

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS POR
ENROLAMENTO FILAMENTAR PARA POSSÍVEIS APLICAÇÕES COMO
RISERS RÍGIDOS

Ana Angélica dos Santos Faro

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 METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph. D.

Prof^ª. Verônica Maria de Araújo Calado, D. Sc.

Prof^ª. Marysilvia Ferreira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO,RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

FARO, ANA ANGÉLICA DOS SANTOS

Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como risers rígidos [Rio de Janeiro] 2008

XV, 109 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Tubos Compósitos
2. Enrolamento Filamentar
3. *Risers*

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico este trabalho a minha mãe e minha amada família.

" A cada dia que vivo, mais me convenço de que o desperdício da vida está no amor que não damos, nas forças que não usamos, na prudência egoísta que nada arrisca, e que, esquivando-se do sofrimento, perdemos também a felicidade... A dor é inevitável. O sofrimento opcional ".

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, por toda bondade que teve comigo, por ter me dado a oportunidade de fazer parte dessa família linda e ter amigos maravilhosos;

À Minha muito amada, lutadora e admirada mãe por ter sempre acreditado, apoiado e contribuído para a concretização desse sonho e pela busca de uma vida melhor, e ao meu pai;

Ao meu amado esposo e meus lindos filhos, Rhuan e Rhayane, pelo amor, companheirismo e coragem de deixar tudo pra trás e acompanhar-me nessa trajetória (“Só o amor constrói”);

A grande mentora e uma das responsáveis pela concretização desse sonho, minha amiga Leleu (Ledjane), que me acolheu, ajudou, apoiou e sempre esteve ao meu lado nos bons e maus momentos, te amo muito amiga e obrigada por tudo mesmo. E a seus agregados que também quero muito bem Helanão, Melzinha e Sayo;

Ao professor Bastian, meu orientador, pela confiança, paciência e bondade. Obrigada.

Aos meus irmãos, Acácia por toda a ajuda que mim deu desde a minha decisão, Ângela pelo apoio incondicional em todos os momentos, Ademir pelas palavras ditas sempre no momento certo, Florência a mãezona e a todos os outros, Almir, Alberto e Adilson que do jeito deles sempre torceram por mim;

Meus sobrinhos Helder, Marrana, Marrara, Maraísa; Marcel, Arley, Binho, Amanda, Neto, Caio, Carol, Michel e Christian;

Aos meus tios José da Silva, Lourdes e Neide, e em especial a outra grande incentivadora dos meus estudos, Tia Luíza (“in memoriam”);

Ao casal nota 10, Cristiane e Rogério, pela atenção e amizade, e a Milena uma amiga “pau pra toda obra”;

Aos amigos das noites perdidas estudando métodos matemáticos Nilsão, Geovani e Maria, quanto sofrimento;

Aos amigos do laboratório de compósitos, Rafa “O péssimo” pela grande ajuda, força, amizade e confiança, Camilona pelas palavras de incentivo e pelos cuidados, Wanderley pelos conselhos, Camilinha, Carol, Bruna, Fabíola, Thayará, Marta, Denis, aos Marcelos e Edgar quanta gente boa, amei conhecer e conviver com todos vocês;

Aos membros da ala Galeão da Igreja de Jesus Cristo dos Santos dos Últimos Dias, em especial a família Fujiwara, família Figueiredo e a família do bispo Henrique que mim acolheram com tanto carinho.

Ao Sr. Carlos Leão Leutewiler da Teijin-Twaron do Brasil Ltda pela simpatia, interesse e boa vontade em conseguir as fibras de carbono para que a tese pudesse ser desenvolvida;

Aos professores do PEMM/UFRJ pelos ensinamentos e pela compreensão, em especial aquelas que me ouviram prof^a Renata, prof^a Marysilvia e prof^a Rossana, e também a prof^a Verônica Calado do LADEQ/EQ, pelo apoio;

Aos técnicos do PEMM, Robinho, Seu Nelson e Seu Júlio, e funcionários, especialmente Francisco;

Ao Prof^o Stockler Canabrava Filho, aos técnicos e alunos de iniciação do departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio no desenvolvimento dos trabalhos para a tese;

Ao prof^o Romildo Dias Toledo Filho do departamento de Engenharia Civil pelos ensaios de tração e a sua aluna de doutorado, Reila Velasco, pela ajuda;

À CAPES pela bolsa concedida;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho;

Enfim a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa trajetória.

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

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS POR
ENROLAMENTO FILAMENTAR PARA POSSÍVEIS APLICAÇÕES COMO
RISERS RÍGIDOS

Ana Angélica dos Santos Faro

Março/2008

Orientador: Fernando Luiz Bastian

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O uso de materiais compósitos na produção de risers rígidos em substituição ao tradicional riser de aço tem surgido como uma boa opção para diminuir os custos de fabricação e manutenção, devido ao seu baixo peso. O estudo de diferentes tipos de reforço na produção de tubos compósitos é importante para avaliar seu desempenho em relação à resistência circunferencial e axial, e rigidez. O objetivo desse trabalho é o estudo do processo de fabricação e a caracterização mecânica e microestrutural dos tubos compósitos produzidos pelo processo de enrolamento filamentar usando fibras de carbono e de vidro “S” e “E” com matriz epóxi. Desta forma, inicialmente foram produzidos três tubos: um de fibra de vidro “E”, um de fibra de vidro “S” e um híbrido, com fibras de vidro “S” e carbono, tipo *sandwich* com duas camadas circunferenciais a 88° internas, duas camadas helicoidais a $\pm 45^\circ$ e duas camadas circunferenciais a 88° externas. O comportamento mecânico dos tubos foi avaliado através de testes de tração de amostras longitudinais, de acordo com a norma ASTM D3039M-95, e ensaios de anéis, de acordo com a norma ASTM D2290-00. As propriedades mecânicas avaliadas foram: tensão de falha, alongação e módulo de elasticidade para as amostras longitudinais, e tensão máxima e módulo de elasticidade para os ensaios de anel. Os modos de falha dos corpos de prova nos testes também foram estudados. Os resultados obtidos mostram que o tubo híbrido apresentou valores de tensão máxima e módulo de elasticidade que fazem dele um candidato potencial para risers. Por outro lado, os tubos fabricados com fibras de vidro “S” e “E” apresentaram maior alongação, propriedade também relevante para risers.

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

DEVELOPMENT OF TUBES OF COMPOSITE MATERIALS BY FILAMENT WINDING FOR RIGID RISERS APPLICATIONS

Ana Angélica dos Santos Faro

March/2008

Advisor: Fernando Luiz Bastian

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The use of composite materials in the production of rigid riser for deep waters is becoming an interesting alternative to steels for their lower densities and fabrication costs. The study of the different reinforcement types in the production of the composite tubes is important in order to evaluate their performances in relation of hoop and axial strength and stiffness. The objective of the present dissertation is to study the fabrication process and the mechanical and microstructural characterization of the composite tubes produced by filament winding using S and E fiberglass and carbon fibers with an epoxy matrix. A possible application of those tubes is the production of rigid risers. Three tubes were produced: one with E glass fibers, the second with S glass fibers, the third hybrid of the sandwich type, of S glass and carbon fibers. The tubes were produced with two internal hoop layers at 88° , two helical layers at $\pm 45^\circ$ and two external hoop layers at 88° . The mechanical behavior of the tubes was evaluated through tensile tests of axial samples following ASTM D 3039M-95 and ring tests following ASTM D 2290-00 standards. In the tensile tests the rupture stress, elasticity modulus and elongation were evaluated. In the ring tests the ultimate tensile stress and elasticity modulus evaluated. The failure modes were also studied. The obtained results show that the hybrid tube presents values of ultimate tensile stress and elasticity modulus that make it potential candidate for risers. On the other hand, the tubes fabricated with E or S glass fibers show higher elongation, which is also important for the risers.

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Exploração <i>Offshore</i> no Brasil e no Mundo	3
2.2. Plataformas	5
2.3. <i>Risers</i>	7
2.4. Materiais Compósitos	12
2.5. Matriz Polimérica	13
2.5.1. Resina Epóxi.....	14
2.6. Reforço	22
2.6.1. Fibras de Vidro	23
2.6.2. Fibras de Carbono.....	24
2.7. Materiais Compósitos Híbridos	25
2.8. Fabricação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	26
2.8.1. Laminação Manual (“Hand-lay-up”).....	26
2.8.2. Enrolamento Filamentar (“Filament Winding”).....	27
2.9. <i>Riser</i> Rígido de Compósito	35
3. <i>Materiais e Métodos</i>	45
3.1. Materiais Seleccionados	45
3.1.1. Resina Epóxi.....	45
3.1.2. Fibra de Vidro.....	45
3.1.2.1. Fibra de Vidro Tipo “S”	45
3.1.2.2. Fibra de vidro Tipo “E”	46
3.1.3. Fibra de Carbono	46
3.2. Metodologia	47
3.2.1. Preparação do Laminado Plano	47
3.2.2. Caracterização dos Laminados Compósitos Produzidos.....	49
3.2.2.1. Ensaio de Tração	49
3.2.2.2. Análises Microscópicas e Fractográficas	51
3.2.3. Enrolamento Filamentar	51
3.2.3.1. Parâmetros Internos da Máquina	52
3.2.3.2. Adequação da Máquina de Enrolamento.....	54

3.2.3.3. Alterações na Estufa de Cura.....	56
3.2.3.4. Produção dos Tubos Compósitos	57
3.2.4. Caracterização dos Tubos Compósitos Produzidos.....	58
3.2.4.1. Variação de Diâmetro e Espessura	58
3.2.4.2. Densidade do Compósito e Fração Volumétrica de Fibra.....	59
3.2.4.3. Avaliação Microestrutural	61
3.2.4.4. Ensaio de Tração em Corpos de Prova e em Anéis.....	62
3.2.4.4.1. Tração em Corpos de Prova Retirados Longitudinais.....	62
3.2.4.4.2. Tração em Anéis.....	63
4. Resultados e Discussão.....	65
4.1. Análise Microscópica dos Laminados	65
4.2. Densidade e Fração Volumétrica de Fibra dos Laminados	67
4.3. Ensaio de Tração dos Laminados	69
4.4. Produção de Tubos Compósitos.....	72
4.4.1. Tubos Compósitos Protótipos.....	72
4.4.2. Tubos compósitos.....	77
4.5. Variação de Diâmetro e Espessura dos Tubos	79
4.6. Densidade e Fração Volumétrica de Fibra dos Tubos	80
4.7. Análise Microscópica dos Tubos	82
4.8. Ensaio de Tração dos Tubos	83
4.8.1. Tração em Corpos de Prova Longitudinais	84
4.8.2. Tração em Anéis.....	89
4.9. Considerações Finais	93
5. Conclusões	95
6. Sugestões para Trabalhos Futuros	96
7. Referências Bibliográficas.....	97
8. Apêndice	103
9. Anexos	107

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática dos conjuntos tecnológicos para exploração marinha.	5
Figura 2 - Tipos de plataformas <i>offshore</i> . a) semi-submersível; b) de perna atirantada; c) tipo bóia; d) auto-elevatória; e) fixa por gravidade; f) tipo jaqueta; g) trípoda de aço; h) torre articulada; i) torre estaiada (Taier <i>et al</i> , 2002).	7
Figura 3 – Configuração geométrica dos <i>risers</i> : a) vertical, b) catenária livre e c) catenária complexa tipo <i>Lazy-S</i> (Ávila, 2005).	8
Figura 4 - Configurações dos <i>risers</i> em catenária complexa: <i>Steep-S</i> , <i>Lazy-S</i> , <i>Steep-wave</i> e <i>Lazy-wave</i> (Franco, 2004).	9
Figura 5 – Camadas de um <i>riser</i> flexível (Ávila, 2005).	9
Figura 6 – Foto de um <i>riser</i> rígido.	10
Figura 7 – Configuração de <i>riser tower</i>	11
Figura 8 – Configuração de <i>Single Line Offset Riser</i> (SLOR).	11
Figura 9 - Reação de formação da estrutura básica da resina epóxi (Jordano, 2006). ...	15
Figura 10 - Grupo epoxídico (Dow, 1999).	15
Figura 11 – Resistência ao impacto e módulo de <i>Young</i> do sistema epóxi/nitrila curado a 150°C por 1 h e depois curado a 80°C por 1,5 h. (●) epóxi/MN, (■) epóxi/SN e (▲) epóxi/GN (Shim e Kim, 1997).	20
Figura 12 – Representação do processo de laminação manual (vetrotex).	27
Figura 13 – Esquema do processo de enrolamento filamentar (saint-gobain-vetrotex).	28
Figura 14 - Padrões de enrolamento: a) helicoidal, b) circunferencial e c) polar (Shen, 1995).	29
Figura 15 – Mandril com anel de pinos para fabricação das camadas unidirecionais (Rousseau <i>et al</i> , 1999).	31
Figura 16 – Curva tensão/deformação circunferencial para o tubo CFRP ($\pm 75^\circ$) testado a 200/s (A, falha do <i>strain guage</i> ; B, pressão de explosão) (Kaddour <i>et al</i> , 1996).	32
Figura 17 – Comparação da resistência à tensão circunferencial dos espécimes com os cinco tipos de fibras como uma função do ângulo de enrolamento (Cevdet Kaynak <i>et al</i> . 2005).	34
Figura 18 – Comparação do módulo de elasticidade circunferencial dos espécimes com os cinco tipos de fibras como uma função do ângulo de enrolamento (Cevdet Kaynak <i>et al</i> . 2005).	34

Figura 19 – Componentes do <i>riser</i> fabricado (Storhaug <i>et al.</i> , 2001).....	37
Figura 20 – Enrolamento filментар do <i>riser</i> rígado produzido (Storhaug <i>et al.</i> , 2001). 38	
Figura 21 – Instalação do <i>riser</i> fabricado na plataforma TLP Heidrun (Storhaug <i>et al.</i> , 2001).....	39
Figura 22 – Tubo híbrido após o teste de explosão a temperatura ambiente (Guesnon <i>et al.</i> , 2002).....	40
Figura 23 – Configuração do <i>riser</i> compósito (Meniconi <i>et al.</i> , 2001).....	42
Figura 24 – Construção da parede do tubo compósito (Johnson <i>et al.</i> , 2001).	43
Figura 25 – Exemplo de um <i>riser</i> metal-compósito: <i>liner</i> interno de metal (1), camada de enrolamento circunferencial (2), camadas de enrolamento helicoidal (3,4) e camada de proteção externa (5) (Tarnopol'skii <i>et al.</i> , 1999).....	44
Figura 26 - Enrolamento da fibra.	47
Figura 27 – Colocação da fita adesiva as fibras para corte.	48
Figura 28 - Camada de fibra de carbono.	48
Figura 29 - Camada de fibra de vidro “S”.....	48
Figura 30 – Laminados: a) fibra de carbono, b) fibra de vidro “S” e c) fibra de vidro “E”.....	49
Figura 31 – Máquina EMIC utilizada nos testes de tração.....	50
Figura 32 - Desenho esquemático ilustrando a geometria dos corpos de prova.....	50
Figura 33 – Amostras embutidas para análise microscópica.....	51
Figura 34 – Máquina de enrolamento filментар utilizada na produção dos tubos.....	52
Figura 35 – Pentes da banheira para colocação das fibras.	55
Figura 36 – Porta fibras de carbono construído.....	55
Figura 37 – Equipamentos utilizados para medidas de diâmetro: a) relógio comparador e b) micrômetro.	59
Figura 38 – Amostras do tubo protótipo embutidas para análise.	61
Figura 39 - Geometria dos corpos de prova usados no ensaio de tração.....	62
Figura 40 – Sistema de garras: a) peças e b) após a montagem.	63
Figura 41 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de anel.	64
Figura 42 – Microscopia ótica do corte transversal dos laminados: carbono/epóxi a) 100x e b) 200x, vidro “S”/epóxi c) 50x e d) 100x, e vidro “E”/epóxi e) 50x e f) 100x. 66	
Figura 43 - Microscopia ótica do corte longitudinal dos laminados: carbono/epóxi a) 100x e b) 200x, vidro “S”/epóxi c) 100x e d) 200x, e vidro “E”/epóxi e) 100x e f) 200x.	67

Figura 44 – Resistência à oxidação, medida com perda de peso em ar a 350°C, de fibras de carbono com diferentes módulos de elasticidade: (A) 240GPa e (B) 345 GPa (Chawla, 1987).	68
Figura 45 – Curvas tensão-deformação dos materiais testados.	69
Figura 46 – Camada de véu colocada sobre o mandril.	72
Figura 47 – Foto do tubo produzido após a cura.	73
Figura 48 – Tubo protótipo cortado: a) acabamento interno e b) marca do adesivo e do véu.	73
Figura 49 – Vazios observados: a) na região do adesivo e b) na região do véu.	74
Figura 50 – Tubo protótipo 2: a) após enrolamento e b) após a cura.	75
Figura 51 – Tubo produzido: a) marca da emenda do teflon, b) acabamento interno e c) acabamento externo.	75
Figura 52 – Superfície interna do tubo após modificações.	76
Figura 53 – Camada helicoidal a $\pm 45^\circ$ sem resina.	77
Figura 54 – Fotos do processamento: a) tubo compósito de fibra de vidro “E”, b) tubo compósito de fibra de vidro “S” e c) tubo compósito híbrido.	78
Figura 55 - Fotos dos tubos após a cura: a) tubo compósito de fibra de vidro “E”, b) tubo compósito de fibra de vidro “S” e c) tubo compósito híbrido.	79
Figura 56 – Imagens: a) amostra dos cabos de fibras utilizados e b) palheta dosadora de resina.	81
Figura 57 – Amostras cortadas transversalmente e observadas no microscópio ótico: a) fibra de vidro “E” (100x) e b) híbrido (50x).	83
Figura 58 – Amostras cortadas longitudinalmente observadas no microscópio ótico: a) fibra de vidro “E” (100x) e b) fibra de vidro “S” (100x).	83
Figura 59 – Curvas tensão-deformação características dos corpos de prova testados: a) Epóxi/ fibra de vidro “S”, b) Epóxi/ fibra de vidro “E” e c) híbrido.	85
Figura 60 – Trincas produzidas ao longo dos corpos de prova durante ensaios de tração.	86
Figura 61 – Análise das falhas em corpos de prova híbrido e de fibra de vidro “S” ensaiados sob tração.	88
Figura 62 – Corpos de prova ensaiados: a) epóxi/vidro “S”, b) epóxi/vidro “E” e c) híbrido.	89
Figura 63 - Curvas tensão-deslocamento dos materiais testados.	90

Figura 64 – Foto dos modos de falha característicos: a) anéis de fibra de vidro “E”, b) anéis de fibra de vidro “S” e anéis híbridos..... 92

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características de matrizes termorrígidas usadas em aplicações estruturais (Astrom, 2000).	14
Tabela 2 – Resultados dos testes de tensão e impacto de Charpy em todos os espécimes (Ozturk <i>et al.</i> 2001).	17
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do sistema epóxi modificado (Barcia <i>et al.</i> , 2003).19	
Tabela 4 – Temperatura de transição vítrea e propriedades mecânicas do sistema epóxi/PEK-C curado com DDM (Zhong <i>et al.</i> , 1998).	21
Tabela 5 – Sistemas poliméricos estudados (Camussi <i>et al.</i> , 2007).	21
Tabela 6 – Resultados das análises realizadas nos sistemas poliméricos escolhidos (Camussi <i>et al.</i> , 2007).	22
Tabela 7 – Propriedades de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fibras contínuas de vidro e carbono na direção longitudinal e transversal, com fração volumétrica de fibra de 0,6 (Callister, 2002).	23
Tabela 8 – Características das fibras de vidro (Fiorelli, 2002).	24
Tabela 9 – Sumário dos resultados experimentais das propriedades mecânicas de tubos $\pm 75^\circ$ KRP e CFRP sob várias taxas de deformação (Kaddour <i>et al.</i> , 1996).	31
Tabela 10 – Descrição dos parâmetros e materiais estudos (Cevdet Kaynak <i>et al.</i> 2005).	33
Tabela 11 – Descrição das falhas observadas nos espécimes testados no <i>split-disk</i> (Cevdet Kaynak <i>et al.</i> 2005).	35
Tabela 12 – Parâmetros básicos do <i>riser</i> (Johnson <i>et al.</i> , 2001).	36
Tabela 13 - Resultados dos testes feitos no <i>riser</i> rígido (Storhaug <i>et al.</i> , 2001).	38
Tabela 14 – Comparação entre o tubo de aço e o tubo híbrido (Guesnon <i>et al.</i> , 2002). 41	
Tabela 15 – Propriedades dos laminados vidro/epóxi e carbono/epóxi (Meniconi <i>et al.</i> , 2001).	42
Tabela 16 – Resumo das propriedades da fibra de vidro tipo “S” 721B ZenTron®	46
Tabela 17 – Características da fibra de vidro “E” tipo 30 (Fonte: Owens Corning®).	46
Tabela 18 – Resumo das propriedades da fibra de carbono STS 24k HTA-7C F301 (Fonte: Tejin).	47
Tabela 19 - Dimensões dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração dos materiais compósitos de acordo com a norma ASTM D3039M-95.	51

Tabela 20 – Parâmetros utilizados na máquina para produção do tubo híbrido.....	54
Tabela 21 – Variação dos parâmetros da estufa para alcance da temperatura máxima de cura de 140°C.....	57
Tabela 22 - Dimensões dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração dos materiais compósitos de acordo com a norma ASTM D3039M-95.....	62
Tabela 23 - Dimensões dos anéis adotados para o ensaio de tração de acordo com a norma ASTM D2290.....	64
Tabela 24 – Características dos laminados produzidos.....	67
Tabela 25 – Propriedades mecânicas obtidas para os laminados testados.....	70
Tabela 26 – Propriedades mecânicas de materiais compósitos similares encontrados na literatura.....	71
Tabela 27 – Variações de diâmetro e espessura dos tubos produzidos.....	79
Tabela 28 – Valores médios da densidade e fração volumétrica fibras dos tubos produzidos.....	80
Tabela 29 – Propriedades mecânicas de tração de amostras retiradas dos tubos.....	86
Tabela 30 – Propriedades mecânicas dos anéis testados.....	91
Tabela 31 – Resumo das propriedades mecânicas estudadas.....	94

1. Introdução

Os *risers*, tubulações que levam o petróleo desde a cabeça do poço submarino até a plataforma *offshore*, são estruturas sujeitas a ações dinâmicas de natureza aleatória (correntes marítimas, ondas e indiretamente ventos atuando sobre o casco da plataforma), onde qualquer falha no sistema pode deteriorar o ambiente marinho e provocar a interrupção na produção de óleo, acarretando altos custos na reativação da unidade e na recuperação do meio ambiente. As correntes marinhas além de gerarem carregamentos estáticos sobre o *riser* também podem induzir à carregamentos cíclicos através do desprendimento sincronizado de vórtices formados ao redor do tubo.

Assim sendo, os *risers* podem ser considerados como uma das partes críticas de um sistema de produção (ou perfuração) *offshore*, já que, estando continuamente sujeitos a condições severas ambientais e ações dinâmicas, podem ter o seu comportamento afetado pelo grande número de solicitações variáveis a que estão submetidos.

Embora o material de engenharia tradicional para produção de *risers* rígidos seja o aço, outros materiais como os compósitos estão sendo considerados devido a sua eficiência e segurança. Isso por que os sistemas de aço são pesados e requerem sistemas de tensionamento e fluabilidade caros, cujos projetos são governados pela fadiga (Salama, 1993), que é atualmente a grande preocupação na produção de *risers*.

A produção de *risers* compósitos fornece vantagens sobre os *risers* convencionais de aço por que os materiais compósitos são mais leves, possuem maior resistência à fadiga, maior resistência à corrosão, podem ser projetados para melhorar a resposta estrutural e mecânica, e são melhores isolantes térmicos. Além disso, eles reduzem os custos de produção das plataformas, pois seu baixo peso resulta na redução de tensão no topo do *riser*, dos sistemas de amarração (tendões) e ancoragem. Resultam também na redução da manutenção e inspeção, de custos em instalação e recuperação (Johnson *et al.*, 2001).

O *riser* compósito é aproximadamente 50% mais leve que o similar de aço, o que na prática faz com que o *riser* atinja uma profundidade 30% maior, apenas com a diminuição do peso sem modificar a estrutura das plataformas (ClickMacaé).

Tendo em vista todos os requisitos exigidos dos *risers*, os *risers* rígidos compósitos surgem como uma boa opção na utilização de materiais compósitos em sistemas *offshore*, pois esses materiais unem em um único produto as melhores propriedades dos materiais que o constituem (reforços e matriz).

Este trabalho tem como objetivo o estudo do processo de fabricação e a caracterização mecânica e microestrutural dos tubos compósitos produzidos pelo processo de enrolamento filamentar usando fibras de carbono e de vidro “S” e “E” com matriz epóxi, para possível aplicação como *riser* rígido para injeção de água.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Exploração *Offshore* no Brasil e no Mundo

O interesse econômico pelo petróleo teve início no começo do século XIX ao ser utilizado como fonte de energia para a iluminação pública, substituindo o gás proveniente da destilação do carvão vegetal. Esta função perdurou apenas até as décadas de 1870/80, quando Thomas Edison conseguiu sistematizar e desenvolver o conhecimento em energia elétrica, suplantando qualquer outra fonte de iluminação. Com isto, o interesse comercial pelo fósil reduziu drasticamente, voltando apenas no final do século XIX, principalmente no século XX, a partir da invenção dos motores a gasolina e a diesel. Desde então, o insumo passou a ter justificativas comerciais para ser explorado continuamente, ou até seu esgotamento (Debeir *apud* Ortiz Neto *et al*, 2005).

Bacias Sedimentares podem ocorrer tanto no continente como em ambientes marinhos. A exploração marinha de petróleo apresenta um diferencial em relação à exploração continental: a profundidade a ser vencida, antes de se chegar ao substrato a ser explorado. De acordo com a profundidade da bacia, a exploração ocorre em águas rasas (até 400 metros), águas profundas (400 a 1000 metros) ou águas ultra – profundas (acima de 1000metros) (Lopes, 2004).

A indústria *offshore* mundial teve seu nascimento entre os anos 1930 e 1950 na Venezuela e Golfo do México, respectivamente. A partir de então, a exploração começou a se expandir para o Mar do Norte e formou o primeiro *pull* de empresas neste segmento. No Brasil, já no final de 1950, devido às análises geológicas, havia o conhecimento de que o país deveria possuir reservas de petróleo marítimas. Isso se confirmou pela descoberta do primeiro poço *offshore* em 1968, no Campo de Guaricema (SE), e depois na bacia de Potiguar (ES) e o campo de Garoupa, na Bacia de Campos (RJ), em 1974, o que marcaria o início de uma segunda fase dentro da Petrobras, na qual a empresa se diferenciaria pela exploração do petróleo em águas profundas e ultra – profundas (Ortiz Neto *et al*, 2005).

Mesmo antes do primeiro choque do petróleo, o Brasil já desenvolvia exploração na sua costa, porém o choque do petróleo de 1973 deu o impulso necessário à exploração do petróleo existente em ambiente marinho. Isto porque, com o aumento brusco do preço do petróleo e a possibilidade de escassez do produto no mercado, os

países consumidores passaram a desenvolver programas de economia de combustíveis e de geração de energias alternativas, o que fez com que essas atividades fossem intensificadas. Ao mesmo tempo, buscou - se encontrar novas jazidas de petróleo em países não pertencentes à Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), e em regiões consideradas inviáveis economicamente devido à complexidade de seus ambientes, o que incentivou a exploração *offshore*. Os primeiros frutos surgiram em 1981, quando a produção marítima superou a terrestre e, em 1984, quando a produção brasileira se iguala à importada, com meio milhão de barris diários (Lopes, 2004).

Cabe ressaltar que as companhias americanas de petróleo que atuavam no Golfo do México já desenvolviam tecnologia para exploração *offshore* desde o final dos anos 50, e durante toda a década de 60. De forma que, quando os países do Mar do Norte e o Brasil decidiram se dedicar ao desenvolvimento da produção de petróleo em alto mar, as bases tecnológicas já estavam lançadas. Hoje em dia o Brasil possui mais de 20 bacias petrolíferas conhecidas, onde a produção ultrapassa 1,5 milhões de barris ao dia. Atualmente, a Petrobras detém o recorde mundial de perfuração exploratória no mar, com um poço em lâmina d'água de 2853 metros, no mar da Bacia de Campos e exporta tecnologia de exploração nesses ambientes para vários países (Lopes, 2004). Nesses mais de 30 anos de atividades *offshore* no Brasil, a produção no mar tornou-se vital, passando a responder por cerca de 80% do total produzido no país.

A exploração marinha, de maneira geral, pode ser sintetizada em quatro conjuntos tecnológicos distintos (Figura 1): às plataformas que são estruturas de suporte, os sistemas de perfuração, os cabos umbilicais, que enviam comandos para equipamentos submarinos, e os mecanismos de transmissão tais como os dutos de produção (*risers*). Os *risers* são tubos que efetuam o escoamento de óleo e gás do poço até a plataforma e são produzidos de forma a suportar o movimento das correntes e a pressão elevada das águas profundas (Rodrigues, 2004).

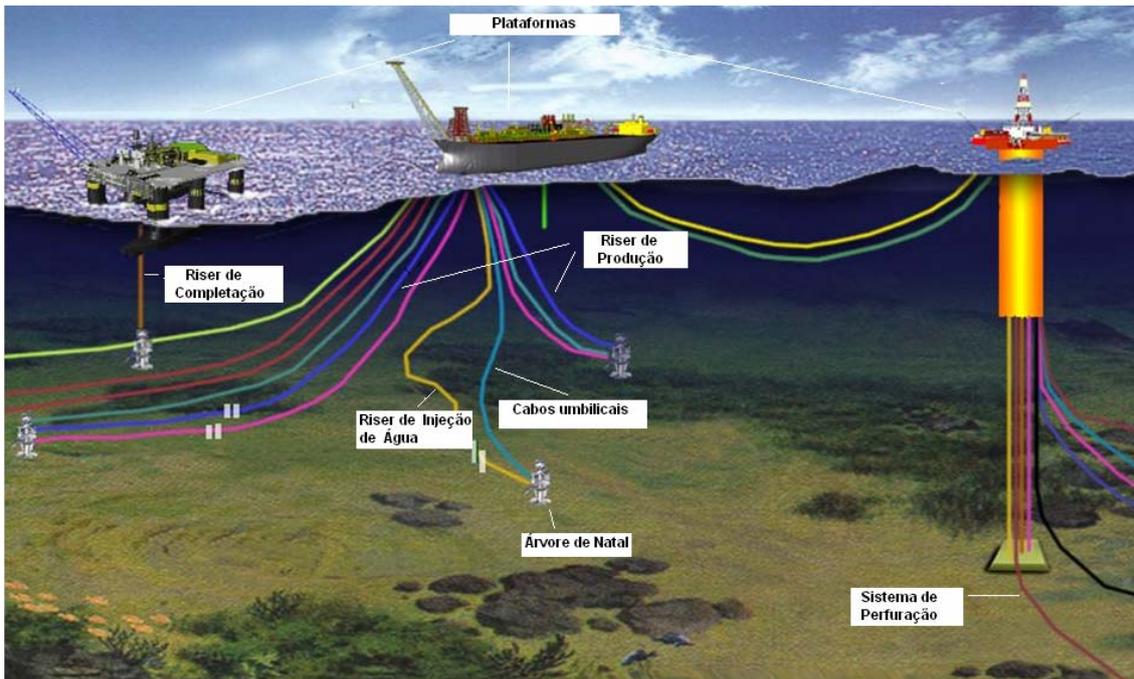


Figura 1 – Representação esquemática dos conjuntos tecnológicos para exploração marinha.

2.2. Plataformas

A necessidade crescente de exploração de petróleo e a descoberta de campos petrolíferos em águas cada vez mais profundas, fez surgir diferentes concepções de plataformas que podem ser construídas através de estruturas fixas e flutuantes (Figura 2) a depender da profundidade da lamina d'água.

Plataformas Fixas → Consistem em grandes estruturas metálicas que repousam sobre o subsolo marinho. Nesse sistema, a árvore de natal (conjunto de válvulas que controla a produção do poço) e as unidades de processamento da produção estão posicionadas sobre a plataforma. São instaladas em campos localizados em lâminas d'água de até 400 metros e possuem a vantagem de serem completamente estáveis até nas piores condições do mar (Furtado, 1996). Podem ser do tipo auto-eleváveis, jaqueta e torre-complacente.

Plataformas Flutuantes → Efetuam o processamento e estocagem da produção e são capazes de ter uma certa flexibilidade de movimento entre a superfície do mar e o subsolo. Dentre as plataformas flutuantes temos as semi-submersíveis, FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), *Spar-buoy* e de pernas tensionadas, esta última denominada em inglês de “*tension-leg platform*”(TLP).

As semi-submersíveis podem ser empregadas tanto em produção quanto em perfuração. As Plataformas de produção se apóiam em flutuadores submarinos, cuja profundidade pode ser alterada através do bombeamento de água para o tanque de lastro. Esta plataforma fica estacionária numa localização em torno de vinte anos (Ávila, 2005).

As plataformas Semi-submersíveis de perfuração são geralmente denominadas de MODU (*Moblie Offshore Drilling Unit*) (Furtado, 1996), possuem controle de profundidade análogo ao de produção. Entretanto a plataforma de perfuração fica estacionária numa localização por um período determinado (Ávila, 2005). O apoio dessas plataformas é feito por flutuadores submersos que sofrem movimentação devido à ação das ondas, ventos e correntezas e possuem um sistema de ancoragem ou de posicionamento dinâmico, que não possuem ligação física com o fundo do mar, exceto pelos equipamentos de perfuração (Furtado, 1996).

Os navios plataforma FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) são unidades estacionárias de produção que consistem na utilização de um navio petroleiro ancorado. Este suporta no seu convés uma planta de processo, armazena o óleo produzido e ainda permite o escoamento da produção para outro navio, chamado aliviador, que é periodicamente amarrado a FPSO para receber e transportar o óleo até os terminais petrolíferos (Ávila, 2005). Já o sistema *Spar-buoy* consiste de um único cilindro vertical de aço ancorado operando com um calado de profundidade constante de cerca de 200 metros, o que gera pequenos movimentos verticais possibilitando a utilização de *risers* rígidos de produção (Franco, 2004).

Na TLP o sistema de ancoragem no fundo do mar é feito por meio de estruturas tubulares, com tendões fixos no fundo do mar por estacas e mantidos esticados pelo excesso de flutuação da plataforma. Esse sistema proporciona uma maior estabilidade da plataforma porque diminui drasticamente os seus movimentos, com isso as operações de perfuração e produção se assemelham às executadas em plataformas fixas. (Furtado, 1996).

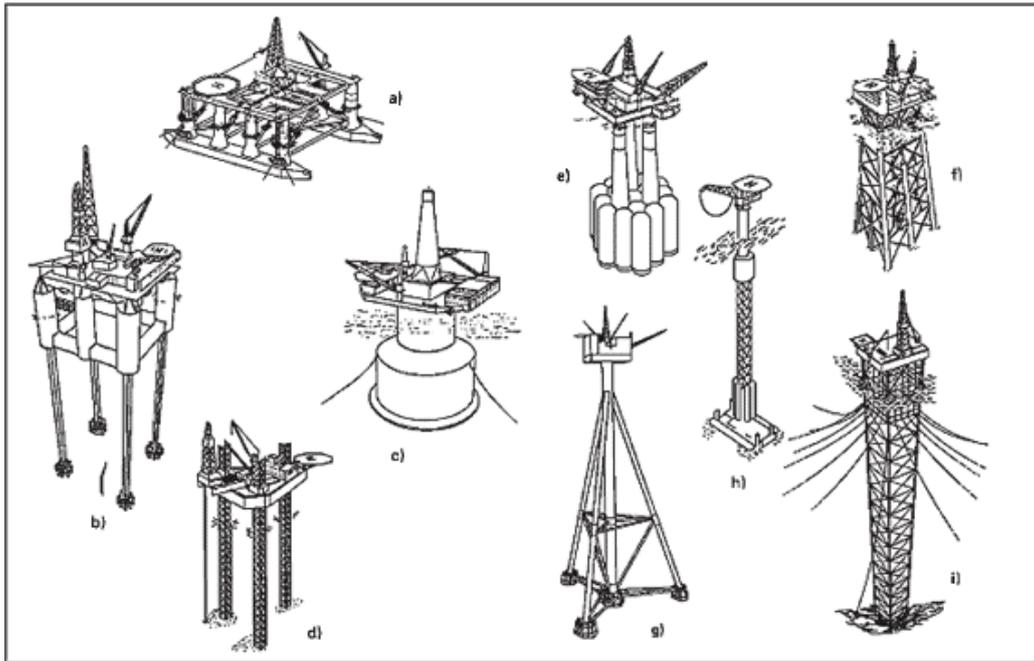


Figura 2 - Tipos de plataformas *offshore*. a) semi-submersível; b) de perna atirantada; c) tipo bóia; d) auto-elevatória; e) fixa por gravidade; f) tipo jaqueta; g) tripoda de aço; h) torre articulada; i) torre estaiada (Taier *et al*, 2002).

2.3. Risers

Os “*risers*” são dutos de produção suspensos utilizados na perfuração e extração de óleo ou gás, que possuem a finalidade de transportar o fluido produzido (óleo, gás, lama e água), desde a cabeça do poço até a Unidade Estacionária de Produção (UEP). Eles são componentes críticos de um sistema submarino de produção, por estarem submetidos à pressão hidrostática, a cargas de lançamento, a cargas cíclicas de operação e ao próprio peso (Sindipetro).

Os fatores que mais influenciam o comportamento de *risers* são: a sua configuração geométrica em repouso, condições ambientais e fatores operacionais, além da sua estrutura própria, conexões mecânicas e juntas (Pinho, 2001). Eles podem ser classificados segundo a sua configuração geométrica, a sua finalidade e o material empregado na sua fabricação.

► **Quanto a sua configuração geométrica** - Eles podem ser verticais, em catenária livre ou catenária complexa (Figura 3), sendo que os de catenária complexa podem ser

do tipo *Lazy-S*, *Lazy-wave*, *Steep-S* e *Steep-wave*, eles são semelhantes aos de catenária livre, diferenciando-se pela utilização de flutuadores ou bóias mantidos submersos (Ávila, 2005).

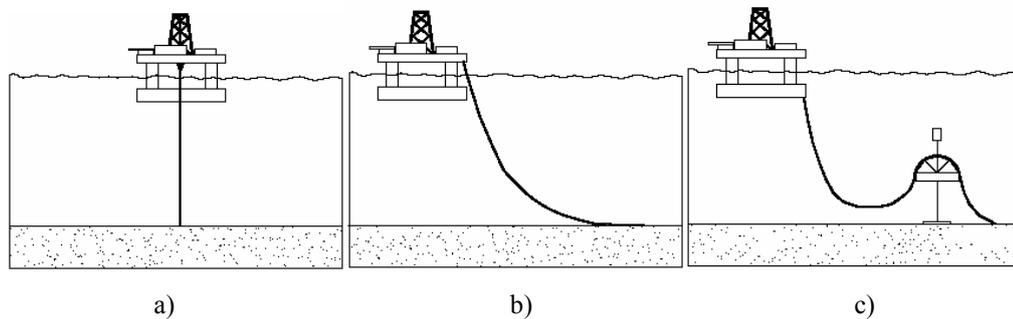


Figura 3 – Configuração geométrica dos *risers*: a) vertical, b) catenária livre e c) catenária complexa tipo *Lazy-S* (Ávila, 2005).

► **Quanto ao material empregado na sua fabricação** – Eles podem ser flexíveis ou rígidos.

Risers Flexíveis → São mangotes especiais empregados em atividades de produção em plataformas baseadas em sistemas flutuantes. São compostos por camadas entrelaçadas de materiais diferentes. Através dos *risers* flexíveis é possível efetuar a conexão da plataforma com as árvores de natal mais afastadas do ponto de locação da plataforma. Denomina-se árvore de natal o conjunto de válvulas localizadas sobre o solo marítimo, sobre a cabeça do poço, que servem para controlar a produção (Rodrigues, 2004). Os *risers* flexíveis podem ser empregados em configurações em forma de catenária livre, ou em uma das configurações de catenária complexa: *Lazy-S*, *Lazy-wave*, *Steep-S* e *Steep-wave* (Figura 4). Estas configurações possuem seções intermediárias com flutuadores, cujo empuxo alivia o peso suportado pelo sistema flutuante e quando sob solicitações laterais contribuem com momentos restauradores (Franco, 2004).

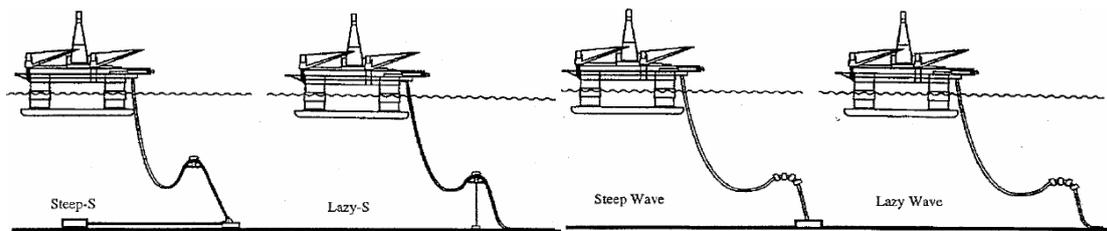


Figura 4 - Configurações dos *risers* em catenária complexa: *Steep-S*, *Lazy-S*, *Steep-wave* e *Lazy-wave* (Franco, 2004).

Nos *risers* flexíveis (Figura 5) a camada interna do tubo por onde escoo o fluido (óleo, gás ou água do mar), é de aço inoxidável formada por fitas intertravadas. Esta camada, também chamada de carcaça intertravada, não resiste aos esforços de tração e flexão, nem possui estanqueidade. Para isto é utilizada uma camada de PVDF (fluoreto de polivinilideno), também conhecida como barreira de pressão. Em seguida duas camadas de tendões de aço, dispostos de forma helicoidal e com sentido de enrolamento invertido para minimizar o efeito da torção residual, conferem resistência à tração para o tubo de produção. A capa externa do tubo de produção é de polietileno de alta densidade. O conjunto como um todo apresenta boa flexibilidade (Rodrigues, 2004). O *riser* flexível pode possuir algumas camadas a mais que vão desempenhar diferentes funções a depender do tipo de solicitação e da aplicação a que será destinado.

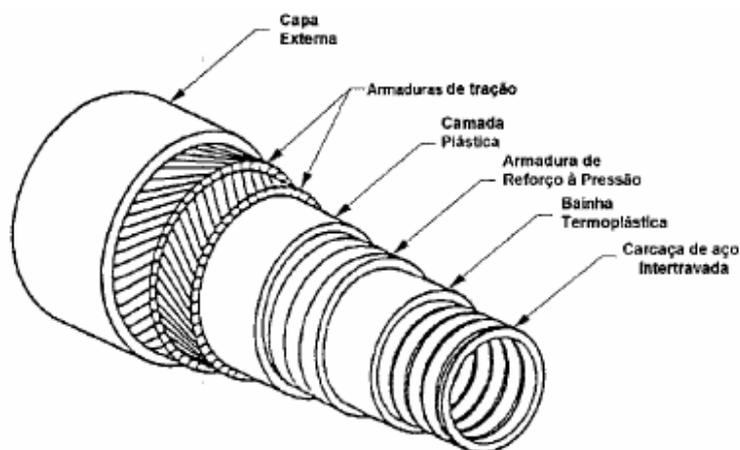


Figura 5 – Camadas de um *riser* flexível (Ávila, 2005).

A principal vantagem do *riser* flexível é a característica de ser acentuadamente “complacente”, pois podem acompanhar sem problemas todos os movimentos do sistema flutuante (Rodrigues, 2004).

Risers Rígidos → São tubos de aço, titânio ou compósito formados por uma série de juntas acopladas umas às outras (Figura 6). Nesses *risers* ou contrário dos flexíveis todo o conjunto deve suportar os vários carregamentos a que estão submetidos.



Figura 6 – Foto de um *riser* rígido.

Eles podem estar dispostos na configuração vertical para serem utilizados em atividades de perfuração ou de produção em plataformas que apresentem pouco deslocamento (TLP ou *Spar-buoys*) (Franco, 2004), ou em catenária livre (como os *Steel Catenary's Riser*, SCRs, desenvolvidos com o objetivo de substituir os *risers* flexíveis de grande diâmetro e que podem ser utilizados em plataformas TLP, semi-submersíveis, FSPO e *Spar-buoys*) ou em qualquer uma das configurações de catenária complexa. Além dessas, os *risers* rígidos podem se apresentar na configuração de *riser tower* (Figura 7) que é um conjunto de *risers* de produção e injeção que possui uma junta rotulada no fundo e uma bóia de sub-superfície, que mantém a tração positiva do conjunto, ligado à unidade de produção por uma junção com dutos flexíveis, eles são utilizados em FPSOs ou semi-submersíveis (Ávila, 2005).

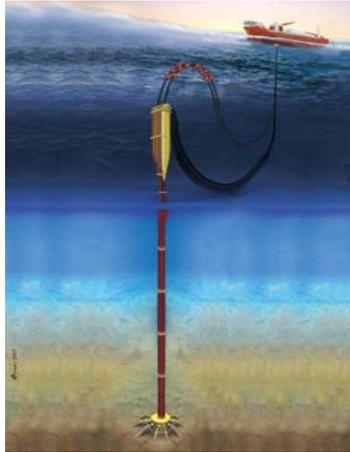


Figura 7 – Configuração de *riser tower*.

Na configuração de *Top Tension Riser* (TTR) em que são utilizados tanto para produção como perfuração ou completação (seca) em plataformas TLPs e *Spar-buoys* e na configuração de *Single Line Offset Riser* (SLOR) que é uma concepção simplificada dos *Risers Tower* e são compostos de um único *riser* rígido, uma bóia e um *jumper* flexível (Figura 8).

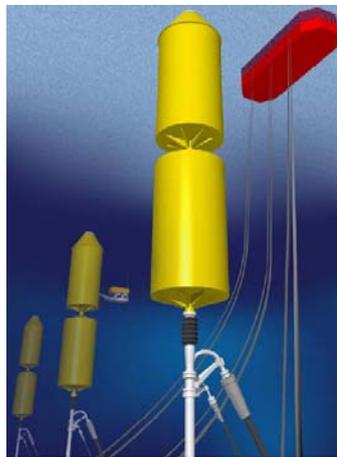


Figura 8 – Configuração de *Single Line Offset Riser* (SLOR).

► **Quanto à sua finalidade** – Eles podem ser classificados como de perfuração, de completação, de produção, de injeção ou de exportação.

Riser de Perfuração → Possui a função de proteger e guiar a coluna de perfuração, bem como permitir o retorno da lama do poço para a plataforma, auxiliando

assim nas operações de perfuração. A operação de perfuração de um poço é executada em vários estágios, com brocas de diferentes dimensões e revestimentos de diferentes diâmetros. O *riser* de perfuração apresenta geometria vertical e é fabricado geralmente em aço (Ávila, 2005).

Riser de Completação → Utilizado nas operações de completação, que tem como finalidade iniciar ou garantir a produção de um poço, equipando-o para produzir óleo ou gás. O *riser* de completação apresenta geometria vertical e pode ser flexível ou Rígido (Ávila, 2005).

Riser de Produção → É essencialmente um tubo conectado entre a plataforma *offshore* fixa ou flutuante e a cabeça do poço no leito marinho. Possui função de conduzir o petróleo bruto do poço à superfície, para ser separado em óleo, água e gás. Pode ser rígido, instalado verticalmente, ou em catenária, como também pode ser flexível instalado em catenária (Ávila, 2005).

Riser de Injeção → Possui a função de injetar água no interior do reservatório, visando melhorar o desempenho do mesmo, ou gás para diminuir a densidade do óleo e facilitar a subida à plataforma.

Riser de Exportação → Possui função de enviar da plataforma o óleo e o gás produzidos para outra unidade (marítima ou terrestre) (Ávila, 2005).

2.4. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz, onde o produto final apresenta uma combinação de propriedades dos seus constituintes. O reforço geralmente é feito por fibras, que apresentam alta resistência à tração e a matriz une as fibras de forma a permitir que as tensões sejam transferidas para a fibra, resultando num material reforçado (Callister, 2002).

O compósito é projetado de modo que as cargas a que a estrutura é submetida em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço e da interface. Desta forma muitas variáveis precisam ser consideradas ao se projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente

controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias nas quais será usado (Gibson, 1994).

Os compósitos de matriz metálica, polimérica e cerâmica ocupam posições de destaque no campo dos materiais avançados, graças às suas elevadas resistência e rigidez específicas. Os compósitos avançados reduzem problemas de fadiga, possuem maior flexibilidade, resistência à corrosão e ao desgaste, o que conduz a custos mais baixos de ciclo de vida do produto.

Os materiais compósitos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Os materiais compósitos vêm sendo testados e tem apresentado desempenho superior ao de estruturas metálicas convencionais.

Os materiais poliméricos são os mais usados em uma ampla diversidade de aplicações dos compósitos, devido as suas propriedades à temperatura ambiente, da sua facilidade de fabricação e de seu custo (Callister, 2002).

2.5. Matriz Polimérica

Os compósitos poliméricos, também denominados plásticos reforçados, são materiais formados por uma matriz polimérica e um reforço. Entre as vantagens do compósito polimérico estão: baixo peso, resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas quando comparados com alguns materiais convencionais de engenharia.

A função da matriz polimérica assim como das demais matrizes é transferir o carregamento aplicado no material para as fibras, mantê-las ancoradas e agrupadas, e protege-las contra danos superficiais (abrasão mecânica ou reações com o ambiente), o que contribui no controle das propriedades do compósito (Gibson, 1994).

As matrizes poliméricas podem ser termorrígidas ou termoplásticas. As termoplásticas amolecem com o aquecimento e eventualmente fundem, e endurecem quando resfriadas e as termorrígidas são formadas por uma reação química interna entre a resina e o endurecedor ou a resina e o catalisador, sofrendo uma reação não reversível formando um produto duro e infusível, que se degrada com o aquecimento (Pilato e Michino, 1994). As resinas poliméricas termorrígidas mais amplamente utilizadas para aplicações

estruturais na indústria e mais baratas são os poliésteres e os vinis ésteres. As resinas poliméricas termorrígidas mais amplamente utilizadas para aplicações estruturais na indústria são as resinas poliéster, vinil éster e epóxi. As poliéster e vinil éster são mais baratas. Já as resinas epóxi são mais caras e, além de aplicações comerciais, também são muito utilizadas em compósitos de matriz polimérica para aplicações aeroespaciais por que possuem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à umidade do que as anteriores (Callister, 2002). Na Tabela 1 pode ser observada as características de cada uma dessas matrizes, sendo que cada uma delas apresenta características particulares quanto ao processamento e desempenho (Astrom, 2000).

Tabela 1 - Características de matrizes termorrígidas usadas em aplicações estruturais (Astrom, 2000).

Sistema	Poliéster	Vinil Éster	Epóxi
Tipo de Resina	Ortoftálica, isoftálica, halogenada	Epóxi novolac, resinas epóxi éster metacrilato de bisfenol	Epicloridrina/bisfenol-A
Tipo de Iniciador	Peróxido orgânico	Peróxido orgânico	Aminas e ácidos anidrido
Volume de Contração	7-9%	7-9%	1-4%
Adesão Interfacial	Baixa	Média	Alta
Propriedades Mecânicas	Baixa	Média	Alta
Resistência à Fadiga	Média	Média	Alta
Resistência Química	Média	Alta	Média

2.5.1. Resina Epóxi

As resinas epóxi são caracterizadas pela presença de três grupos de anéis, os epóxidos, os oxiranos e os etoxilanos. As resinas comerciais contêm em sua cadeia: alifáticos, cicloalifáticos ou aromáticos. A mais largamente usada são a epicloridrina e o bisfenol-A (Ozturk *et al.* 2001).

Essas resinas são produtos obtidos por reações de condensação (na presença de hidróxido de sódio) entre a Epicloridrina (1-cloro-2,3-epóxi-propano) e o Bisfenol A [2,2-bis(4'-hidroxifenil) propano] (Figura 9) (Jordano, 2006).

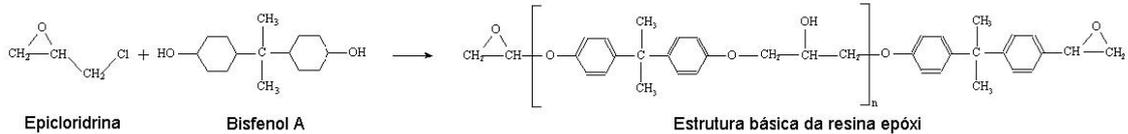


Figura 9 - Reação de formação da estrutura básica da resina epóxi (Jordano, 2006).

O resultado desta reação é um polímero termorrígido de cadeia longa constituída de grupos epoxídicos (Figura 10) em suas extremidades, constituídos de um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono (Jordano, 2006). Os grupos epóxi apresentam boa resistência à água; os dois grupos de anéis em seu centro são responsáveis pelas propriedades mecânicas e os grupos lineares garantem boa tenacidade e resistência ao calor.

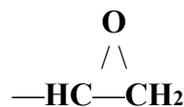


Figura 10 - Grupo epoxido (Dow, 1999).

A cura dessas resinas pode ser feita nas temperaturas entre 5°C e 150°C, dependendo do agente de cura. Elas resistem a temperaturas da ordem de 220°C em ambiente seco e à 140°C em ambiente úmido. Após a cura, os sistemas epóxi apresentam pequena contração, em média na ordem de 2%. Dentre as vantagens para utilização da resina epóxi tem-se a alta resistência mecânica, baixo custo quando comparada com o vinil éster, boa resistência à água, boa resistência em ambientes corrosivos e alta condutividade térmica (Zwebn *et al*, 1989).

Algumas propriedades devem ser observadas em uma resina que será utilizada na fabricação de materiais compósitos, como: boa resistência mecânica comparada com outros polímeros, alta adesividade entre fibra e matriz, elevada tenacidade e alta resistência à degradação ambiental (Zwebn *et al*, 1989).

Uma boa aderência da resina com as fibras garante uma eficiência na transferência do carregamento da matriz para as fibras. A elevada tenacidade favorece uma maior resistência à propagação de trincas, e resistência à degradação, dá garantia de maior vida útil e segurança na escolha e aplicação da resina (Sperling, 1986).

O comportamento mecânico das resinas epóxi é influenciado pela razão resina/catalisador (agente de cura) (Selby, 1975). Com o uso de diferentes agentes de cura e condições de cura, é possível variar a estrutura interna, e em particular a densidade e natureza das ligações cruzadas sobre a deformação plástica.

As resinas epóxi tendem a ser frágeis e, quando submetidas a impacto, tendem a fraturar com facilidade. Elas são frágeis devido à formação de uma rede tri-dimensional de ligações cruzadas durante a cura. Esta estrutura química afeta a tenacidade e a estabilidade térmica do sistema. A utilização de modificadores fornece maior tenacidade à resina sem comprometer muito a resistência à tração, pois a resistência à compressão e a tensão dessas resinas é aumentada quando a distância entre as ligações cruzadas é pequena. Os modificadores atuam como extenedores de cadeia, formando cadeias moleculares longas e baixa densidade de ligações cruzadas, aumentando a resistência ao impacto (Shim e kim, 1997).

Essas resinas são usualmente modificadas de três maneiras: pela adição de partículas duras, pela adição de materiais elastoméricos ou pela adição de termoplásticos, sendo que o mais comum é pela adição de elastômeros (Lowe *et al*, 1996).

Esta tecnologia de adição de modificadores elastoméricos em resina epóxi utiliza líquidos de baixo peso molecular como o copolímero butadieno acrilonitrila com grupos finais reativos carboxil (CTBN) ou amina (ATNB), além de elastômeros de acrilato, poli(oxipropileno amina) e copolímeros de polisiloxano. Os sistemas epóxi modificados com borracha apresentam melhores valores de tenacidade à fratura, sendo que esses valores variam com uma série de fatores tais como: taxa de carregamento, temperatura, densidade de ligações cruzadas, fração volumétrica de borracha, e tipo e estrutura do agente de cura (Hedrick *et al*, 1991).

Ozturk *et al*. (2001) investigou as propriedades mecânicas e térmicas de uma resina epóxi quando modificada com borracha líquida com o propósito de tenacificação. Utilizaram como modificador o polibutadieno (HTPB) nas porcentagens de 1% e 1,5% (em peso da resina epóxi), e 2% de agente silanizante com a finalidade de fornecer compatibilidade entre a matriz epóxi e a borracha. Para observação dos efeitos nas propriedades mecânicas foram preparados quatro espécimes diferentes variando as condições de misturas: Grupo A – todos os constituintes (borracha, endurecedor e resina epóxi) foram misturados juntos à temperatura ambiente; Grupo B – foram misturados inicialmente borracha e endurecedor e deixados por 1 hora à temperatura ambiente e só

então adicionaram a resina epóxi; Grupo C – idem ao grupo B, sendo que 2% de agente silanizante foram adicionados ao sistema epóxi; Grupo D – foram misturados 2% de silanizante com a borracha e a mistura deixada à temperatura ambiente por 20 min. Depois o endurecedor foi adicionado à mistura e deixado à temperatura ambiente por mais 1 hora quando então a resina epóxi foi adicionada. Os espécimes produzidos foram submetidos a testes de tensão e impacto, e suas superfícies de fratura estudadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Eles concluíram que o comportamento mecânico da resina epóxi, que pode ser observado na Tabela 2, foi modificado com a adição da borracha e que o uso de diferentes ordens dos constituintes e adição do agente silanizante melhorou a interação entre a borracha e a resina. Os resultados dos testes mecânicos demonstram a eficiência do processo de mistura e do silanizante. Concluíram ainda que a pré-mistura e a pré-reação da borracha com o agente silanizante e o endurecedor antes da adição da resina epóxi mudou a trajetória da reação principal para a extensão das cadeias, que também tiveram um decréscimo na densidade de ligações cruzadas em um determinado alcance, e que todos os espécimes dos grupos B, C e D com 1% de HTPB apresentaram melhores valores de resistência à tensão. Similarmente, os resultados dos testes de impacto de Charpy mostraram que 44% dos espécimes A2 e A3, e dos grupos C e D tiveram sua resistência ao impacto aumentada.

Tabela 2 – Resultados dos testes de tensão e impacto de Charpy em todos os espécimes (Ozturk *et al.* 2001).

Designação dos Espécimes	Resistência á tensão (MPa)	Modulo de tensão (GPa)	Deformação (%)	Resistência ao impacto (KJ/m ²)
A1 (NE) ^a	69 ± 5	1,5 ± 0,1	4,3 ± 0,05	3,7 ± 0,5
A2 (1% RHE) ^b	51 ± 4	1,8 ± 0,1	3,0 ± 0,1	4,3 ± 0,1
A3 (1,5% RHE) ^c	26 ± 2	1,8 ± 0,1	1,4 ± 0,05	4,0 ± 0,3
B2 (1% RH60'E) ^d	70 ± 6	2,2 ± 0,1	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,2
B3 (1,5% RH60'E) ^e	71 ± 3	2,0 ± 0,1	3,6 ± 0,1	3,6 ± 0,1
C1 (2% SHE) ^f	39 ± 3	2,3 ± 0,05	1,7 ± 0,05	5,1 ± 0,1
C2 (2% S 1% RH60'E) ^g	76 ± 3	2,0 ± 0,05	5,5 ± 0,05	5,3 ± 0,4
C3 (2% S 1,5% RH60'E) ^h	34 ± 6	2,0 ± 0,05	1,7 ± 0,05	4,6 ± 0,3
D1 (2% S 1% R20'H60'E) ⁱ	76 ± 2	1,6 ± 0,05	6,0 ± 0,05	4,8 ± 0,1
D2 (2% S1,5%R20'H60'E) ^j	62 ± 5	1,9 ± 0,05	3,4 ± 0,05	5,1 ± 0,1

S = silanizante (SCA), R = HTPB, H = endurecedor e E = resina epóxi.

a = mistura da resina epóxi com endurecedor.

b = 1% HTPB misturado com endurecedor e resina epóxi.

c = 1,5% HTPB misturado com endurecedor e resina epóxi.

d = 1% HTPB pré-misturado com endurecedor por 60min e depois misturada a resina epóxi.

e = 1,5% HTPB pré-misturado com endurecedor por 60min e depois misturada a resina epóxi.

f = 2% SCA, misturado com endurecedor e epóxi.

g = 2% de SCA, 1% HTPB e endurecedor são pré-misturados por 60 min e depois resina epóxi.
h = 2% de SCA, 1,5% HTPB e endurecedor são pré-misturados por 60 min e depois resina epóxi.
i = 2% de SCA pré misturado com 1% HTPB por 20 min e depois pré-misturado endurecedor por 60 min e depois resina epóxi.
j = 2% de SCA pré misturado com 1,5% HTPB por 20 min e depois pré-misturado endurecedor por 60 min e depois resina epóxi.

Barcia *et al.* (2003) prepararam dois copolímeros em bloco, polibutadieno (HTPB) terminado em isocianato (NCOTPB) e polibutadieno terminado em carboxil (CTPB), e estudaram a influência desses dois copolímeros nas propriedades mecânicas e morfológicas de um sistema epóxi. Os corpos de prova preparados com diferentes formulações de 5 e 10% de HTPB, NCOTPB e CTPB foram submetidos a teste de Transformada de Fourier por Infravermelho (FT-IR), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e ponto de gel (de acordo com ASTM 2471), para caracterização morfológica, e a teste mecânicos, onde as superfícies dos corpos de prova ensaiados foram observadas por Microscopia de Eletrônica de Varredura (MEV). Concluíram que a resina epóxi modificada com os dois copolímeros preparados pela pré-reação funcionalizada do polibutadieno apresentou um tempo rápido de gelatinação quando comparado com a resina epóxi pura ou modificada com HTPB, e que o sistema contaminado com NCOPBER exibiu um tempo de gelatinação mais rápido devido à presença de grupos uretano que participaram do processo de cura. O sistema CPBER apresentou-se homogêneo disperso dentro da matriz epóxi, o que acarretou em um melhor desempenho no impacto associado à melhora nas propriedades de flexão. As resinas modificadas apresentaram influências sob o comportamento mecânico (Tabela 3) e morfológico, produzindo um sistema epóxi com melhores propriedades mecânicas e de resistência ao impacto, que a resina pura, sendo que o modo de preparo desses copolímeros influencia esses dois comportamentos.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do sistema epóxi modificado (Barcia *et al.*, 2003).

ER (%)	HTPB (%)	NCOPBER (%)	CPBER (%)	Resistência ao impacto (J/m ²)	Flexão (MPa)	Módulo de flexão (MPa)	Resistência à tensão (MPa)
100	0	0	0	9,7 ± 0,4	83,8 ± 0,3	2536	54,3 ± 5,4
95	5	0	0	11,4 ± 0,4	72,0 ± 0,1	2385	50,2 ± 4,2
90	10	0	0	14,2 ± 0,4	62,2 ± 0,1	1912	50,4 ± 2,3
95	0	5	0	13,6 ± 0,3	67,0 ± 0,2	1753	70,0 ± 7,0
90	0	10	0	15,3 ± 0,4	70,0 ± 0,1	1776	52,6 ± 1,5
95	0	0	5	11,5 ± 0,3	92,0 ± 0,2	2350	90,4 ± 1,7
90	0	0	10	16,1 ± 0,4	82,0 ± 0,1	2300	84,1 ± 0,7

Entretanto a temperatura de transição vítrea (T_g) de cura das resinas são significativamente diminuídos devido a baixa T_g das borrachas. Uma forma de resolver esse problema é através da adição de termoplásticos de alta permance, por que a sua alta T_g, quando utilizado na modificação da resina, melhora a tenacidade, mas não diminui significativamente as propriedades térmicas e mecânicas (Jin e Park, 2007).

Shim e Kim (1997) investigaram a reação de cura e as propriedades mecânicas de um sistema epóxi (DGEBA/MDA)/nitrila. Foram adicionados ao sistema três compostos de nitrila (Malonitrila (MN), Sucionitrila (SN) e Glutaronitrila (GN)) nas proporções de 5, 10, 15 e 20%, com a finalidade de fornecer tenacidade ao sistema epóxi. Os estudos da cinética de cura foram feitos por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e através das medidas de temperatura de transição vítrea. Já para os testes mecânicos foram feitos testes de impacto e de tração. Concluíram que os compostos de nitrila servem como extenedores de cadeia através da formação de um grupo amina durante a cura. A resistência ao impacto foi aumentada com o aumento da concentração de nitrila ao sistema, como um resultado da extensão das cadeias devido às reações sucessivas dos grupos nitrila (amina primária e hidroxil), como pode ser visto na Figura 11 através do gráfico de tenacidade *versus* rigidez, onde se observa que a ordem dos efeitos para tenacidade foi SN>GN>MN. A temperatura de transição vítrea (T_g) foi aumentada com o aumento da temperatura de cura, porém está T_g foi menor quando comparada com o sistema epóxi puro.

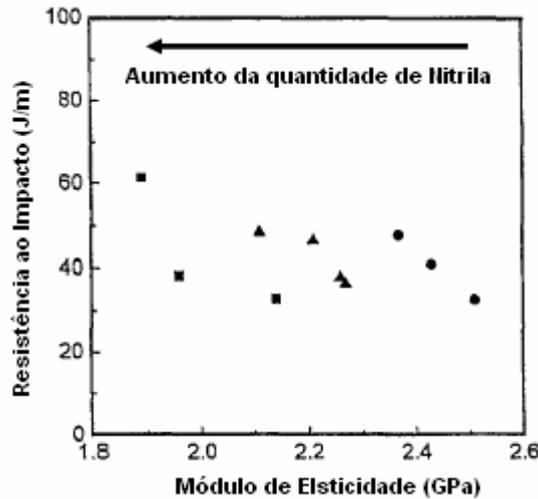


Figura 11 – Resistência ao impacto e módulo de *Young* do sistema epóxi/nitrila curado a 150°C por 1 h e depois curado a 80°C por 1,5 h. (●) epóxi/MN, (■) epóxi/SN e (▲) epóxi/GN (Shim e Kim, 1997).

Zhong *et al* (1998), estudaram as propriedades mecânicas e a formação de fases de um sistema epóxi/PEK-C (fenolftalina poli(éter-éter-cetona)) curado com o agente de cura 4,4-diaminoglicil-metano (DDM). Os estudos foram feitos utilizando Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), Análise Mecânico Dinâmica (DMA) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Observaram que a Tg da resina epóxi curada com DDM foi de 165°C, com a adição de PEK-C a Tg foi primeiro aumentada para 168°C (proporção 96/4) chegando até 170°C (proporção de 94/6) e caiu para 162°C com o acréscimo da proporção de PEK-C (88/12) (Tabela 4). O aumento gradativo na Tg foi devido à alta Tg da PEK-C (228°C). Já o decréscimo da Tg foi atribuído à redução da densidade de ligações cruzadas na rede epóxi. A transparência e a existência de uma Tg simples em todos os sistemas epóxi/PEK-C ocasionaram um comportamento de fase homogêneo, que foi determinado por fatores cinéticos e termodinâmicos.

Tabela 4 – Temperatura de transição vítrea e propriedades mecânicas do sistema epóxi/PEK-C curado com DDM (Zhong *et al*, 1998).

PEK-C (% em peso)	Tg (°C)	Flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação máxima (%)	K _{IC} (MN m ^{-1/2})	G _{IC} (KJ m ⁻²)
0	165	2,29±0,10	119±8	6,0±0,7	1,24±0,03	0,56±0,02
4	168	2,12±0,08	103±9	5,9±0,5	1,14±0,05	0,52±0,03
6	170	2,12±0,05	99±8	5,6±0,9	1,12±0,06	0,50±0,04
8	168	2,13±0,03	100±3	5,4±0,2	1,15±0,04	0,52±0,03
12	162	2,22±0,14	96±5	5,0±0,3	1,14±0,04	0,49±0,02

O decréscimo da densidade de ligações cruzadas da resina epóxi e conseqüente decréscimo na Tg com 8 e 12% de PEK-C, ocorreu devido a alta viscosidade do modificador, o que ocasionou em reação de cura incompleta. Nos testes mecânicos, a tenacidade à fratura foi medida pelo teste de dobramento em três pontos, além da determinação do fator crítico de intensidade de tensão (K_{IC}) e da energia crítica de deformação (G_{IC}), onde foi observado que a adição do modificador reduziu ligeiramente a tenacidade à fratura e as propriedades de flexão da resina epóxi (Tabela 4). Já na investigação morfológica os mecanismos de fratura medidos nos corpos de prova indicam uma fratura de natureza frágil para todos os sistemas estudados (Zhong *et al*, 1998).

Camussi *et al* (2007) selecionou e caracterizou cinco sistemas poliméricos comerciais (Tabela 5) à base de Diglicidil Éter Bisfenol A (DGEBA) para possíveis aplicações na fabricação de *risers* compósitos por enrolamento filamentar. Os primeiros critérios para seleção de apenas dois sistemas poliméricos foram menor pico exotérmico para temperatura de cura de 80°C e maior temperatura de transição vítrea (Tg).

Tabela 5 – Sistemas poliméricos estudados (Camussi *et al*, 2007).

Sistemas	Resina	Endurecedor	Acelerador
1	Araldite LY 1556	Aradur 917	DY 070
2	Araldite LY 1564	Aradur 2954	-
3	Dow 383	Epoxitec XG 160	-
4	Tenax RR 128	Tenax BB 270	Tenax DB 1006
5	Dow 383	Tenax BB 270	Tenax DB 1006

Escolhidos os sistemas 1 e 4 seria utilizado o que apresentasse maior resistência mecânica (maior tensão de ruptura e maior alongamento até a ruptura), maior Tg e tempo de gel mínimo de 60min. Para isso foram feitos testes de calorimetria, reometria, termogravimetria, infravermelho, ensaios mecânicos de tração e análises fractográficas, cujos resultados de alguns desses testes podem ser vistos na Tabela 6. Com base nos resultados obtidos nos testes o sistema adequado para a técnica de enrolamento filamentar e para utilização na fabricação de *risers* foi o sistema polimérico 1 que apresentou melhores propriedades (principalmente mecânicas), segundo os requisitos, que o sistema 4 (Camussi *et al*, 2007).

Tabela 6 – Resultados das análises realizadas nos sistemas poliméricos escolhidos (Camussi *et al*, 2007).

Sistemas	Tg (°C)	Reometria (min)	Termogravimetria (°C)	Tensão de Ruptura (Mpa)	Alongamento Total (mm/mm)
1	124,6 ± 0,7	67 ± 4	385,3 ± 4,1	67,3 ± 5,4	0,026 ± 0,003
4	107,9 ± 1,8	82 ± 6	389,0 ± 1,9	41,9 ± 5,6	0,017 ± 0,003

2.6. Reforço

Os reforços compósitos podem ser divididos em três tipos: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa para compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, isto é, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções; para os compósitos reforçados com fibras a fase dispersa tem a geometria de uma fibra, que podem ser de acordo com o seu comprimento curtas ou longas (Callister, 2002).

Os compósitos reforçados com fibras longas são tecnologicamente mais importantes que os de fibras curtas, pois incluem com frequência resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso. Diversos fatores influenciam as propriedades finais do compósito reforçado com fibras longas, tais como: o comprimento, a orientação e concentração (fração volumétrica) da fibra, além da orientação da tensão aplicada, se

longitudinal (força aplicada paralela à orientação da fibra) ou transversal (força perpendicular à orientação da fibra) (Callister, 2002).

Existem diversos tipos de fibras contínuas utilizadas como reforço, a depender do propósito a que se destinam e das propriedades desejadas para o produto final, dentre as quais, as mais utilizadas em aplicações estruturais com matriz poliméricas são: fibras vidro, carbono e aramida, sendo que esta última não é indicada para utilização em *risers*, devido à perda das suas propriedades mecânicas em presença de umidade. Na Tabela 7 estão apresentados os dados da densidade e das propriedades mecânicas da fibra de vidro e carbono.

Tabela 7 – Propriedades de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fibras contínuas de vidro e carbono na direção longitudinal e transversal, com fração volumétrica de fibra de 0,6 (Callister, 2002).

Propriedades	Vidro [Vidro E (<i>E-glass</i>)]	Carbono (Alta Resistência)
Densidade relativa	2,1	1,6
Módulo de tração		
Longitudinal (GPa)	45	145
Transversal (GPa)	12	10
Limite de resistência à tração		
Longitudinal (MPa)	1020	1240
Transversal (MPa)	40	41
Deformação no limite de resistência à tração		
Longitudinal	2,3	0,9
Transversal	0,4	0,4

2.6.1. Fibras de Vidro

As fibras de vidro ocupam posição de grande importância entre os materiais de reforço usados pela indústria dos plásticos. Sendo comercializadas desde a década de 40, elas têm permitido a crescente evolução dos plásticos reforçados em aplicações antes reservadas aos metais e suas ligas. As principais características da fibra de vidro, que as tornam atraentes para o reforço de plásticos, em relação a outras fibras, são: baixo coeficiente de dilatação térmica, altas propriedades mecânicas, retenção das propriedades mecânicas em altas temperaturas, alto alongamento na ruptura, facilidade de processamento e baixo custo (Carvalho, 1992).

As fibras de vidro são obtidas pela fusão e fiberização de óxidos metálicos (óxidos de silício, sódio, cálcio, alumínio, potássio, entre outros). Esses óxidos são analisados, moídos, dosados, misturados e alimentados em fornos de fusão para posterior transformação em fibras (Carvalho, 1992). Elas se dividem em três categorias de acordo com suas características (Tabela 8) em: E “*Eletrical*” (elétrico), C “*Chemical*” (químico) e S “*High Tensile Strength*” (alta resistência) (Fiorelli, 2002).

Tabela 8 – Características das fibras de vidro (Fiorelli, 2002).

Fibras de Vidro	Características
E	Alta resistência e alto módulo de elasticidade; Bom isolante elétrico.
C	Alta resistência à corrosão; Baixa propriedade de resistência.
S	Alto módulo de elasticidade; Resistente a altas temperaturas.

2.6.2. Fibras de Carbono

A fibra de carbono é um polímero formado pela grafitização de um material precursor. São muito utilizadas como reforço em materiais compósitos de alto desempenho, principalmente por possuírem os maiores módulos e resistências específicas entre todas as fibras. O alto módulo e a alta resistência das fibras de carbono se devem à orientação dos planos de grafite, paralelos ao eixo da fibra, e também às ligações covalentes (ligações fortes) entre os átomos (Fiorelli, 2002).

Os principais precursores para produção de fibras de carbono são os compostos orgânicos: o piche, o raiom e a poliacrilonitrila (PAN). As técnicas de processamento variam com o precursor, como também as características da fibra resultante. A fabricação de fibras de carbono por piche ou polímeros envolve o processo de pirólise, executado pelo aquecimento das fibras, sendo que o piche fornece maior rendimento de fibras de carbono (Chung, 1994).

A fibra básica de carbono, após ser tratada (carbonização, oxidação e grafitização) produz fibras de carbono mais resistentes que o aço, (em termos de pressão por cm²) tendo como cor natural o preto. Elas podem ser fabricadas com diferentes

resistências e módulos de elasticidade, existindo em quatro formas, dependendo das suas propriedades (motonline):

- **HS** “*High Strength*” (Alta resistência);
- **IM** “*Intermediate Modulus*”(Módulo intermediário);
- **HM** “*High Modulus*”(Alto módulo);
- **UHM** “*Ultra High Modulus*”(Ultra alto módulo).

A densidade da fibra de carbono está entre as fibras de vidro e de aramida, e a sua resistência à tração é superior às fibras de vidro “R” e “S”, sendo também superior em termos de rigidez em relação a qualquer outra fibra (módulo de tração e flexão). A resistência à fadiga e vibração são também duas excelentes características das fibras de carbono (motonline).

A combinação de fibras de carbono e resina epóxi é um dos sistemas compósitos mais populares, graças às boas propriedades mecânicas da fibra de carbono e devido a sua boa compatibilidade com a matriz epóxi. A adesão interfacial entre esses componentes é atribuído à presença de alguns grupos polares (hidroxil e carboxil) na superfície da fibra, os quais são capazes de interagir com os grupos ativos presentes na matriz epóxi. Infelizmente, esses compósitos estão suscetíveis a danos por impacto, devido às fibras de carbono serem quebradiças e de permitirem uma grande resistência com pouca alongação, podendo serem empregadas fibras mais dúcteis (vidro ou aramida), juntamente com as fibras de carbono, com a finalidade de melhorar o desempenho desses sistemas e que são conhecidos como compósitos híbridos (Dutra, *et al* 2000).

2.7. Materiais Compósitos Híbridos

Um compósito híbrido é obtido pelo uso de dois ou mais tipos de fibras diferentes no interior de uma única matriz. Os compósitos híbridos possuem uma melhor combinação global das propriedades do que os compósitos que contém um único tipo de fibra. São utilizadas várias combinações de fibras e de materiais para matriz, mais o sistema mais comum é o de fibras de carbono com fibras de vidro unidas

em uma matriz polimérica. As fibras de carbono são fortes e relativamente rígidas, e proporcionam um reforço de baixa densidade; contudo, elas são caras. As fibras de vidro são baratas e servem para aumentar a tenacidade do compósito de carbono. O compósito híbrido vidro/carbono é mais resistente mecanicamente, possuindo maior resistência ao impacto. Ele pode ser produzido a um custo menor do que os plásticos comparáveis feitos totalmente a partir do reforço com fibras de carbono ou totalmente a partir do reforço com fibras de vidro (Callister, 2002).

2.8. Fabricação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Para fabricar compósitos reforçados com fibras contínuas que atendam à determinadas especificações de projeto, as fibras devem estar distribuídas uniformemente no interior da matriz. Nesta seção serão discutidas técnicas de laminação através das quais são produzidos os materiais para desenvolvimento deste trabalho.

2.8.1. Laminação Manual (“*Hand-lay-up*”)

No processo de laminação manual as mantas e/ou os tecidos de fibras são colocados manualmente sobre o molde e impregnados com resina catalisada e acelerada. A resina, no estado líquido, é aplicada manualmente com rolos ou pincéis, utilizados no auxílio da impregnação e na retirada de bolhas de ar (Carvalho, 1992).

Esse processo (Figura 12) consiste em aplicar sucessivamente dentro da superfície do molde: inicialmente um agente desmoldante, uma camada de resina líquida termofixa e uma camada de reforço que deve ser impregnado na resina com o auxílio de um rolo ou pincel. Esse processo deve ser repetido até que se tenha a espessura desejada do laminado (vetrotex).

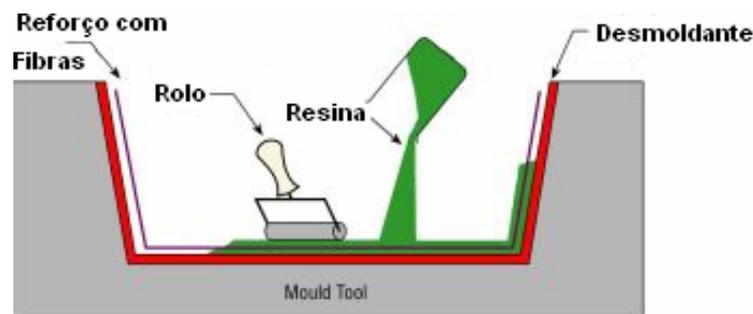


Figura 12 – Representação do processo de laminação manual (vetrotex).

2.8.2. Enrolamento Filamentar (“*Filament Winding*”)

O enrolamento filamentar é um processo de laminação segundo o qual fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e com a orientação necessária, de acordo com um padrão predeterminado, para compor uma forma oca, impregnadas com resina termorrígida, na quantidade necessária para construção da estrutura desejada (Callister, 2002) e é usado principalmente pra construção de formas cilíndricas como tanques, tubos ou dutos.

A construção do compósito cilíndrico por enrolamento filamentar consiste em três etapas principais: a primeira é o projeto, os quais incluem a seleção de materiais, geometria e orientações da fibra, o segundo os meios mecânicos de colocação das fibras através dos quais elas são colocadas em posições apropriadas e o terceiro são a seleção e o controle das condições que devem ser mantidos durante o processo de fabricação (Abdalla *et al*, 2007).

As fibras contínuas (*rovings*) dispostos em uma prateleira , através de sistemas de tensão e guia, são desenroladas sob condições controladas e passadas em sistemas de “imersão completos” que impregnam e controlam a quantidade de resina nos filamentos. Os filamentos são então enrolados sobre um molde rotatório (mandril) em várias camadas (Figura 13). Após essa fase de enrolamento úmido, o mandril com a estrutura compósita é removido, sempre em rotação, para ser polimerizado em um forno ou à temperatura ambiente. Posterior à cura da resina, o mandril é removido ou mantido como parte do composto final (*liner*) (saint-gobain-vetrotex).

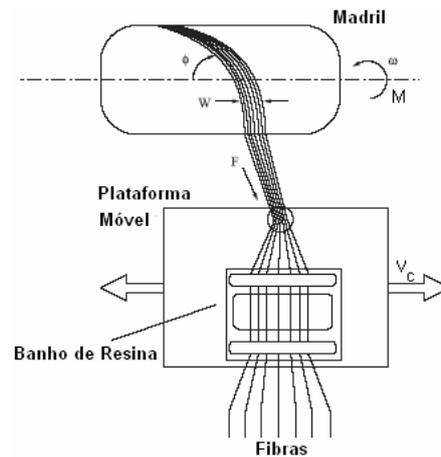


Figura 13 – Esquema do processo de enrolamento filar (saint-gobain-vetrotex).

Existem dois diferentes métodos de enrolamento: (1) *wet winding*, nos quais as fibras são passadas através de um banho de resina e enroladas em um mandril rotatório; (2) *prepreg winding*, nos quais as fibras pré-impregnadas são colocadas sobre o mandril rotatório. Entre esses métodos de enrolamento, o *wet winding* é o mais comum, extensamente usado na fabricação de cilindros compósitos de matriz termorrígida reforçado com fibras e possui maiores vantagens que o anterior, como: baixo custo do material, curto tempo de enrolamento e o tipo da resina pode ser variado de acordo com os requerimentos específicos (Abdalla *et al.*, 2007).

A tensão de enrolamento, o ângulo de enrolamento e/ou quantidade de resina em cada camada de reforço pode ser variado de modo a se obter a resistência e a rigidez desejada na estrutura. As propriedades finais do compósito podem variar com o tipo de enrolamento selecionado (Abdalla *et al.*, 2007). São possíveis vários padrões de enrolamento, isto é, circunferencial, helicoidal e polar (Figura 14). O enrolamento polar é usado para colocar as fibras perto de 0° com o eixo longitudinal, geralmente a passagem é feita perto ou ao redor dos pólos do mandril. O enrolamento helicoidal é usado para colocar as fibras em ângulos entre 5° a 80° com o eixo longitudinal. Neste padrão as fibras são enroladas sobre a superfície do mandril em orientações alternadas (positiva e negativa), o que resulta em uma dupla camada de material enrolado (Shen, 1995).

O enrolamento circunferencial é uma forma especial de enrolamento helicoidal e é usado para colocar as fibras perto de 90° com o eixo longitudinal (Shen, 1995). As peças enroladas em filamentos têm razão resistência/peso muito alta. Esta técnica

também permite alto grau de controle sobre a uniformidade e a orientação do enrolamento (Callister, 2002).

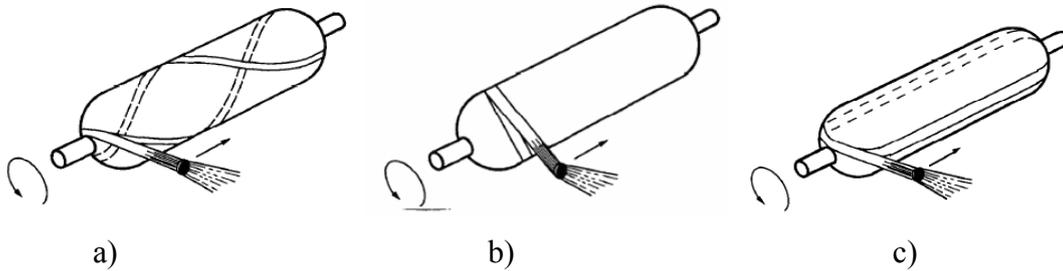


Figura 14 - Padrões de enrolamento: a) helicoidal, b) circunferencial e c) polar (Shen, 1995).

Carvalho A. (1992), apresentou os cálculos de ajuste da máquina para enrolar a estrutura desejada. As fibras contínuas impregnadas com resina são enroladas sobre o mandril segundo uma hélice de passo (Equação 1) controlável, significando que o carrinho percorre esta distância no mesmo tempo em que o mandril completa uma rotação, e é estabelecido pela razão entre o diâmetro do mandril (Φ) e a tangente ângulo de enrolamento (θ) que se deseja obter no laminado. Já a largura da faixa (w) (Equação 2), que é a composição do número de *rovings* utilizados, pode ser calculada pela razão entre o passo (p) e o número de passadas (n) requeridas para a cobertura do mandril com o produto do seno do ângulo desejado.

A quantidade de bobinas de *rovings* necessárias para compor a largura da faixa (w) é determinada segundo a Equação 3 e depende do teor(%) de fibra desejado no laminado, da espessura aplicada por camada (t) e do tex do *roving* (Carvalho, 1992).

$$p = \frac{\pi\Phi}{\text{tg}\theta} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$w = \left(\frac{p}{n}\right) \cdot \text{sen}\theta \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\text{n}^\circ \text{ bobinas} = \frac{(\% \text{fibra} \cdot t \cdot w \cdot 10000)}{\text{tex} \cdot \left[\left(\frac{\% \text{fibra}}{2,60} \right) + \left(\frac{100 - \% \text{fibra}}{1,20} \right) \right]} \quad \text{(Equação 3)}$$

Como estruturas tubulares produzidas por enrolamento filamentar estão sujeitas à variações em suas propriedades devido aos diferentes arranjos configuracionais possíveis, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de constatar as diversas variações das propriedades dessas estruturas.

Mertiny *et al.* (2004) investigou o desempenho de estruturas multi-camadas por enrolamento filamentar. Foi construída uma estrutura com configuração base de $\pm 60^\circ$ que foi experimentalmente comparada com estruturas em duas configurações ($\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$) e ($\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$), as quais foram submetidas a testes de tensão biaxial aplicando pressão interna e força axial. Concluíram que as estruturas analisadas exibiram um melhor desempenho na resistência ao dano quando sujeitas a uma variedade de carregamentos e que a tecnologia de enrolamento de multi-camadas pode fornecer consideráveis vantagens em relação a configurações de um único ângulo.

Rosseau *et al.* (1999) caracterizaram a influência do grau de ondulações produzidas pelas fibras dentro das camadas, no método de enrolamento filamentar helicoidal, sobre o desempenho mecânico de oito estruturas cilíndricas sob vários carregamentos. Foram produzidos tubos de fibra de vidro pré-impregnada com resina epóxi (19% em massa de fibra) em arranjos de $\pm 55^\circ$ com enrolamentos alternados ($+55^\circ$ e -55°) e passagens paralelas (somente $+55^\circ$ ou -55°), produzindo diversos tubos com diferentes graus de cruzamentos (8, 16 e 46%), sendo que os parâmetros de enrolamento foram mantidos constantes. Porém observaram que durante o processo de fabricação do tubo, para passagens paralelas, havia o resvalamento das fibras durante a reversão, o que foi contornado com a utilização de anéis de pinos (Figura 15) acoplado ao tubo. Foram feitos testes de tração com carregamentos progressivos e repetidos a fim de caracterizar o comportamento de dano sob vários carregamentos, testes para determinar as propriedades elásticas, através de uma alta taxa de carregamento (10MPa/s) até 15MPa para o módulo axial e 30MPa para o módulo circunferencial, e testes de pressão interna determinados através de incrementos na tensão circunferencial. Os resultados quanto à influência das ondulações nos tubos mostraram-se insignificantes em carregamentos no eixo, porém apresentaram comportamento bastante diferente para os valores de pressão interna, pois a presença de ondulações parece aumentar o crescimento do dano devido a diversos fatores. Os cruzamentos representam os defeitos internos onde às rachaduras podem facilmente aparecer, a presença de vazios ou de regiões na fibra sem resina associados com as ondulações também é outro fator para a iniciação das rachaduras.

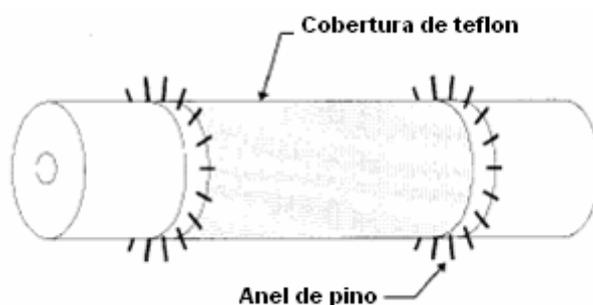


Figura 15 – Mandril com anel de pinos para fabricação das camadas unidirecionais (Rousseau *et al*, 1999).

Kaddour *et al.* (1996) avaliou os efeitos da taxa de deformação sob as propriedades de tensão de tubos fabricados por enrolamento filamentar em baixo ângulo ($\pm 75^\circ$) de laminados kevlar-49/epóxi (KRP) e laminados carbono/epóxi (CFRP) pela técnica de pressurização explosiva interna. As taxas de deformação foram divididas em três regimes: respostas quase estáticas com taxas de deformação da ordem de $10^{-3}/s$, respostas a baixas taxas de deformação entre $5/s$ e $15/s$ e altas taxas de deformação acima de $100/s$. O tempo de carregamento para ambos os materiais foi de 1,5 minutos e os testes foram realizados com e sem *liners* plásticos. A resistência circunferencial e a deformação circunferencial na falha dos espécimes sem e com *liner*, além das falhas dos *strain guage* e de explosão, podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9 – Sumário dos resultados experimentais das propriedades mecânicas de tubos $\pm 75^\circ$ KRP e CFRP sob várias taxas de deformação (Kaddour *et al*, 1996).

Condições de Teste	Taxa de Deformação	Resistência Circunferencial (MPa)		Deformação Circunferencial da Falha (%)	
		KRP	CFRP	KRP	CFRP
Sem <i>liner</i>	Quase estático	832	736	1,31	0,68
Com <i>liner</i>	Quase estático	1556	1818	2,18	1,64
Com e sem <i>liner</i>	10/s	1520	1790	2,22	1,62
Falha do <i>strain guage</i>	> 100/s	1460	1630	2,40	1,90
Pressão de explosão	> 100/s	2250	2610	5,20	5,04

Para superar as limitações de falha prematura dos extensômetros, um *wrap-wire gauge* foi desenvolvido, o qual permitiu a medida instantânea da expansão circunferencial até a explosão final. Curvas tensão/deformação completas (Figura 16) foram obtidas até a falha final e para os testes realizados em taxas de deformação acima de 10/s, a resposta dinâmica de ambos os materiais foi caracterizada por fissuração da superfície ou por falha inicial, antes do estouro final (Kaddour *et al*, 1996).

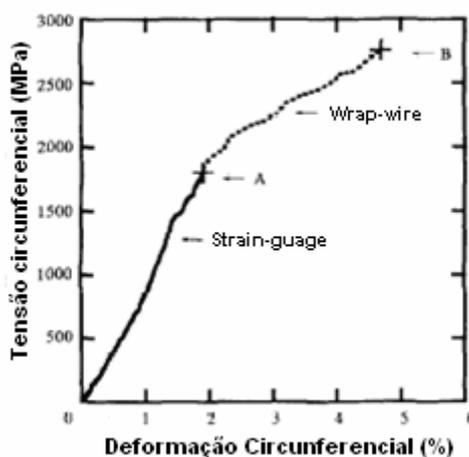


Figura 16 – Curva tensão/deformação circunferencial para o tubo CFRP ($\pm 75^\circ$) testado a 200/s (A, falha do *strain gauge*; B, pressão de explosão) (Kaddour *et al*, 1996).

Foi observado que ambos os tubos KRP e CFRP desenvolveram fissuramento na superfície, antes da ruptura final, quando testados em taxas de deformação mais altas do que 10/s. O fissuramento inicial causa falha dos extensômetros ligados a superfície dos tubos. A deformação circunferencial e a resistência circunferencial, na explosão, aumentam a razão de Poisson. Já na falha inicial, há um decréscimo quando a taxa de deformação foi aumentada acima de 10/s, sendo que o aumento da deformação e da resistência pode ser atribuído ao comportamento pós-falha dos tubos. *Wrap-wires* foram usados com grande sucesso para medir a expansão radial dos tubos depois da falha dos extensômetros. Com a ajuda dos *wrap-wire* foi constatado que as curvas tensão/deformação para os tubos KRP e CFRP exibiram comportamento de transição do tipo frágil para o dúctil, sendo que este comportamento ocorre com testes executados a altas taxas (acima de 10/s) (Kaddour *et al*, 1996).

Cevdet Kaynak *et al.* (2005) avaliou os efeitos de três parâmetros do processo de enrolamento filamentar (tipo de resina, tipo de fibra e ângulo de enrolamento) através da

comparação do desempenho mecânico, quanto a resistência e módulo de tensão circunferencial, dos espécimes fabricados sobre testes de *split-disk* que medem as tensões circunferenciais similarmente aos testes de pressão interna. Nos testes foram utilizados dois sistemas de resina epóxi, três tipos de fibra de vidro, dois de fibra de carbono e cinco ângulos de enrolamento (Tabela 10). Além das propriedades de tensão circunferencial, tipos de falha e suas localizações também foram investigados.

Tabela 10 – Descrição dos parâmetros e materiais estudados (Cevdet Kaynak *et al.* 2005).

PARÂMETROS ESTUDADOS		
Fibras	Resina	Ângulos de Enrolamento
1- Fibra de Vidro PPG (2400 Tex)	1- HUNTSMAN	0°
2- Fibra de vidro CAMELYAF WR3 (2400 Tex)	MY740/HY918/D	± 25°
3- Fibra de carbono TENAX HTA 5331 (800 Tex)	Y062	± 45°
4- Fibra de Vidro PPG (1200 Tex)	2- HUNTSMAN	± 65°
5- Fibra de carbono FORTAFIL 503 (2190 Tex)	LY556/HY917/D Y070	90°

A resistência à tensão circunferencial dos espécimes com os cinco tipos de fibras, contendo o mesmo sistema de resina epóxi, foram comparadas como uma função do ângulo de enrolamento. Foi observado que os espécimes reforçados com fibra de carbono apresentaram melhores propriedades mecânicas que os reforçados com fibra de vidro o que se torna mais dominante com a aproximação da direção do ângulo de carregamento (90°) (Figura 17). Dentre os mesmos tipos de fibra foi observado que as fibras (vidro e carbono) com menor densidade linear apresentaram melhor desempenho mecânico, isso ocorre por que com o decréscimo na densidade linear das fibras o diâmetro do pacote de fibras diminui durante a operação de enrolamento o que acarreta em cruzamentos mais suaves e mais eficientes, o que pode ser visto também na Figura 17. Já à resistência à tensão circunferencial dos espécimes com os dois diferentes sistemas de resina epóxi mostrou-se insignificante.

De modo similar a resistência à tensão circunferencial, o módulo de elasticidade circunferencial foi avaliado. Foi observado que os valores do módulo de elasticidade do reforço de fibra de carbono é duas a três vezes maiores que o de fibra de vidro quando os ângulos de enrolamento são superiores a ± 65° (Figura 18).

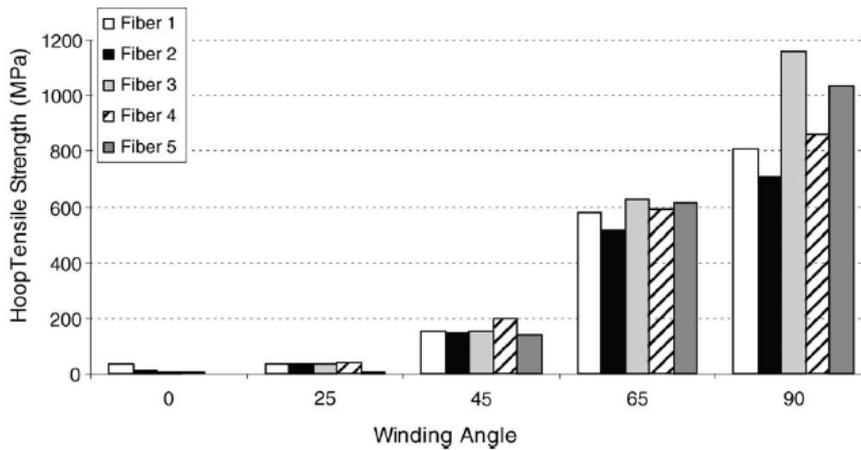


Figura 17 – Comparação da resistência à tensão circunferencial dos espécimes com os cinco tipos de fibras como uma função do ângulo de enrolamento (Cevdet Kaynak *et al.* 2005).

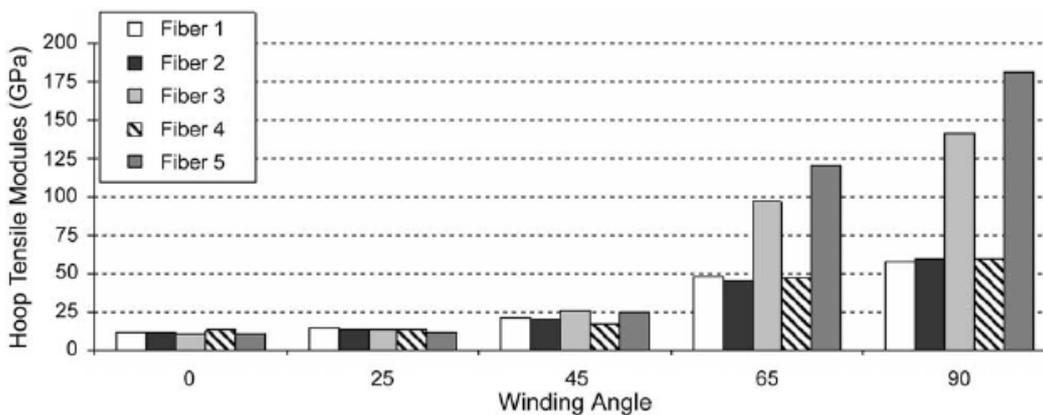


Figura 18 – Comparação do módulo de elasticidade circunferencial dos espécimes com os cinco tipos de fibras como uma função do ângulo de enrolamento (Cevdet Kaynak *et al.* 2005).

Quanto aos modos de falha foi observado que a falha dos espécimes ocorreram na seção do *gage* e que os modos de falha mudam à medida que diminui o ângulo de enrolamento como pode ser observado na Tabela 11. O resultado dos espécimes com $\pm 25^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 65^\circ$ apresentaram desempenho intermediário entre os ângulos extremos (0° e 90°).

Tabela 11 – Descrição das falhas observadas nos espécimes testados no *split-disk* (Cevdet Kaynak *et al.* 2005).

Ângulo	Descrição da Falha
90°	Desligamento paralelo fibra/matriz e no eixo de carregamento ruptura das fibras.
± 65°	Similar ao mecanismo anterior com adição de um estágio de delaminação.
± 45°	Desligamento fibra/matriz ocorreu mais predominantemente.
± 25°	Pouca ruptura de fibras e principalmente mecanismo de rachamento da matriz.
0°	Predominantemente rachamento da matriz

2.9. *Riser* Rígido de Compósito

Segundo Pelsoci (2004) o desenvolvimento de reforços compósitos de produção começou em 1950, com a utilização fibras de vidro como reforço, para facilitar a produção de óleo bruto em poços altamente corrosivos. Já Johnson *et al* (2001), conta o histórico do desenvolvimento de *risers* compósitos rígidos desde 1979 até 1995. Em 1979, o Instituto de Petróleo da França (IFP) e Aeroespacial desenvolveram um tubo compósito, completamente aplicável à indústria *offshore*, de 4 polegadas e que trabalhava a pressões de 5000psi. Então, em 1983, tubos híbridos de fibras de carbono e vidro com 4 polegadas de diâmetro interno, foram produzidos e testados durante três campanhas no Mar do Norte. Já em 1984, foram fabricados cerca de 40 tubos de fibras de vidro ou carbono, e testados quanto as suas pressões de explosão e colapso, tensões máxima de curvatura, e testes de fadiga.

Em 1985, o IFP fabricou oito *risers* compósitos com 9 polegadas de diâmetro interno, dos quais seis foram testados quanto a sua pressão de explosão, tensão máxima, tensão de fadiga e curvatura. Então em 1988, o IFP propôs um terceiro projeto para testar no mar três segmentos de *risers* de compósitos na Conoco's Jolliet TLP, mas por diversos fatores, o programa fracassou (Johnson *et al*, 2001).

Em 1993, um novo projeto foi proposto com o objetivo de desenvolver e qualificar um *riser* compósito de acordo com a API RT-2T, afim de caracterizar a vida em fadiga, avaliar a segurança, estabilidade e os custos de produção da unidade. Já, em 1995, o objetivo do projeto foi o desenvolvimento, fabricação, teste e qualificação de um *riser* compósito de produção para profundidades de 3000 a 5000 pés, neste projeto foi preparado um tubo compósito rígido com estrutura híbrida, consistindo de fibras de

vidro e carbono em matriz epóxi, enroladas pelo processo de enrolamento filamentar, no qual as fibras de reforço são impregnadas com uma resina epóxi não curada e aplicado em orientações e camadas precisas em um mandril rotatório (Johnson *et al*, 2001).

A estrutura do *riser* compósito de produção (CPR) foi desenvolvida para realizar especificações funcionais, incluindo resistência à pressão externa e interna, fluido componentes, suporte estrutural, e resistência química à corrosão e outros ataques ambientais. Ele também tinha que ter um custo competitivo com os *risers* de aço (Pelsoci, 2004). Até os dias de hoje muitas pesquisas são feitas em relação à produção e qualificação de *risers* compósitos para utilização em grandes profundidades.

Jonhson *et al* (2000) *apud* Pelosci (2004), fabricou um *riser* compósito de produção (CPR) híbrido com fibras de carbono e vidro tipo “E” em matriz epóxi enroladas por *filament winding*. Utilizando camadas de fibras de carbono em baixo ângulo e camadas hibridizadas de fibras de carbono e vidro circunferenciais enroladas no mandril metálico onde foi enrolado anteriormente em espiral uma borracha resistente hidrogenada, não curada (HNBR), que era o *liner* do *riser*. As fibras de carbono foram enroladas sobre o HNBR e sobre o acessório final de metal (junta). Depois o tubo foi colocado em rotação para cura, e após o processo de cura, foi adicionada outra camada de HNBR aplicada externamente. Em seguida a camada de HNBR enrolada uma camada circunferencial e outra helicoidal de fibra de vidro, com o objetivo de compactar o elastômero HNBR e fornecer resistência extra à abrasão. Posteriormente, o *riser* produzido foi levado ao processo final de cura.

Os parâmetros básicos do *riser* podem ser observados na Tabela 12. Para isso tubos CPR foram sucessivamente projetados, fabricados e testados. Variáveis de desempenho assim como curvas de fadiga estática e cíclica foram geradas, apresentando flexibilidade com as especificações funcionais iniciais e com os critérios de desempenho (Jonhson *et al*, 2000, *apud* Pelosci, 2004).

Tabela 12 – Parâmetros básicos do *riser* (Johnson *et al*, 2001).

Lamina d’água	914 a 1524 metros
Comprimento	18.894 metros
Diâmetro interno (nominal)	255mm
Peso da unidade compósita	30.7 Kg/m
Peso da unidade incluindo os encaixes	40.2 Kg/m
Custo Relativo em relação ao <i>riser</i> de aço	< 2:1

Storhaug *et al.* (2001) projetaram, fabricaram, testaram e qualificaram um *riser* compósito – metal de 15 metros com 22 polegadas, produzido com fibras de carbono e testado em operação na plataforma TLP Statioil's Heidrun no Mar do Norte em julho de 2001. Os principais componentes do *riser* (Figura 19) fabricado são: o metal conector, um *liner* metal/elastômero, um laminado estrutural compósito de fibra de carbono e uma camada de proteção externa.

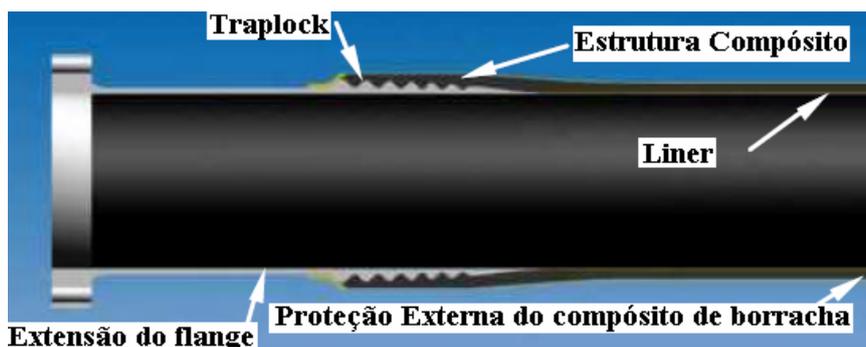


Figura 19 – Componentes do *riser* fabricado (Storhaug *et al.*, 2001).

O tubo foi fabricado usando o processo de enrolamento filamentar (Figura 20), composto por aproximadamente 40 camadas de fibras de carbono e fibras de carbono/vidro aplicadas na direção longitudinal e circunferencial, com a finalidade de melhorar parte do carregamento entre *traps* e para aumentar a resistência na área *traplock*, camadas extras de fibras de carbono de alto módulo são aplicadas. Para garantir uma aplicação exata das fibras, o processo de enrolamento filamentar foi controlado por computador. Depois da aplicação de todas as fibras, o *riser* foi curado em um forno a uma temperatura específica e cuidadosamente controlada.



Figura 20 – Enrolamento filamental do *riser* rígido produzido (Storhaug *et al*, 2001).

Depois de produzido, o tubo passou por um programa de testes que incluía testes de impacto, pressão de explosão e curva de fadiga, cujos valores podem ser observados em detalhes na Tabela 13. No meio do teste *offshore* a junta *riser* é transportada para a terra e inspecionada visualmente, para verificar se não existem partes deterioradas ou mudanças nas propriedades enquanto expostos (Storhaug *et al*, 2001). A instalação do *riser* rígido compósito produzido na plataforma TLP *Statiol's* Heidrun no Mar do Norte pode ser observada na Figura 21.

Tabela 13 - Resultados dos testes feitos no *riser* rígido (Storhaug *et al*, 2001).

Testes	Parâmetros
Teste de pressão de explosão	109,2 MPa
Fadiga cíclica em dobramento ¹⁾	146.000 ciclos
Fadiga cíclica em dobramento ²⁾	167.000 ciclos
Resistência ao impacto sem proteção	50kJ
Resistência ao impacto com proteção	250kJ

1) 100.000 ciclos a 850kNm + 46.000 ciclos a 1120 kNm.

2) 167.000 ciclos a 850kNm e 1360kN de carregamento sob tensão.



Figura 21 – Instalação do *riser* fabricado na plataforma TLP Heidrun (Storhaug *et al*, 2001).

Guesnon *et al.* (2002) projetaram um *riser* híbrido segundo a norma API 16Q, com a finalidade de redução da massa *riser* em relação ao *riser* convencional de aço. Esse *riser* era composto de um núcleo de aço, enrolado circunferencialmente com tiras de um composto de poliamida termoplástica e fibras de carbono. As características do tubo híbrido construído podem ser vista abaixo:

- Núcleo de aço:

- Diâmetro interno: 4 ½” (114.3 mm)
- Espesura: ½” (12.7 mm)
- Tensão específica: 552 MPa

- Compósito circunferencial:

- 50% de fibras de carbono
- 50% de poliamida 12

Durante a fabricação dos tubos híbridos, a tensão aplicada nas tiras de compósito foi cuidadosamente controlada. A camada de material compósito enrolada circunferencialmente ao redor do núcleo de aço, compatível com o carregamento axial, além de contribuir com a resistência a explosão, reduziu a espessura da parede em ½” (12.7 mm). Dez protótipos foram projetados e testados. Os vários testes a que os tubos

foram submetidos são listados abaixo e simulam a vida de um *riser* em funcionamento (Guesnon *et al.*, 2002).

- Explosão simples a temperatura ambiente (Figura 22);
- Explosão com temperatura interna e externa de 100°C;
- Explosão com temperatura simulando as condições *offshore*: 100°C de temperatura interna e 4°C de temperatura externa;
- Teste de temperatura: 100°C por 120h seguido pelo teste de explosão;
- Teste de pressão: Pressão interna de 22 500 psi (155.2 MPa) por um mês, seguido pelo teste de explosão;
- Teste de temperatura cíclica: De 0° para 100°C em 100h, seguido pelo teste de explosão;
- Teste de pressão cíclica: De 150 psi para 22 500 psi em 10 000h, seguido pelo teste de explosão;
- Teste de pressão externa de colapso.



Figura 22 – Tubo híbrido após o teste de explosão a temperatura ambiente (Guesnon *et al.*, 2002).

Na construção desse *riser* foram considerados os principais parâmetros operacionais e ambientais, segundo as condições do Golfo do México para uma profundidade de 10 000 ft (3050 m). Os parâmetros operacionais e ambientais considerados para produção do *riser* são listados abaixo, seguido pela Tabela 14 com a comparação entre algumas características dos tubos de aço convencionais usados e o tubo híbrido produzido (Guesnon *et al.*, 2002).

- Parâmetros operacionais:
 - Densidade da lama;
 - Pressão das linhas;
 - Modo de desconexão;
 - Distribuição do módulo de flutuação;
 - Influência do peso aparente.
- Parâmetros ambientais:
 - Corrente;
 - Profundidade da água;
 - Ondas.

Tabela 14 – Comparação entre o tubo de aço e o tubo híbrido (Guesnon *et al.*, 2002).

	Aço	Híbrido
Diâmetro Interno	4" ½ (114.3 mm)	4" ½ (114.3 mm)
Espessura do Aço	1" (25.4 mm)	½" (12.7 mm)
Espessura do Compósito	-	7 mm
Diâmetro Externo	6 ½" (165.1 mm)	6" (152.4 mm)
Pressão de Serviço	15 000 psi (103.4 MPa)	15 000 psi (103.4 MPa)
Teste de Pressão	22 500 psi (155.2 MPa)	22 500 psi (155.2 MPa)
Peso	87.4 Kg/m	44.0 Kg/m

Meniconi *et al.* (2001) construiu um *riser* compósito híbrido para TLP em profundidades de 1000m, usando fibras de vidro e carbono em resina epóxi, com o objetivo de investigar a técnica de enrolamento filamentar. O *riser* possuía 200 mm de diâmetro interno e as paredes reforçadas com fibras de carbono a $\pm 20^\circ$ com o eixo do tubo e camadas circunferenciais (90°) de fibras de vidro enroladas sobre um liner interno elastomérico feito de borracha Buna-N nitrila (Figura 23), que foi utilizado para melhorar a firmeza na água e isolar a fibra de vidro da água do mar, pois elas podem se degradar. E externamente uma camada de polietileno foi aplicada com a finalidade de proteger a superfície externa do tubo contra choques e abrasão. Eles concluíram que a produção de *riser* compósito é tecnicamente possível e que a principal vantagem é o seu peso efetivo em relação ao aço, além da redução nos custos na construção de plataformas, da sua resistência à corrosão e do seu bom desempenho em fadiga.



Figura 23 – Configuração do *riser* composto (Meniconi *et al*, 2001).

A justificativa das configurações e da utilização de fibras de carbono e vidro, e resina epóxi na produção de *risers* são apresentadas na literatura. Segundo Meniconi *et al.* (2001) resina epóxi é usada devido suas boas propriedades mecânicas, facilidade de processamento e bom desempenho a altas temperaturas. Já as camadas de fibra de vidro/epóxi aplicadas à 90° por enrolamento filamental foram utilizadas para resistir à tensão circunferencial das camadas internas e externas, sendo que fibras de vidro são adotadas devido a sua adequada rigidez e resistência, e baixo custo quando comparadas com as fibras de carbono. As fibras de carbono enroladas em ângulos de $\pm 20^\circ$, dão a maior contribuição para a resistência axial e rigidez do tubo. Estas camadas foram designadas para resistir à tensão no topo do *riser* em profundidades de 1000 metros. Na Tabela 15 encontram-se os valores das propriedades dos laminados vidro/epóxi e carbono/epóxi das camadas utilizadas na produção do tubo.

Tabela 15 – Propriedades dos laminados vidro/epóxi e carbono/epóxi (Meniconi *et al*, 2001).

	Vidro-E/Epóxi (fv=45%)	Carbono/Epóxi (fv=56%)
<i>Propriedades Elásticas</i>		
E ₁ (GPa)	39	117
E ₂ (GPa)	8	8
G ₁₂ (GPa)	4	5
Y ₁₂	0,26	0,34
<i>Resistência Máxima (MPa)</i>		
Tensão longitudinal	1062	1640
Compressão longitudinal	610	1280
Tensão transversal	31	80
Compressão transversal	118	250
Cisalhamento interlaminar	72	100
Densidade do compósito (Kg/m ³)	1820	1510

Turid *et al.* (2002) citam que fibras de carbono são utilizadas para esse tipo de exploração, porque elas são utilizadas há mais de 40 anos no desenvolvimento de materiais para indústria aeroespacial e também porque compósitos reforçados com fibras de carbono apresentam baixo peso, alta rigidez e resistência, alta resistência à corrosão, excelentes propriedades de fadiga e muito boas características de amortecimento.

Johnson *et al.* (2001) no projeto de desenvolvimento de *riser*, citaram que as camadas de fibra de carbono circunferenciais foram igualmente distribuídas na superfície interna e externa da parede do tubo (Figura 24) para maximizar a capacidade de pressão ao colapso. E essas camadas circunferenciais hibridizadas com fibra de vidro tipo “E” para aumentar a tolerância ao dano e a resistência ao impacto na parede do tubo. Além de que as camadas de fibra de vidro circunferencial no meio da parede do tubo também foram usadas para aumentar a estabilidade da seção transversal através do aumento da distância de separação entre o reforço circunferencial interno e externo de carbono. Já os baixos ângulos das camadas de carbono helicoidal servem para fornecer rigidez e resistência axial. Beyle *et al.* (1997) descrevem um *riser* compósito-metal projetado com duas camadas elementares, no qual a camada compósita externa, formada pelo enrolamento circunferencial, fornece resistência básica para pressão interna e externa, enquanto a camada interna de metal suporta o carregamento axial.

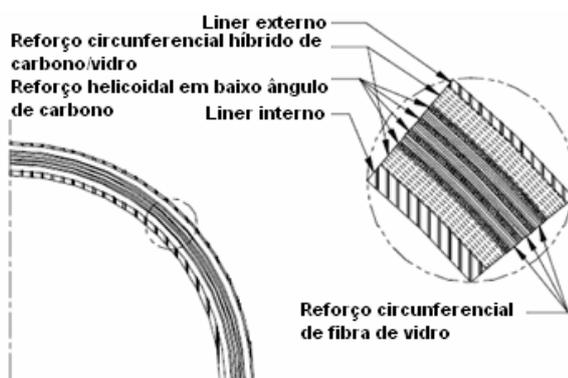


Figura 24 – Construção da parede do tubo compósito (Johnson *et al.*, 2001).

Tarnopol'skii *et al.* (1999) justificam o uso da estrutura da metal-compósito em *risers* à necessidade de rigidez dos mesmos. Nesse *riser* a camada interna de metal (*liner*) assegura rigidez e resistência ao carregamento axial, e parcialmente às pressões

de operação. A camada compósita formada pelo enrolamento circunferencial, fornece resistência básica para pressões internas e externas. Já as camadas, formadas pelo enrolamento helicoidal, suporta carregamentos axiais (Figura 25).

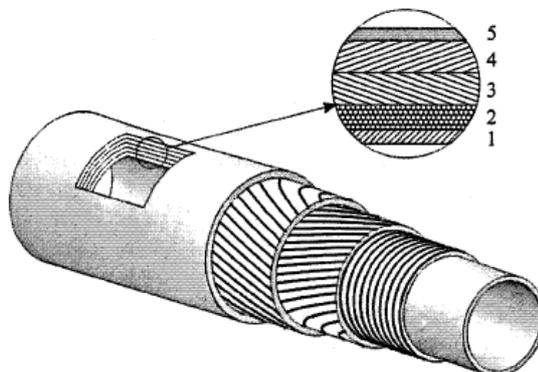


Figura 25 – Exemplo de um *riser* metal-compósito: *liner* interno de metal (1), camada de enrolamento circunferencial (2), camadas de enrolamento helicoidal (3,4) e camada de proteção externa (5) (Tarnopol'skii *et al*, 1999).

Feechan e Fowler (2001) citam que a utilização de um *liner* interno termoplástico (PVDF ou HPDE) nos tubos compósitos produzidos por enrolamento filamental se faz necessário para atenuar a permeabilidade, já que os laminados de fibra (vidro, carbono ou aramida) e epóxi apresentam micro rachaduras que não atuam como barreira de pressão. A adição do *liner* também fornece ao tubo maior tolerância ao impacto e ao dano.

Diversos carregamentos atuam sob o *riser* e variam consideravelmente ao longo de seu comprimento, devido à concentração e distribuição de carregamentos estáticos e dinâmicos, tais como (Beyle *et al*, 1997):

- Pressão interna e externa;
- Força da gravidade e força de tração no topo do *riser* garantindo sua posição vertical;
- Carregamentos transversais devido as correntes marinhas ao redor do *riser* e carregamentos sobre ele devido o deslocamento linear e angular das plataformas.

3. Materiais e Métodos

Nesta seção serão descritos os materiais selecionados e as metodologias de fabricação e de análise que serão utilizadas para o desenvolvimento da tese. Na seção 3.1 são mostrados os materiais selecionados bem como suas propriedades e indicações. Na seção 3.2 são mostradas as metodologias utilizadas na produção dos laminados e dos tubos compósitos, além descrição das técnicas utilizadas na caracterização desses materiais.

3.1. Materiais Selecionados

3.1.1. Resina Epóxi

Para utilização como matriz polimérica na produção do *riser* e dos laminados, foi escolhido um sistema epóxi de cura a quente baseado em Araldite[®] LY 556*/ Aradur 917*/Accelerator DY 070* da HUNTSMAN, utilizado para materiais compósitos de alto desempenho e indicado para processos de enrolamento filamental, pultrusão e moldagem por pressão.

Esse sistema de resina possui reatividade ajustável de acordo com a quantidade de acelerador utilizada, boas propriedades de impregnação da fibra, baixa viscosidade, potencial de vida longa, excelente resistência química (principalmente a ácidos em temperaturas até 80°C), e exibe excelentes propriedades mecânicas, dinâmicas e térmicas.

3.1.2. Fibra de Vidro

3.1.2.1. Fibra de Vidro Tipo “S”

Foram utilizados como reforço *rovings* de fibras de vidro tipo “S” 721B ZenTron[®] de alta resistência da Advanced Glassfiber Yarns LLG, silanizada para utilização com resina epóxi. Na Tabela 16 se pode observar as propriedades da fibra de vidro cedidas pelo fabricante.

Tabela 16 – Resumo das propriedades da fibra de vidro tipo “S” 721B ZenTron®

(Fonte: Advanced Glassfiber Yarns LLG).

TEX Nominal	675 g/km
Resistência à tração	3882 MPa
Módulo de Elasticidade	94 GPa
Resistência ao cisalhamento (<i>Short beam</i>)	72 MPa
Coefficiente de expansão térmica (α)	$1,6 \cdot 10^{-6}$ mm/mm°C
Densidade	2,46-2,49 g/cm ³

3.1.2.2. Fibra de vidro Tipo “E”

Foram utilizadas como reforço fibras de vidro do tipo “E” Advantex® tipo30® - 111A da Owens Corning®. O TEX e o desempenho da fibra fornecido pelo fabricante podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17 – Características da fibra de vidro “E” tipo30 (Fonte: Owens Corning®)

TEX	1100 g/km
*Resistência à tração	2,56 GPa
*Módulo de Elasticidade	80 GPa
*Resistência ao cisalhamento	69,8 MPa
Densidade	2.58 g/cm ³

* Em anidrido epóxi

3.1.3. Fibra de Carbono

Foram utilizados como reforço fibras de carbono STS 24k HTA-7C F301 da Tejin (Toho Tenax) de alta resistência, tendo como precursor a poli-acrilonitrila (PAN) e superfície tratada para promover adesão com matrizes poliméricas. Os dados das propriedades da fibra são mostrados na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Resumo das propriedades da fibra de carbono STS 24k HTA-7C F301

(Fonte: Tejin).

TEX Nominal	1600 g/km
Resistência à Tração	4070 MPa
Módulo de Elasticidade	240 GPa
Elongação	1.7 %
Densidade	1.75 g/cm ³

3.2. Metodologia

Para atingir os objetivos da dissertação as seguintes atividades foram efetuadas:

3.2.1. Preparação do Laminado Plano

O desenvolvimento dos laminados compósitos planos de fibra de vidro (tipo “E” e tipo “S”) e carbono foi feito segundo a seqüência:

1- Produção dos arranjos de fibras unidirecionais por enrolamento filantar a um ângulo de 90° (*hoop*):

Para utilização da técnica de enrolamento filantar na produção das camadas de fibras foi construído um dispositivo composto de um cilindro rotativo de PVC com uma base metálica que foi utilizado para o enrolamento das diversas camadas. O processo de produção das camadas de fibra de vidro “S” e “E”, e fibra de carbono ocorreram segundo as etapas abaixo (Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29):

1º)



Inicialmente o *roving* de fibra é enrolado sobre o cilindro a um ângulo de 90° com o seu eixo;

Figura 26 - Enrolamento da fibra.

2º)

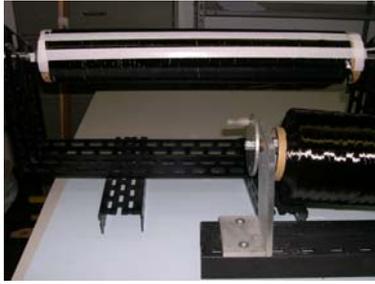


Figura 27 – Colocação da fita adesiva as fibras para corte.

Após o enrolamento, duas tiras de fita adesiva foram coladas sobre a camada de fibra formada, a uma distância de 5mm entre elas e, com o auxílio de um estilete, cortadas ao longo de todo o cilindro;

3º)



Figura 28 - Camada de fibra de carbono.



Figura 29 - Camada de fibra de vidro “S”.

A camada de fibra formada é retirada do equipamento e armazenada protegida contra poeira e umidade até sua posterior utilização na produção do laminado.

2- Laminação das camadas de fibras:

Após a produção de todas as camadas de fibras de vidro e de fibra de carbono necessárias para a produção do laminado iniciou-se o processo de laminação manual (“*Hand lay-up*”), com aplicação das camadas intercaladas de fibra e resina, de forma a se obter um laminado com 8 de camadas e 55% em volume nominal de fibra de carbono e, 6 e 5 camadas de fibra de Vidro “E” e “S”, respectivamente, ambas com 45% em volume nominal de fibras.

3- Cura da resina em estufa

Depois de produzido, o laminado foi levado à estufa para cura da resina segundo ciclo de cura indicado pelo fabricante. Observe abaixo (Figura 30) a foto dos laminados fabricados para posterior produção dos corpos de prova a serem utilizados nos testes de tração e para caracterização microestrutural.

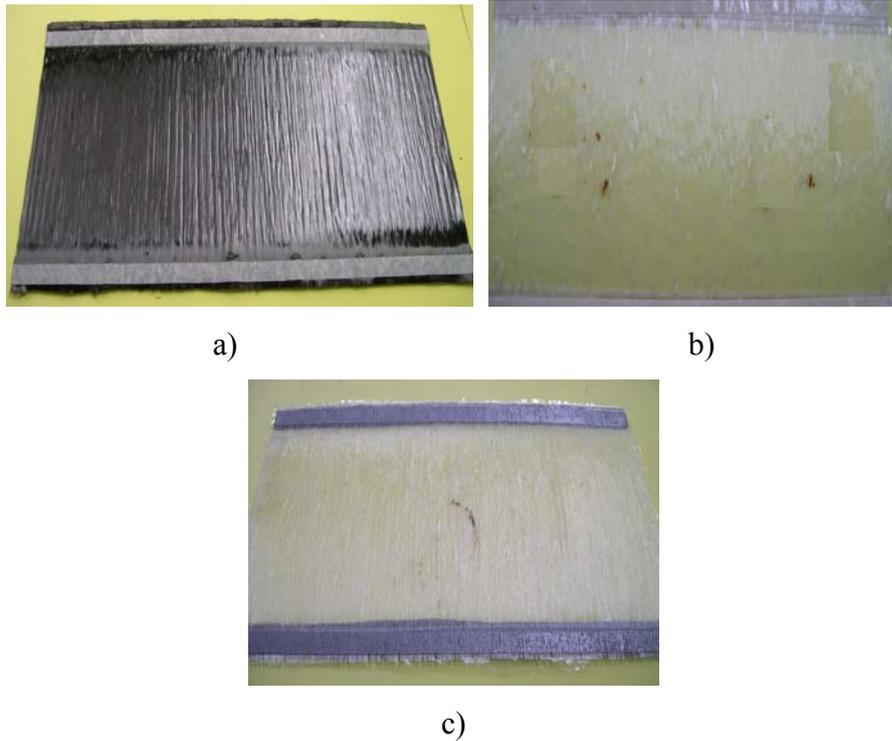


Figura 30 – Laminados: a) fibra de carbono, b) fibra de vidro “S” e c) fibra de vidro “E”.

3.2.2. Caracterização dos Laminados Compósitos Produzidos

3.2.2.1. Ensaio de Tração

A caracterização mecânica dos laminados compósitos planos produzidos foi realizada a partir de ensaios de tração conduzidos em uma máquina eletromecânica EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 10 kN (Figura 31), no Laboratório de Propriedades Mecânicas do PEMM/COPPE.



Figura 31 – Máquina EMIC utilizada nos testes de tração.

Os oito corpos de prova destinados à execução desse ensaio foram obtidos a partir do corte das placas de laminados unidirecionais nas dimensões sugeridas pela norma ASTM D3039M-95, por meio da utilização de uma máquina de corte com disco. Após o corte e lixamento dos corpos de prova, procede-se a colagem dos *tabs*, constituídos de material semelhante ao laminado, com resina MC-132 e endurecedor FD- 128 da Epoxifiber Ind. e Com. Ltda. A geometria dos corpos de prova produzidos (Figura 32) e suas dimensões (Tabela 19) para os ensaios de tração são mostradas a seguir.

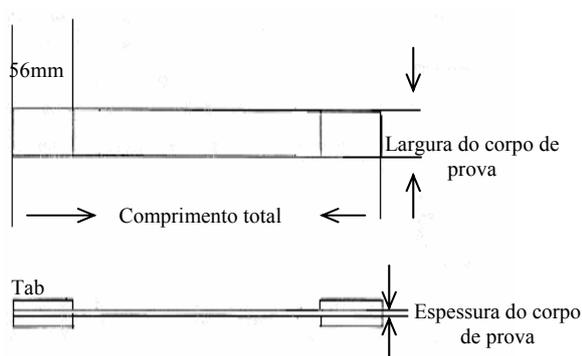


Figura 32 - Desenho esquemático ilustrando a geometria dos corpos de prova.

Tabela 19 - Dimensões dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração dos materiais compósitos de acordo com a norma ASTM D3039M-95.

Espessura do corpo de prova (mm)	Tab (mm)	Largura do corpo de prova (mm)	Comprimento total (mm)
1,0	56,0	15,0	250,0

3.2.2.2. Análises Microscópicas e Fractográficas

As análises microestruturais dos laminados produzidos foram realizadas através de microscopia óptica utilizando um microscópio da marca OLYMPUS modelo BX60 do Laboratório de Microscopia do PEMM/COPPE.

Para isso, foi necessário o preparo das amostras que é feito pelo embutimento das mesmas em resina epóxi 331 e endurecedor D.E.H. 24, ambos da marca EPOXTEC Ind. E Com. LTDA, seguido por uma seqüência de lixamento (lixas 320, 400, 500, 600, 1200 e 2400) e depois polimento metalográfico com alumina 1 e 2.

As amostras foram embutidas nas posições transversais e longitudinais para visualização da dispersão da fibra na matriz e podem ser observadas na Figura 33.

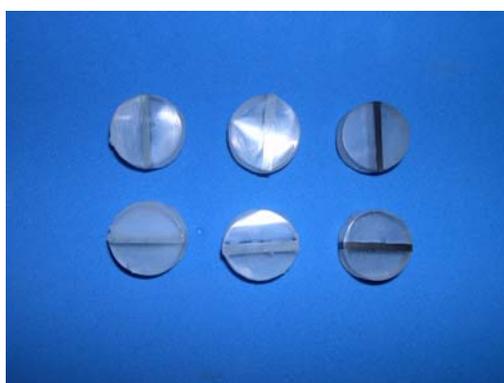


Figura 33 – Amostras embutidas para análise microscópica.

3.2.3. Enrolamento Filamentar

Os tubos foram produzidos no laboratório de compósitos em uma Máquina de enrolamento filamentar Tecservice (Figura 34) para mandris entre 300 e 500 mm de diâmetro e até 3.000 mm de comprimento útil. Foram produzidos tubos compósitos de

fibra de vidro do tipo “S” e do tipo “E”, e híbridos de fibra de vidro do tipo “S” e fibra de carbono, todos sem *liner*, com 4,5 polegadas (114,3mm) de diâmetro interno.



Figura 34 – Máquina de enrolamento filamantar utilizada na produção dos tubos.

Os tubos produzidos tipo *sandwich*, sob mandril de aço, com duas camadas circunferenciais (88°) interna, duas helicoidais ($\pm 45^\circ$) centrais e duas camadas circunferenciais (88°) externas, foram impregnados em uma matriz epóxi à base de Diglicidil Éter Bisfenol A (DGEBA). A cura do tubo compósito foi feita em uma estufa Tecservice rotatória para mandris de até 3000 mm de comprimento útil em um ciclo de cura de 8 horas a temperaturas de $80^\circ\text{C}/4\text{h}$ e $120^\circ\text{C}/4\text{h}$.

3.2.3.1. Parâmetros Internos da Máquina

Os parâmetros de controle da máquina (parâmetros de enrolamento) para a produção dos tubos foram decididos segundo as necessidades de produção do tubo e segundo as limitações da máquina. Esses parâmetros se dividem em dimensões e passos, e podem ser vistos resumidamente na Tabela 20.

→ Dimensões

Está seção é dividida em diâmetro do molde, ângulo de enrolamento helicoidal, largura de faixa e número de divisões.

- O diâmetro do molde de 4 ½ polegadas foi decidido com base no diâmetro interno do *riser* rígido vertical de produção e levando-se em consideração o transporte do tubo até a estufa, as dificuldades em se trabalhar com um tubo de diâmetro do tamanho real (>6 ½ polegadas para risers de injeção de água), bem como seu manuseio e retirada do mandril.
- O ângulo de $\pm 45^\circ$ das fibras foi definido baseado na angulação da armadura de tração dos *risers* flexíveis, que resistem a tensões axiais, e levando também em consideração, o fato de que quanto menor o ângulo de enrolamento, maior resistência axial, segundo as referências bibliográficas estudadas. Outro fator observado foi a limitação da máquina na produção de tubos com angulações inferiores a $\pm 30^\circ$ observada durante os testes;
- A largura de faixa foi definida segundo a quantidade de *rovings* de fibras (vidro ou carbono) disponíveis para serem utilizados durante o processo de enrolamento, lembrando que quanto maior a quantidade de *rovings* utilizados menor a quantidade de voltas que a máquina dá pra fechar o cruzado e, conseqüentemente, menor a espessura final do tubo e menor o número de pontos de cruzamento entre as fibras, o que acarreta em melhores propriedades mecânicas;
- O número de divisões segue um cálculo já armazenado no sistema de controle da máquina e leva em consideração os três parâmetros anteriores.

→ Passos

São divididos em tipo, comprimento e número de camadas.

- O tipo de passo foi definido segundo Meniconi *et al.* (2001) no qual foi produzido um tubo tipo *sandwich*, com camadas internas e externas em paralelo referentes as camadas circunferenciais (88°) e camadas centrais em cruzado referentes as camadas helicoidais ($\pm 45^\circ$), pois esse tipo de configuração melhora o efeito do reforço de tração e compressão interlaminar. A máquina está equipada para fazer uma seqüência de seis passos diferentes entre paralelo e cruzado, porém na produção dos tubos foram utilizados apenas três;

- O comprimento do tubo foi definido segundo as necessidades para retirada de amostras para os testes;
- O número de camadas foi definido de forma a se obter um tubo com arranjo simples para se iniciar os estudos, com duas camadas internas a 88°, seguida de duas camadas a $\pm 45^\circ$ e mais duas externas a 88°.

Tabela 20 – Parâmetros utilizados na máquina para produção do tubo híbrido.

Parâmetros da Máquina de Enrolamento Filamentar	
Dimensões	
Diâmetro do molde	114,3 mm (4 ½’)
Ângulo	45°
Largura da Faixa	25 mm
Número de Divisões	10
Passos	
Passo 1	
Tipo	Paralelo
Comprimento	1800 mm
Número de Camadas	2
Passo 2	
Tipo	Cruzado
Comprimento	2000 mm
Número de Camadas	2
Passo 3	
Tipo	Paralelo
Comprimento	1800 mm
Número de Camadas	2

3.2.3.2. Adequação da Máquina de Enrolamento.

Em vista da necessidade de adequamento da máquina aos objetivos da dissertação, foram produzidos alguns acessórios para a máquina com a finalidade de ajudar ou facilitar a produção dos tubos.

Dois ajustes foram feitos na máquina de forma a adaptá-la a utilização dos *rovings* de fibra de carbono. O primeiro foi a introdução de dois pentes (frontal e traseiro) para passagem das fibras no banho de resina, sem que as mesmas fossem destruídas ou retorcidas durante o processo de fabricação do tubo, já que as fibras de carbono possuem uma largura de faixa de 7 mm, superior a da fibra de vidro (2 mm) e a abertura do pente da máquina para passagem das mesmas (3 mm). As fotos dos pentes

do banho de resina original e dos pentes produzidos para fibra de carbono podem ser vistos na Figura 35.

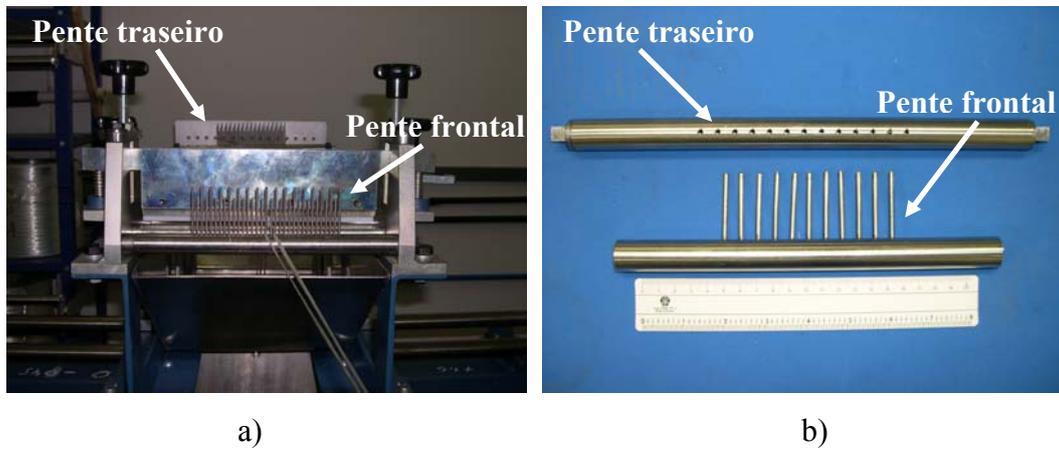


Figura 35 – Pentes da banheira para colocação das fibras.

O segundo ajuste foi à introdução de porta-fibras na prateleira, para utilização dos *rovings* de fibra de carbono (Figura 36), já que saída das fibras de carbono para alimentação na máquina é externa, ao contrário das fibras de vidro que é interna.



Figura 36 – Porta fibras de carbono construído.

3.2.3.3. Alterações na Estufa de Cura

A estufa adquirida para cura dos tubos compósitos produzidos apresentou algumas limitações, quanto à temperatura máxima, que não ultrapassava 80°C, e impossibilidade de programação de uma rampa de aquecimento. Devido a esses fatores que impossibilitavam a produção do tubo, já que a temperatura de cura máxima da resina utilizada é de 140°C com a utilização de uma rampa de aquecimento, foram tomadas algumas providências a fim de melhorar o funcionamento da mesma. Estas alterações foram idealizadas pelo prof. José Stockler Canabrava Filho do Departamento de engenharia Mecânica da escola politécnica e efetuadas sob sua supervisão. A seqüência de medidas tomadas para adequação da estufa é listada abaixo:

- Desligamento de um par de resistências do equipamento, já que as mesmas ultrapassavam a temperatura de segurança de desarme, tendo em vista que as resistências foram colocadas no equipamento originalmente em pares, o que favorecia o rápido aquecimento das mesmas antes da estufa atingir a temperatura programada;
- Colocação de um controle de temperatura, com a finalidade controlar a temperatura das resistências, permitindo assim que as mesmas fossem desligadas antes de atingirem a temperatura máxima de segurança de desarme, evitando assim que o equipamento fosse completamente desligado antes de atingir a temperatura desejada;
- Posteriormente, religação do par de resistências desligado inicialmente, com a finalidade de ajudar no aquecimento da estufa para o alcance da temperatura máxima de 140°C já que com a adição do controlador a temperatura das mesmas não satura;
- Adição de um segundo controlador, com a finalidade de controlar a manutenção da temperatura desejada pelo desligamento de um par de resistências quando uma temperatura T é atingida antes da temperatura desejada, já que com todas as resistências ligadas, devido a inércia, a temperatura desejada era ultrapassada e demorava a se manter com uma variação pequena, isto é, $\leq 5^\circ\text{C}$.

Porém, apesar de todo aparato utilizado, a temperatura máxima de cura para ser atingida demandava um grande tempo, já que o ciclo de cura por si só é demorado (8 horas), a fim de otimizar o tempo para atingir essa temperatura, diversos testes foram feitos através da variação dos parâmetros internos da máquina (Tabela 21). Parâmetros como temperatura de segurança de desarme, temperatura de segurança limite, histerese da temperatura de segurança limite, histerese da temperatura de segurança desejada* e variação de temperatura para o desligamento de um par de resistências.

* A histerese da temperatura de segurança desejada indica a variação de temperatura em que o par de resistências restantes deve ser religado após a queda da temperatura desejada, isto é, quando a temperatura desejada é atingida o segundo par de resistências é desligado e à medida que os mesmos vão esfriando a temperatura desejada cai até uma temperatura definida, que faz com que um par de resistências seja novamente religado.

Tabela 21 – Variação dos parâmetros da estufa para alcance da temperatura máxima de cura de 140°C.

Programação	Variáveis					Tempo total (min) 100-140°C
	Sp ₁	Sp ₂	Hist ₁	Hist ₂	ΔT	
1	300°C	250°C	40°C	50°C	2°C	Não atingiu
2	350°C	250°C	40°C	30°C	3°C	Não atingiu
3	350°C	280°C	40°C	20°C	3°C	Não atingiu
4	350°C	280°C	40°C	10°C	3°C	Não atingiu
5	350°C	290°C	40°C	10°C	3°C	Não atingiu
6	350°C	300°C	40°C	20°C	3°C	73
7	350°C	320°C	40°C	5°C	2°C	64

Sp₁ = temperatura de segurança de desarme

Sp₂ = temperatura de segurança limite

Hist₁ = histerese da temperatura de segurança limite

Hist₂ = histerese da temperatura de segurança desejada

ΔT = variação de temperatura para o desligamento de um par de resistências

Mesmo depois de todos os ajustes, devido à dificuldade e a demora para se atingir à temperatura máxima de 140°C para a cura do compósito sugerida pelo fabricante, e segundo estudo de Camussi *et al* (2007), foi adotado um novo ciclo de cura (4h a 80°C e 4h a 120°C) que diminui a temperatura máxima em 20°C e a Tg da resina cerca de 5°C, segundo o fabricante, porém sem afetar consideravelmente as propriedades mecânicas finais, segundo pesquisa de Sobrinho *et al* (2007).

3.2.3.4. Produção dos Tubos Compósitos

A produção dos tubos compósitos foi dividida em duas etapas:

→ Primeira etapa:

Moldagem de tubo compósito protótipo de fibra de vidro tipo “E” com dois tipos de arranjos, uma camada circunferencial a 88° interna e externamente, e uma camada helicoidal a $\pm 45^\circ$ no meio, com a finalidade de testar a metodologia de produção dos tubos e adaptação dos testes de caracterização;

→ Segunda etapa:

Moldagem de três tipos de tubos compósitos: (1) tubo de fibra de vidro “E” com quatro camadas circunferenciais (88°) e duas helicoidais ($\pm 45^\circ$); (2) tubo de fibra de vidro “S” com arranjos iguais ao anterior; e (3) tubo compósito híbrido constituído de camadas circunferenciais (88°), duas interna e duas externa, de fibra de vidro tipo “S” e duas helicoidais ($\pm 45^\circ$) de fibra de carbono.

3.2.4. Caracterização dos Tubos Compósitos Produzidos

3.2.4.1. Variação de Diâmetro e Espessura

As medidas de variação de diâmetro interno foram feitas com um relógio comparador, da marca Feinmesszeugfabrik – Suhl para diâmetros de 50-160mm, em três pontos diferentes do tubo (superior, inferior e meio), quatro medidas em cada ponto. O diâmetro externo medido com o micrômetro, da marca Feinmesszeugfabrik – Suhl para diâmetros de 125-175mm, nos mesmos pontos das medidas de diâmetro interno. As fotos dos equipamentos utilizados para as medições de diâmetro interno e externo podem ser vistos na Figura 37.

A variação de espessura foi medida com um paquímetro digital Starret de 0-150 mm e as medidas feitas em dois pontos do tubo (superior e inferior), dez medidas em cada ponto.



a)

b)

Figura 37 – Equipamentos utilizados para medidas de diâmetro: a) relógio comparador e b) micrômetro.

3.2.4.2. Densidade do Compósito e Fração Volumétrica de Fibra

A determinação da fração volumétrica de fibra e resina nos tubos compósitos envolve basicamente dois métodos experimentais: o método da queima para determinação da fração de massa de fibras (W_f) e o método de diferença de volume para determinação da densidade do compósito (ρ_c). Ambos os métodos experimentais são utilizados para obtenção da fração volumétrica de fibras, dada pela Equação 4.

$$v_f = \frac{W_f \cdot \rho_c}{\rho_f} \quad \text{(Equação 4)}$$

Sendo:

V_f = fração volumétrica de fibras

W_f = fração de massa das fibras

ρ_c = densidade do compósito

ρ_f = densidade das fibras

No método da queima, seis amostras são retiradas do tubo compósito e cortadas nas dimensões $10 \times 20 \text{mm}^2$ (mantendo-se a espessura do compósito). Em seguida os cadinhos vazios são pesados. Após, os cadinhos mais a amostra são pesados, sendo então levados para um forno onde permanecem durante duas horas à 500°C para queima da matriz. Depois de queimada a fase polimérica é determinada a fração em massa de fibra do compósito (W_f), através da pesagem do cadinho com as fibras (Equação 5).

$$W_f = \frac{\omega_f}{\omega_c} \quad \text{(Equação 5)}$$

ω_f = massa de fibras após a queima

ω_c = massa do compósito

O método da diferença de volume consiste na utilização de um picnômetro. Nesse procedimento inicialmente são pesados na balança analítica separadamente, o picnômetro cheio de água destilada e a amostra do material compósito ($5 \times 20 \text{mm}^2$), em seguida a amostra é colocada dentro do picnômetro com água que desloca certo volume de água e é pesado novamente (tomando sempre o cuidado de encher completamente o picnômetro e enxugá-lo antes das pesagens). De posse das massas do picnômetro com água, das amostras e do picnômetro com água mais a amostra calculamos a densidade, determinando para isso a massa de água deslocada e o volume de água deslocado segundo as Equações 6, 7 e 8.

$$(P_a + A) - P_A = M_a \quad \text{(Equação 6)}$$

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_a} \quad \text{(Equação 7)}$$

$$\rho_c = \frac{A}{V_a} \quad \text{(Equação 8)}$$

P_a = massa do picnômetro com água

A = massa da amostra

P_A = massa do picnômetro com água mais a amostra

M_a = massa de água deslocada

V_a = volume de água deslocado

ρ_a = densidade da água a 23°C

ρ_c = densidade do compósito

Com os dados experimentais obtidos, mais a densidade das fibras, fornecida pelo fabricante, calculamos a fração volumétrica de fibras no tubo. Ela é obtida a partir da equação 4, mostrada acima, e a fração volumétrica de matriz obtida da equação 9.

$$V_f + V_r = 1 \quad \text{(Equação 9)}$$

3.2.4.3. Avaliação Microestrutural

A observação da homogeneidade das fibras na matriz e verificação de defeitos provenientes do processo de fabricação foi feita em um microscópio ótico da marca OLYMPUS modelo BX60 do Laboratório de Microscopia PEMM/COPPE. Para isso foi necessário o preparo das amostras que é feito pelo embutimento das mesmas em resina epóxi 331 e endurecedor D.E.H. 24, ambos fornecidos pela EPOXTEC Ind. E Com. LTDA, seguido por uma seqüência de lixamento (lixas 320, 400, 500, 600, 1200 e 2400) e depois polimento metalográfico com aluminas 1 e 2.

As amostras foram embutidas em duas posições diferentes de forma a mostrar os arranjos de fibras na posição longitudinal e transversal com o eixo do mandril (Figura 38).



Figura 38 – Amostras do tubo protótipo embutidas para análise.

Já as análises microestruturais superficiais internas dos tubos produzidos, bem como a observação dos modos de falha nos ensaios de tração em anel e dos corpos de prova retirados longitudinalmente foram feitos em um microscópio estereoscópio da marca STEMI, modelo SV6 KL1500.

3.2.4.4. Ensaio de Tração em Corpos de Prova e em Anéis

3.2.4.4.1. Tração em Corpos de Prova Retirados Longitudinais

Os corpos de prova destinados à execução desse ensaio foram retirados dos tubos produzidos, nas dimensões sugeridas pela norma ASTM D3039M-95, em uma máquina eletromecânica EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 10 kN no Laboratório de Propriedades Mecânicas do PEMM/COPPE. Após o corte e lixamento dos corpos de prova procedeu-se a colagem dos *tabs*, feitos com tecidos de fibra de vidro, com resina MC-132 e endurecedor FD-128 da Epoxifiber Ind. e Com. LTDA. A geometria dos corpos de prova produzidos (Figura 39) e suas dimensões (Tabela 22) para os ensaios de tração são mostradas a seguir.



Figura 39 - Geometria dos corpos de prova usados no ensaio de tração.

Tabela 22 - Dimensões dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração dos materiais compósitos de acordo com a norma ASTM D3039M-95.

Espessura do corpo de prova (mm)	Tab (mm)	Largura do corpo de prova (mm)	Comprimento total (mm)
2,5	Tecido de fibra de vidro	25,0	250,0

A retirada de corpos de prova do tubo foi sugerida para dar uma idéia do comportamento das camadas helicoidais e da tensão axial suportada pelo tubo, já que a configuração em baixo ângulo sugerida no trabalho ($\pm 45^\circ$) é utilizada para dar resistência axial ao tubo, segundo o estudo dos autores já citados na referência.

3.2.4.4.2. Tração em Anéis

Para os testes de anéis foram construídos dois sistemas de garras segundo a norma ASTM D2290-00 (Figura 40). A montagem para utilização das peças inicia-se pela colocação do anel de compósito no miolo metálico por onde são puxados os anéis, nessa colocação deve ser observada a centralização da emenda entre as duas peças do miolo com a seção reduzida do anel compósito. Em seguida, o miolo já com o anel é colocado nas garras (superior e inferior) com o auxílio de um bastão metálico através de orifícios existentes tanto nos miolos como nas garras.

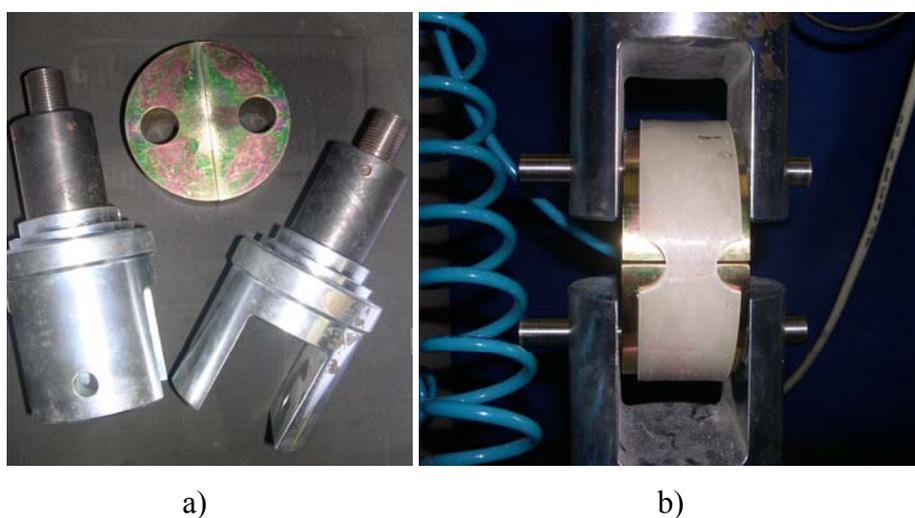


Figura 40 – Sistema de garras: a) peças e b) após a montagem.

Os ensaios foram divididos em duas partes na primeira os anéis de fibra de vidro “E” foram desenvolvidos em uma máquina eletromecânica EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 10 kN, no Laboratório de Propriedades Mecânicas do PEMM/COPPE e a segunda parte os anéis de fibra de vidro “S” e híbrido em uma máquina hidráulica Shimadzu UHF 1000kN no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil/COPPE, devido a alta resistência das fibras que compõem os tubos, todos os testes com deslocamento de 5mm/min. O modelo do corte dos corpos de prova para os testes de anel, segundo a norma, bem como suas dimensões podem ser vistos na Figura 41 e na Tabela 23.

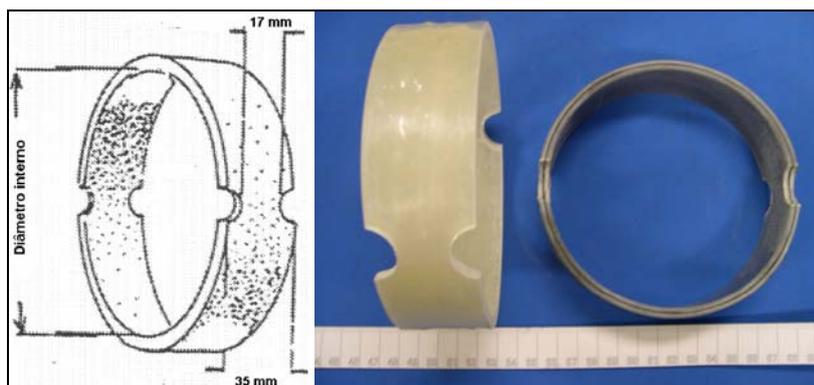


Figura 41 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de anel.

Tabela 23 - Dimensões dos anéis adotados para o ensaio de tração de acordo com a norma ASTM D2290.

Largura do anel (mm)	Largura da seção reduzida (mm)	Raio da seção reduzida (mm)	Distância entre as seções reduzidas
35,0	17,0	9,0	180°

Os valores de tensão circunferencial aparente para todos os corpos de prova são obtidos da Equação 10 segundo indicado pela norma ASTM D 2290-00 utilizada para procedimento dos testes.

$$\sigma_a = \frac{P_b}{(d_1 b_1 + d_2 b_2)} \quad \text{(Equação 10)}$$

σ_a = tensão máxima, MPa.

P_b = carregamento máximo, N.

d_1, d_2 = espessura das seções reduzidas, mm.

b_1, b_2 = largura das seções reduzidas, mm.

O ensaio de anel fornece a resistência à tensão máxima, segundo a norma, e é utilizado para fornecer dados para pesquisa e desenvolvimento, projetos de engenharia, controle de qualidade e aceitação ou rejeição de especificações, porém não é um teste aplicado a testes padrões que levem em consideração a relação tempo-carregamento. Ele foi escolhido porque nos dá uma idéia de quanto, no mínimo, o tubo resiste em termos de tensões circunferenciais.

4. Resultados e Discussão

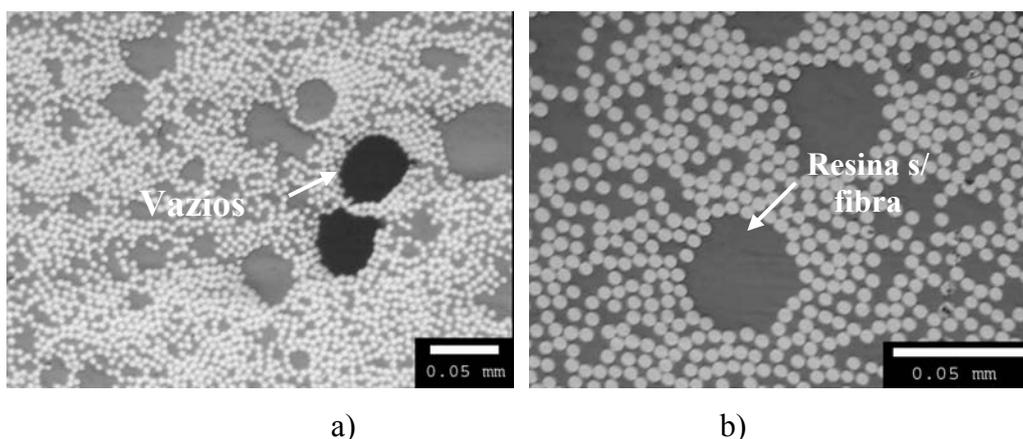
Nesta seção serão discutidas as análises realizadas nos laminados e a produção e caracterização dos tubos compósitos produzidos.

4.1. Análise Microscópica dos Laminados

As imagens obtidas por microscopia ótica mostram seções longitudinais e transversais ao plano dos três laminados produzidos (carbono, vidro “S” e “E”). Foram feitas imagens com 50x, 100x e 200x de aumento.

Na Figura 42 na posição transversal é mostrada a distribuição das fibras, onde se notam também a ocorrência de vazios e áreas de resina com ausência de fibras. A presença desses defeitos provenientes do processo de fabricação pode atuar como concentradores de tensão no material, o que pode facilitar a falha prematura do compósito.

Pelas micrografias observamos que a distribuição das fibras é relativamente heterogênea, com regiões de maior concentração de fibras e outras com menores concentrações. Essas heterogeneidades certamente tendem a diminuir a resistência mecânica desses materiais, entretanto vale ressaltar que elas estão presentes em maior ou menor quantidade em qualquer método de fabricação utilizado.



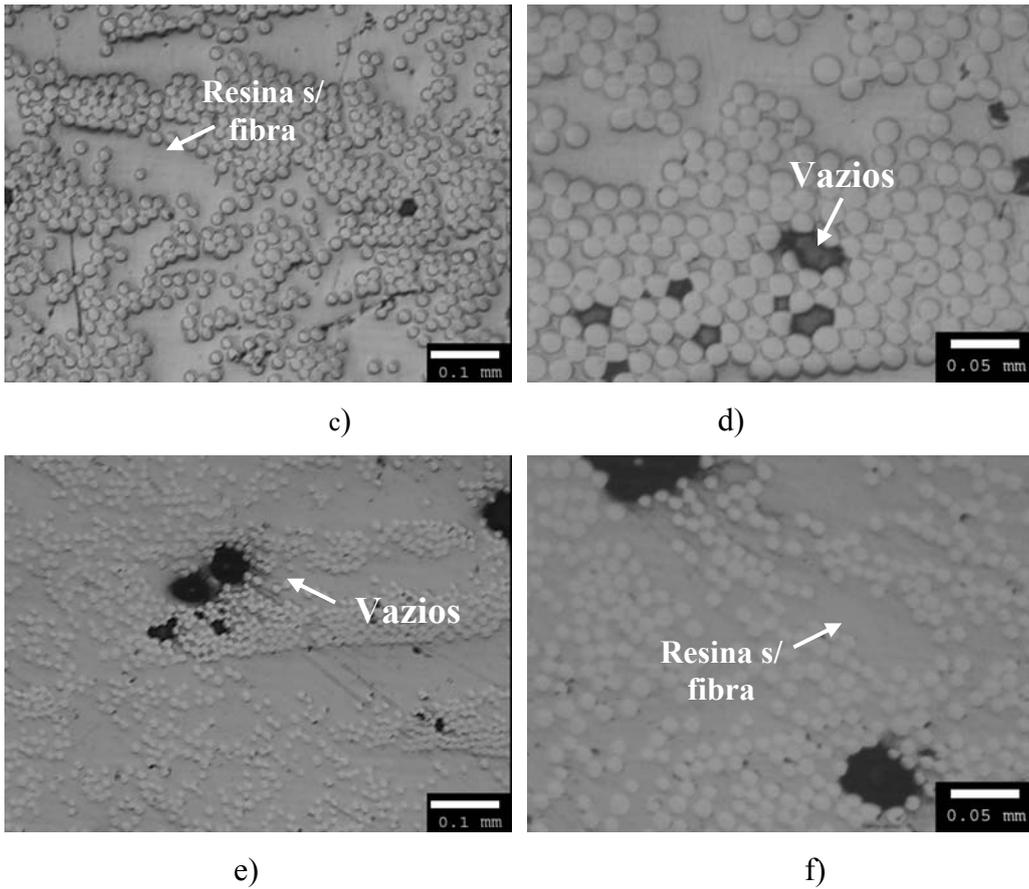
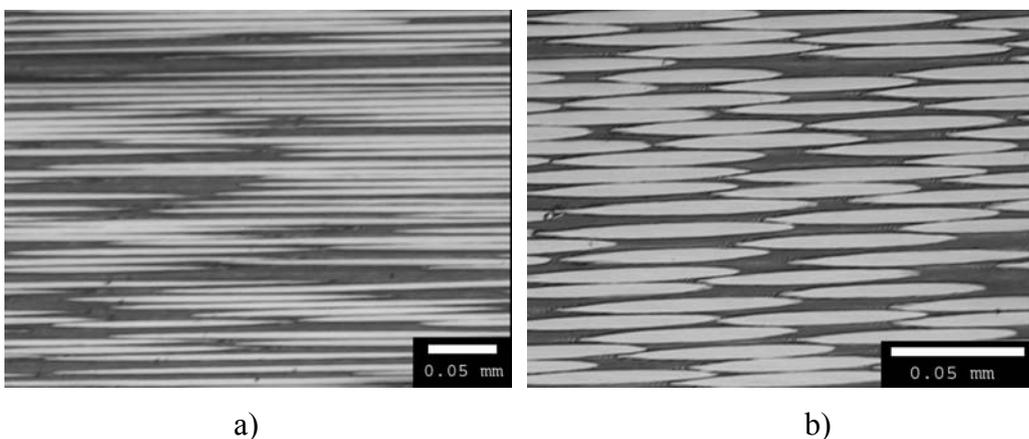


Figura 42 – Microscopia ótica do corte transversal dos laminados: carbono/epóxi a) 100x e b) 200x, vidro “S”/epóxi c) 50x e d) 100x, e vidro “E”/epóxi e) 50x e f) 100x.

As imagens dos materiais observados na Figura 43 na posição longitudinal onde se observa a extensão das fibras que apresentam uma aparência descontínua, que pode ser atribuída ao próprio processo de laminação manual, onde elas não ficam totalmente retilíneas, gerando a aparência na micrografia de que são constituídas de fibras curtas (Albuquerque *et al.* 2005).



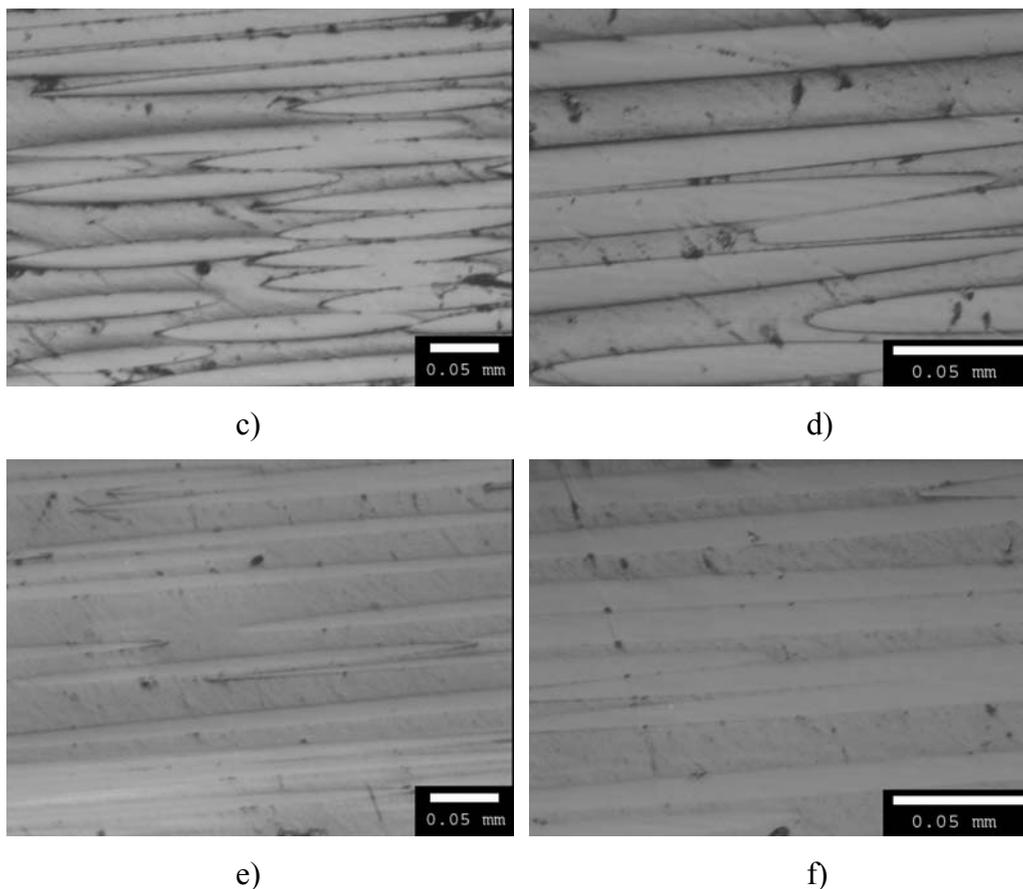


Figura 43 - Microscopia ótica do corte longitudinal dos laminados: carbono/epóxi a) 100x e b) 200x, vidro “S”/epóxi c) 100x e d) 200x, e vidro “E”/epóxi e) 100x e f) 200x.

4.2. Densidade e Fração Volumétrica de Fibra dos Laminados

A densidade dos laminados produzidos, determinada pelo método de picnometria, e a fração volumétrica de fibras, obtida pelo método da queima, pode ser vista na Tabela 24.

Tabela 24 – Características dos laminados produzidos.

Laminados	Número de camadas do laminado	Densidade do compósito (g/cm ³)	Fração Volumétrica de fibras (%)
Epóxi/carbono	8	1,40 ± 0,01	35,75 ± 5,55
Epóxi/vidro “S”	5	1,57 ± 0,03	48,04 ± 3,73
Epóxi/vidro “E”	6	1,60 ± 0,08	33,30 ± 1,73

A utilização do processo de queima para determinação da fração volumétrica de fibras de carbono foi possível, mesmo este sendo um material orgânico, devido à sua alta resistência e ao curto tempo de exposição ao calor, pois nesse caso a perda de massa é muito pequena, segundo mostrado por Chawla na Figura 44. Na figura se observa que quanto maior a resistência mecânica da fibra de carbono utilizada maior a sua estabilidade química e, conseqüentemente, menor a massa perdida com o aumento do tempo de aquecimento. Dessa forma, pode-se ver que as fibras de carbono de alta resistência perdem pequena quantidade de massa com aquecimento ao ar mesmo para aquecimentos de até 500h à temperatura de 350°C.

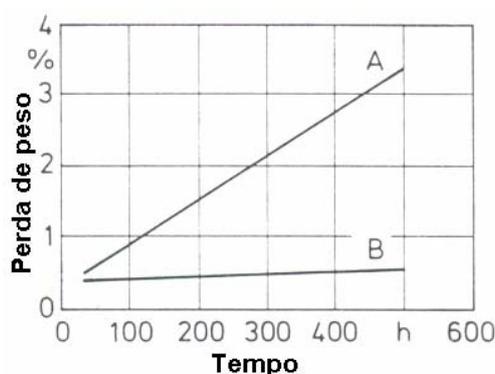


Figura 44 – Resistência à oxidação, medida com perda de peso em ar a 350°C, de fibras de carbono com diferentes módulos de elasticidade: (A) 240GPa e (B) 345 GPa (Chawla, 1987).

O baixo volume de fibras encontrados nos laminados, em relação à bibliografia (ver Tabela 26), ocorreu devido ao processo de laminação utilizado (laminação manual) onde a compactação das fibras com a resina da pressão aplicada e da habilidade do operador, ao contrário de outras técnicas, como a bolsa de vácuo (*vacuum bag*) utilizada nas bibliografias citadas. A fração volumétrica de fibras de vidro “S” apresentou-se maior que as demais devido à dificuldade de escoamento da matriz nas fibras, o que acarretou maiores densidades de fibras, fato que pode ser observado na microscopia pela presença de grandes aglomerados de fibras no laminado (Figura 42d).

A dispersão dos dados foi medida pelo coeficiente de variação, desvio padrão dividido pela média, onde é observado a homogeneidade nos resultados dos parâmetros estudados. Os coeficientes de variação (CV) das frações volumétricas para os laminados

de fibra de vidro “E” e “S” apresentaram valores inferiores a 8%. Já para os laminados de carbono valores de 15% foram observados, provavelmente devido a perdas de massa ocorridas durante a queima.

As densidades dos laminados apresentaram resultados esperados já que a densidade do laminado de carbono foi menor que o dos demais laminados. O coeficiente de variação para a densidade em todos os materiais foram inferiores a 5% (0,07% para laminado de carbono, 1,9% para o de fibra “S” e 5% para a fibra “E”) demonstrando a precisão da metodologia utilizada.

4.3. Ensaio de Tração dos Laminados

Os testes de tração foram realizados conforme o item 3.2.2.1. As curvas tensão-deformação geradas nesses testes, típicas de cada um dos materiais testados, podem ser vistas na Figura 45.

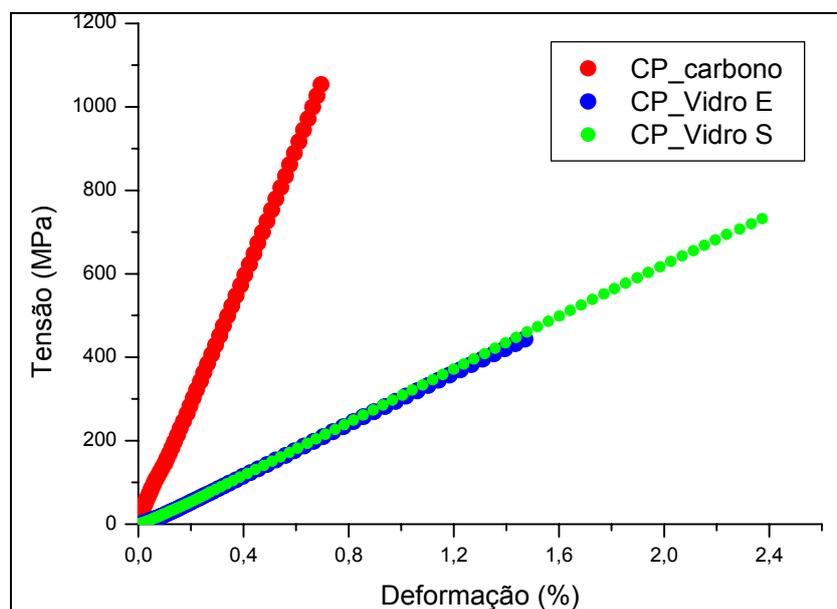


Figura 45 – Curvas tensão-deformação dos materiais testados.

Como pode ser observado na Figura 45, a tensão de fratura do laminado carbono/epóxi é superior aos demais, enquanto o laminado de vidro “S”/epóxi apresenta maior deformação que os laminados de carbono e de fibra de vidro “E” e maior resistência à tração que este último. Os comportamentos obtidos para as fibras estão de

acordo com o esperado, pois as fibras de carbono apresentam como característica uma maior resistência à tração com menor alongação e as fibras de vidro “S” maior resistência que a sua fibra similar do tipo “E”. Os resultados das propriedades mecânicas sob tração podem ser vistos na Tabela 25, onde se observa que os valores de tensão de fratura do compósito com fibras de carbono são 38% e 57% superiores aos dos compósitos com fibras de vidro “S” e “E”, respectivamente, o que qualifica essa fibra para utilização nas camadas centrais do tubo compósito, que suportam tensões axiais, sem aumentar muito o custo final, já que essas fibras são caras.

Tabela 25 – Propriedades mecânicas obtidas para os laminados testados.

Laminado	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Carbono/Epóxi	1154,1 ± 57,5	142,6 ± 11,1	0,80 ± 0,11
Vidro-S/Epóxi	715,6 ± 51,9	34,1 ± 3,5	2,21 ± 0,17
Vidro-E/Epóxi	498,1 ± 69,9	29,2 ± 1,7	1,79 ± 0,31

O alto valor do módulo de elasticidade do compósito de carbono em relação aos outros compósitos testados, assim como a tensão de ruptura, também justificam sua utilização nas camadas centrais do tubo, pois permite maior rigidez axial necessária para a estabilidade estrutural dos *risers*. A fibra de vidro “E”, apesar de ser comercialmente mais barata que as demais fibras, apresentou no laminado compósito, menor desempenho nas propriedades mecânicas, exceto em deformação quando comparado com o compósito de fibra de carbono. O compósito com fibra de vidro “S” apresentou propriedades mecânicas superiores às de fibra de vidro “E” justificando seu emprego nas camadas circunferenciais do tubo, já que possui menor valor comercial que a fibra de carbono, o que diminui os custos na produção dos *risers*.

Os testes LSD de Fisher, calculados pela ANOVA, para cada propriedade mecânica, foram calculados com um nível de confiança de 5% para verificação da diferença significativa entre os resultados. Os valores gerados para as propriedades podem ser vistos nas tabelas 1, 2 e 3 no apêndice.

A análise estatística para os testes mecânicos mostrou que a utilização das diferentes fibras no laminado acarreta em diferença significativa para as tensões de ruptura. Já para o módulo de elasticidade e deformação, apenas o laminado epóxi/carbono apresentou diferença significativa com os laminados epóxi/fibra de vidro

“S” e epóxi/fibra de vidro “E”, fato que é característico da fibra de carbono (maior módulo com menor alongação), não havendo diferença significativa entre as duas últimas fibras.

Os valores de tensão de ruptura dos materiais testados encontram-se abaixo dos encontrados na literatura (Tabela 26), provavelmente devido aos menores valores de fração volumétrica de fibras nos laminados e à presença de defeitos ambos provenientes dos diferentes processos de fabricação utilizados, já que os autores citados produziram os laminados com bolsa de vácuo. Sabe-se que os fatores predominantes para a resistência em tração são fundamentalmente a fração volumétrica de fibras e o tipo de fibra utilizado.

Tabela 26 – Propriedades mecânicas de materiais compósitos similares encontrados na literatura.

Propriedades	Laminados estudados		Meniconi, 2001		Soden, 1998		Kaddour, 1996
	Carbono	Vidro “E” (vidro “S”)	Carbono	Vidro “E” (“S”)	Carbono	Vidro “E” (“S”)	Carbono
Fração volumétrica de fibras (%)	36	33 (48)	56	45	60	62	60
Módulo de elasticidade (GPa)	142	29 (34)	117	39	138	53.48	138
Tensão de fratura longitudinal (MPa)	1154	498 (716)	1640	1062	1500	1140	1970

Os valores encontrados para o compósito com fibra de carbono podem ser considerados muito bons já que apresentaram valores de módulo de elasticidade e de tensão de ruptura superiores aos citados na literatura, apesar de possuir baixo teor de fibras. Os compósitos com as fibras de vidro “S” e “E” apresentaram valores inferiores aos encontrados na literatura, tanto para a tensão de fratura como para o módulo de elasticidade, fato que pode ser explicado para a fibra “E” devido ao baixo teor de fibras, quase metade quando comparado com a fração volumétrica de fibras obtida por Soden (1998). Não foram encontrados dados de laminados reforçados com fibra de vidro “S”, porém, segundo o próprio fabricante, materiais reforçados com tais fibras possuem uma resistência em tração maior que os materiais reforçados com fibra de vidro tipo “E”, o que pode ser confirmado pelos valores de tensão de fratura encontrados nos dois

laminados estudados, que apresentaram valores de tensão 30% maiores que no laminado de fibra de vidro “E”.

4.4. Produção de Tubos Compósitos.

A produção de tubos compósitos se deu basicamente em duas etapas. A primeira com a finalidade de testar todas as metodologias de processo e análises, através da fabricação de tubos compósitos protótipos produzidos com fibra de vidro tipo “E” e a segunda com a produção de tubos com os materiais selecionados (fibra de vidro “E” e “S”, e fibra de carbono) com arranjos $88^\circ/\pm 45^\circ/88^\circ$.

4.4.1. Tubos Compósitos Protótipos

A produção do tubo protótipo iniciou-se pela colocação de uma cera desmoldante sobre o mandril, seguido de uma camada de folha de teflon, ambas com a finalidade de facilitar a retirada do compósito do mandril após a cura, pois a contração da resina e a tensão das fibras no mandril (principalmente das camadas circunferenciais) dificultam essa remoção. Depois uma camada de véu de poliéster (Figura 46) é colocada para dar um bom acabamento interno ao tubo, seguido pelo enrolamento e cura. A foto do tubo após a cura pode ser vista na Figura 47.



Figura 46 – Camada de véu colocada sobre o mandril.



Figura 47 – Foto do tubo produzido após a cura.

Devido à contração da resina e a tensão das fibras durante o enrolamento, não foi possível a retirada do tubo do mandril sendo necessário sacrificar o mesmo através de cortes transversais. Observando-se as paredes internas do tubo (Figura 48) pode-se notar o acabamento interno ruim do mesmo, devido a má impregnação do véu durante o processo de enrolamento e também em função da presença de marcas do adesivo colocado para fixar a folha de teflon, fatores esses que podem atuar como defeitos.

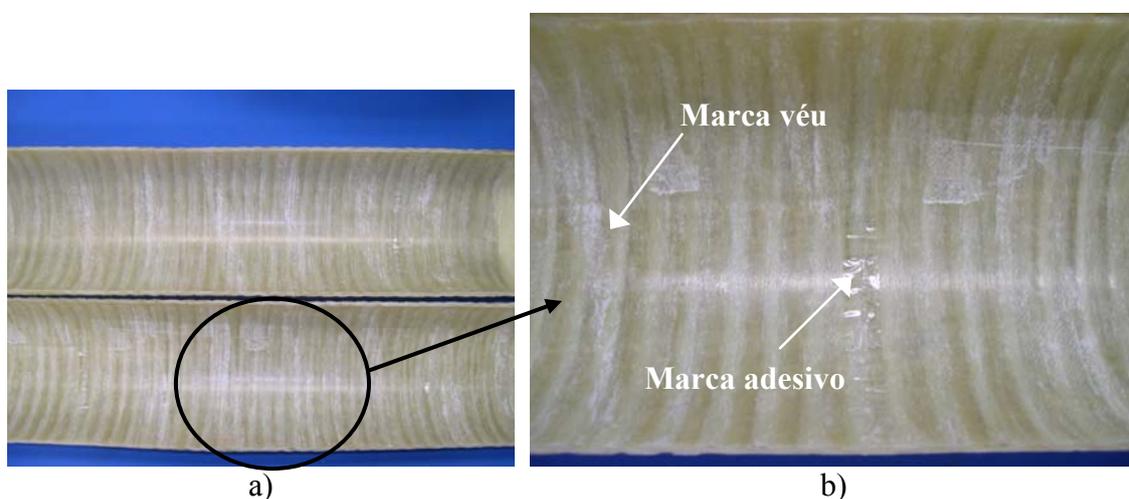
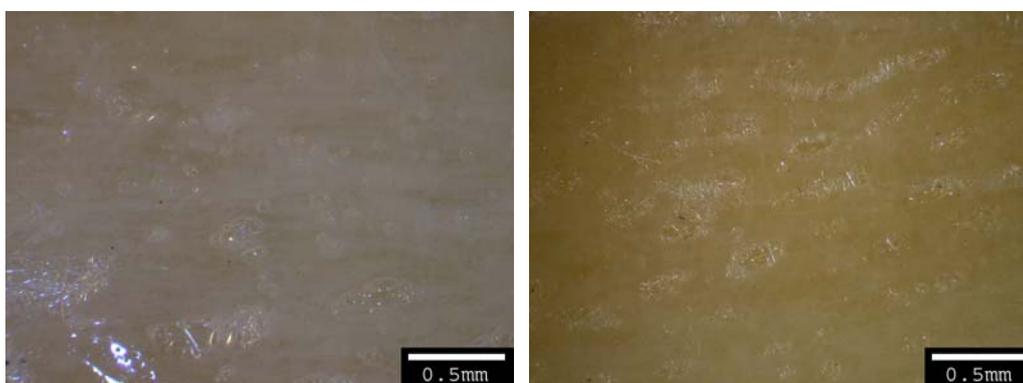


Figura 48 – Tubo protótipo cortado: a) acabamento interno e b) marca do adesivo e do véu.

Esse acabamento superficial interno do tubo também foi observado no microscópio estereoscópico (Figura 49) onde se verifica a presença de diversos vazios

provenientes do contato inadequado do véu com a resina e das áreas onde o adesivo foi colocado.



a)

b)

Figura 49 – Vazios observados: a) na região do adesivo e b) na região do véu.

Tendo em vista um melhor acabamento interno do tubo a ser produzido um segundo tubo protótipo foi fabricado (Figura 50) com diferentes ações que ajudassem na retirada do tubo após a cura. Para isso quatro decisões foram tomadas:

- 1^a) Utilizar um desmoldante líquido no mandril ao invés de cera que pode ressecar e dificultar a retirada;
- 2^a) Utilizar folhas de teflon do tamanho do tubo de forma evitar a utilização de adesivos com emendas e a colocação de outra camada de folha de teflon de modo a facilitar o deslizamento de uma folha sobre a outra para a retirada do compósito;
- 3^a) Impregnar o véu com resina, com o auxílio de uma palheta de laminação, antes de iniciar o processo enrolamento do tubo;
- 4^a) Retirar as pontas de cada extremidade dos tubos, onde as fibras da camada helicoidal resvalam no final do curso se acumulando e acumulando resina.



a)

b)

Figura 50 – Tubo protótipo 2: a) após enrolamento e b) após a cura.

A retirada do mandril foi favorecida com colocação da cera líquida e após sua retirada pode-se observar no tubo que as decisões tomadas para melhorar o acabamento foram satisfatórias (Figura 51), somente tendo sido observado visualmente um defeito na superfície interna proveniente do local de emenda da folha de teflon.



a)

b)



c)

Figura 51 – Tubo produzido: a) marca da emenda do teflon, b) acabamento interno e c) acabamento externo.

Na observação da superfície interna obtida no microscópio estereoscópio após as modificações (Figura 52) já não se observa os vazios provenientes da má impregnação do véu, apenas a presença de algumas bolhas, provenientes do processo de cura da resina.

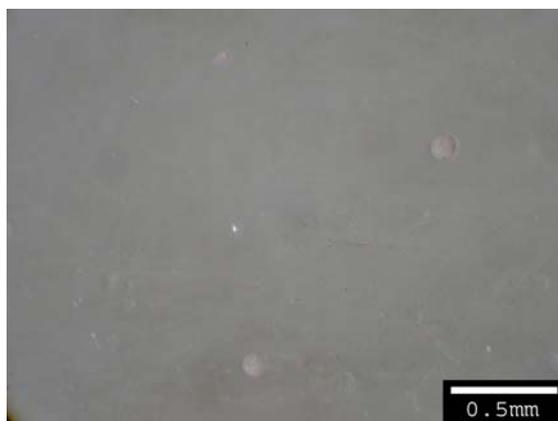


Figura 52 – Superfície interna do tubo após modificações.

Após a produção desses dois tubos protótipos vários outros foram feitos com a finalidade de facilitar a retirada do tubo, pois apesar da retirada do segundo tubo protótipo ter ocorrido, várias dificuldades foram encontradas para essa extração. Para isso foram utilizadas diferentes folhas de teflon com diferentes espessuras, folhas reforçadas com fibra de vidro, utilizadas duas folhas de teflon no mandril uma sobre a outra. Extratores também foram produzidos por alunos da Engenharia Mecânica e testados com pouco êxito devido a força necessária para extração onde geralmente se utilizava o trabalho de cinco homens em média.

Estudos também foram feitos quanto as angulação, já que a proposta inicial do trabalho era a produção de tubos com camadas helicoidais de 12° , que eram segundo o fabricante a limitação mínima da máquina. Porém após algumas tentativas observou-se que a limitação real da máquina é de 20° . Então iniciaram-se testes para a produção de camadas helicoidais com 20° (Anexo 1) quando foi observado a necessidade de utilização de anéis de pinos, já que nessa angulação o resvalamento das fibras é intenso inviabilizando a produção do tubo.

Diversos tipos de anéis de pinos (Anexo 2) foram testados (anéis com diferentes quantidades de pinos, espessura e tamanho dos pinos) sem muito sucesso devido a dificuldade no alinhamento exato desses com a máquina de forma que as camadas

entrassem no lugar exato afim de que não ocasionasse na superposição de camada. Nos testes com esses anéis também foram encontradas dificuldades quanto a sua retirada após a produção das camadas helicoidais.

Outras dificuldades como problemas de programação da máquina de enrolamento, que impossibilitaram a produção de tubos por um longo período, e queima das resistências da estufa devido a problemas de projeto da mesma também foram enfrentados.

Por todos os fatores citados anteriormente se decidiu pela produção de um tubo compósito com camadas a 45° , que evitariam tanto a utilização de anéis de pinos, já que estes precisavam ser mais bem estudados. Para isso, antes dos testes com a utilização de resina para a produção dos tubos compósitos com os materiais selecionados foram feitos testes enrolando-se fibra a $\pm 45^\circ$ (Figura 53) sem resina no mandril. O objetivo deste teste foi verificar a angulação e visualizar a necessidade de utilização ou não dos anéis de pinos na produção dos tubos. Após os testes, se pode observar a angulação desejada e os arranjos de fibras na camada produzida completamente fechado, observou-se também não houve grandes resvalamentos nas fibras que justificassem a utilização dos anéis de pinos para a manutenção da angulação desejada.



Figura 53 – Camada helicoidal a $\pm 45^\circ$ sem resina.

4.4.2. Tubos compósitos

A produção de tubos compósitos seguiu os mesmos passos de preparação dos tubos protótipos: aplicação de desmoldante no mandril, colocação da folha de teflon e

do véu, seguida pela impregnação do véu com a resina. Foram produzidos tubos compósitos com fibra de vidro “E”, fibra de vidro “S” e híbrido (camadas circunferenciais de fibra de vidro “S” e helicoidais de fibra de carbono) com arranjos a $88^\circ/\pm 45^\circ/88^\circ$. As fotos do processamento dos tubos e após a cura podem ser vistos nas Figura 54 e Figura 55.

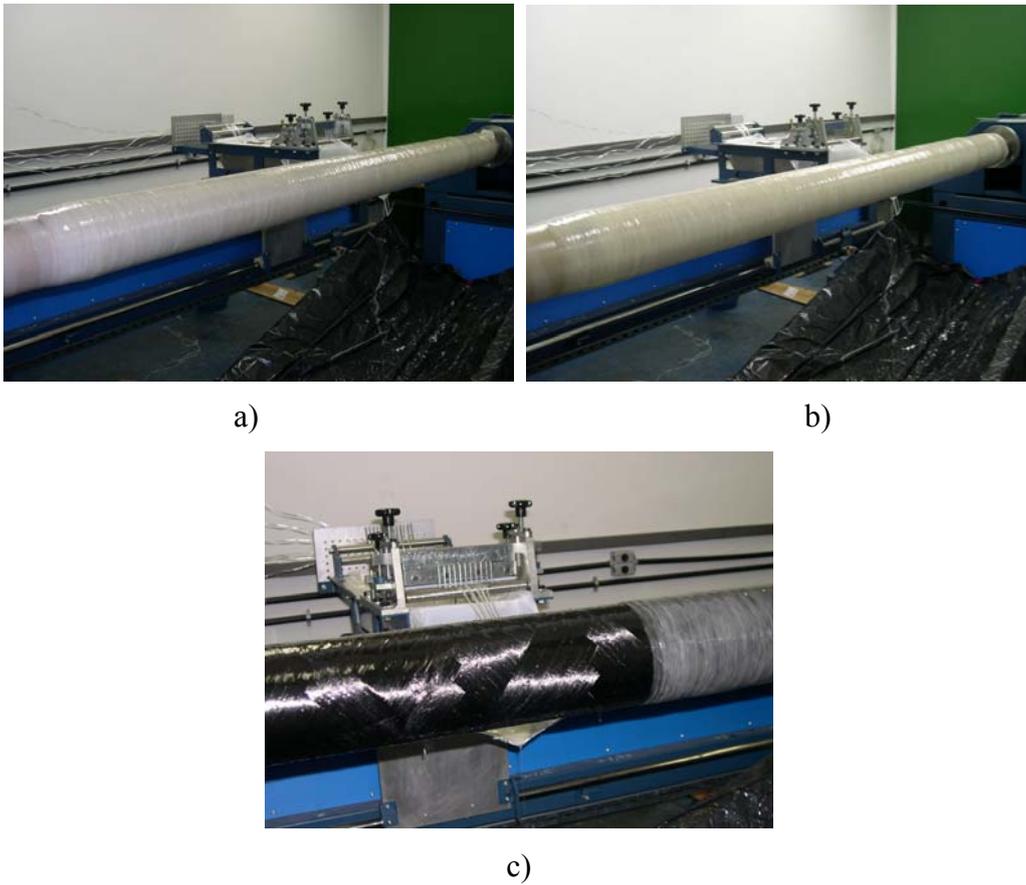
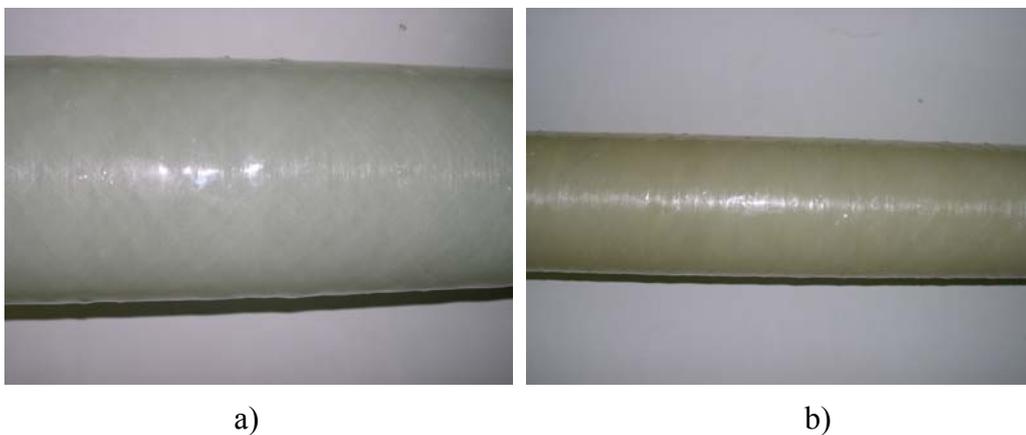


Figura 54 – Fotos do processamento: a) tubo compósito de fibra de vidro “E”, b) tubo compósito de fibra de vidro “S” e c) tubo compósito híbrido.





c)

Figura 55 - Fotos dos tubos após a cura: a) tubo compósito de fibra de vidro “E”, b) tubo compósito de fibra de vidro “S” e c) tubo compósito híbrido.

4.5. Variação de Diâmetro e Espessura dos Tubos

As medidas de diâmetro interno e externo (Tabela 27), para todos os tubos, apresentaram valores equivalentes com coeficientes de variação inferiores a 1%. Já na variação de espessura foram observados valores mais altos de coeficiente de variação, entre 2% e 4%, variação essa proveniente de regiões com grande heterogeneidade, isto é, áreas com mais fibras ou mais resina no tubo, provenientes do processo, que causam pequenas ondulações.

Tabela 27 – Variações de diâmetro e espessura dos tubos produzidos.

Tubos	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Espessura (mm)
Epóxi/Vidro “E”	114,36 ± 0,04	121,79 ± 1,14	3,31 ± 0,16
Epóxi/Vidro “S”	114,39 ± 0,07	126,04 ± 0,86	5,14 ± 0,09
Híbrido	114,71 ± 0,03	125,18 ± 0,95	4,83 ± 0,13

No tratamento estatístico dos dados, utilizando-se o teste de Fischer com 95% de significância (Tabelas 4, 5 e 6 no apêndice), observou-se que o diâmetro interno do tubo híbrido apresentou diferença significativa em relação aos outros dois, provavelmente devido à utilização de diferentes folhas de teflon com diferentes espessuras. Quanto ao diâmetro externo, o tubo “E” apresentou diferença significativa em relação ao tubo “S” e ao tubo híbrido devido ao maior número de filamentos por cabo existentes nessas duas

últimas fibras que ocasionaram em maior volume nos tubos. Já com relação à espessura, todos os tubos produzidos apresentaram diferença significativa entre si mostrando que mesmo para o tubo híbrido, que é constituído de fibras de vidro “S” nas camadas circunferenciais, a presença da fibra de carbono nas camadas centrais causou diferenças na espessura do tubo, provavelmente devido as diferentes quantidades de filamentos nos cabos de cada uma dessas fibras.

4.6. Densidade e Fração Volumétrica de Fibra dos Tubos

A determinação da fração volumétrica de fibras dos tubos foi feita a partir da fração em massa de fibras, obtida pelo método da queima, e pela determinação da densidade do compósito, obtido por picnometria, através das equações 4 e 5 da seção de metodologias. A Tabela 28 apresenta os valores encontrados da fração em massa de fibras (W_f), da densidade do compósito (ρ_c) e da fração volumétrica de fibras (V_f) dos tubos produzidos.

Tabela 28 – Valores médios da densidade e fração volumétrica fibras dos tubos produzidos.

Tubos	W_f (g)	ρ_c (g/mL)	V_f (%)
Fibra de Vidro “E”	0,43 ± 0,03	1,71 ± 0,04	28,91 ± 2,10
Fibra de Vidro “S”	0,76 ± 0,05	1,75 ± 0,03	54,10 ± 3,23
Híbrido (Fibra de vidro “S” e carbono)	0,55 ± 0,05	1,74 ± 0,03	54,85 ± 4,80

Durante o processamento dos tubos observou-se que a quantidade de filamentos por cabo das fibras (densidade linear) utilizadas influenciou na fração volumétrica dos tubos e na homogeneidade das fibras na matriz devido há dois motivos: o primeiro foi o fato da palheta dosadora (Figura 56b) existente no banho de resina não ter sido utilizada na fabricação dos tubos, pois durante o enrolamento dos tubos protótipos se observou que a utilização dessa palheta acarretava em quebra das fibras durante o enrolamento, e segundo, devido a fibra de vidro “E” com menor densidade linear (Figura 56a) apresentar melhor percolação com a resina que as demais fibras, com maior densidade linear.

Esses fatores citados acima acarretaram em menor fração volumétrica de fibras no tubo produzido com fibra de vidro “E” que nos tubos compostos de fibras de vidro “S” e híbrido, como quantidades superiores a 50%. Essa menor fração está relacionada com a maior quantidade de resina existente nesse tubo, que possui menor densidade que todas as fibras, acarretando em menor densidade.

A influência da menor densidade linear da fibra de vidro “E” sobre a homogeneidade da fibra na matriz será observada na seção 4.3.2 onde serão observadas as micrografias dos tubos. Vale ressaltar que influência dessa característica no processo de enrolamento filamentar só foi observada durante os testes e não pode ser controlada devido às fibras de vidro “S” e de carbono ter sido doadas, e devido este não ser um parâmetro utilizado na compra de fibras no mercado.

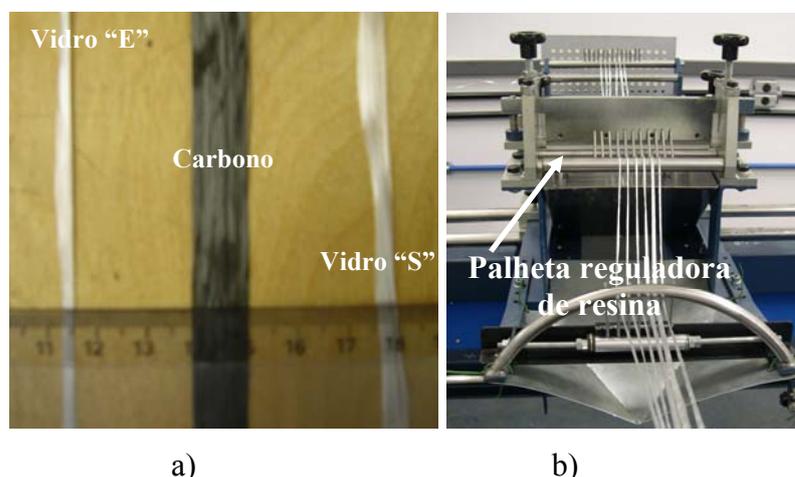


Figura 56 – Imagens: a) amostra dos cabos de fibras utilizados e b) palheta dosadora de resina

A semelhança nos valores de densidade dos três materiais estudados está associada com as frações volumétricas encontradas, pois apesar da densidade da fibra de vidro “E” ser maior que as outras duas, o baixo teor dela no compósito acarretou em uma densidade próxima a dos outros tubos e conseqüentemente alto teor de resina que possui densidade inferior a todas as fibras estudadas. No teste de Fisher (Tabelas 7 e 8 no apêndice), com 95% de significância, a densidade dos tubos não apresentou diferença significativa entre os valores encontrados, mostrando que em relação a esse fator o tipo de fibra utilizado não influenciou. Já a fração volumétrica apresentou diferença significativa apenas entre o tubo de fibra de vidro “E” e os tubos híbrido e de

fibra de vidro "S", provavelmente devido à diferença da quantidade de filamentos por cabo e/ou a maior quantidade de resina nesse tubo.

Os coeficientes de variação das densidades para todos os materiais apresentaram valores inferiores a 2%, confirmando precisão do teste de picnometria na determinação da densidade de materiais compósitos produzidos por diferentes técnicas (laminação manual ou enrolamento filamentar). Já a fração volumétrica apresentou valores de coeficiente de variação superiores aos da densidade, porém abaixo do limite para dados homogêneos que é de 20%, com valores entre 9 a 6%.

Os valores de densidade encontrados para os três materiais são aproximadamente 77% menores que a densidade dos aços API ($7,8\text{g/cm}^3$) geralmente utilizados na produção de *risers* rígidos, o que evidencia uma das grandes vantagens da utilização de tubos compósitos, já que a diminuição do peso no riser diminui os custos dos sistemas de tensionamento e flutuação das plataformas, além de maiores profundidades quando comparado a *risers* de aço com o mesmo peso.

4.7. Análise Microscópica dos Tubos

No microscópio óptico foram observadas as camadas internas e a distribuição das fibras na matriz, bem como a presença de defeitos internos provenientes do processo de fabricação. As amostras foram cortadas em duas posições diferentes no tubo, uma longitudinal e outra transversal ao eixo de enrolamento.

Nas amostras cortadas transversalmente (Figura 57), somente no tubo híbrido, pode-se observar a presença dos diferentes arranjos utilizados, camadas a 88° de fibra de vidro "S e camadas a $\pm 45^\circ$ de fibras carbono, devido à diferença no diâmetro dos filamentos e na coloração das fibras carbono, fato não observado para os tubos produzidos com a mesma. Para as amostras cortadas longitudinalmente (Figura 58) foram observadas camadas longitudinais a 88° seguida pelas camadas a $\pm 45^\circ$ em todos os materiais estudados. A presença de vazios e regiões de resina sem fibra foi observada em todas as amostras, porém em menor quantidade para a fibra de vidro "E", o que pode estar relacionado com a menor quantidade de filamentos por cabo existentes nessa fibra em relação às outras, o que acarretou em melhor impregnação na resina produzindo um laminado mais homogêneo. Essa homogeneidade não é observada nas outras amostras

(fibra de vidro “S” e híbrido) onde se verificam maiores regiões com aglomerados de fibras. Esses argumentos justificam, em parte, os valores de densidade encontrados.

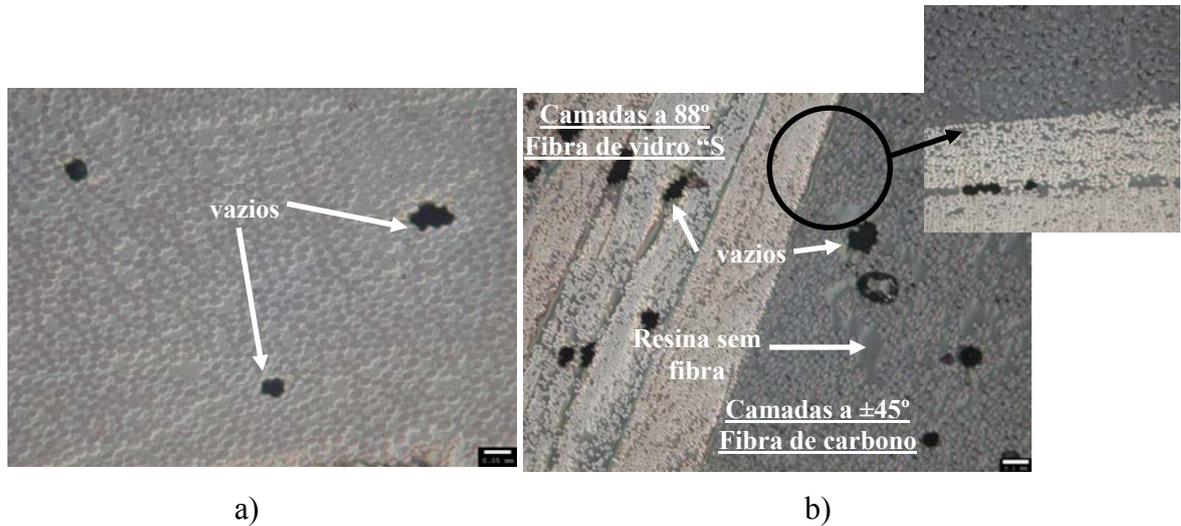


Figura 57 – Amostras cortadas transversalmente e observadas no microscópio ótico: a) fibra de vidro “E” (100x) e b) híbrido (50x).

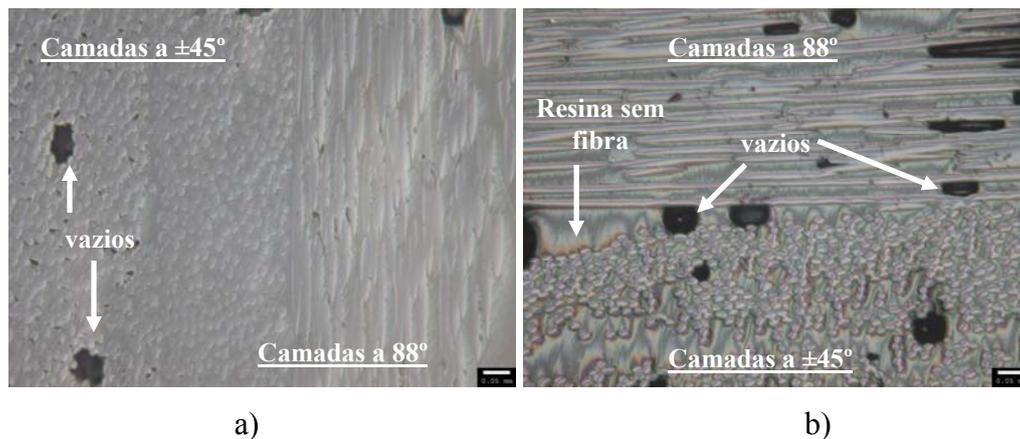


Figura 58 – Amostras cortadas longitudinalmente observadas no microscópio ótico: a) fibra de vidro “E” (100x) e b) fibra de vidro “S” (100x).

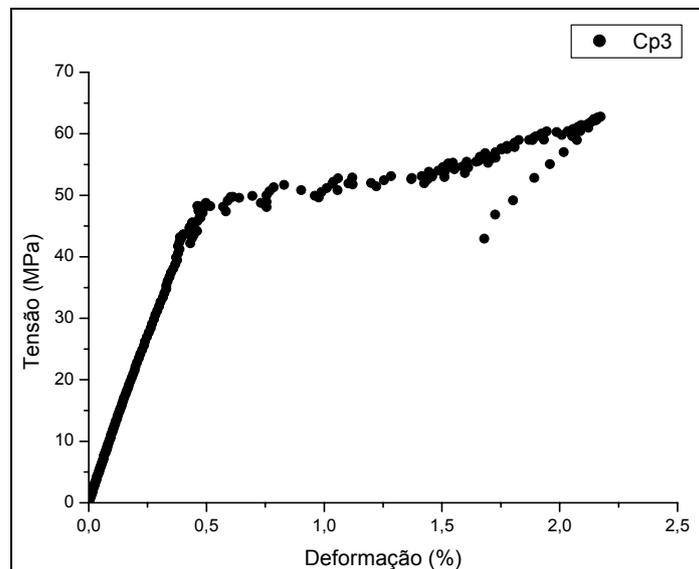
4.8. Ensaios de Tração dos Tubos

Os ensaios de tração foram realizados em dois tipos de corpos de prova: (1) Em corpos de prova retirados dos tubos longitudinalmente e (2) e anéis retirados transversalmente.

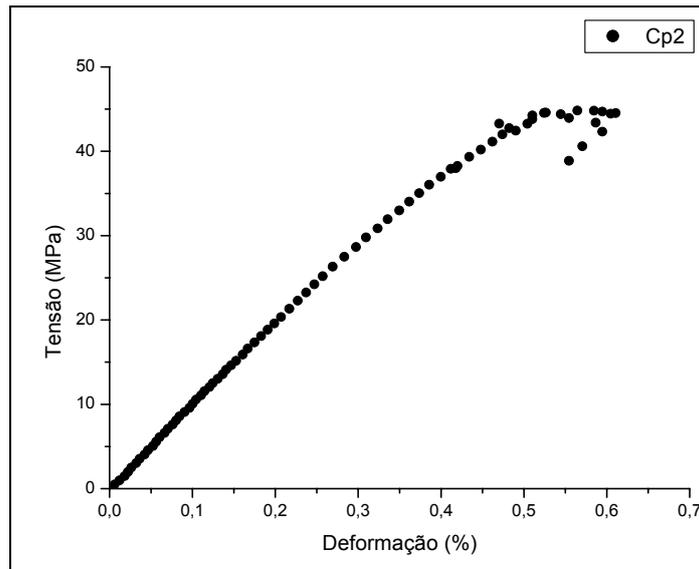
4.8.1. Tração em Corpos de Prova Longitudinais

As curvas tensão-deformação características do ensaio de tração dos seis corpos de prova podem ser vistas na Figura 59, onde pode-se observar que os gráficos produzidos apresentam uma parte inicial linear e uma parte final descontínua. Esse fato pode ser explicado devido à configuração das camadas estarem a 88° e $\pm 45^\circ$ com o eixo de tração da máquina. Quando as camadas com angulação a 88° começam a trincar, o extensômetro escorrega no corpo de prova, fazendo com que o mesmo varie em sua aquisição de dados. Esse escorregamento para os corpos de prova híbridos foi intenso, devido ao número de trincas produzidas nesses corpos de prova ser bem superior aos corpos de prova constituídos de fibra de vidro tipo S e tipo E, onde o extensômetro praticamente zerou a aquisição dos dados de deformação (Figura 59 c).

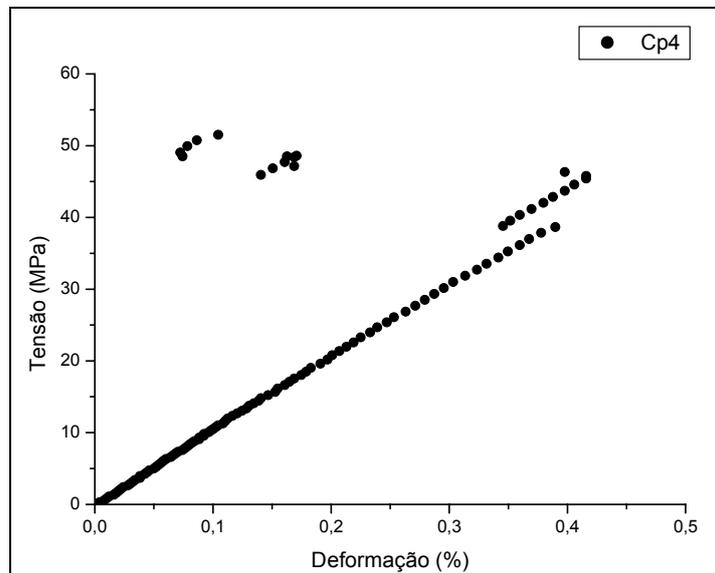
A célula de carga também sente a propagação de trincas ao longo dos corpos de prova, através de descargas que fazem o valor de tensão oscilar. Essa descarga, após a propagação de cada trinca, ocasiona na diminuição da força aplicada que em seguida começa a aumentar. A foto das trincas produzidas em um corpo de prova de tração híbrido que promovem esse comportamento irregular da curva pode ser vista na Figura 60.



a)



b)



c)

Figura 59 – Curvas tensão-deformação características dos corpos de prova testados: a) Epóxi/ fibra de vidro “S”, b) Epóxi/ fibra de vidro “E” e c) híbrido.

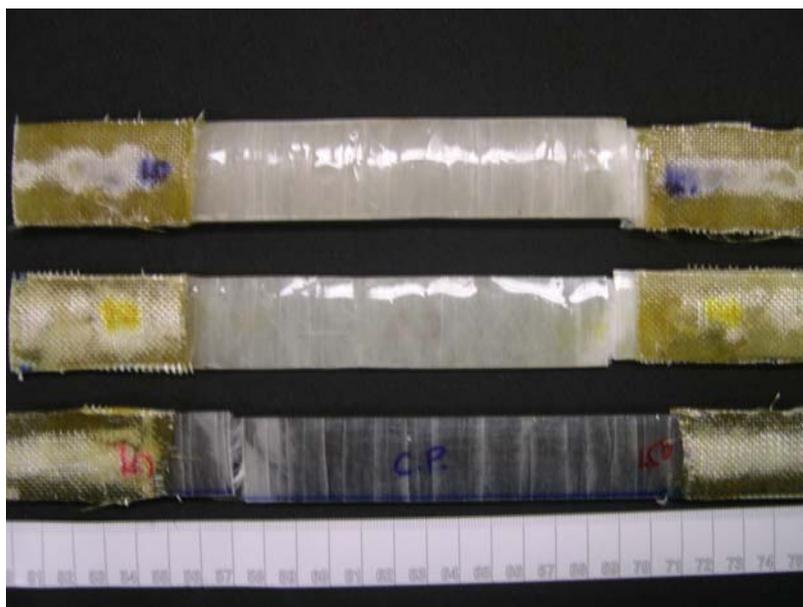


Figura 60 – Trincas produzidas ao longo dos corpos de prova durante ensaios de tração.

Esse comportamento final não-linear dos corpos de prova divide os valores de tensão obtidos em dois: (1) Tensão máxima de ruptura, que dá o valor máximo de tensão quando o material falha completamente e (2) Tensão de falha, que é a tensão máxima da área linear da curva, caracterizada pelo início das trincas, de onde se obtém os valores de módulo de elasticidade e deformação. Os valores das propriedades citados acima para cada material estudado podem ser observados na Tabela 29.

Tabela 29 – Propriedades mecânicas de tração de amostras retiradas dos tubos.

Cp's	Tensão Máxima de Ruptura (MPa)	Tensão de Falha (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Epóxi/Vidro "E"	58,49 ± 9,99	44,00 ± 2,24	8,60 ± 0.31	0,497 ± 0,034
Epóxi/Vidro "S"	60,98 ± 6,90	41,80 ± 0,66	10,29 ± 0.39	0,400 ± 0,045
Híbrido	51,65 ± 4,13	35,79 ± 3,00	11,31 ± 0.81	0,288 ± 0,012

Os baixos valores de tensão e de módulo de elasticidade obtidos nesses testes, em relação aos laminados unidirecionais, devem-se provavelmente ao arranjo das fibras (88° e ±45°) e também ao baixo número de camadas a 45° nos tubos (duas) que nesses arranjos é que suportam mais os esforços trativos. Assim eles não apresentam boa eficiência sob tração, fato explicado no trabalho de Tew (1993) que diz que fibras

helicoidais enroladas a ângulos mais próximos das fibras circunferenciais resistem preferencialmente a carregamentos circunferenciais tornando-se menos efetivas para o carregamento axial. Esses valores evidenciam a necessidade de um maior número de camadas centrais e a utilização de um ângulo mais próximo ao do eixo de tração, que suportam os esforços axiais, aumentando a resistência à tração e a rigidez do material.

Os testes LSD de Fisher, para cada propriedade mecânica, que mostra se há ou não diferença significativa entre os resultados podem ser vistos nas Tabelas 9, 10 e 11 no apêndice. O limite de confiança foi de 95% e, desta forma valores inferiores a 0,05 indicam que há diferença significativa.

A análise estatística apresentou diferença significativa para a tensão de falha dos corpos de prova híbridos em relação aos corpos de prova de fibra de vidro tipo E e tipo S. Essa diferença provavelmente ocorreu porque a fibra de carbono quando testada em ângulos $\pm 45^\circ$ perdem resistência, fato observado no trabalho de Morioka e Tomita (2000). Nesse trabalho eles estudaram o efeito da seqüência de camadas nas propriedades mecânicas e comportamento de fratura de laminados compósitos de carbono. Quanto ao módulo de elasticidade e a deformação, todos os materiais testados apresentaram diferença significativa, mostrando que as fibras estudadas mesmo estando em um arranjo diferente do unidirecional preservam suas características, maior módulo para a fibra de carbono e maior deformação para a fibra de vidro “E”.

Nos materiais testados, foi observado que todos os corpos de prova estudados apresentaram modos de falha semelhantes (Figura 61). Inicialmente foram produzidas trincas ao longo dos corpos de prova nas camadas a 88° com o eixo de tração referente às camadas circunferenciais do enrolamento. Em seguida pelo descolamento interfacial entre as camadas a 88° e $\pm 45^\circ$, e por último falha nas camadas a $\pm 45^\circ$, caracterizada pelo desligamento interfacial fibra/matriz ao longo dessas camadas, e deslocamento de uma das partes fraturadas devido à tentativa de alinhamento dessas fibras com o eixo de tração por causa da tensão cisalhante (Figura 61).

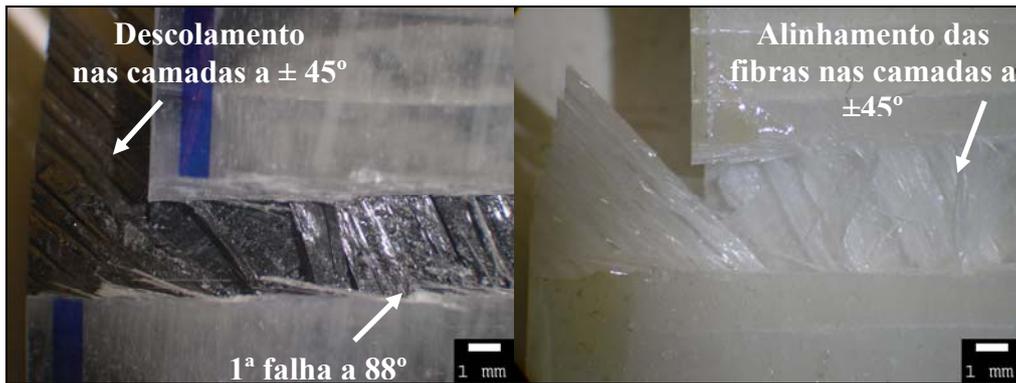


Figura 61 – Análise das falhas em corpos de prova híbrido e de fibra de vidro “S” ensaiados sob tração.

Os modos de falha observados nas camadas a 88° e $\pm 45^\circ$, também foram verificados no trabalho de Morita e Tomita (2000), onde as camadas nos diferentes arranjos dos laminados apresentaram falhas semelhantes. Nos corpos de prova, estudados por eles, com arranjos $0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ e $\pm 45^\circ$, as camadas a 90° apresentaram trincas e desligamento interfacial fibra/matriz ao longo dessas camadas. Para as camadas a $\pm 45^\circ$ eles observaram que a falha ocorreu predominantemente pelo desligamento interfacial fibra/matriz ao longo dessas camadas.

Na Figura 62 pode ser vistas as variadas áreas de falha dos corpos de prova dos materiais testados. Nos corpos de fibra de vidro “S” três falharam na área útil, dois no tab e um abaixo do tab. Nos corpos de fibra de vidro “E” foram um na área útil, quatro abaixo do tab e um no tab. Já para os corpos de prova híbridos três falharam na área útil e três abaixo do tab. Os coeficientes de variação obtidos para as propriedades mecânicas foram inferiores a 17% para tensão máxima de ruptura, a 8.5% para tensão de falha, a 7% para o módulo de elasticidade e a 11% para a deformação, esses efeitos foram desconsiderados.

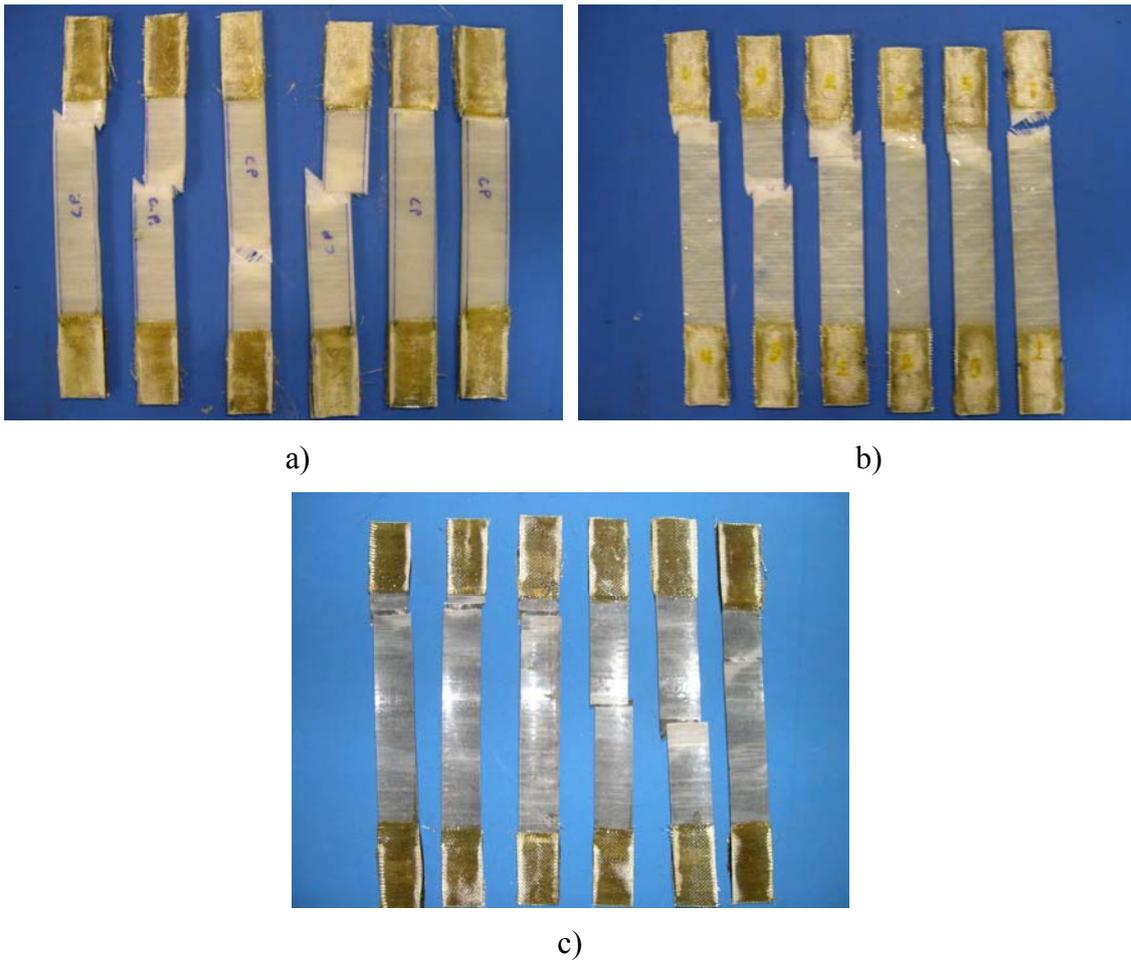


Figura 62 – Corpos de prova ensaiados: a) epóxi/vidro “S”, b) epóxi/vidro “E” e c) híbrido.

4.8.2. Tração em Anéis

As curvas tensão-deslocamento características dos anéis de epóxi/vidro “E”, epóxi/vidro “S” e híbrido podem ser observadas na Figura 63. A parte inicial da curva corresponde ao ajuste do sistema (acomodação do anel e das peças).

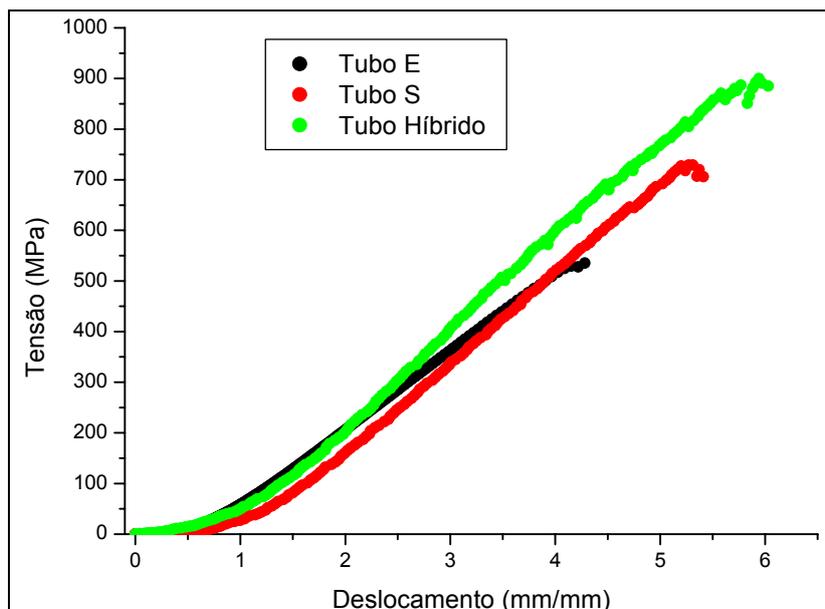


Figura 63 - Curvas tensão-deslocamento dos materiais testados.

Os valores de tensão máxima obtidos nos testes e do módulo de elasticidade retirado do coeficiente angular da parte linear da curva, para os três anéis, podem ser vistos na Tabela 30. Os valores de tensão máxima se apresentaram semelhantes aos dos laminados unidirecionais de fibras de vidro “E” e superiores para os anéis de fibra de “S” e híbrido, porém inferiores para todos os materiais quando relacionados com o módulo de elasticidade. A presença da fibra de carbono nas camadas centrais a $\pm 45^\circ$, nos anéis híbridos, aumentou em 37% a resistência do anel de fibra de vidro “S”, melhorando o desempenho dessa fibra nos testes. Os coeficientes de variação apresentaram valores abaixo de 20% para todos os materiais testados, em ambas propriedades, inferiores a 11% para tensão máxima e inferiores a 5.5% para o módulo de elasticidade.

Os valores dos módulos de elasticidade obtidos para os anéis, bem diferente dos valores de tensão máxima, pode ser explicado por Kaynak *et al.* (2005) que estudaram a variação dos módulos de elasticidade em anéis testados com diferentes angulações. Nesse trabalho eles observaram que à medida que o ângulo de enrolamento dos anéis diminuía ($90^\circ \rightarrow 65^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 25^\circ \rightarrow 0^\circ$) o valor do módulo de elasticidade diminuiu também, tanto para os anéis construídos com fibra de vidro como para os anéis produzidos com fibra de carbono. Porém, eles observaram que para fibra de carbono em ângulos inferiores a 45° apresentavam um valor de módulo de elasticidade menor que

para as fibras de vidro de mesmo ângulo. Em média uma diminuição de 82% no valor do módulo para fibras de carbono e de 75% para a fibra de vidro.

Tabela 30 – Propriedades mecânicas dos anéis testados.

Tubos	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Epóxi/Vidro “E”	497,70 ± 28,73	14,41 ± 0,79
Epóxi/Vidro “S”	820,79 ± 72,44	17,63 ± 0,30
Híbrido	1311,81 ± 146,69	18,52 ± 0,47

A análise estatística, pelo teste de Fisher, das propriedades dos anéis testados apresentou diferença significativa para todos os materiais, mostrando que tanto a utilização de diferentes fibras na produção do anel como a substituição das camadas centrais por fibra de carbono modificam as propriedades finais do tubo.

Os modos de falha (Figura 64) observados para os anéis de fibra de vidro “E” e fibra de vidro “S” mostraram-se semelhantes, com propagação de trincas ao longo do anel nas regiões próximas a seção reduzida que fraturou, quebra das fibras perpendicular ao eixo de tração nas camadas a 88° e descolamento interfacial fibra/matriz nas camadas a ±45°. Para metade dos corpos de prova de fibras de vidro “E” e “S” também foram observadas delaminações na superfície externa do anel iniciada na área de seção reduzida entre as camadas a 88° e ±45°. Já para os anéis híbridos o modo de falha apresentou quebra das fibras na direção perpendicular ao carregamento para ambas as camadas, 88° e 45°. Modos de falha semelhantes aos obtidos no presente estudo foram observados no trabalho de Kaynak *et al.* (2005) quando estudaram o uso do teste de anel, efetuados segundo a mesma norma (ASTM D 2290-00), sobre os parâmetros de processo de tubos compósitos enrolados a 0°, ±45° e 90° por enrolamento filamentar, citados na seção de referências bibliográficas.

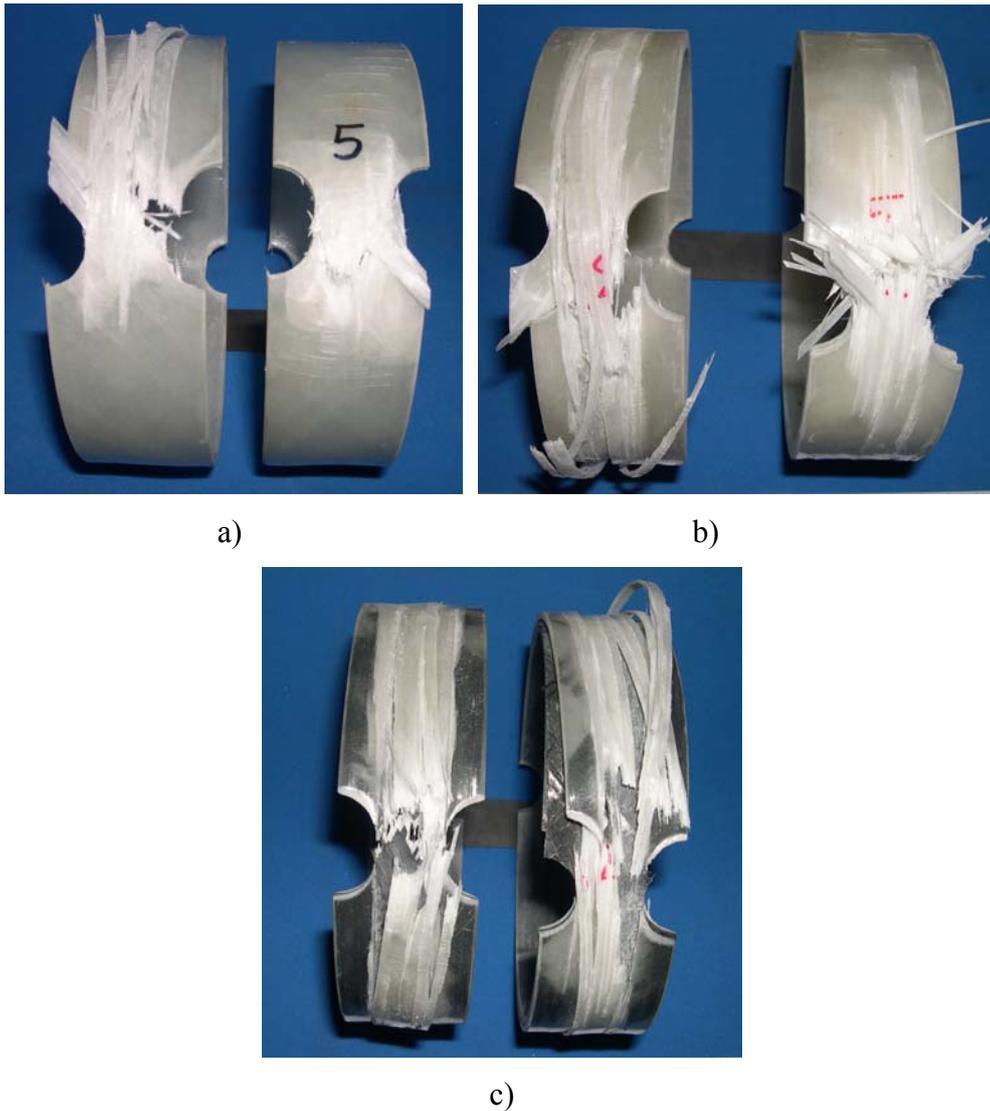


Figura 64 – Foto dos modos de falha característicos: a) anéis de fibra de vidro “E”, b) anéis de fibra de vidro “S” e anéis híbridos.

Levando-se em conta a importância da fração volumétrica de fibras nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos, é válido ressaltar que, os tubos produzidos com fibra de vidro do tipo E podem apresentar melhores valores em testes mecânicos (testes de tração em corpos de prova retirados longitudinalmente dos tubos e de anel) já que esse tubo apresentou diferença significativa, na análise estatística, em relação aos demais.

4.9. Considerações Finais

Tendo em vista a utilização para a qual os materiais estudados se destinam, aplicação como risers, um resumo com todas as propriedades mecânicas (Tabela 31) foi feito de modo a ajudar na escolha do material mais adequado para esse fim.

Os risers são estruturas que estão sujeitas a diversos carregamentos como: pressão interna e externa, empuxo e esforços trativos no topo do *riser* devido ao próprio peso. Os risers também devem apresentar rigidez de modo a garantir sua posição vertical. Esses fatores exigem dos materiais para essa aplicação resistência a carregamentos circunferencial e de tração, e módulo de elasticidade suficiente para fornecer rigidez ao material.

Na Tabela 31 pode ser visto que para os testes de anel do compósito híbrido a tensão máxima apresentou valores bem superiores aos dos compósitos das outras fibras, fator predominantemente importante já que esse teste nos dá a idéia do quanto o material resiste a tensões circunferenciais, resultante das pressões internas e externas a que os risers estão submetidos. O módulo de elasticidade, que mede a rigidez do material, apresentou nos dois ensaios mecânicos (anel e tração) valores estatisticamente maiores para os corpos de prova híbridos do que para os de fibra de vidro tipo E e S. Nos testes de tração, referentes à resistência axial, os corpos de prova fabricados com fibras de vidro tipo E e S não apresentaram diferença estatística, mas superiores aos valores dos corpos de prova híbridos. Maiores valores de deformação são requeridos desses materiais quando sua finalidade é a produção de risers rígidos carretáveis, que necessitam do menor ângulo de dobramento possível, para serem enrolados em carretéis facilitando o transporte. Melhores valores de deformação foram obtidos para os tubos produzidos com fibra de vidro tipo E.

Em resumo, com base nos carregamentos a que os risers estão submetidos, o tubo híbrido produzido apresentou, no geral, melhor desempenho que os tubos de fibra de vidro tipo E e tipo S.

Tabela 31 – Resumo das propriedades mecânicas estudadas.

Propriedades Mecânicas		Materiais Estudados		
		Epóxi/ vidro “E”	Epóxi/ vidro “S”	Híbrido
Ensaio de Anel	Tensão Máxima (MPa)	497,70 ± 28,73	820,79 ± 72,44	1311,81 ± 146,69
	Módulo de Elasticidade (GPa)	14,41 ± 0,79	17,63 ± 0,30	18,52 ± 0,47
Testes de Tração	Tensão de Falha (MPa)	44,00 ± 2,24	41,80 ± 0,66	35,79 ± 3,00
	Módulo de Elasticidade (GPa)	8,60 ± 0,31	10,29 ± 0,39	11,31 ± 0,81
	Deformação (%)	0,497 ± 0,034	0,400 ± 0,045	0,288 ± 0,012

5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos chegou-se as seguintes conclusões:

- A produção de tubos compósitos com a máquina de enrolamento filamental revelou-se rápida e adequada para as angulações estudadas (88° , $\pm 45^\circ$);
- No enrolamento filamental, a utilização de fibras com um número menor de filamentos por cabo, como a fibra de vidro “E” estudada, permitiu a produção de um compósito com melhor homogeneidade;
- A utilização de fibras com diferentes quantidades de filamentos também ocasionou na produção de tubos com diferentes espessuras e diâmetros externos;
- O melhor escoamento da resina nas fibras de vidro “E”, no banho durante o enrolamento, acarretou em menor fração volumétrica de fibras nesse e, conseqüentemente, menor densidade os contrário dos tubos produzidos com fibra de vidro “S” e híbrido;
- A presença das camadas de fibra de carbono, no tubo híbrido, não influenciou a densidade final do tubo em relação aos demais;
- Nos corpos de prova longitudinais retirados dos tubos, para ensaio de tração, apresentaram menor resistência axial que os laminados, devido à configuração e ao número de camadas centrais utilizados para essa função;
- A técnica de ensaio de anel se apresentou precisa para a determinação da tensão máxima dos tubos, com coeficientes de variação inferiores a 11%;
- À utilização das camadas centrais de fibra de carbono a $\pm 45^\circ$, no tubo híbrido, aumentou a resistência dos anéis em 37% quando comparado com os anéis constituídos somente com fibra de vidro “S”;
- Dos materiais testados, o tubo híbrido apresentou, no geral, melhor desempenho mecânico, com maior tensão máxima (no teste de anel) e maiores módulos de elasticidade (nos testes de tração dos corpos de prova retirados longitudinalmente e anel). Sendo assim mais indicados na aplicação de risers quando sua aplicação exigir mais resistência e rigidez, porém se exigência na aplicação for maior alongação o tubo de fibra de vidro seria mais indicado.

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Verificar a relação entre o ensaio de anel e os ensaios de pressão, através da comparação das técnicas;
- Otimizar o ensaio de anel, através da instrumentação dos anéis, utilizando-se extensômetro para medir a deformação circunferencial;
- Avaliar a influência da tensão aplicada nas fibras durante o processo de enrolamento filamental nas propriedades mecânicas do tubo;
- Estudar a variação do número de camadas e de angulações centrais no tubo visando melhor o desempenho mecânico axial no que tange à sua resistência e módulo de elasticidade.

7. Referências Bibliográficas

Abdalla F. H., Mutasher S. A., Khalid Y. A., Sapuan S. M., Hamouda A. M. S., Sahari B. B., Hamdan M. M., 2007, “Design and Fabrication of Low Cost Filament Winding Machine”, *Materials and Design*, vol. 28, pp. 234-239.

Albuquerque, 2005, Desenvolvimento de material compósito para reforço de dutos de aço. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camussi, A. B., 2007, *Desenvolvimento de Material Compósito visando a Fabricação de Risers Rígidos pro Enrolamento Filamentar*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASTM D3039M-95 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” In: 1995 Annual Book of ASTM Standards, v.15.03, American Society for Testing and Materials.

Astrom, B. T., 2000, *Pultrusion, Processing of Composites*, Edited by Davé, R. S. and Lobs, A. C. Series Editor: Warren Baker Hanser.

Ávila, G. G., 2005, *Cálculo de Fadiga de Risers Rígidos através da Mecânica da Fratura*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Barcia, F. L., Amaral, T. P., Soares, B. G., 2003, “Syntesis and Properties of Epoxy Resin Modified with Epoxy-terminated Liquid Polybutadiene”, *Polymer*, vol. 44, pp. 5811-5819.

Beyle, A. I., Gustafson, C. G., Kulakov, V. L., Tarnopol’kii, Yu. M., 1997, “Composite Risers for Deep-water Offshore Technology: Problems and Prospects”, *Mechanics of Composite Materials*, vol. 33, Nº 5, pp. 403-414.

Bruni, P. B., “Petrobras: Estratégia e esforço tecnológico para alavancar competitividade”, *Análise da Conjuntura das Indústrias do Petróleo e do Gás*, n.3,

disponível em: <http://www.ie.ufrj.br/infopetro/pdfs/petrogas-mar2002.pdf> . Acesso em 07/11/2006.

Callister Jr, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC.

Carvalho, F. J. X. de, 1992, *Fiberglass X Corrosão*, São José dos Campos, SP, Patrocinadores.

Chung, D. D. L., 1994, *Carbon fiber composites*, editora Butterworth-Heinemann.

Debeir, J-C *et al.* “A Expansão do Sistema energético capitalista”, *Uma história da energia*. Brasília: Ed. da UnB, p. 169-206, 1993, apud in José Benedito Ortiz Neto e Armando Dalla Costa, A Petrobrás e a exploração de Petróleo *Offshore* no Brasil: um *approach* evolucionário, Revista Brasileira de Economia, 2005, disponível em:<http://www.economia.ufpr.br/publica/textos/2006/Petrobras%20Neto%20e%20Armando%20RBE.doc>. Acesso em 07/11/2006.

Dow Chemical Company, 1999, “*Dow Liquid Epoxy Resins*”, Technical Catalogue.

Dutra, R. C. L., Soares, B. G., Campos, E. A., Silva, J. L. G., 2000, “Hybrid Composites Based on Polypropylene and Carbon Fiber and Epoxy Matrix”, *Polymer*, vol.41, pp. 3841-3849.

Farfán, D. C., 2005, *Estudo do Comportamento Estático e Dinâmico de um Riser Vertical com Bóia de Subsuperfície*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

Fiorelli, J., 2002, *Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço em Vigas de Madeira*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Franco, L. D., 2004, *Implementação Computacional em Ambiente Paralelo de memória Distribuída para Análise Acoplada de Sistemas Offshore*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Freechan, M., Fowler, H., 2001, “*Changing the Paradigm with Spoolable Composite Pipe*”, *Composite Materials for Offshore Operations – 3*, Eds. University of Houston – CEAC, pp. 385-395.

Furtado, A. T., 1996, “*A Trajetória Tecnológica da Petrobrás na Produção Offshore*”, *Espacios*, Vol. 17 (3). Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a96v17n03/32961703.htm> Acesso em 10/11/2006.

Gibson, R. F., 1994, “*Principles of Composites Material Mechanics*”, Ed. 1, New York, Mc Graw Hill.

Guesnon, J., Gaillard, Ch., Richard, F., 2002, “*Ultra Deep Water Drilling Riser Design and Relative Technology*”, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 57, N° 1, pp. 39-57.

http://www.motonline.pt/left/tecnica/artigos_interesse/index.asp?ART_ID=52 Acesso em 06/11/2006.

http://www.saint-gobain-vetrotex.com.br/portugues/process_filwind.htm Acesso em 06/11/2006.

http://www.vetrotexeurope.com/fabrication_processes/re_handlay.html Acesso em 22/11/2006

Jin, Fan-L., Park, Soo-J., 2007, “*Improvement in Fracture Behaviors of Epoxy Resins Toughened with Sulfonated Poly(ether sulfone)*”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92, pp. 509-514.

Johnson, D. B., Baldwin, D. D., Him Lo, K., “*Composite Production Riser Development and Qualification Test Result*”, *Composite Materials for Offshore*

Operations – 3, S. S. Wang, J. G. Williams and K. H. Lo, Eds. University of Houston – CEAC, 2001, pp. 109-123.

Jordano, J., Maluf, V., “*Resinas Epóxi*”. Disponível em: <http://www.carbono.com.br/artigo/Artigo8.pdf> Acesso em 06/11/2006.

Kaddour, A. S., Al-Salehi, F. A. R., Al-Hassani S. T. S., Hinton, M. J., 1996, “Burst Behaviour of $\pm 75^\circ$ Filament-wound Kevlar/Epoxy and Carbon/Epoxy Tubes at High Loading Rates”, *Composites Science and Technology*, vol. 56, pp. 1151-1159.

Kaynak, C., Erdiller, E. S., Parnas, L., Senel, Fikret, 2005, “Use of Split-disk Test for the Process Parameters of Filament Wound Epoxy Composite Tubes”, *Polymer Testing*, vol. 24, pp. 648 - 655.

Lopes, F. C., 2004, *O conflito entre a Exploração Offshore de Petróleo e a Atividade Pesqueira Artesanal*, Monografia de Bacharelado, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Mertiny, P., Ellyin, F., Hothan, A., 2004, “An Experimental Investigation on the Effect of Multi-angle Filament Winding on the Strength of Tubular Composites Structures”, *Composites Science and Technology*, vol.64, pp. 1-9.

Meniconi, L. C. M., Reid, S. R., Soden, P. D., 2001, “Preliminary Design of Composite Riser Stress, joints”, *Composites*, Part. A vol.32, pp. 597-605.

Ortiz Neto, J. B., Costa, A. D., 2005, “*A Petrobrás e a Exploração de Petróleo Offshore no Brasil: Um Approach Evolucionário*”, Revista Brasileira de Economia, disponível em: <http://www.economia.ufpr.br/publica/textos>. Acesso em 07/11/2006.

Ozturk, A., Kaynak, C., Tincer, T., 2001, “Effects of Liquid Rubber Modification on the Behaviour of Epoxy Resin”, *European Polymer Journal*, vol. 37, pp. 2353 – 2363.

Pelsoci, T. M., 2004, “*Composites Manufacturing Technologies: Applications in Automotive, Petroleum and Civil Infrastructure Industries, Composite Production Riser*

Case Study”, Prepared for: Economic Assessment Office Advanced Program National Institute of Standards and Technology Gaithersburg.

Pilato, L. A., Michino, M. J., 1994, “*Advanced composite Materials*”, New York, Springer-Verlag.

Pinho, A. L. S. de, 2001, *Redução de tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rodrigues, G. J. O., 2004, *Ferramentas Computacionais para Otimização e Síntese de Sistemas Híbridos de Risers Baseados no Conceito de Bóia de Subsuperfície*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rousseau, J., Perreux, D., Verdière, N., 1999, “The Influence of Winding on the Damage behaviour of Filament-Wound pipes”, *Composites Science and Technology*, vol. 59, pp. 1439-1449.

Salama, M. M., 1993, “*Advanced Composites for the Offshore Industry: applications and challenges*”, Composites Materials for Offshore Operations: Proceedings of the First International Workshop, Houston, Texas, USA, 26-28 Oct. 1993.

Selby, K., Miller, L. E., 1975, “Fracture Toughness and Mechanical Behavior of an Epoxy Resin”, *Journal of Materials Science*, v. 10, pp. 12-24.

Shen, F. C., 1995, “A Filament Wound Structure Technology Overview”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 42, pp. 96-100.

Shim, M.-J., Kim, S.-W., 1997, “Cure Reaction and Mechanical Properties of DGEBA/MDA/Nitrile System”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 47, pp. 198-202.

Sindipetro, “*A Atividade Offshore no Brasil*”. Disponível em: <http://www.clickmacae.com.br>.

Sperling, H., *“Introduction to Physical Polymer Science”*, 1 ed. New York, John Wiley & Sons.

Storhaug, T., Stjern, G., Paulshus, B., Salama M. M., 2001, *“Significant Achievements in Composites Technology in 2001. Qualification and Testing of Composites Tethers and Risers for Ultra Deep Water. Including Commenced Field Demonstration at Heidrun TLP”*, 13th Deep Offshore Technology Conference 2001, New Orleans, USA.

Taier, R.; Araújo, E. C. de; Godefroid, L. B., 2002, *“Fadiga em plataformas offshore fixas com modelos em elementos finitos”*, Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 55, n. 3. Disponível em: <http://www.scielo.br>.

Tarnopol'skii, Yu. M., Kulakov, V. L., Mungalov, D. D., 1999, *“Composites in Offshore Technology in the Next Century”*, *Mechanics of Composite Materials*, vol. 35, Nº 5, pp. 365-372.

Tew, B. W., 1993, *“Design of Composites Products for Oil Field Applications”*, University of Idaho.

Yamini, S., Young, R. J., 1980, *“The Mechanical Properties of Epoxy Resins, Part 1, Mechanism of Plastic Deformation”*, *Journal of Material Science*, v. 15, pp.1814-1822.

Zhong Z., Zheng S., Huang J., Cheng X., Guo Q., Wei j., 1998, *“Phase Behaviour and Mechanical Properties of Epoxy Resin Containing Phenolphthalein Poly(ether ether Ketone)”*, *Polymer*, vol. 39, Nº 5, pp. 1075-1080.

Zwebn, C., Hahn, H. T., Chou, T., 1989, *“Delaware Composites Design Encyclopedia - Volume 1 / Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials”*, 1 ed. United State of America, Technomic Publishing Company.

8. Apêndice

Segue em anexo, como forma de apêndice, os resultados da análise estatística.

Tabela 1 – Teste LSD para deformação dos laminados.

Teste LSD – Fisher/ Tensão de Ruptura				
	Laminado	{1}	{2}	{3}
1	Epxi/vidro E		0,000044	0,000000
2	Epxi/vidro S	0,000044		0,000000
3	Epxi/carbono	0,000000	0,000000	

Tabela 2 – Teste LSD para Módulo de elasticidade dos laminados.

Teste LSD – Fisher/Módulo de elasticidade				
	Laminado	{1}	{2}	{3}
1	Epxi/vidro E		0,273474	0,000000
2	Epxi/vidro S	0,273474		0,000000
3	Epxi/carbono	0,000000	0,000000	

Tabela 3 – Teste LSD para deformação dos laminados.

Teste LSD – Fisher/Deformação				
	Laminado	{1}	{2}	{3}
1	Epxi/vidro E		0,402417	0,000074
2	Epxi/vidro S	0,402417		0,000037
3	Epxi/carbono	0,000074	0,000037	

Tabela 4 – Teste LSD para o diâmetro interno dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Diâmetro interno				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,000002	0,000001
2	Cps S	0,000002		0,611002
3	Cps E	0,000001	0,611002	

Tabela 5 – Teste LSD para o diâmetro externo dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Diâmetro externo				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,025865	0,000000
2	Cps S	0,025865		0,000000
3	Cps E	0,000000	0,000000	

Tabela 6 – Teste LSD para a espessura dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Espessura				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,000111	0,000000
2	Cps S	0,000111		0,000000
3	Cps E	0,000000	0,000000	

Tabela 7 – Teste LSD para densidade dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Densidade				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,772798	0,142483
2	Cps S	0,772798		0,087884
3	Cps E	0,142483	0,087884	

Tabela 8 – Teste LSD para fração volumétrica de fibras dos tubos.

Teste LSD – Fisher/ Fração volumétrica de fibras				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps E		0,000000	0,000000
2	Cps S	0,000000		0,392806
3	Cps hbrido	0,000000	0,392806	

Tabela 9 – Teste LSD para.tensão de falha dos corpos de prova retirados dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Tensão de falha				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,000116	0,000822
2	Cps E	0,000116		0,380858
3	Cps S	0,000822	0,380858	

Tabela 10 – Teste LSD para. módulo de elasticidade dos corpos de prova retirados dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Módulo de elasticidade				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps E		0,000509	0,000010
2	Cps S	0,000509		0,010126
3	Cps hbrido	0,000010	0,010126	

Tabela 11 – Teste LSD para.deformação dos corpos de prova retirados dos tubos.

Teste LSD – Fisher/Deformação				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps E		0,000363	0,000000
2	Cps S	0,000363		0,000166
3	Cps hbrido	0,000000	0,000166	

Tabela 12 – Teste LSD para módulo de elasticidade dos anéis retirados dos tubos.

Teste LSD – Fisher/módulo de elasticidade				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,000000	0,020467
2	Cps E	0,000000		0,000000
3	Cps S	0,020467	0,000000	

Tabela 13 – Teste LSD para tensão de ruptura dos anéis retirados dos tubos.

Teste LSD – Fisher/tensão de ruptura				
	Tubo	{1}	{2}	{3}
1	Cps hbrido		0,000000	0,000000
2	Cps E	0,000000		0,000006
3	Cps S	0,000000	0,000006	

9. Anexos



Foto 1 – Resvalamento das fibras.

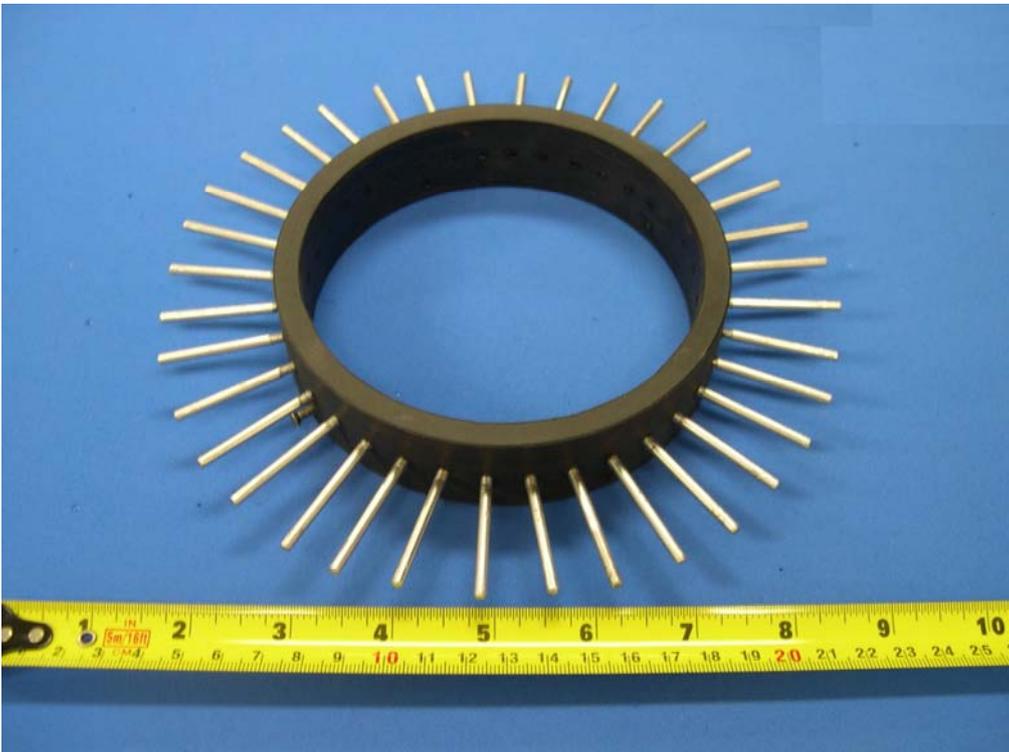


Foto 2 – Anel de pino produzido.

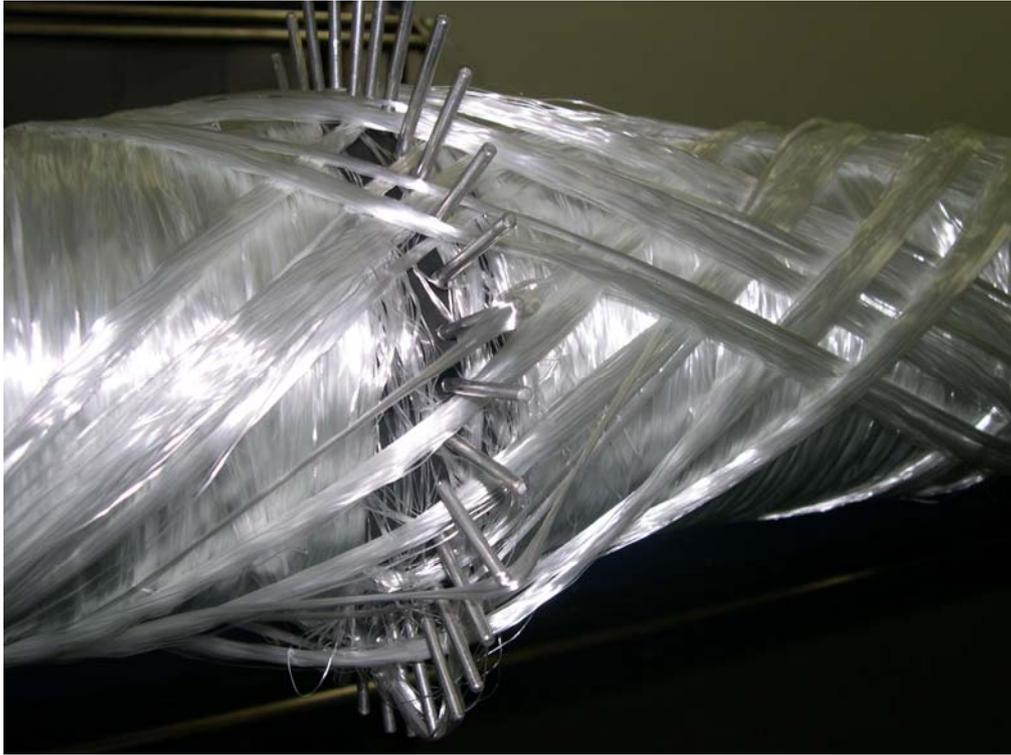


Foto 3 – Teste realizado com os anéis de pinos.



Foto 4 – Teste com anéis de pinos com número de pinos maiores.

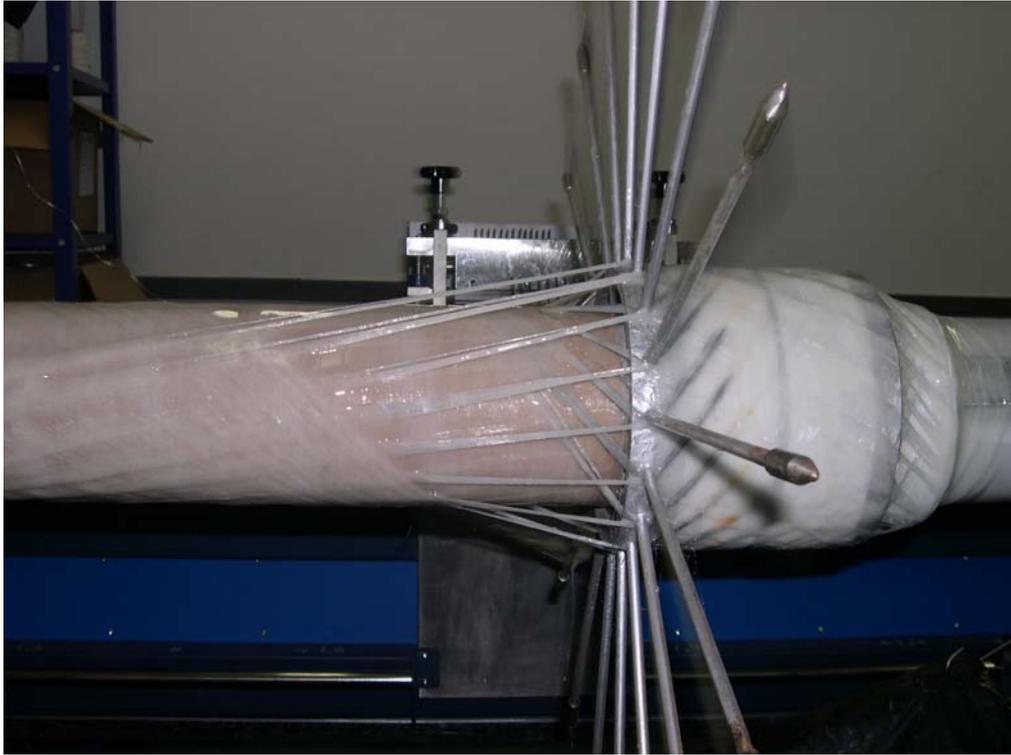


Foto 5 – Testes com anéis de pinos com maior diâmetro de pinos.