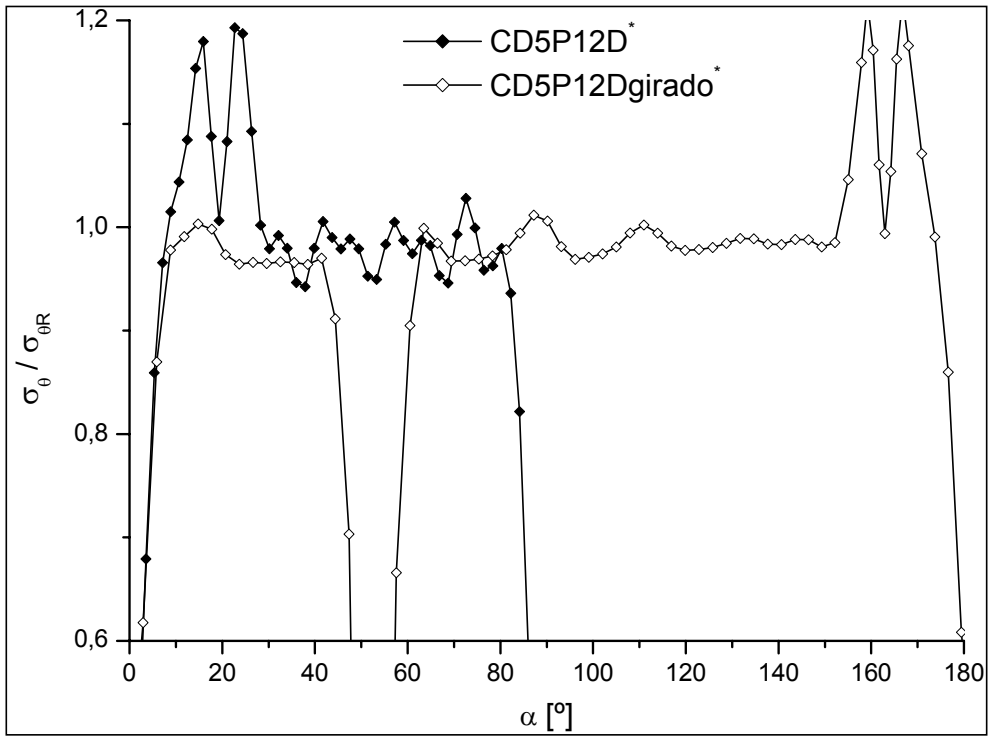


Figura 52: Anel CDV4D* - Tensão circunferencial *versus* ângulo a partir do plano médio.

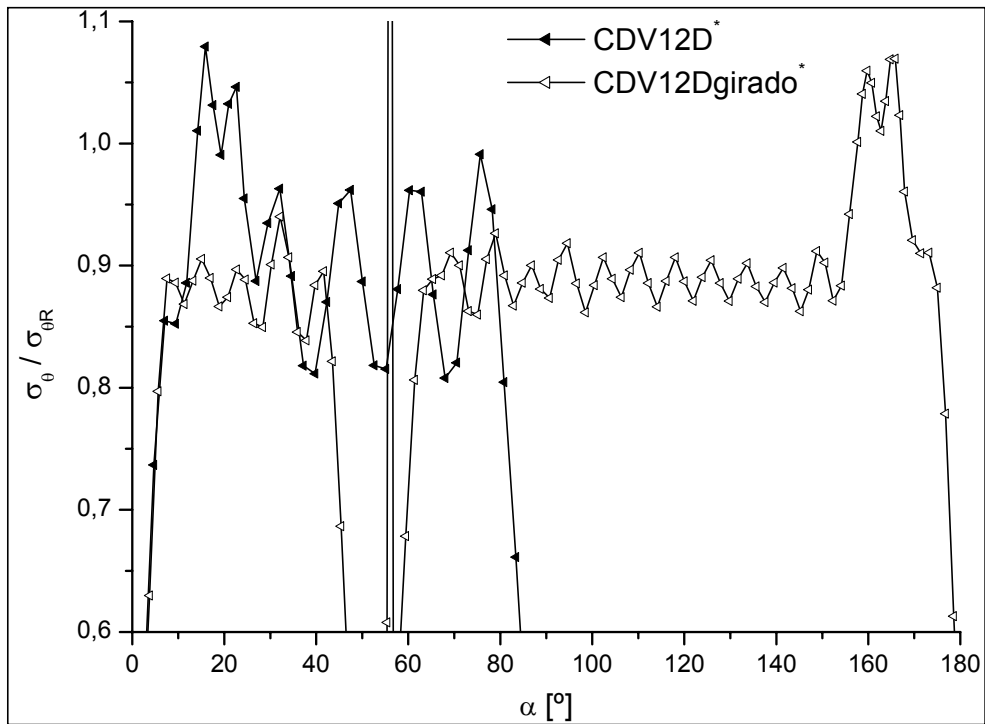
Da mesma forma, as observações feitas anteriormente são válidas para os anéis CDV8D*, CD5P12D* e CDV12D* representados pela Figura 53 (a), (b) e (c), respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 53: Tensão circunferencial *versus* ângulo a partir do plano médio: (a) anel CDV8D*, (b) anel CD5P12D*, (c) anel CDV12D*.

Vale salientar que o comportamento da tensão na redução de seção para ambos os casos, anel girado e não-girado, foram semelhantes. Porém, quando a redução de seção foi localizada onde há o efeito da flexão, no plano médio, isto não foi observado.

Na Figura G3, no Apêndice G, são visualizados todos os anéis girados (posição II) em conjunto.

No Apêndice G, a Figura G4 mostra o comportamento semelhante ao longo dos anéis com defeito e o anel íntegro. Observou-se também, que o aumento no diâmetro do defeito leva a uma maior amplitude na oscilação da tensão circunferencial.

Com a finalidade de estudar a influencia de defeitos em tubos, foi modelado um tubo com um rasgo de 5 mm de profundidade e 12 mm de largura - TuboCD5P12D*. Este foi o escolhido por ser o único defeito não-passante aplicado nos anéis.

Pela simulação foram obtidos os seguintes resultados para as distribuições de tensão ao longo do comprimento e para $\frac{1}{4}$ da circunferência do tubo, representados pelas Figura 54 e Figura 55.

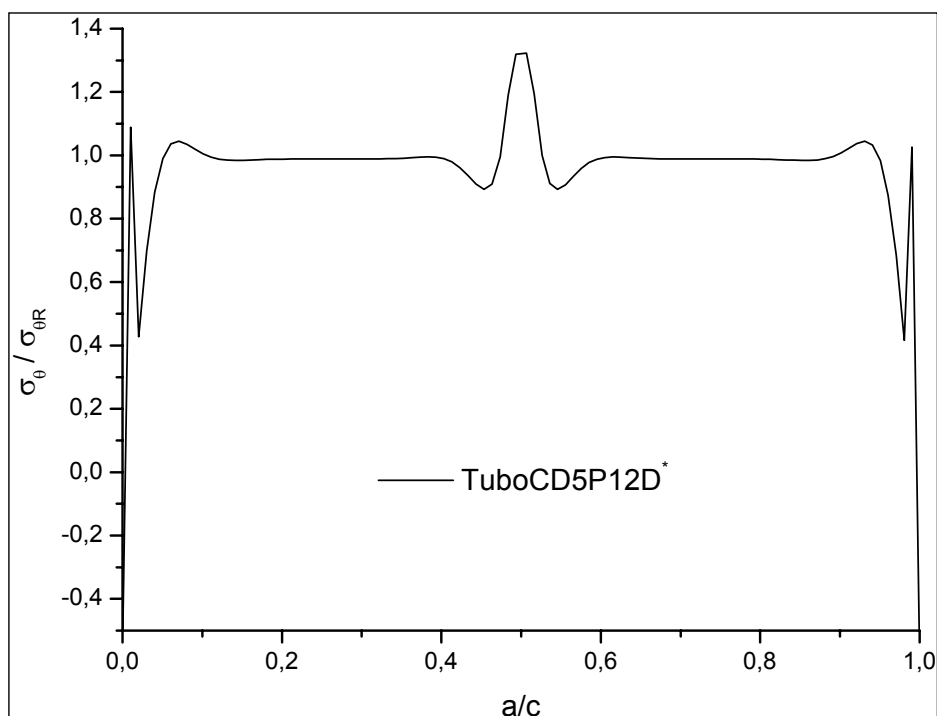


Figura 54: Tensão circunferencial no comprimento do tubo com defeito

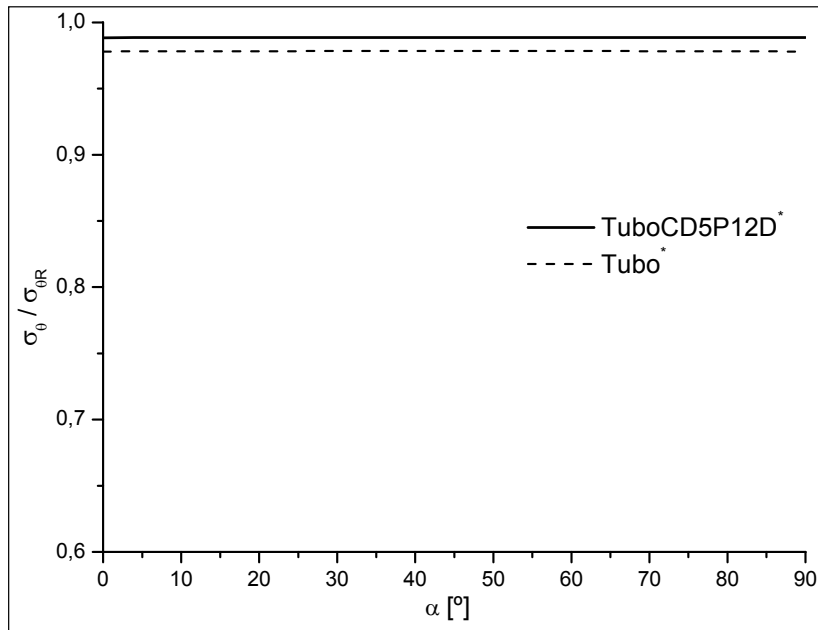


Figura 55: Tensão circunferencial em 1/3 do comprimento do tubo.

O ponto escolhido localizado em 1/3 do comprimento do tubo a partir da extremidade deve-se a estabilidade da tensão conseguida nesse trecho.

Na Figura 56 é apresentada a comparação entre o tubo com defeito e o anel CD5P12D*.

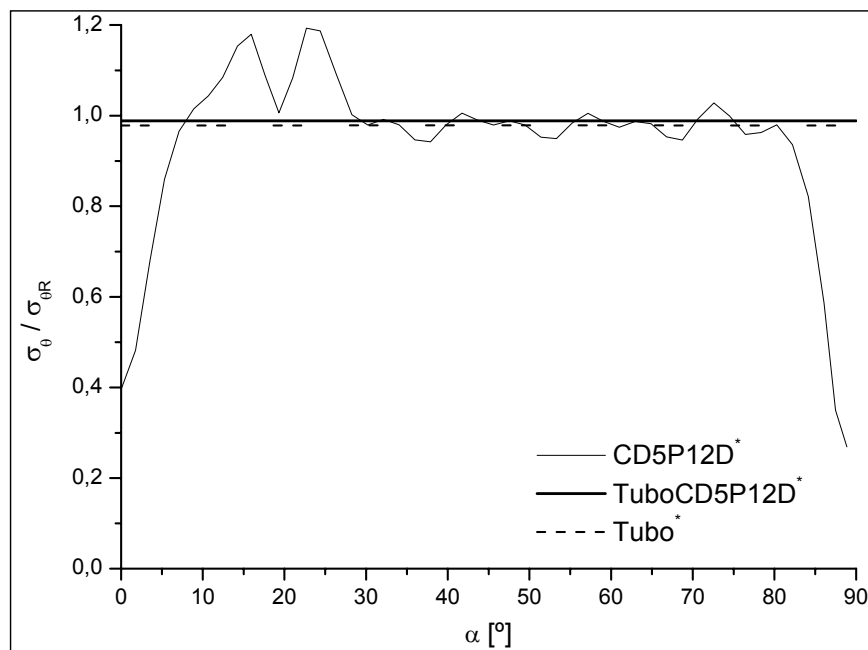


Figura 56: Tensão circunferencial versus $\frac{1}{4}$ da circunferência do tubo.

A fim de complementar os resultados apresentados neste capítulo, são apresentados no Apêndice H figuras ilustrativas e informativas das simulações computacionais realizadas para os diversos anéis em suas configurações utilizadas, além dos tubos.

4.3 Análise Estatística

De posse dos resultados, foi possível observar a influência dos corpos de prova e suas posições sobre as variáveis obtidas como tensão circunferencial de ruptura aparente e o módulo de elasticidade circunferencial.

4.3.1 Tensão e módulo de elasticidade circunferenciais

A análise mostrou que a variável tensão circunferencial de ruptura aparente (σ_{0Ap}) é influenciada pelo fator corpo de prova, como mostra a Tabela I1 do Apêndice I. Os valores do nível p menores do que 0,05, no caso do intervalo de confiança utilizado, indica que a diferença entre as médias é significativa.

As Figuras 57 e 58 apresentam as variações dos valores de tensão e módulo de elasticidade circunferenciais, respectivamente.

A análise estatística mostrou que os valores de tensão são influenciados pelo fator corpo de prova – Figura 57.

O teste LSD de Fisher mostra se há ou não diferença significativa entre os resultados. O limite de confiança foi de 95 % e, desta forma, valores inferiores a 0,05 indicam que há diferença significativa entre os resultados. Então, na Tabela I2 do Apêndice I, é mostrado que a diferença entre os valores de tensão obtidos é estatisticamente significativa.

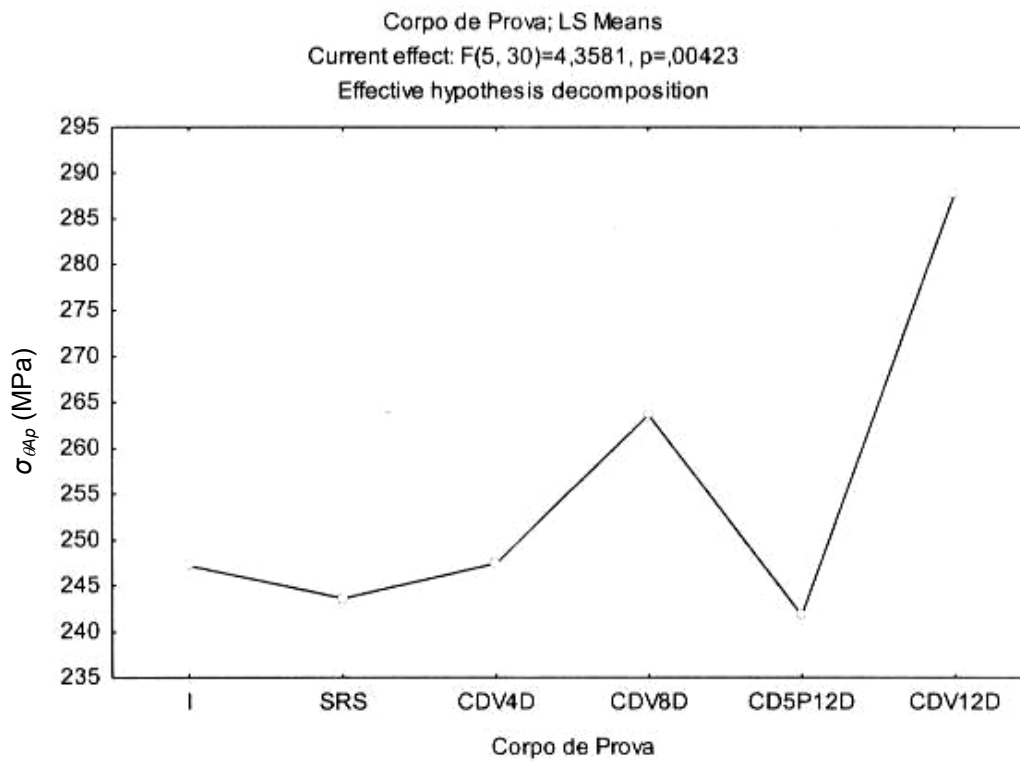


Figura 57: Valores médios da tensão em função do tipo de corpo de prova.

Na análise da variável módulo de elasticidade circunferencial é mostrado que o fator corpo de prova não influencia nos valores médios dessa variável – Figura 58, conforme verificado no teste LSD - Tabela I3 - onde a diferença entre os valores médios das tensões dos corpos de prova não são significativas estatisticamente.

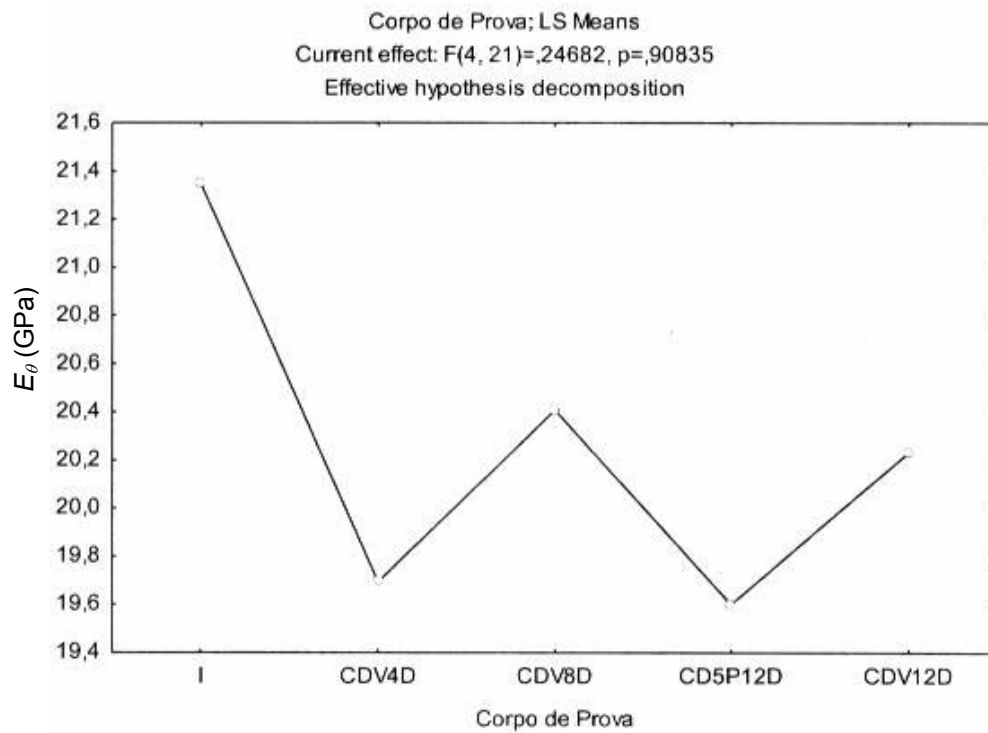


Figura 58: Valores médios do módulo de elasticidade em função do tipo de corpo de prova.

4.3.2 Posições (girado ou não-girados) da redução de seção

Outro fator analisado foi a posição (girado e não-girado) da redução de seção para as duas variáveis em questão, apresentados nas Figuras 59 e 60.

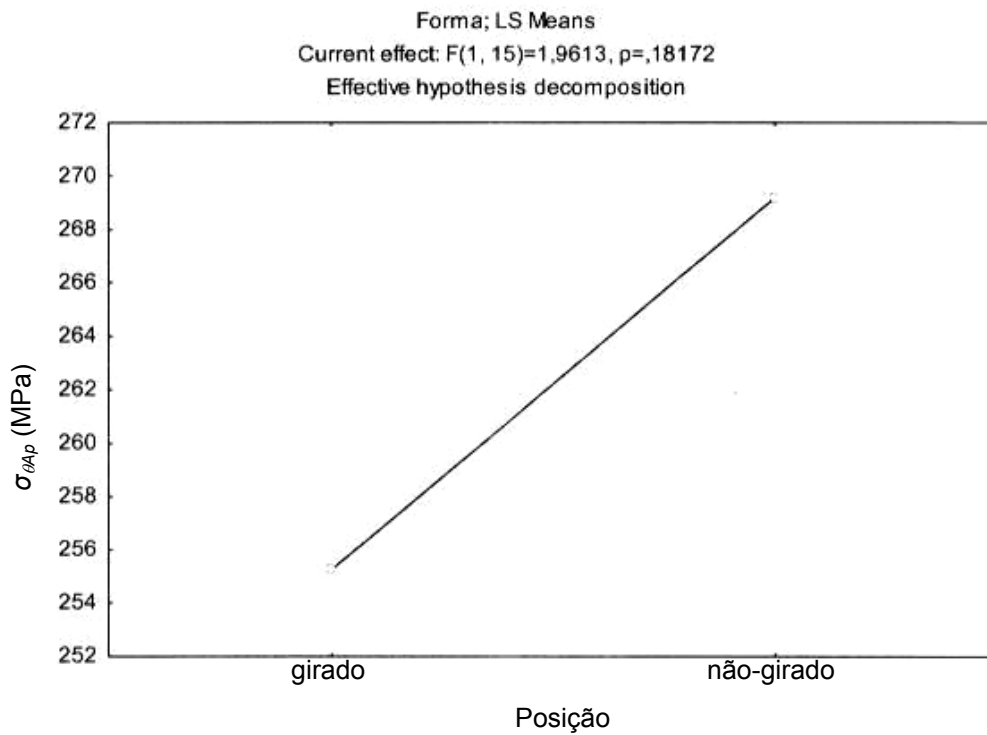


Figura 59: Valores médios tensão em função do posicionamento.

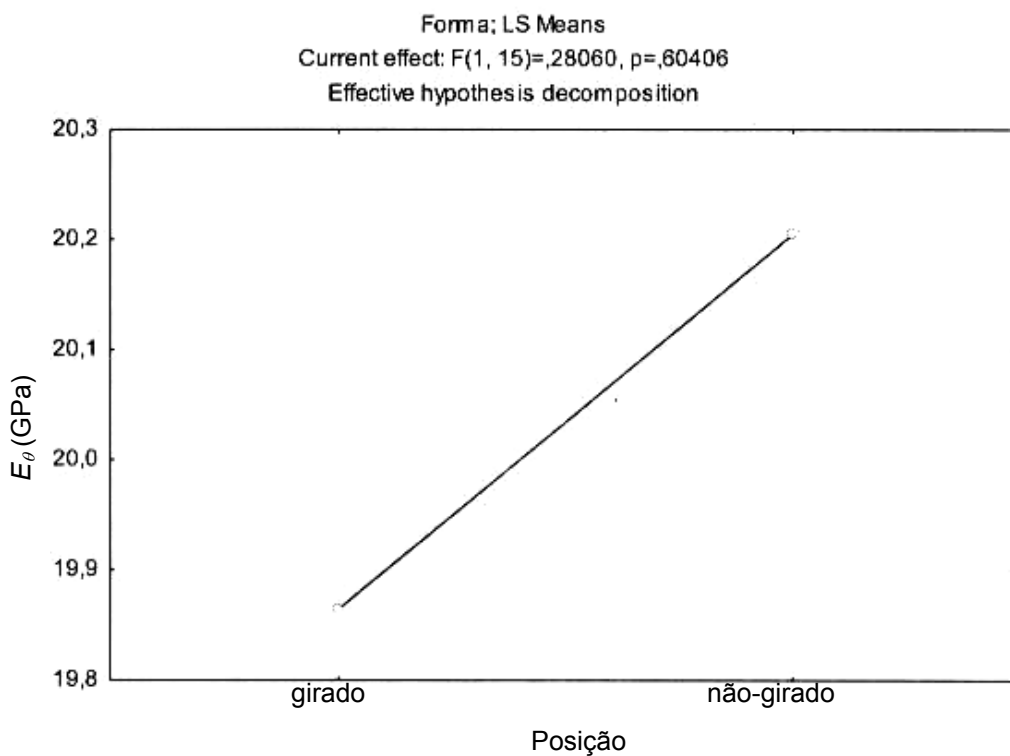


Figura 60: Valores médios do módulo de elasticidade em função do posicionamento.

Considerando o fator posição da redução de seção para a variável, $\sigma_{\theta AP}$, constatou-se que as posições não são estatisticamente significativas. Em relação a variável E_{θ} , as posições são marginalmente significativas.

4.4 Análise de Fratura

As falhas nos anéis compósitos testados foram de múltiplos tipos, de modo que foi necessário, então, identificar o processo de fratura dominante para cada anel.

Os tipos de falhas identificados, mostrados na Figura 61, foram os seguintes:

- A – trincas perpendiculares à direção das fibras e ausência de trincas na direção circunferencial;
- B – trincas circunferenciais pequenas e superfície de fratura irregular e localizada; e
- C – trincas individuais paralelas às fibras, responsáveis pela delaminação próximo à região de fratura.

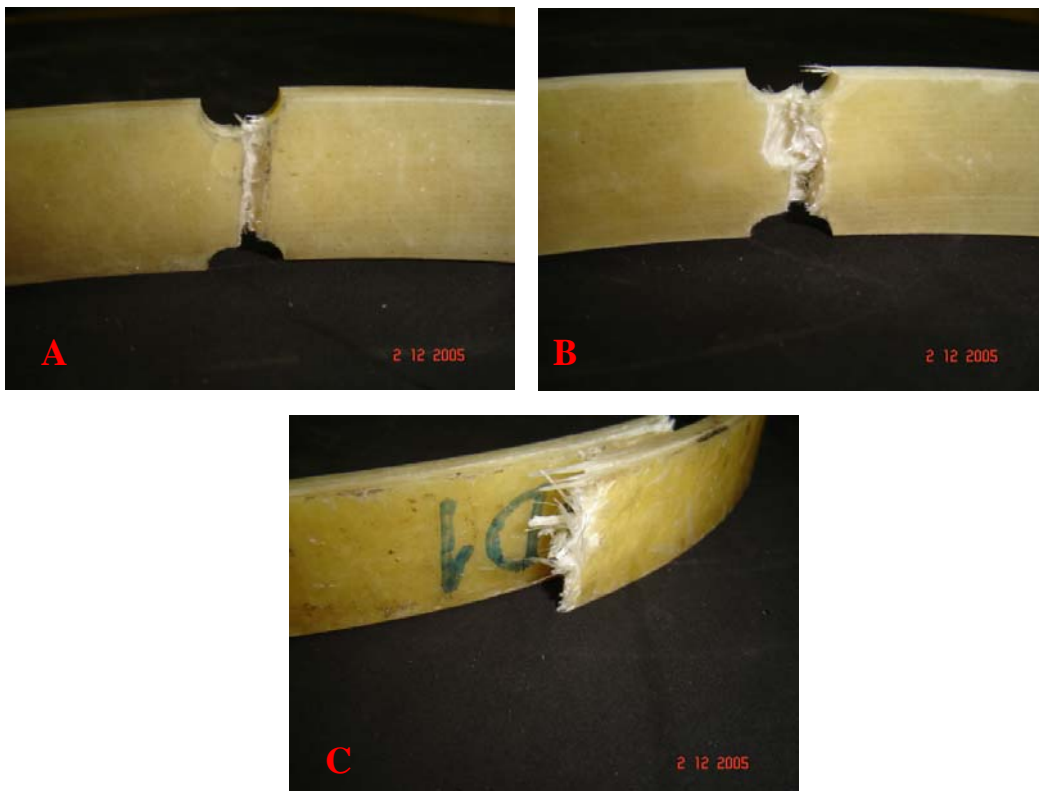


Figura 61: Tipos de falhas: A – trincas perpendiculares às fibras, B – trincas circunferenciais pequenas e C – trincas paralelas às fibras.

A fratura do material apresentou três características predominantes descritas abaixo e ilustradas na Figura 62:

- *clusters* de fibras sacadas, próximos da superfície externa do anel;
- delaminação nas camadas ricas em fibras picadas; e
- mecanismo de dano por *whitening*, circundando a região de fratura.

A localização dos clusters de fibras sacadas indica que a falha se inicia na superfície interna do anel e se propaga para a externa, sacando aglomerados de fibras da matriz e rompendo os mesmos, acarretando a falha final do material.

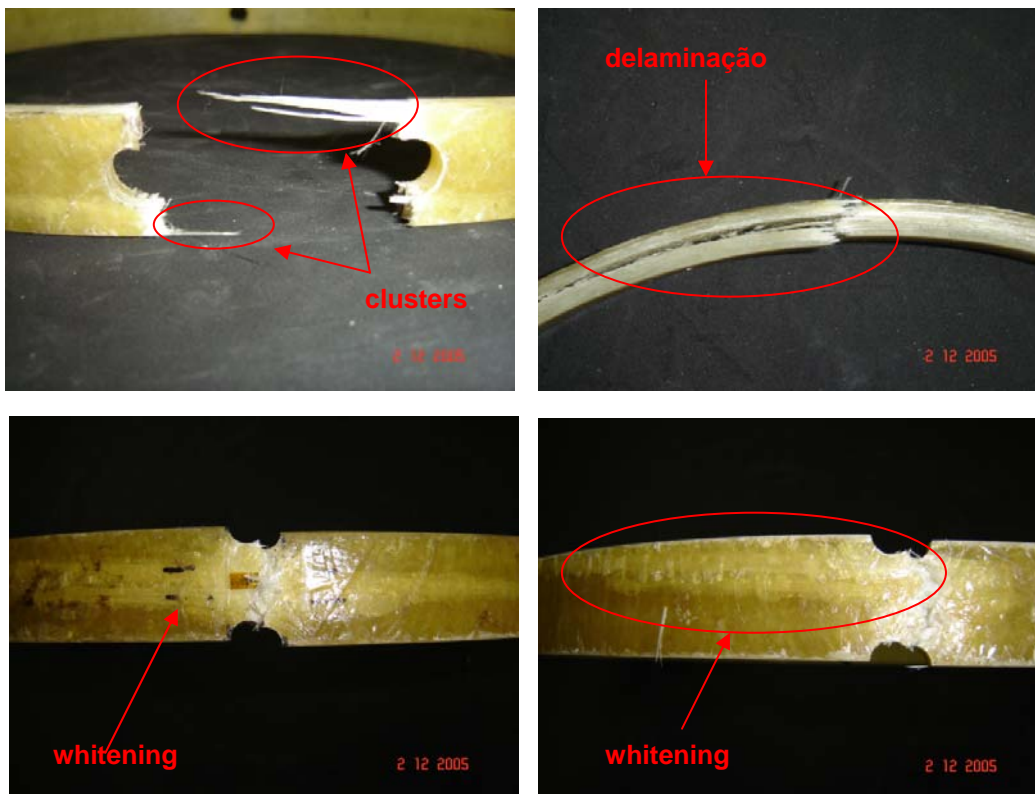


Figura 62: Características apresentadas nas proximidades da região de fratura.

O processo de *whitening*, observado pelo aspecto esbranquiçado na superfície externa e localizado ao redor da região de fratura, foi atribuído principalmente pelo descolamento local nas interfaces e trincamento da matriz. Este mecanismo de dano, provavelmente, pode nos indicar que o material está entrando num processo de falha.

MARINUCCI e ANDRADE (2004) *Apud* BADER *et. al.* propõem um modelo para explicar o comportamento de falha de compósitos com fibras unidirecionais.

O aspecto macroscópico da fratura evidenciou para o compósito um comportamento de fratura frágil, de acordo com o modelo de MARINUCCI e ANDRADE (2004) *Apud* BADER.

Na Tabela 15, que mostra o tipo de falha em função das tensões de ruptura obtidas, nota-se para os anéis íntegros (I#) a provável influência do uso do lubrificante no tipo de falha, uma vez que todos os outros fatores são constantes e conforme ZINOV'EV *et. al.* (2001) e JONES *et. al.* (1669) observaram, o lubrificante reduz significativamente as forças de atrito na interface anel/semi-disco.

Comparando-se os tipos de fratura pela Figura 63 e considerando apenas os anéis ensaiados sob mesmas condições, ou seja, com a lubrificação; há tendência a alterações no tipo de fratura na seqüência A, B e C com o aumento da tensão máxima de ruptura circunferencial aparente.

Aparentemente, quando existe delaminação há uma tendência ao aumento da resistência, conforme observado na Figura 63.

Tabela 15: Tipo de falha em função da tensão de ruptura.

Grupo	Tensão	Tipo de Falha
I01	235,96	B
I02	233,93	A
I03	228,27	A
I04	231,10	A
I05	249,31	A
I06	260,64	B
I07	248,58	B
I08	259,23	B
I09	277,77	B
I10	238,33	B
I11	274,48	B
I12	228,80	B
I13	225,76	A
SRS1	228,23	C
SRS2	243,13	C
SRS3	251,13	C
SRS4	251,96	C
CDV4D1	260,24	B
CDV4D2	250,93	B
CDV4D3	210,05	B
CDV4D4	248,10	B
CDV4D5	267,93	B
CDV8D1	246,07	B
CDV8D2	280,88	A
CDV8D3	239,19	A
CDV8D4	274,00	B
CDV8D5	278,05	C
CDV12D1	323,86	C
CDV12D2	306,34	C
CDV12D3	281,91	C
CDV12D4	272,89	C
CDV12D5	253,25	C
CD5P12D1	253,36	B
CD5P12D2	233,53	B
CD5P12D3	235,55	C
CD5P12D4	259,83	B
CD5P12D5	226,65	A

Baseado no Apêndice E.

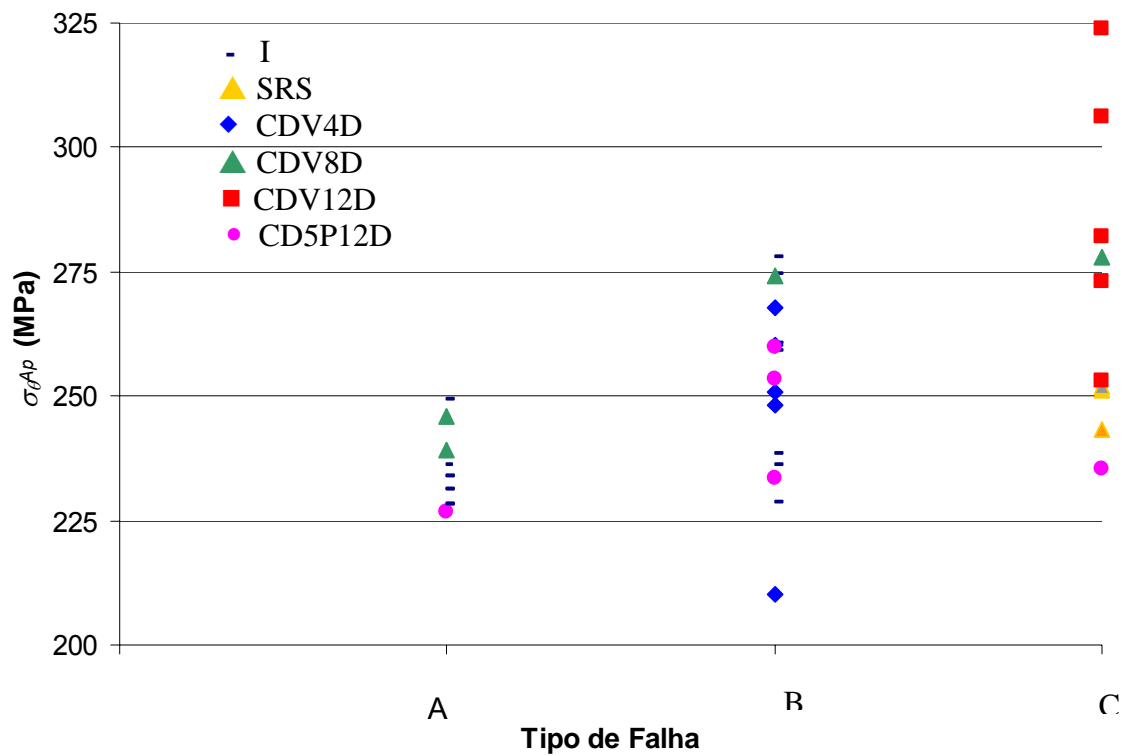


Figura 63: Tensão máxima de ruptura circunferencial aparente *versus* tipo de fratura.

Analisando estatisticamente os tipos de falha para os anéis íntegros, foi observado que a média das tensões entre as falhas dos tipos A e B são marginalmente significativas – Tabela I6. A Figura 64 apresenta a variação do valor da tensão para as falhas do tipo A e B.

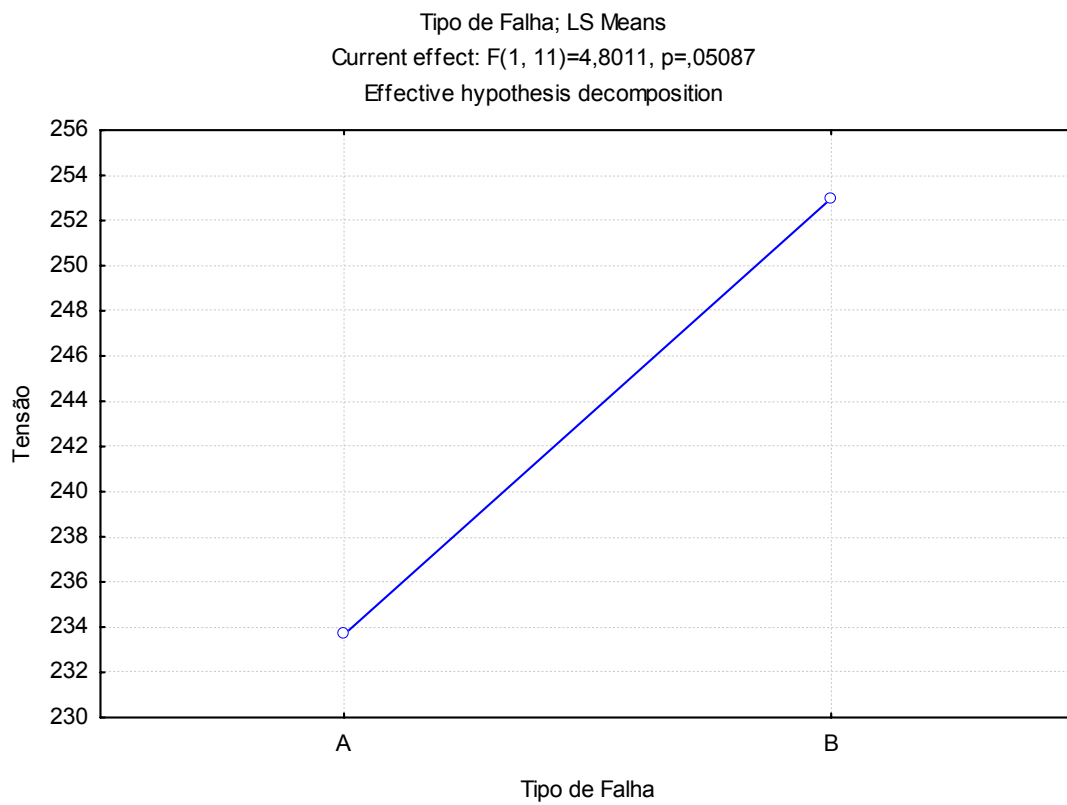


Figura 64: Valores médios da tensão em função do tipo de falha.

Capítulo V

Conclusões

Inicialmente, ressalta-se que os objetivos propostos no trabalho foram alcançados com resultados satisfatórios. A partir destes, obtidos através dos ensaios experimentais, das simulações numéricas e das análises estatísticas, é possível formular as seguintes conclusões:

1. As tensões circunferenciais de ruptura obtidas para os anéis não tiveram diferenças significativas, excetuando-se o anel CDV12D, que teve sua fratura no defeito e não na redução de seção. Para o anel íntegro a tensão circunferencial aparente de ruptura foi 231,77 MPa.
2. A posição da redução de seção fora do alcance da região do plano médio é de fundamental importância no ensaio de tração em anéis, devido a flexão apresentada nesse local.
3. O comportamento dos anéis ensaiados mecanicamente e os resultados das simulações a partir dos modelos computacionais foram muito próximos, apresentando diferenças não superiores a 10%, o que faz validar os modelos utilizados.
4. Os testes com os corpos de prova SRS vieram comprovar a necessidade da existência da redução de seção.
5. Quando o objetivo é determinar a tensão circunferencial máxima de ruptura, os anéis apropriados para o ensaio são os anéis que possuem redução de seção, pois estes apresentaram uma diferença de 5% se comparados com os modelos numéricos e analítico.
6. A posição da redução de seção, girado ou não-girado, não interfere nos resultados obtidos.
7. O módulo de elasticidade circunferencial obtido experimentalmente foi de 18,78GPa para o anel íntegro. Esse valor se mostrou correto, diante da compatibilidade com os modelos analíticos.
8. O mecanismo de falha do material é uma combinação de delaminação com fratura de fibras.
9. O efeito da utilização ou não do lubrificante na interface disco-anel não foi notado quando analisadas as tensões, porém o lubrificante influenciou o modo de fratura porque seu uso permite que o anel não atrite fortemente com o disco.

Capítulo VI

Propostas Futuras

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados, podem-se formular as seguintes sugestões de temas para trabalhos futuros:

- Estudar o comportamento do material através de simulações analítica e computacional submetendo o modelo a um carregamento combinado – e.g. tração, compressão, pressão interna, pressão externa, torção, flexão, térmico.
- Realizar testes experimentais de tração em anéis nesse material em diferentes temperaturas e condições ambientais para avaliar o efeito higrotérmico e o comportamento mecânico do material sujeito a uma carregamento combinado – e.g. pressão interna e carga térmica. Possivelmente, a fase plástica ficaria evidente, permitindo um estudo detalhado dessa fase.
- Realizar ensaios hidrostáticos com o material em estudo, utilizando extensometria, em tubos com e sem defeitos e comparar as tensões de ruptura e módulos de elasticidade circunferenciais obtidos no ensaio de tração de anéis e na modelagem computacional com o ensaio hidrostático.
- Realizar estudos computacionais, através de programas de elementos finitos, em dutos sem e com defeitos simulando corrosão interna e externa, e comparar com os resultados experimentais obtidos.
- Para alcançar resultados e conclusões mais concretas, é necessária a realização de modelagens mais específicas para o caso de tubos com defeitos, inclusive alterando os defeitos geometricamente, além de comparar as respostas obtidas com resultados experimentais de ensaio hidrostático com tubos com rasgos que simulem os defeitos.
- Estudar a fadiga nesse material através de ensaios hidrostáticos cíclicos e, adicionalmente, a inserção de trincas e acompanhamento do crescimento e propagação do dano.

Referências

ABADIE M. J. M.; MEKHISSI K.; BURCHILL P. J. (2001) Effects of processing conditions on the cure of a vinyl ester resin, **Journal of Applied Polymer Science**, v.84, P. 1146-1154.

ABAQUS , Inc. (2003) **Getting started with ABAQUS** version 6.4. Pawtucket, RI.

AL-KHALIL M. F. S.; SODEN P. D.; KITCHING R.; HINTON M. J. (1996) The effects of radial stresses on the strength of thin-walled filament wound GRP composite pressure cylinders. **The International Journal of Mechanical Sciences**, v.38, P.97-120.

ASTM D1599-99 (1999). **Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings**. ASTM – American Society for Testing and Materials.

ASTM D2290-00 (2000). **Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method**. ASTM – American Society for Testing and Materials.

AZOM. Disponível em: <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=986>>. Acesso em: março de 2005.

BAI J.; SEELEUTHNER P.; BOMPARD P. (1997) Mechanical behaviour of $\pm 55^\circ$ filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: I. Microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanisms of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading. **Composites Science and Technology**, v.57, P.141-153.

BAI J.; HU G.; DEMIANOUCHKO E.; BOMPARD P. (1998) Mechanical behaviour of $\pm 55^\circ$ filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes - III. Macromechanical model of the macroscopic behaviour of tubular structures with damage and failure envelope prediction. **Composites Science Technology**, v.58, P.19-29.

CARLSSON L. A.; GILLESPIE J. W.; PIPES R. B.; BLAKE R. A. (1990) Test Methods, **Delaware Composites Design Encyclopedia**, editors Leif A. Carlsson, Ph.D.; John W. Gillespie, Jr., Ph.D. Technomic Publishing Company, Inc.; Lancaster, Pennsylvania, v.6, P.19-51.

CARVALHO A. (1992) **FiberglassxCorrosão**. São Paulo.

CHAN R. W.; HAASEN P; KRAMER E. J. (1993) Material Science and Technology – A Comprehensive Treatment; Structure and Properties of Composite, editor Tsu-Wei Chou, v.13.

CHAWLA K. K. (1998) **Composite Materials, Science and Engineering**. New York Springer-Verlag 2ª ed.

CLARKE J., L. (1996) Structural Design of Polymer Composites, **Eurocomp Design Code and Handbook**. 1ª ed, E FN SPON, London, UK.

DODDS N.; SPEAKE S. D.; GIBSON A. G. (2001) Highlights and advances in the ARP composites offshore program. **Composite materials for offshore operations 3**, S.S.Wang, J.G.Williams, K.H.Lo, editors, University of Houston. P.59-74.

EGBERT N. B. (2004) **Influência de defeitos cilíndricos sobre o limite de resistência de anéis de resina éster vinílica reforçada com fibras de vidro**. Dissertação (Mestrado) Programa de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. P.80.

GIBSON R. F. (1994) **Principles of Composite Material Mechanics**. McGraw-Hill, 1ª ed. Singapore.

GRISON R. F., 1994, Principles of Composite Material Mechanics. 1ª ed. New York. Mc Graw Hill

HOLLIDAY L. (1966) Composite Materials, **Elsevier Publishing Company**, New York.

HSU T. M.; SKOGSBERG J. W.; KARAYAKA M. (2001) Composites utilization on a spar platform – potential economic impact and technical gaps. **Composite materials for offshore operations 3**, S.S.Wang, J.G.Williams, K.H.Lo, editors, University of Houston. P.19-43.

HUANG D.; ABDI F.; RAGALINI R.; MOSALLAM A.; **Comparison of Failure Mechanisms in Composite Structure**, Alpha Star Corporation California State University.

JEYAPALAN J. K. (1990) Advances in pipeline materials. **Civil Engineering**, v. 7, P. 60-62.

JONES I. A.; MIDDLETON V.; OWEN M. J. (1996) Roller-assisted variant of the split disc test for filament-wound composites, **Composites: Part A**, v.27A, P.287-294.

JONES R. M. (1998) **Mechanics of Composite Materials**, Taylor&Francis, 1^a ed. London.

KHAN M. Z. S.; SIMPSON G.; TOWNSEND C. R. (2002) A comparasion of the mechanical properties in compression of two resin systems. **Materials Letters**, v. 52, P. 173-179.

KRENCHER H. (1964) **Fibre Reinforcement**. Akademisk Forlag, Copenhagen Denmark.

LANEY P. (2002) **Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of natural Gas**, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Fossil Energy Technologies Department.

LAPIQUE F.; REDFORD K. (2002) Curing effectson viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive, **International Journal of Adhesion & Adhesives**. v.22, P. 337-346.

LIFSHITZ J. M.; DAYAN H. (1995) Filament-wound pressure vessel with thick metal liner. **Composite Structures**, v. 32, P. 313-323.

LO K. H.; WILLIAMS J. G.; KARAYAKA M.; SALAMA M. (2001) Progress, Challenges and Opportunities in the Application of Composites Offshore. **Composite materials for offshore operations 3**, S.S.Wang, J.G.Williams, K.H.Lo, editors, University of Houston. P. 3-17.

LUBIN G. (1969) **Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites**, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

MARGOLIS J. M. (1985) **Advanced Thermoset Composites – Industrial and Commercial Applications**; Van Nostrand Reinhold Company; New York.

MARINUCCI G.; ANDRADE A. H. P. (2004) Microstructural analysis in asymmetric and un-balanced composite cylinders damaged by internal pressure, **Composite Structures**, P.1-5.

MARTIN Dr. S.; AVERY A. (2003) Reinforced Thermoplastic Pipe – Innovative Technology for Onshore Field Developments. In: **Twentieth-second International Conference on Offshore**, Cancun, June 8–13, 2003.

NAZARETH A. L.; TEIXEIRA S. C. C.; COUTINHO F. M. B.; (2001) Mechanical properties of polymer composites base don commercial epoxy vinyl ester resin and glass fiber. **Polymer**, v.20, P.895-899.

OCHOLA R. O.; MAECUS K.; NURICK G. N.; FRANZ T. (2004) Mechanical behavior of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates. **Composite Structures**. v.63, P. 455-467.

PARNAS L.; KAYNAK C.; ERDILLER E. S.; SENELC F. (2005) Use of split-disk tests for the process parameter of filament wound epoxy composite tubes. **Polymer Testing**, v.24, P.648-655.

PARNAS L.; KATIRCI N. (2002) Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions. **Composite Structures**, v.8, P. 83-95.

PERREUX D.; SURI C. (1997) A Study of the Coupling the Phenomena of Water Absorption and Damage in Glass/Epoxy Composite Pipes, **Composites Science and Technology**, v.57, P.1403-1413.

PETROBRAS (2005). **Superinteressante**. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/propaganda/portugues/revistas/Superinteressante.htm>.

PILATO L. A.; MICHNO M. J. (1994) **Advanced Composite Materials**. Springer-Verlag; Berlin.

PIRES I.; BERGERET A.; FOULC M. P.; ABADIE B.; FERRY L.; CRESPIY A. (2001) The Hygrothermal Behaviour of Glass-Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites: a Prediction of the Composite Lifetime, **Polymer Testing**, v.20, P.753-763.

SHENOI R. A.; WELLICOME J. F. (1993) **Composite Materials in Maritime Structures**, v.1, Fundamental Aspects, Cambridge University Press.

SILVESTRE FILHO G. D. (2001) **Comportamento Mecânico do Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Reforçado por Fibra de Carbono: Contribuição**

para o Projeto de Hastes de Implante de Quadril. Dissertação (Mestrado) Programa de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos. P.192.

SPSYSTEMS. **A Guide of Composite.** Disponível em <<http://www.spsystems.com>>. Acesso em maio de 2005.

STORHAUG T.; STJERN G.; PAULSHUS B.; SALAMA M. M. (2001) Qualification and Testing of Composite Tethers and Risers for Ultra Deep Water. Including Commenced Field Demonstration at Heidrun TLP.; **Significant Achievements in Composite Technology in 2001**; USA.

SUN X. K.; DU S. Y.; WANG G. D. S. (1999) Bursting problem of filament wound composite pressure vessel, **International Journal of Pressure, Vessels and Piping**, v.76, P.55-59.

TELLES P. C. S. (1982) **Tubulações Industriais: Cálculo.** Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 6ª ed.,1982.

UFSCar. **Compósitos Poliméricos**, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em <<http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5706/PDF/COMPOSITOS.PDF>>. Acesso em junho 2006.

VIZINHA J. (2004) Introdução aos Materiais Compósitos. In: **Anais do Seminário Interdisciplinar 2004 - I Jornadas – IPA**; COPPE.

YWN-DE X.; CHIN-KUNG C. (1987) How to predict the burst pressure of a FRP pipe, Composite Structures 4 – Analysis and Design Studies. In: **4th International Conference on Composite Structures**, v.1, Scotland.

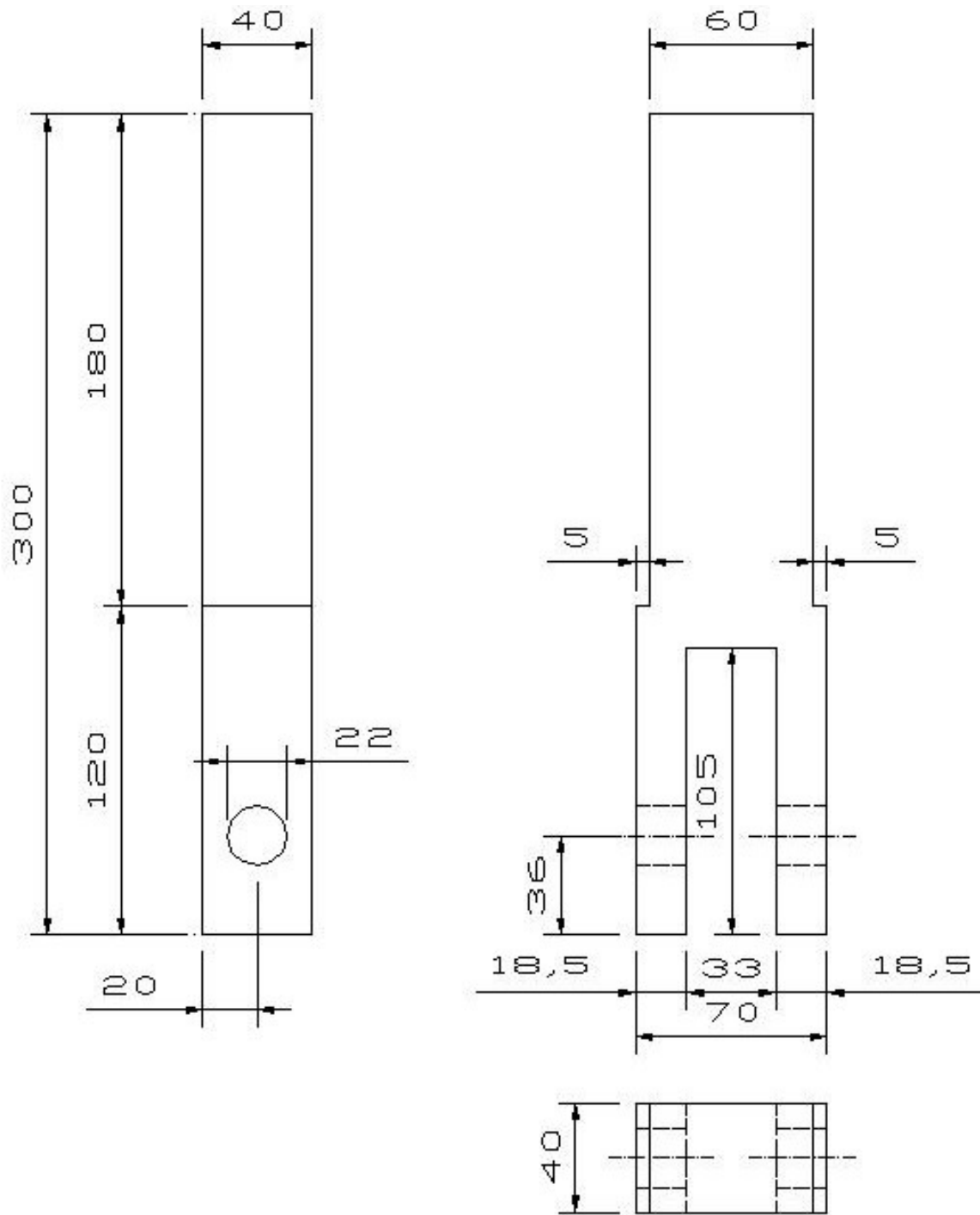
ZINOV'EV P. A.; TSVETKOV S. V.; KULISH G. G.; VAN DEN BERG R. W.; VAN SCHEPDAEL L. J. M. M. (2001) Strength of unidirectional composites under high hydrostatic pressures. **Mechanics of Composite Materials**, v.37, n.4, P.281-288.

ZHOU J.; LUCAS J. P. (1999) Hygrothermal Effects of Epoxy Resin. Part I: The Nature of Water in Epoxy. **Polymer**, v.40, P.5505-5512.

ZHOU J.; LUCAS J. P. (1995) The effects of a water environment on anomalous absorption behavior in graphite/epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.53, P.57-64.

Apêndice A

Dimensões da garra



Cotas em mm.

Apêndice B

Análise de Tensões da Garra – Solução Analítica

Memória de Cálculo

Dados obtidos de estudos anteriores (Tese - Egbert):

$$F_{\max 1} := 64.67 \cdot 10^3 \cdot \text{N}$$

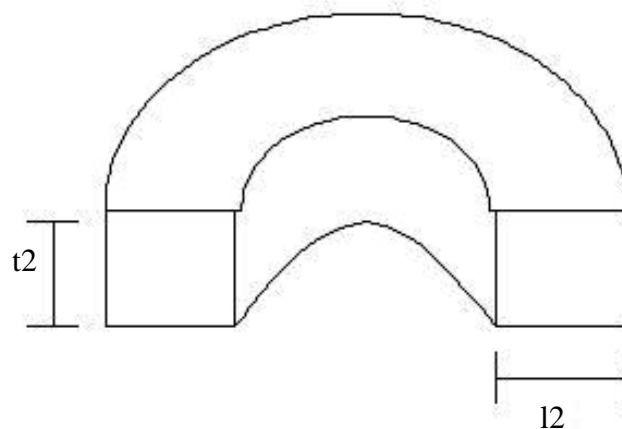
$$\sigma_a := 303.55 \cdot 10^6 \text{Pa}$$

$$\sigma_a := \frac{F_{\max 1}}{2A_{m1}} \quad \text{Norma ASTM D 2290-00}$$

$$A_{m1} := \frac{F_{\max 1}}{2 \cdot \sigma_a}$$

$$A_{m1} = 1.065 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Dados para critério de cálculo:



$$12 := 25 \cdot \text{mm} \quad t2 := 7.5 \cdot \text{mm}$$

$$A_{m2} := 12 \cdot t2 \quad A_{m2} = 1.875 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

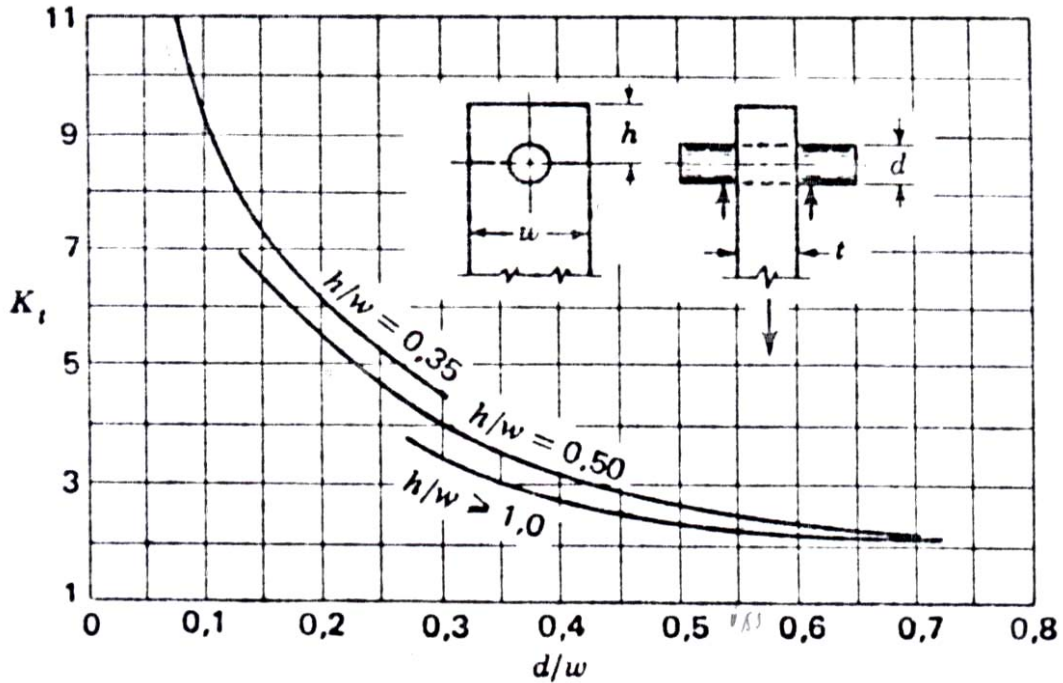
$$F_{\max 2} := \sigma_a \cdot 2 \cdot A_{m2} \quad F_{\max 2} = 1.138 \times 10^5 \text{N}$$

Definindo um fator de segurança (FS) entre 1,5 e 2,0 para carga gradativamente aplicada:

$$FS := 2.0$$

Adaptação:

Submetida a carregamento trativo.



Placa submetida a tração por um pino que passa por um furo. $\sigma_o = F/A$, sendo $A = (w-d)t$. Se houver folga, aumentar K_t de 35 a 50%. [FROCHT, M. M. e HILL, H. N. Stress concentration factors around a central circular hole in a plate loaded through a pin in hole. J. Appl. Mechanics, 7 (1): A-5, mar./1940.]

$$d := 22 \text{ mm} \quad w := 40 \text{ mm} \quad h := 36 \text{ mm} \quad a := 18.5 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{w} = 0.55$$

então: $K_t := 2.3$, considerando que não exista folga entre a adaptação e o pino

$$\frac{h}{w} = 0.9$$

$$A_{ad} := (w - d) \cdot a \quad A_{ad} = 3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sigma_{ad} := K_t \cdot \frac{\left(\frac{F_{max2}}{2} \cdot FS \right)}{A_{ad}} \quad \sigma_{ad} = 7.862 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Pino:

Submetido à cisalhamento.

$$A_p := \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad A_p = 3.801 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\tau_p := \frac{\left(\frac{F_{\max 2FS}}{2} \right)}{A_p} \quad \tau_p = 2.995 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Geometria e volume de material adquirido no fornecedor:

Adaptação - barra chata com a dimensão: largura de 76,2mm (3pol), espessura de 50,8mm (2pol) e comprimento de 320mm.

$$V_{ad} := 76.2 \cdot 50.8 \cdot 320 \text{ mm}^3 \quad V_{ad} = 1.239 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Pino - tarugo de dimensões: diâmetro de 31,75mm (11/4pol) e comprimento de 200mm.

$$V_p := \pi \cdot \left(\frac{31.75^2}{4} \right) \cdot 200 \text{ mm}^3 \quad V_p = 1.583 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Seleção do material:

Limites de escoamento (após tratamentos térmicos) e densidades:

$$\begin{array}{lll} \text{Aço 4340} - \sigma_{e4340} := 1400 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa} & \tau_{e4340} := 0.6 \sigma_{e4340} & \rho_{4340} := 7.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \\ & \tau_{e4340} = 8.4 \times 10^8 \text{ Pa} & \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Aço 4140} - \sigma_{e4140} := 910 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa} & \tau_{e4140} := 0.6 \sigma_{e4140} & \rho_{4140} := 7.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \\ & \tau_{e4140} = 5.46 \times 10^8 \text{ Pa} & \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Aço 8640} - \sigma_{e8640} := 1020 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa} & \tau_{e8640} := 0.6 \sigma_{e8640} & \rho_{8640} := 7.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \\ & \tau_{e8640} = 6.12 \times 10^8 \text{ Pa} & \end{array}$$

Custo:

$$\text{Aço 4340 - } c_{4340} = \frac{12.5}{\text{kg}} \text{ R\$}$$

$$\text{Aço 4140 - } c_{4140} = \frac{16.5}{\text{kg}} \text{ R\$}$$

$$\text{Aço 8640 - } c_{8640} = \frac{18.5}{\text{kg}} \text{ R\$}$$

Custo total:

$$\text{Aço 4340 - } ct_{4340} = 2 \cdot c_{4340} p_{4340} (V_{ad} + V_p) \quad ct_{4340} = 272.425 \text{ R\$}$$

$$\text{Aço 4140 - } ct_{4140} = 2 \cdot c_{4140} p_{4140} (V_{ad} + V_p) \quad ct_{4140} = 359.602 \text{ R\$}$$

$$\text{Aço 8640 - } ct_{8640} = 2 \cdot c_{8640} p_{8640} (V_{ad} + V_p) \quad ct_{8640} = 403.19 \text{ R\$}$$

Todos os aços selecionados são aços para beneficiamento de alta resistência e utilizados para finalidades comuns.

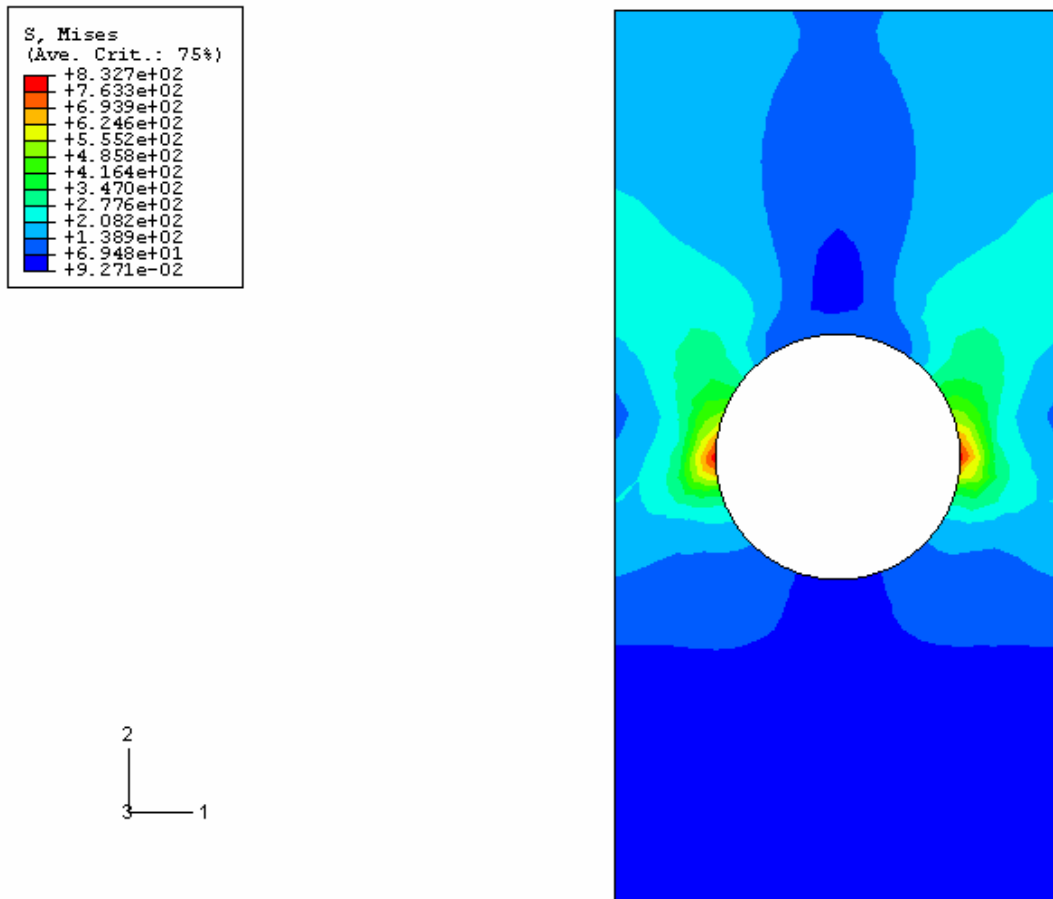
Portanto, os fatores que nortearam a escolha dos materiais foram:

- geometria do material quando adquirido no fornecedor; e
- menor custo total.

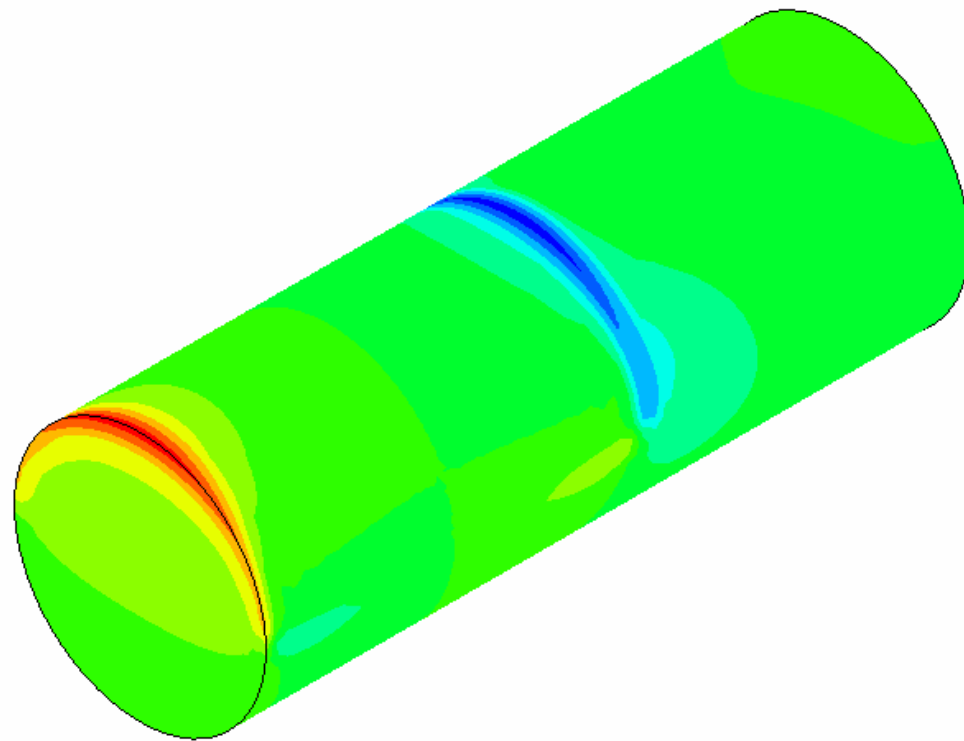
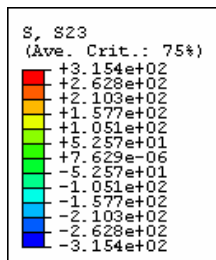
O aço 4340 possui maior limite de escoamento, porém é fornecido em tarugo, o que demandaria maiores tempo e custo para a fabricação da adaptação. Optou-se pelo aço 8640, devido seu limite de escoamento ser superior ao aço 4140, o que traz maior confiabilidade estrutural e também pelo fato da diferença no custo não ser tão significativa.

Apêndice C

Análise de Tensões da Garra e no Pino – Solução Numérica



Análise do carregamento trativo na “perna” da garra cortada.



Análise do cisalhamento no pino cortado

Apêndice D

Dimensões dos anéis e forças de ruptura dos corpos de prova para efeito de cálculo

Anel	Espessura(t)	Largura da redução de seção (Δz)	Largura	Área mín. (mm ²)	Força Ruptura (F_r)
I1	7,20	16,90	25,00	-	58,3
	7,40		25,00		
	7,50	17,00	25,40		
	7,20				
	7,60				
I2	7,30	16,80	25,30	-	57,8
	7,00		24,70		
	7,00	16,80	25,10		
	7,10				
	7,40				
I3	6,90	16,80	24,90	-	56,4
	7,10		24,80		
	7,15	16,85	24,90		
	7,30				
	7,60				
I4	7,50	17,00	25,00	-	57,1
	7,60		25,00		
	7,80	16,90	25,00		
	7,60				
	7,60				
I5	7,30	17,00	24,90	-	61,6
	7,20		25,20		
	7,50	17,00	25,20		
	7,60				
	7,60				
I6	7,00	17,00	25,00	-	64,4
	6,90		25,50		
	7,10	17,10	25,50		
	6,80				
	6,85				
I7	-	-	-	-	61,4
I8	-	-	-	-	64,1
I9	-	-	-	-	68,6
I10	-	-	-	-	58,9
I11	-	-	-	-	67,8
I12	-	-	-	-	56,5
I13	-	-	-	-	55,8
Média	7,29	16,93	25,08	123,41	61,0

Anel	Espessura(t)	Largura da redução de seção (Δz)	Largura	Área mín. (mm ²)	Força Ruptura (F _r)
SRS1	7,90	-	24,90	-	82,7
	7,40		24,90		
	7,40	-	25,10		
	7,40				
	7,50				
SRS2	7,50	-	24,90	-	88,1
	7,60		24,50		
	7,30	-	24,60		
	7,20				
	7,30				
SRS3	7,10	-	25,20	-	91
	7,20		25,20		
	7,30	-	24,80		
	7,20				
	7,20				
SRS4	-	-	-	-	91,3
Média	7,37	-	24,90	183,43	88,275

CDV4D1	7,40	17,10	25,00	-	64,3
	7,40		25,00		
	7,50	17,20	25,00		
	7,40				
	7,40				
CDV4D2	7,35	17,00	25,00	-	62
	7,40		25,00		
	7,30	17,20	24,90		
	7,40				
	7,50				
CDV4D3	7,20	17,20	24,90	-	51,9
	7,40		25,00		
	7,55	17,30	25,00		
	7,80				
	7,45				
CDV4D4	7,30	17,20	25,10	-	61,3
	6,90		24,90		
	7,30	17,20	25,00		
	7,60				
	7,20				
CDV4D5	7,25	17,30	25,10	-	66,2
	7,20		25,20		
	7,50	17,20	25,10		
	7,00				
	7,10				
Média	7,35	17,19	25,01	126,38	

Anel	Espessura(t)	Largura da redução de seção (Δz)	Largura	Área mín. (mm ²)	Força Ruptura (F_r)
CDV8D1	6,80	17,10	25,00	-	60,8
	6,90		25,05		
	6,90	17,00	25,10		
	6,80				
	6,80				
CDV8D2	6,90	17,00	25,00	-	69,4
	7,00		25,00		
	7,35	17,00	25,10		
	7,20				
	7,40				
CDV8D3	7,10	17,05	25,25	-	59,1
	7,20		25,20		
	7,25	17,10	25,00		
	6,90				
	7,10				
CDV8D4	7,30	17,10	25,20	-	67,7
	7,40		24,90		
	7,60	17,10	25,00		
	7,20				
	7,80				
CDV8D5	7,40	17,00	25,00	-	68,7
	7,50		25,00		
	7,30	17,00	25,00		
	7,45				
	7,45				
Média	7,20	17,05	25,05	122,72	65,1
CDV12D1	7,00	17,00	25,00	-	61
	6,70		24,90		
	6,90	16,85			
	7,00				
	6,90				
CDV12D2	6,80	16,90	25,00	-	57,7
	7,10		25,10		
	6,90	16,90			
	7,00				
	7,00				
CDV12D3	7,50	17,00	25,00	-	53,1
	7,20		25,00		
	7,40	17,00			
	7,40				
	7,50				
CDV12D4	7,00	16,90	25,00	-	51,4
	6,60		25,00		
	6,75	16,90			

	6,60				
	6,85				

Anel	Espessura(t)	Largura da redução de seção (Δz)	Largura	Área mín. (mm ²)	Força Ruptura (F_r)
CDV12D5	7,00	16,90	25,00	-	47,7
	7,45		24,90		
	7,30	17,10			
	7,00				
	7,45				
Média	7,05	16,95	24,99	91,61 119,50	59,35

CD5P12D1	7,20	17,40	24,90	-	62,6
	7,20		24,90		
	7,30	17,20	25,00		
	7,20				
	7,40				
CD5P12D2	7,20	17,00	24,80	-	57,7
	7,20		24,90		
	7,20	17,00	24,80		
	7,25				
	7,30				
CD5P12D3	7,20	17,00	25,05	-	58,2
	7,30		24,85		
	7,10	17,00	25,10		
	7,30				
	7,10				
CD5P12D4	7,30	17,10	24,90	-	64,2
	7,20		25,00		
	7,40	17,00	25,00		
	7,20				
	7,30				
CD5P12D5	7,30	17,00	25,00	-	56
	7,20		24,80		
	7,30	17,00	25,00		
	7,40				
	7,25				
Média	7,25	17,07	24,93	123,79	60,15

Média Total	7,25	17,04	24,99	123,55	
-------------	------	-------	-------	--------	--

Apêndice E

Resultados calculados para todos os corpos de prova

Corpo de Prova	$\sigma_{\theta Ap}$ (MPa)	E_{θ} (MPa)	d máx.
I01	235,96	19,62	6,27
I02 (*)	233,93	34,31	5,58
I03	228,27	19,70	5,80
I04	231,10	18,56	5,58
I05	249,31	17,56	6,78
I06	260,64	18,46	7,34
I07	248,58	-	6,11
I08	259,23	-	6,78
I09	277,77	-	7,32
I10	238,33	-	6,65
I11	274,48	-	6,57
I12	228,80	-	5,66
I13	225,76	-	6,24
Média I#	254,53	18,78	6,37
Desvio Padrão	17,73	0,90	0,61
SRS1	228,23	-	8,55
SRS2	243,13	-	9,11
SRS3	251,13	-	9,47
SRS4	251,96	-	9,41
Média SRS#	243,61	-	9,13
Desvio Padrão	11,00	-	0,42
CDV4D1	260,24	17,37	7,15
CDV4D2	250,93	23,19	6,18
CDV4D3	210,05	22,10	5,66
CDV4D4	248,10	18,44	6,57
CDV4D5	267,93	19,39	7,68
Média CDV4D#	247,45	20,10	6,65
Desvio Padrão	22,33	2,46	0,80
CDV8D1	246,07	19,18	6,41
CDV8D2	280,88	19,59	7,28
CDV8D3	239,19	21,14	6,32
CDV8D4	274,00	19,32	7,32
CDV8D5	278,05	21,30	7,82
Média CDV8D#	263,64	20,11	7,03
Desvio Padrão	19,48	1,03	0,64

Corpo de Prova	$\sigma_{\theta Ap}$ (MPa)	E_{θ} (MPa)	d máx.
CDV12D1	323,86	19,62	6,51
CDV12D2	306,34	19,13	6,20
CDV12D3	281,91	21,86	6,00
CDV12D4	272,89	25,25	6,21
CDV12D5	253,25	21,34	5,23
Média CDV12D#	287,65	21,44	6,03
Desvio Padrão	27,81	2,42	0,48
CD5P12D1	253,36	17,62	6,85
CD5P12D2	233,53	19,94	5,96
CD5P12D3	235,55	20,90	6,60
CD5P12D4	259,83	16,03	7,20
CD5P12D5	226,65	16,63	5,96
Média CD5P12D#	241,78	18,22	6,52
Desvio Padrão	14,11	2,11	0,55

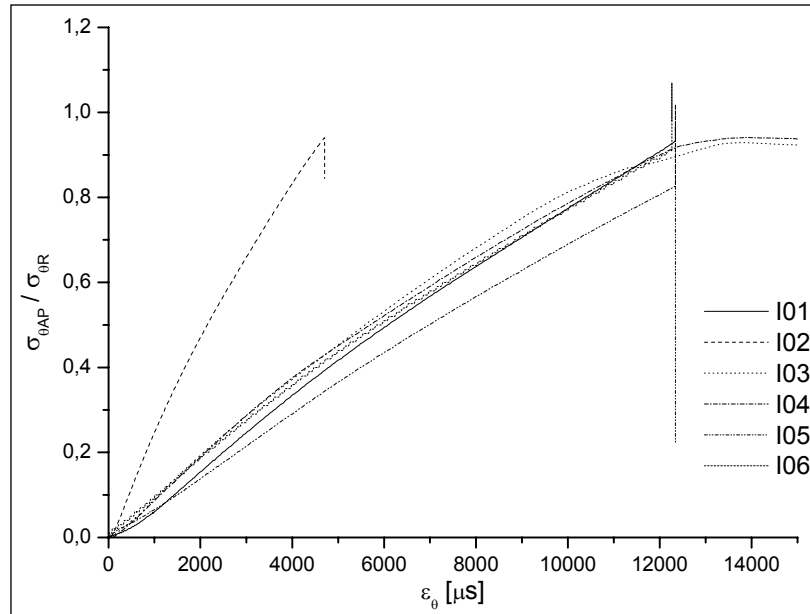
(*) não foi considerado para efeito de cálculo do módulo de elasticidade.

Tensão Circunferencial x Deformação Circunferencial

(obtidos experimentalmente)

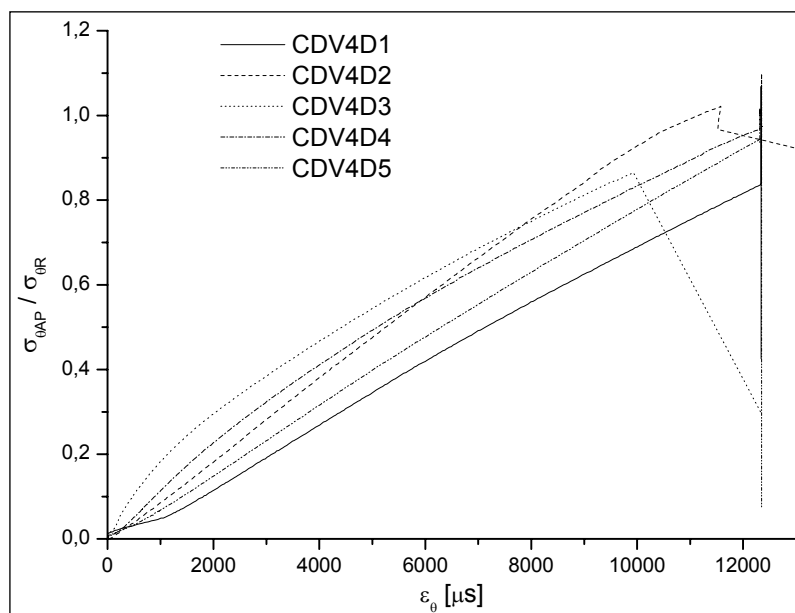
Anel I#:

(*) Anel I02 foi descartado, em virtude da discrepância apresentada, justificada pelo possível descolamento do strain-gauge durante o teste.



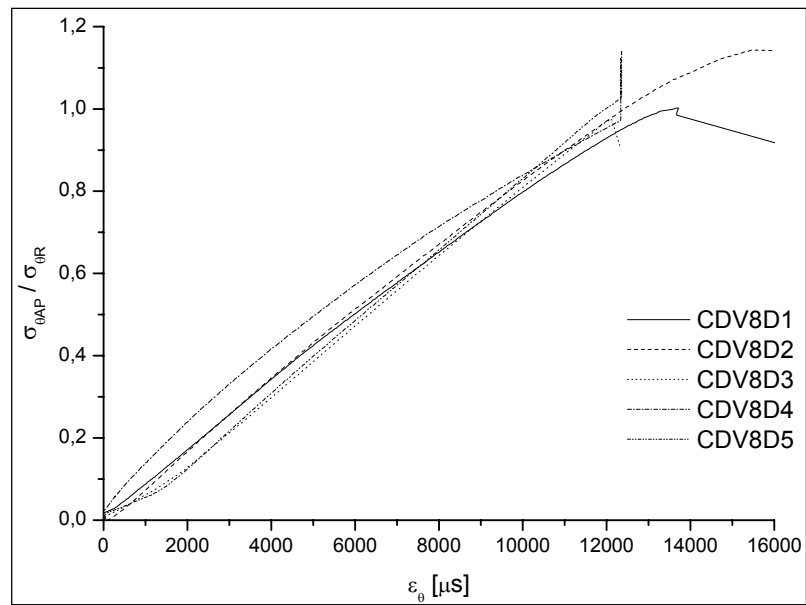
(a)

Anel CDV4D#:



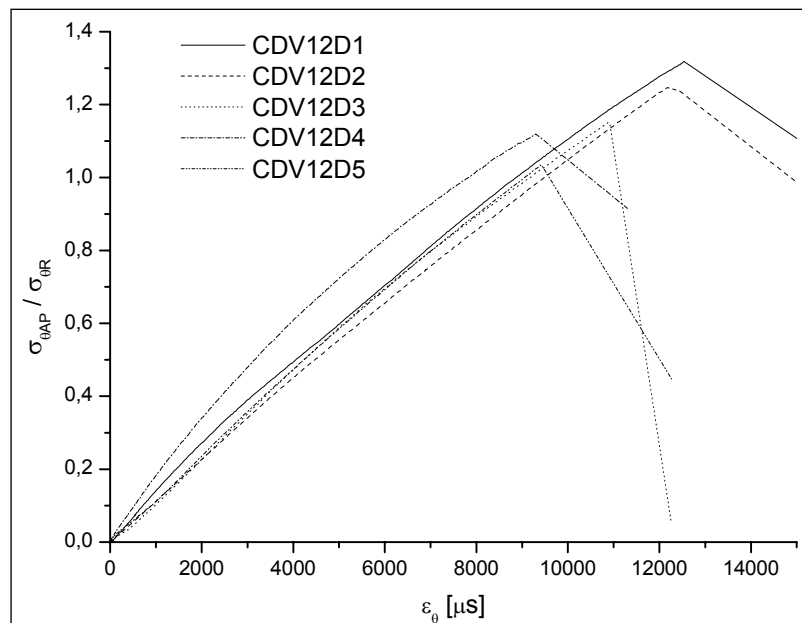
(b)

Anel CDV8D#:



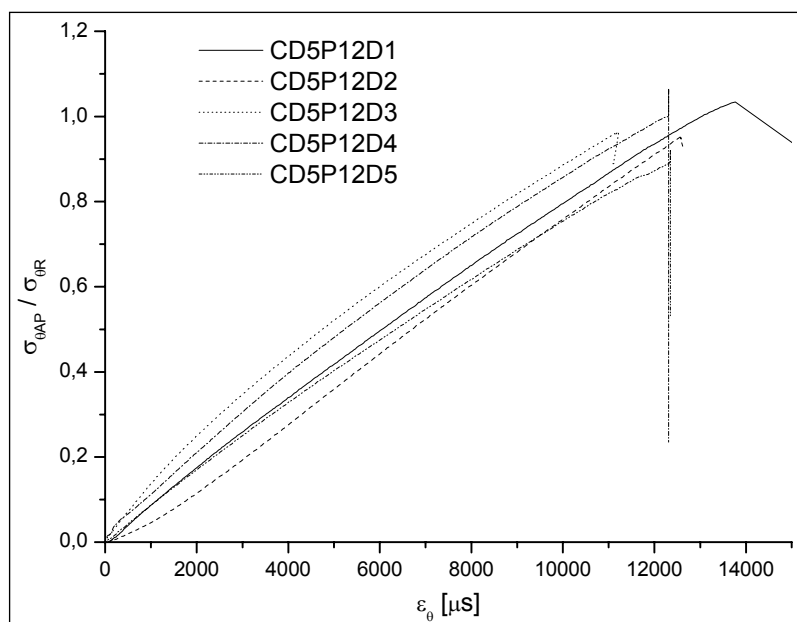
(c)

Anel CDV12D#:



(d)

Anel CD5P12D#:



(e)

Figura E1: Resultados dos ensaios de tração, utilizando extensometria, para os grupos de anéis: (a) Anel I#, (b) Anel CDV4D#, (c) Anel CDV8D#, (d) Anel CDV12D#, (e) Anel CD5P12D#.

Apêndice F

Cálculo da tensão circunferencial de referência ($\sigma_{\theta R}$) e pressão interna máxima (p)

Considerando:

- F é a força de ruptura média obtida experimentalmente;
- t é a espessura do tubo;
- Δz é o comprimento do tubo, que equivale a largura mínima do anel na redução de seção;
- R_i é o raio interno do tubo;

sendo:

$$R_i = R_n - \frac{t}{2} \Rightarrow R_i = 152,4mm - \frac{7,25mm}{2} \Rightarrow R_i = 148,775mm$$

Determina-se:

$$\sigma_{\theta R} = \frac{F}{2 \cdot t \cdot \Delta z} \Rightarrow \sigma_{\theta R} = \frac{60300N}{2 \cdot 7,25mm \cdot 17,04mm} \Rightarrow \sigma_{\theta R} = 244,05MPa$$

e

$$p = \sigma_{\theta R} \cdot \frac{t}{R_i} \Rightarrow p = 244,05MPa \cdot \frac{7,25mm}{148,775mm} \Rightarrow p = 11,89MPa .$$

Apêndice G

Análise de Tensão dos corpos de prova

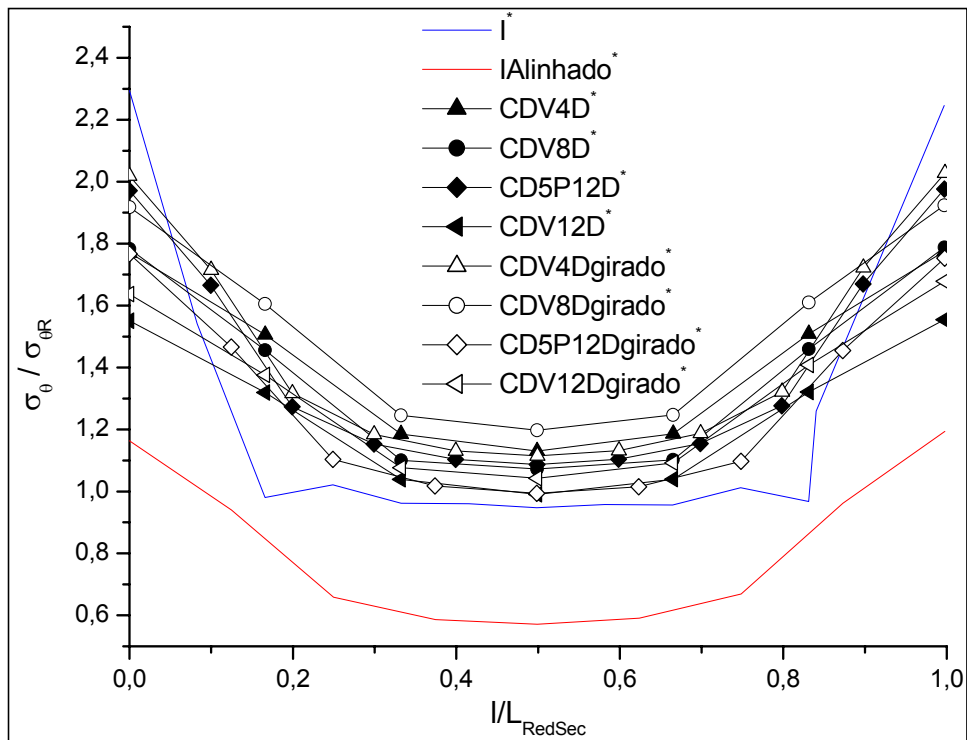


Figura G1: Tensão circunferencial na largura da redução de seção (L_{RedSec}).

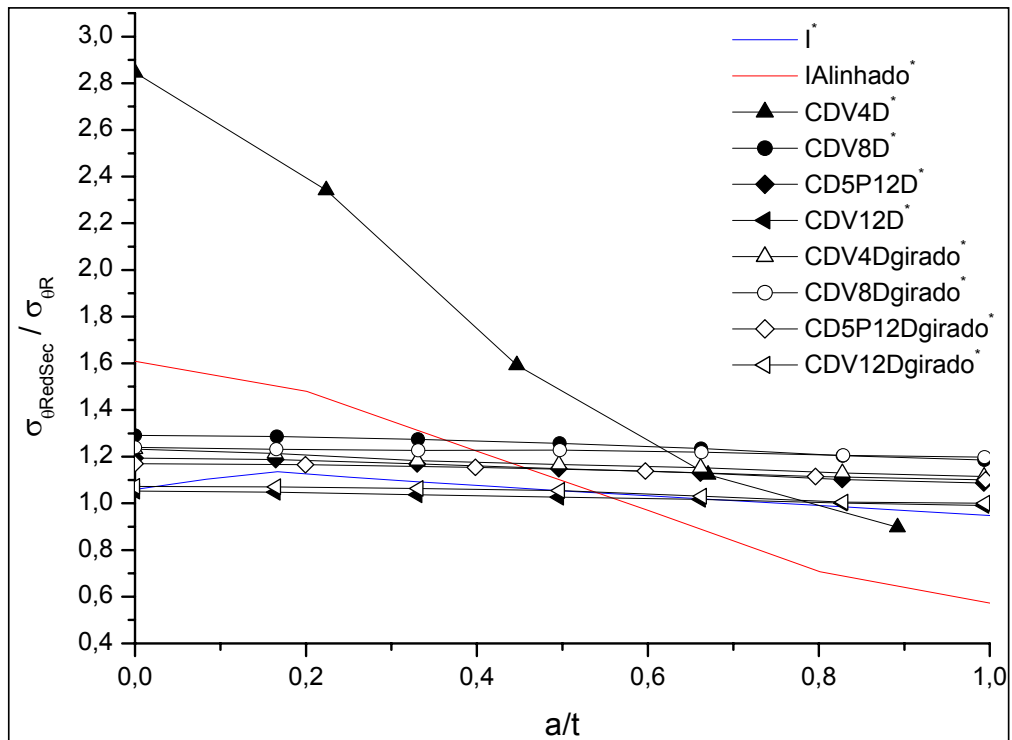


Figura G2: Tensão circunferencial na redução de seção através da espessura.

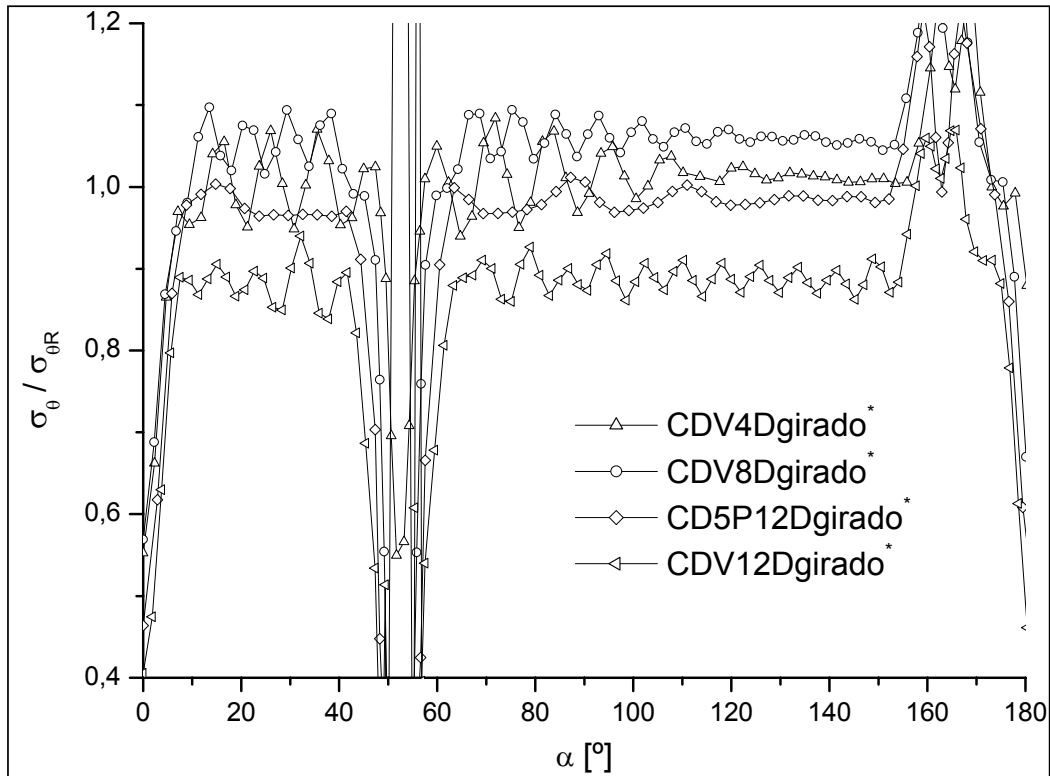


Figura G3: Tensão circunferencial versus ângulo a partir do plano médio para anéis com defeito na posição II.

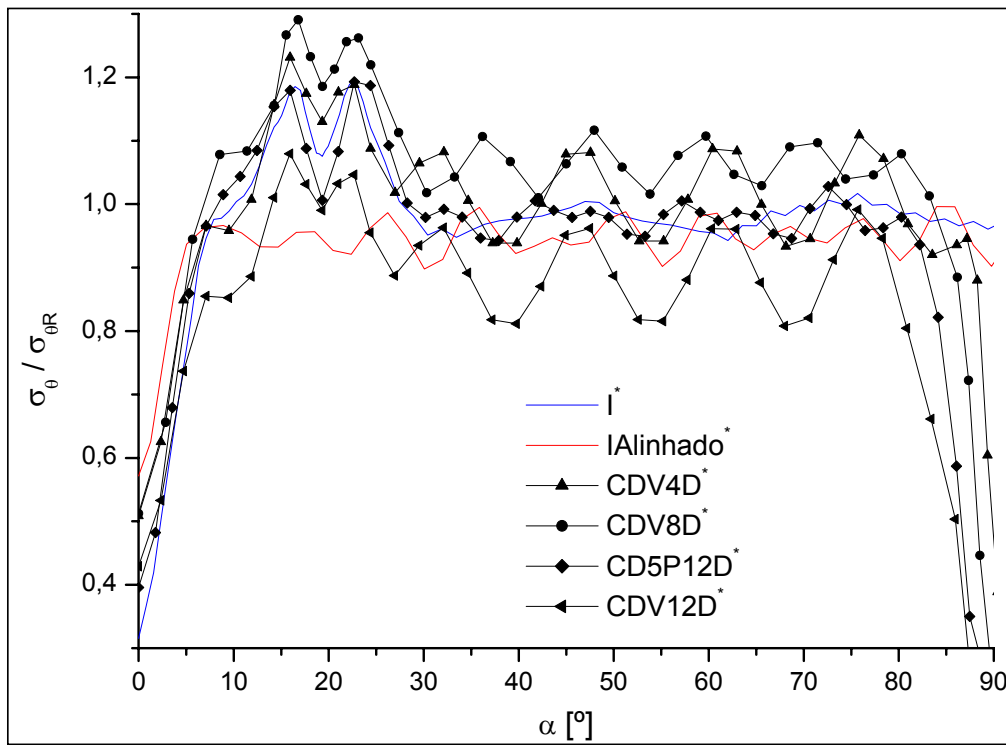
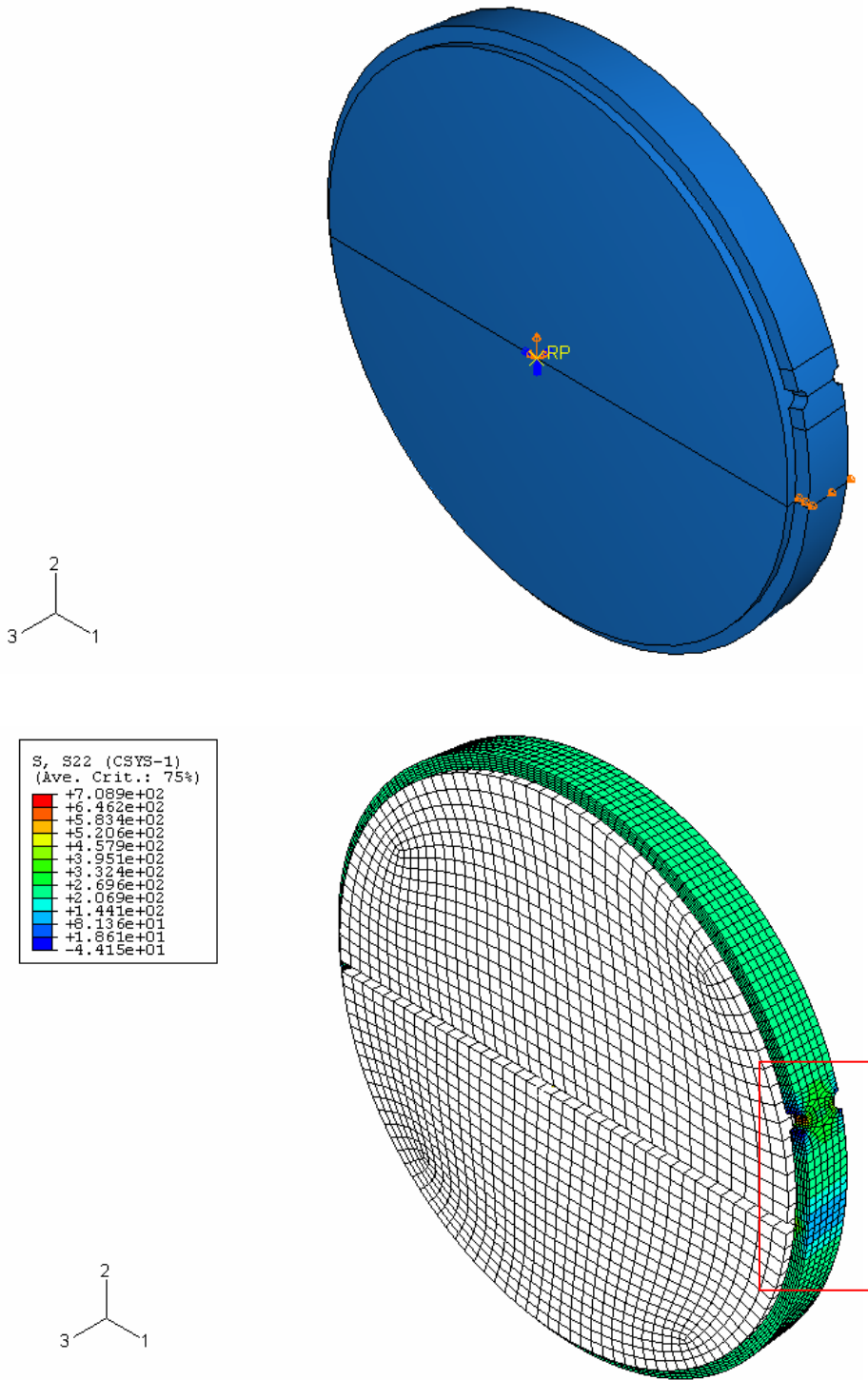


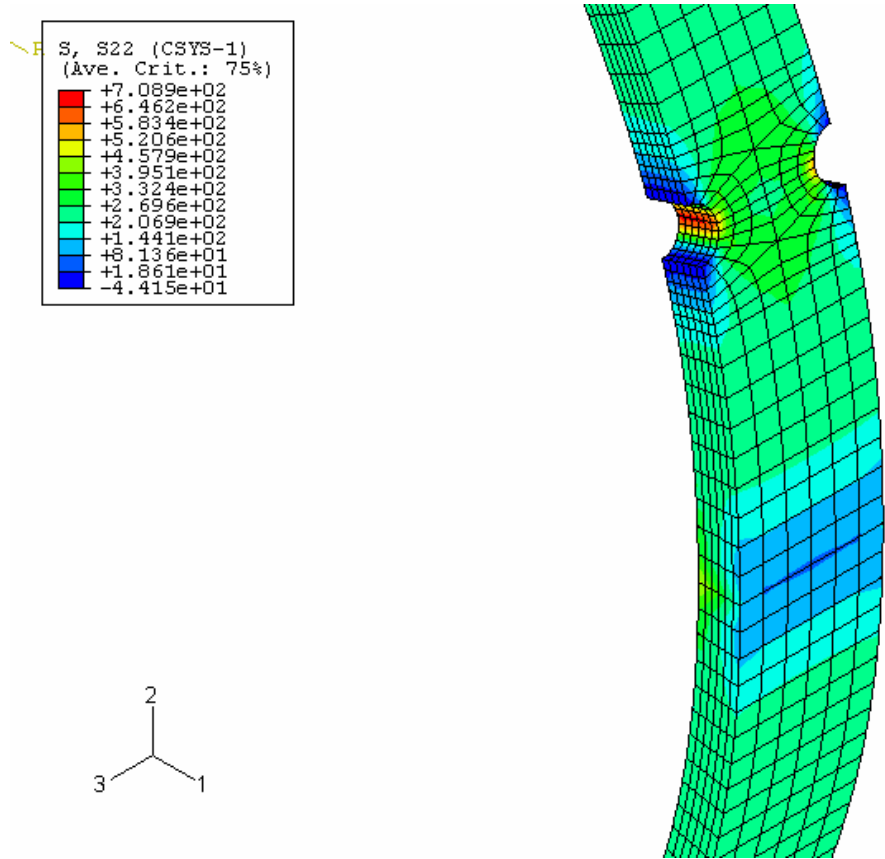
Figura G4: Tensão circunferencial versus ângulo a partir do plano médio para anéis com defeito na posição I, anel íntegro e íntegro alinhado.

Apêndice H

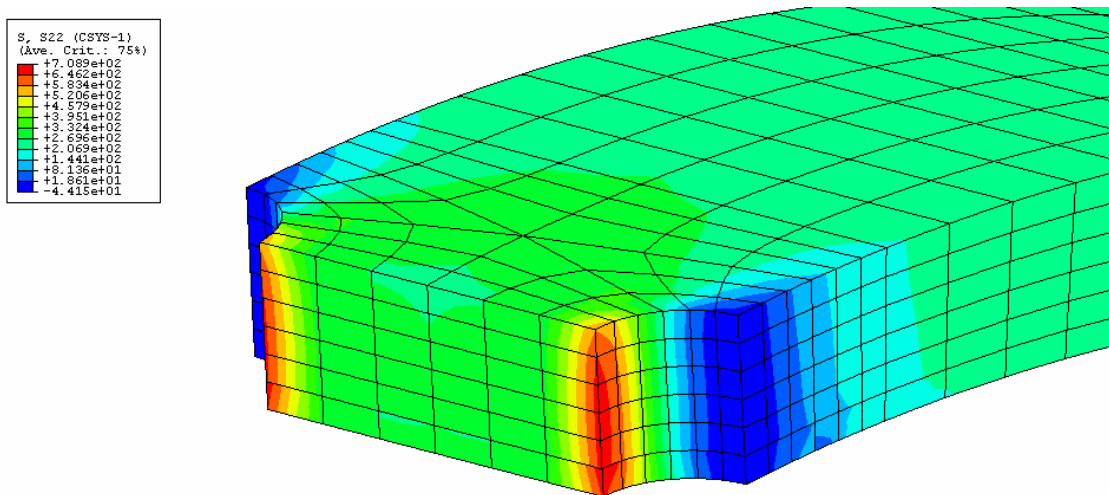
Simulação computacional – Análise de tensões

Anel Íntegro (I)



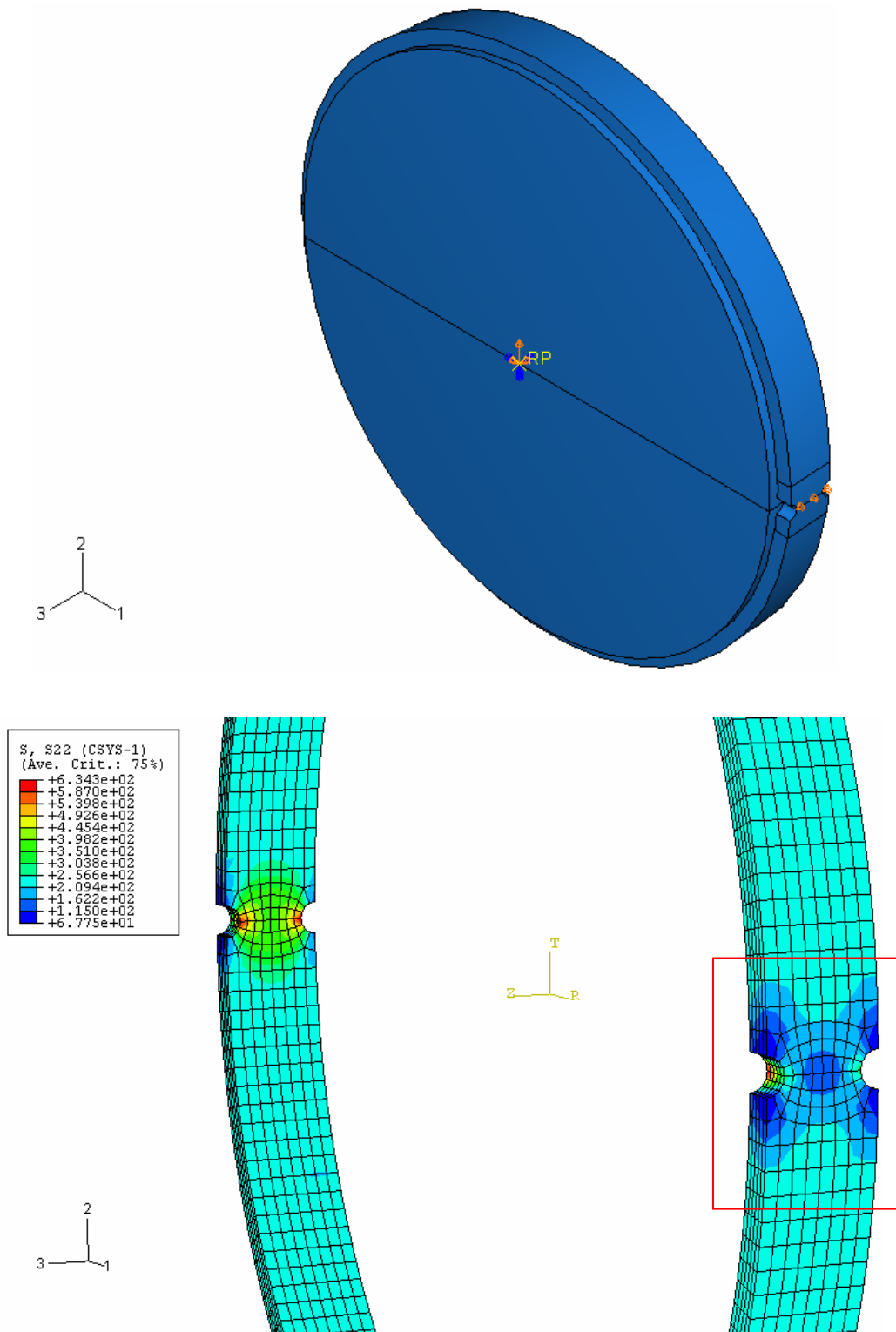


Região da redução de seção e região do plano médio.

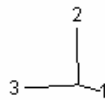
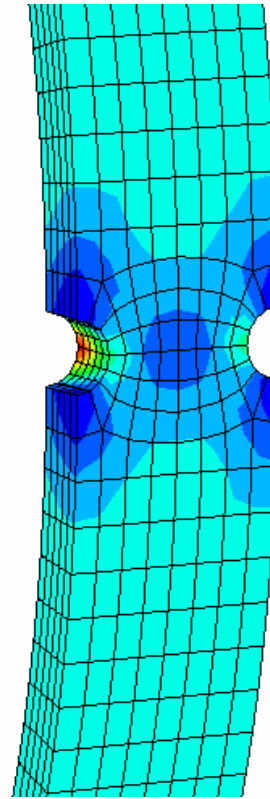
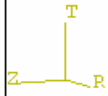
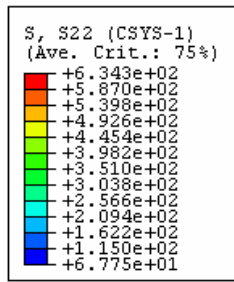


Seção transversal da redução de seção.

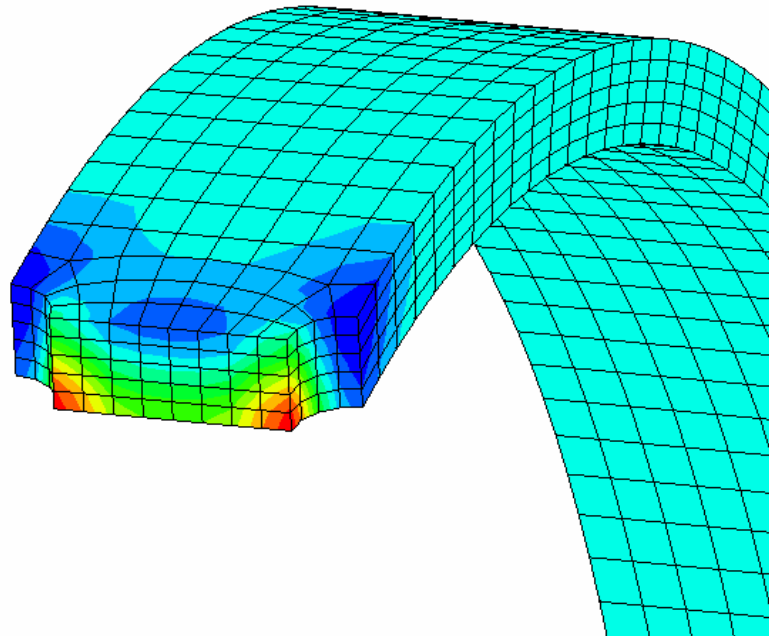
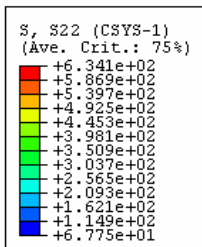
Anel Íntegro Alinhado (IAlinhado)



Reduções de seção localizadas no plano médio.

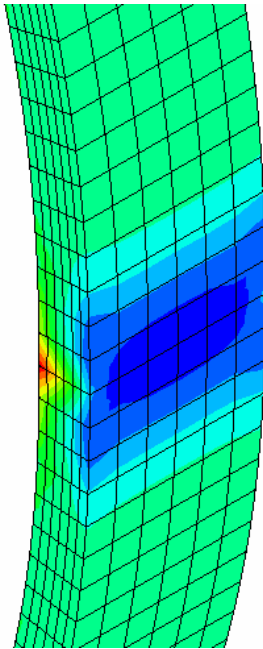
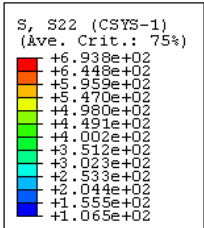
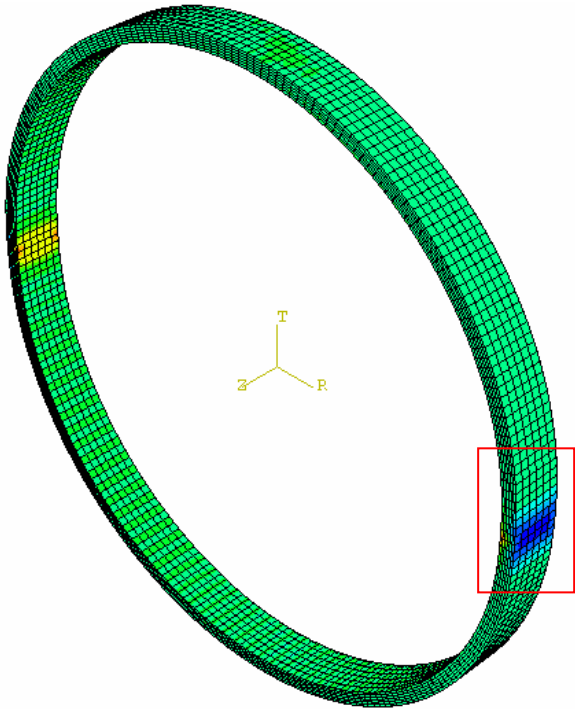
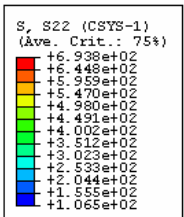


Redução de seção, localizada no plano médio.



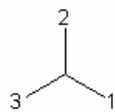
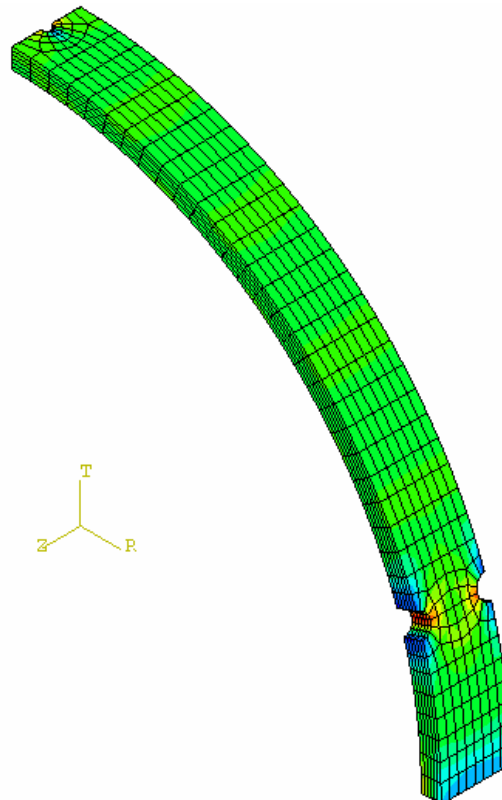
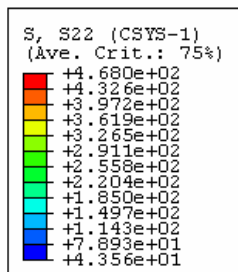
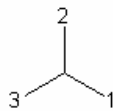
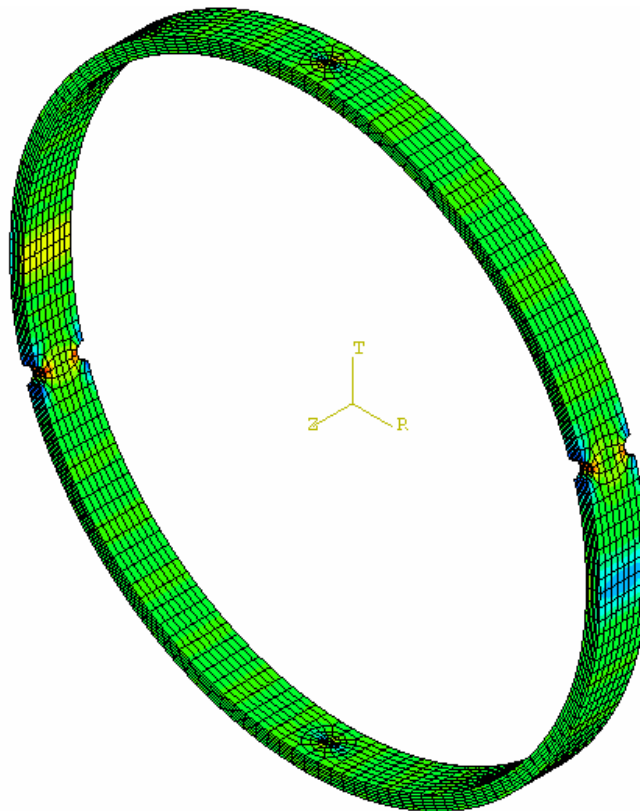
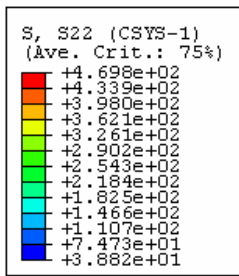
Seção transversal da redução de seção.

Anel Sem Redução de Seção (SRS)



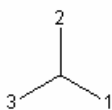
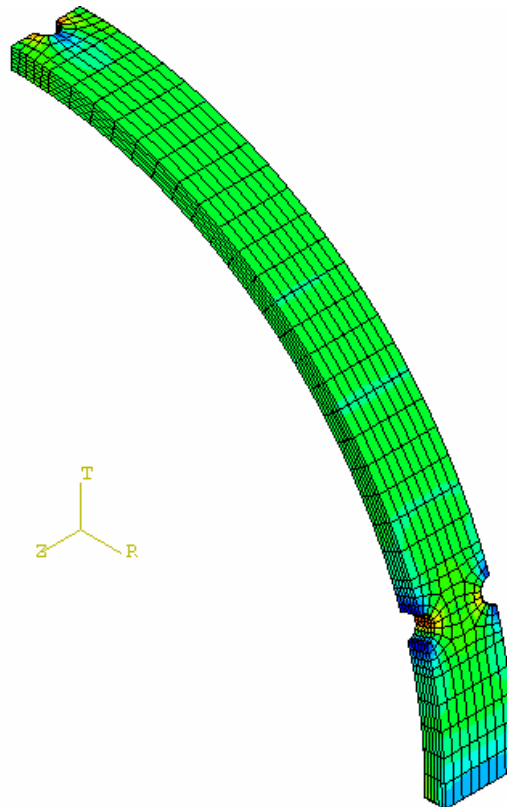
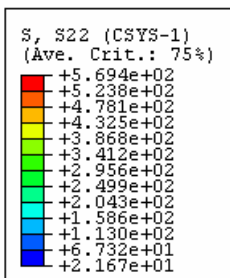
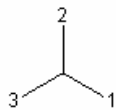
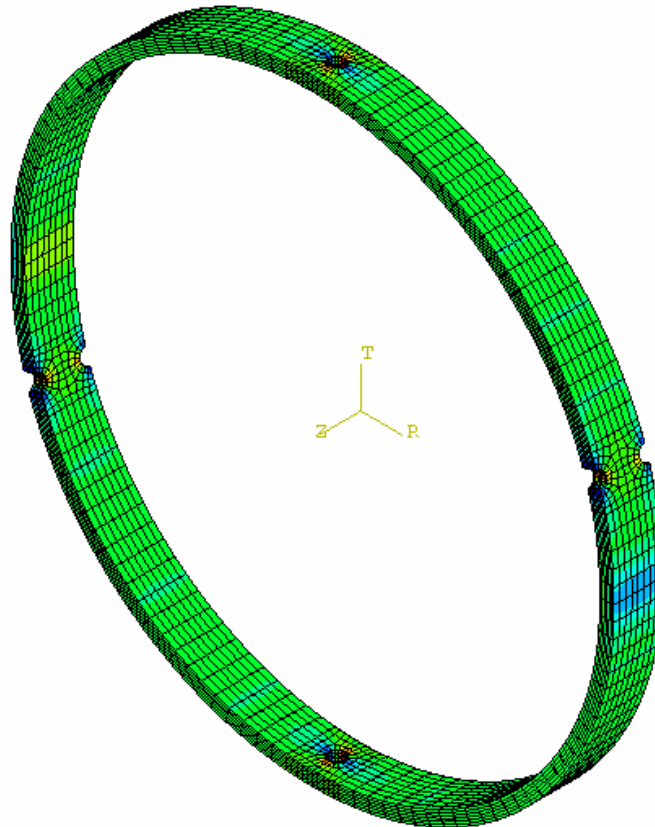
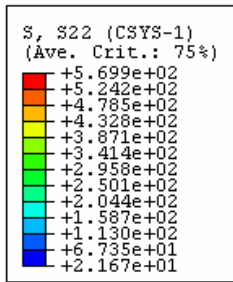
Região do plano médio - efeito da flexão

Anel CDV4D



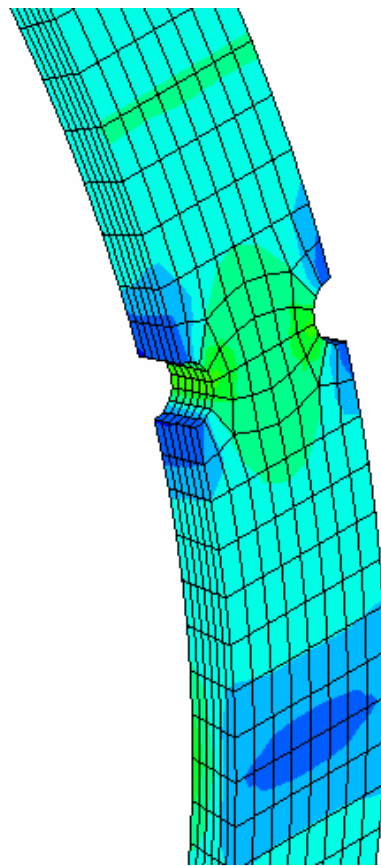
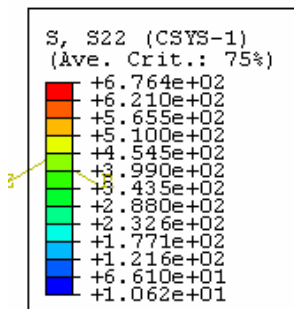
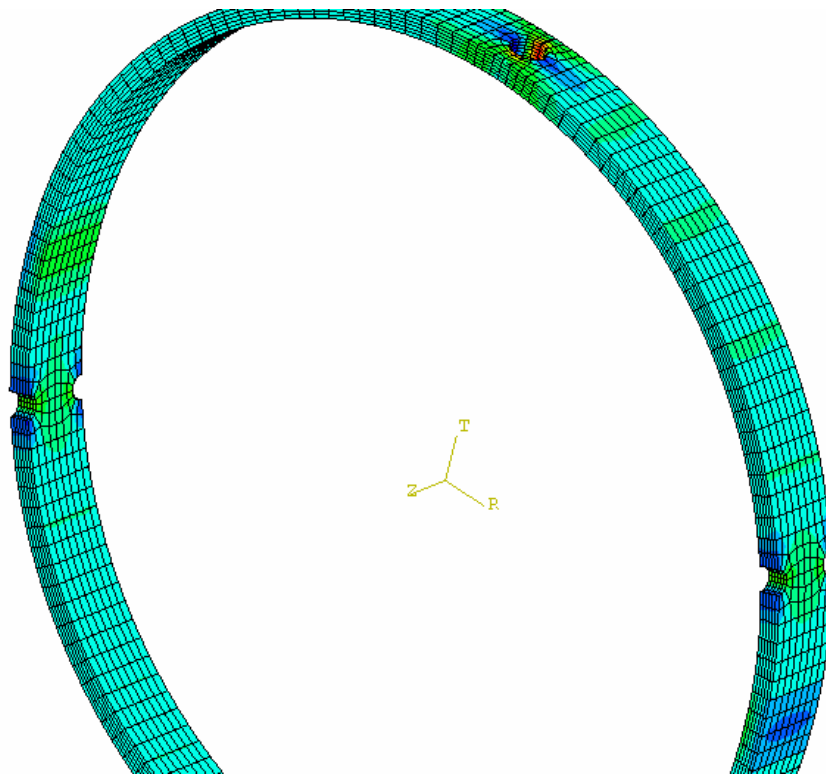
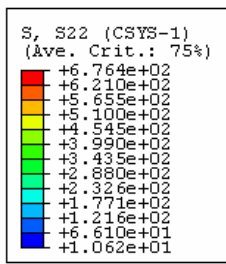
$\frac{1}{4}$ da circunferência do anel: do plano médio ao defeito.

Anel CDV8D

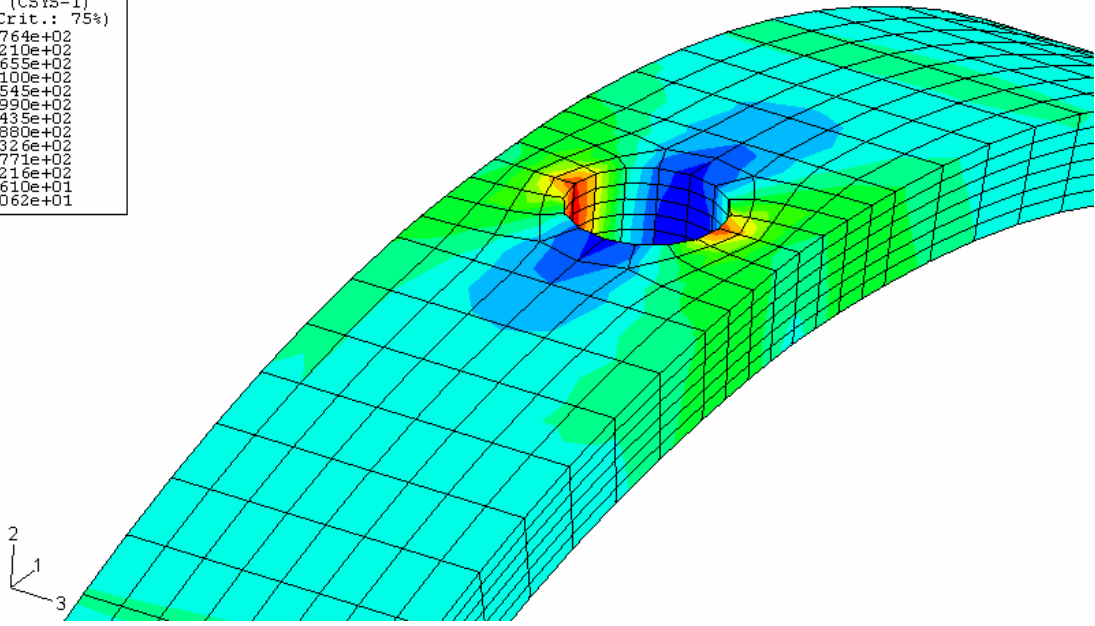
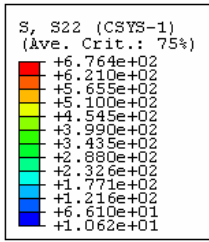


¼ da circunferência do anel: do plano médio ao defeito.

Anel CDV12D

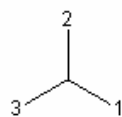
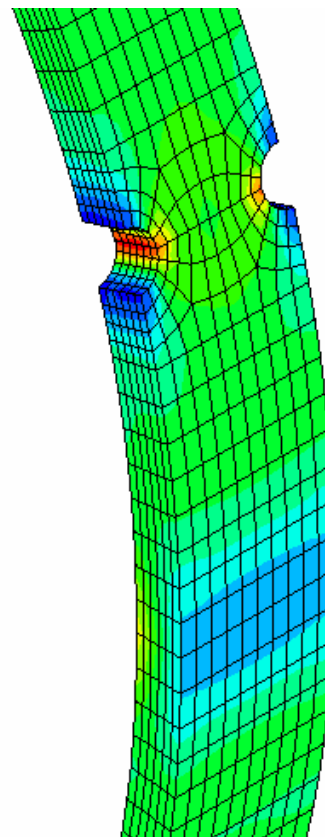
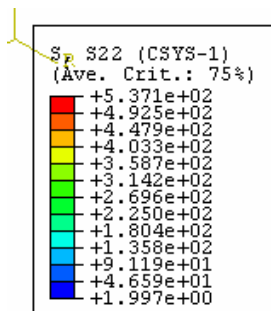
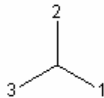
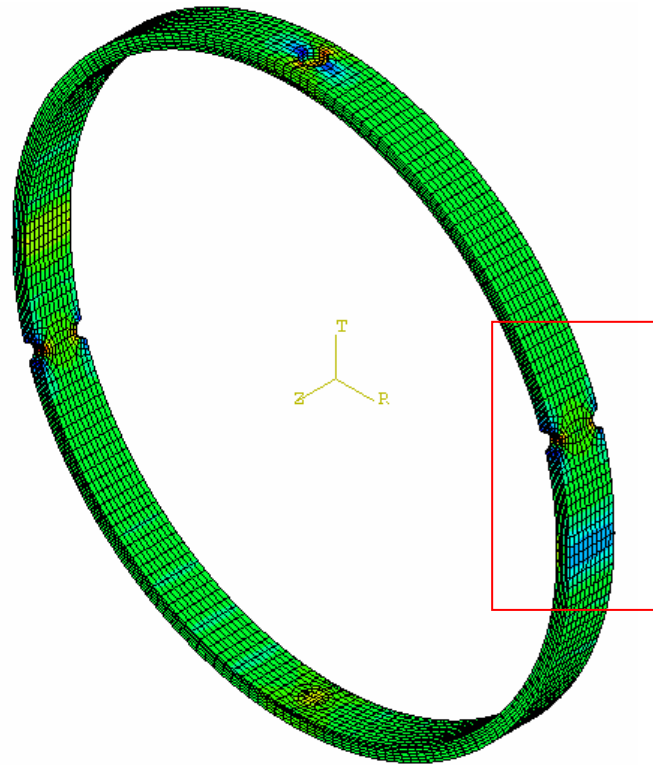
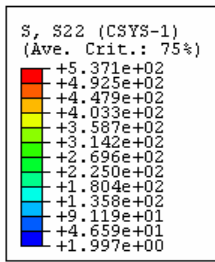


Redução de seção e região do plano médio.

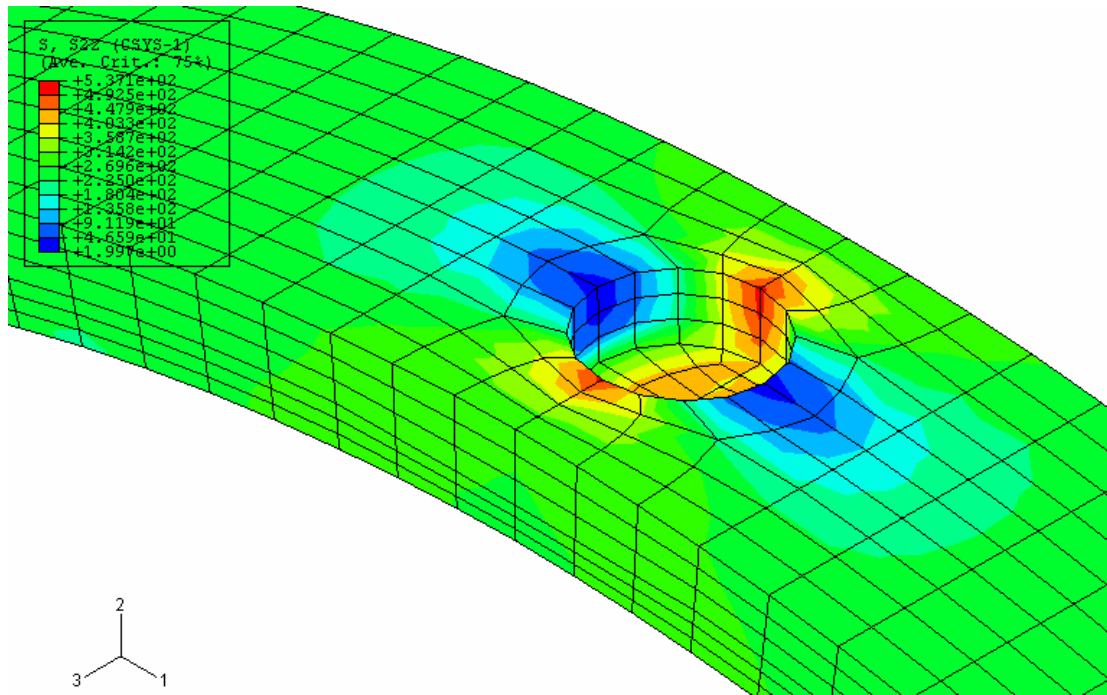


Região do defeito vazante (12mm de diâmetro).

Anel CD5P12D

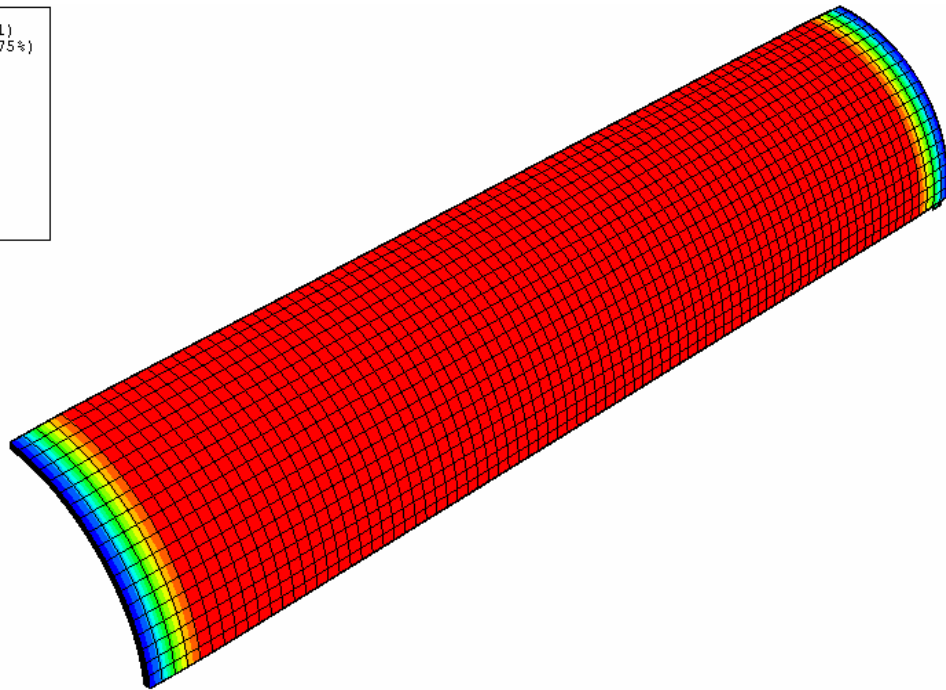
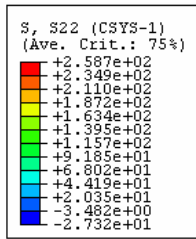


Redução de seção e região do plano médio.



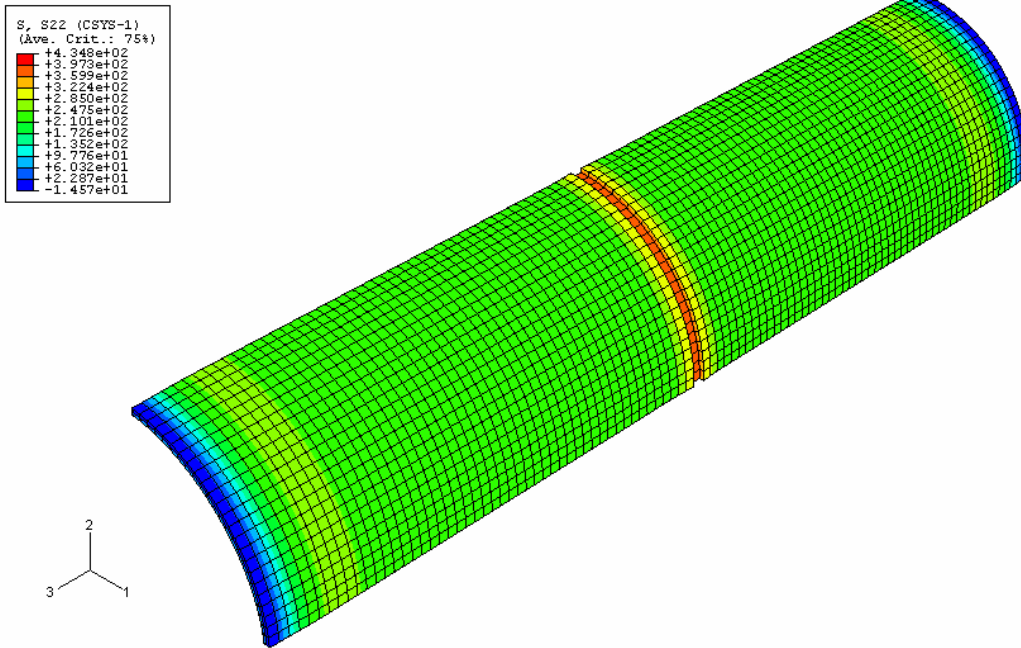
Região do defeito (12mm de diâmetro e 5mm de profundidade).

Tubo



$\frac{1}{4}$ da circunferência do tubo íntegro.

Tubo com defeito (TuboCD5P12D)



¼ da circunferência do tubo com defeito de 12mm de largura e 5mm de profundidade.

Apêndice I

Análise Estatística

Tabela I1: Tabela ANOVA para tensão circunferencial de ruptura aparente.

Tensão circunferencial de ruptura aparente					
	SQ	GL	MQ	F	p
Intercept	2069109	1	2069109	5585,077	0,000000
Corpo de prova	8073	5	1615	4,358	0,004229
Erro	11114	30	370		

Tabela I2: Teste LSD Fisher para tensão circunferencial de ruptura aparente, considerando o corpo de prova.

Teste LSD - Fisher / Tensão circunferencial de ruptura aparente							
	Corpo de prova	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		247,20	243,61	247,45	263,64	241,78	287,65
1			0,749252	0,980629	0,119053	0,600995	0,000440
2	SRS	0,749252		0,768469	0,131415	0,888200	0,001872
3	CDV4D	0,980629	0,768469		0,193578	0,644963	0,002485
4	CDV8D	0,119053	0,131415	0,193578		0,082679	0,057858
5	CD5P12D	0,600995	0,888200	0,644963	0,082679		0,000720
6	CDV12D	0,000440	0,001872	0,002485	0,057858	0,000720	

Tabela I3: Teste LSD Fisher para módulo de elasticidade circunferencial, considerando o corpo de prova.

Teste LSD - Fisher / Módulo de elasticidade circunferencial						
	Corpo de prova	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		21,347	19,694	20,407	19,600	20,232
1	I		0,421437	0,645847	0,396012	0,586001
2	CDV4D	0,421437		0,738210	0,964900	0,800846
3	CDV8D	0,645847	0,738210		0,705410	0,934469
4	CD5P12D	0,396012	0,964900	0,705410		0,767124
5	CDV12D	0,586001	0,800846	0,934469	0,767124	

Tabela I4: Teste LSD Fisher para tensão circunferencial de ruptura aparente, considerando a posição.

Teste LSD - Fisher / Tensão circunferencial de ruptura aparente			
	Posição	{1} 254,43	{2} 270,71
1	Girado (II)		0,117317
2	Não-girado (I) ou normal	0,117317	

Tabela I5: Teste LSD Fisher para módulo de elasticidade circunferencial, considerando a posição.

Teste LSD - Fisher / Módulo de elasticidade circunferencial			
	Posição	{1} 254,43	{2} 270,71
1	Girado (II)		0,543519
2	Não-girado (I) ou normal	0,543519	

Tabela I6: Tabela ANOVA para tensão circunferencial de ruptura e o tipo de falha.

	Tensão circunferencial de ruptura				
	SQ	GL	MQ	F	p
Intercept	728695,5	1	728695,5	3052,561	0,000000
Tipo de falha	1146,1	1	1146,1	4,801	0,050867
Erro	2625,9	11	238,7		