

FABRICAÇÃO DE RISERS RÍGIDOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS PELO
PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR

Carolina Gonçalves Coelho Laurindo Leite

PROJETO DE FORMATURA SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovado por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Ledjane Lima Sobrinho, D.Sc.

Prof^a. Marysilvia Ferreira da Costa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO DE 2009

“Uns confiam em carros outros
em cavalos, mas nós faremos menção
do nome do Senhor nosso Deus”.

Salmo 20: 7

Dedico este trabalho ao meu amigo, namorado e marido, Jorge, por me apoiar e me fazer tão feliz. Dedico também ao meu pai, Victor, por ser meu exemplo de vida, e à minha mãe, Conceição, por sempre ter acreditado em mim.

Agradecimentos

À Deus, por me dar forças e me capacitar. Por TUDO, OBRIGADA, SENHOR!!

À meu marido, Jorge, por seu amor, compreensão e por ser sempre presente; por sonhar esse sonho comigo e me ajudar a realizá-lo. TE AMO!!

À minha mãe, que acreditou nesse projeto desde quando ele era apenas um sonho. Obrigada! Ao meu pai, pelos conselhos e apoio. Obrigada! Aos meus irmãos, Isabel e Gustavo, pelo incentivo e carinho. Amo vocês!

À minha tia do coração, Zezé, e ao meu tio Rui, por me acolherem e acreditarem em mim. E também aos meus primos, Mariane e Douglas. Aos meus tios Rita e Ângelo, e à minha prima Raquel, pela grande hospitalidade e carinho.

Aos meus arteiros sobrinhos pelos momentos de alegria e carinho: Alan, Maria Alice, Raquel, Daniel, Ana Beatriz e Davi.

À Ana Paula, minha amiga-irmã, sempre presente, que muito me ajudou com suas orações, amizade, e claro, aulas de matemática. Ao amigo Vinicius, por todo o apoio e, como não poderia deixar de ser, pelas aulas de cálculo.

Aos ilustríssimos membros de minha família: Chris, Sheila, Edineusa e Alan. À Dona Ruth, Ana Cristina e Dona Noemia, pela confiança e carinho. Aos amigos Glauco e Rhayanne.

Aos meus sogros Antonio Jorge e Adelaide, por todo o afeto e aos meus cunhados, Claudia, Evanir, Bruno, Márcia, Jéssica e Fúlvio.

À amiga Patrícia, pelas longas horas de conversa, que sempre faziam com que o tempo passasse rápido demais. À amiga Ligia, pela companhia, amizade e horas e mais horas que passamos juntas. Seu talento e dedicação me inspiram. Aos amigos, Rodrigo e Evandro, companhia nos estudos e trabalhos ou para arrumar o laboratório e cortar corpo de prova. Obrigada.

À meu orientador, Fernando Luiz Bastian, pelos ensinamentos, apoio e orientação. À minha orientadora e amiga, Ledjane, pela amizade e longas horas dispensadas nesta orientação. Obrigada!!

À professora Marysilvia, pela disponibilidade e contribuição nesse aprendizado. Aos professores, Tsuneharu, Ericksson, João Marcos e Pontes, pelo exemplo que marcou minha formação e certamente permeará minha prática profissional.

Ao amigo Denis, por ter feito com que o trabalho ficasse mais divertido. Aos amigos do laboratório de compósitos, Camila Dolavale, Victor Parreira, Edgar, Camilinha, Thayara, Camila Lorençao, Vivian, Letícia Pimentel, Rafael Cidade, Daniel Barboza, Luiz Antônio, Raphael de Araújo, Letícia Soldan, Natália, Miguel, Sânia, Marcelo Gomes, Marta, Fernando Carreteiro, Marcelo Miranda e ao “agregado” Helano, em especial à Ana Angélica, por ter com tanto carinho me ensinado os primeiros passos no laboratório e Marcelo Beltrão, pelo auxilio na formatação deste trabalho.

Ao técnico sr. Julio, pela prontidão e boa vontade e aos técnicos do PEMM: Robson, Nelson, Laércio, João e Oswaldo por toda a assistência. Aos técnicos da engenharia mecânica, por toda a força, literalmente. Aos técnicos e engenheiros do LTS pelos ensaios hidrostáticos. À todos os funcionários da UFRJ, que tornam possível o funcionamento desta Universidade.

Aos amigos das antigas, Renatinha e Paulo Roberto. Às amigas do alojamento, Juliane, Renata, Katerine e Márcia.

Aos amigos Edith, Izalmir e Filipi, pelas orações e incentivo. Ao sr. Paulo, Daniella e Rafael pelas caronas e oração. A todos os amigos da CBA, Comunidade Bíblica do Amor, pelas orações e comunhão.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de iniciação científica.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para concretização desse sonho, Obrigada!

ÍNDICE

Lista de figuras	8
Lista de tabelas	10
1 - Introdução	11
2 - Revisão bibliográfica	13
2.1 - Materiais compósitos	13
2.1.1 - Matriz	13
2.1.1.1 - Resinas epoxídicas	15
2.1.2 - Reforço	16
2.1.2.1 - Fibra de vidro	17
2.1.2.2 - Fibra de carbono.....	18
2.2 - Métodos de fabricação de materiais compósitos.....	19
2.2.1 - Laminação manual	20
2.2.2 - Enrolamento filamentar.....	20
2.3 - Falhas em compósitos	23
2.3.1 - Falhas de laminados	23
2.3.2 - Falhas de tubos	24
2.4 - <i>Risers</i>	25
2.5 - <i>Risers</i> compósitos.....	27
3 - Materiais e métodos	29
3.1 - Materiais.....	29
3.1.1 - Sistema polimérico.....	29
3.1.2 - Reforço	30
3.2 - Métodos.....	31
3.2.1 - Fabricação e caracterização de laminados compósitos	31
3.2.1.1 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados	33
3.2.1.2 - Análise micrográfica dos laminados	34
3.2.1.3 - Ensaio de tração dos laminados	34
3.2.2 - Fabricação e caracterização de tubos compósitos	36
3.2.2.1 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos.....	42
3.2.2.2 - Análise micrográfica dos tubos	42
3.2.2.3 - Ensaio de anel.....	43

3.2.2.4 - Ensaio de pressão hidrostática externa.....	45
4 - Resultados e discussões	46
4.1 - Laminados	46
4.1.1 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados	46
4.1.2 - Análise micrográfica	48
4.1.3 - Ensaio de tração	49
4.2 - Tubos.....	52
4.2.1 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos.....	52
4.2.2 - Análise micrográfica dos tubos	53
4.2.3 - Ensaio de anel.....	56
4.2.4 - Ensaio de pressão hidrostática externa.....	61
5 - Conclusões	66
6 - Sugestões para trabalhos futuros.....	67
7 - Referências Bibliográficas	68
8 - Anexo	73

Lista de figuras

Figura 1 - Grupo epoxídico	15
Figura 2 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA	16
Figura 3 - Padrões de enrolamento da fibra sobre o mandril: a) polar, b) helicoidal e c) circunferencial	21
Figura 4 - Detalhes geométricos do processo de enrolamento	22
Figura 5 - Modos de micro-fratura em laminados com carregamento longitudinal à orientação das fibras: a) quebra de fibra, b) iniciação de trinca na matriz, c) fratura de outras fibras e d) descolamento na interface fibra-matriz	24
Figura 6 - Tipos de configurações para <i>risers</i>	25
Figura 7 - Camada de fibra de vidro	31
Figura 8 - Laminado de fibra de vidro	33
Figura 9 - Dimensões do corpo de prova de ensaio de tração	35
Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de tração do laminado de fibra de vidro	35
Figura 11 - Corpo de prova para ensaio de tração do laminado de fibra de carbono	35
Figura 12 - Máquina de enrolamento filamentar	36
Figura 13 - Configurações dos tubos compósitos fabricados	37
Figura 14 - Mandril colapsável cuja superfície recebeu desmoldante	37
Figura 15 - Revestimento do mandril com plástico de teflon	38
Figura 16 - Mandril enrolado pelo tecido de poliéster	38
Figura 17 - Mandril com tecido já molhado por resina	39
Figura 18 - Camada de fibra de vidro circunferencial	39
Figura 19 - Fibra de vidro com ângulo de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo do mandril	40
Figura 20 - Tubo híbrido com camada de fibra de carbono enrolada a $\pm 45^\circ$	40
Figura 21 - Camada circunferencial de fibra de vidro sobre a camada helicoidal de fibra de carbono no tubo híbrido	41
Figura 22 - Estufa contendo tubo híbrido	41
Figura 23 - Tubo após processo de cura: a) com fibras de vidro e b) com fibras de vidro e carbono	42
Figura 24 - Anel para ensaio de tração	43
Figura 25 - Corpo de prova do tubo de fibra de vidro para ensaio de anel	43
Figura 26 - Corpo de prova de tubo híbrido para ensaio de anel	44
Figura 27 - Dispositivo mecânico para ensaio de anel	44

Figura 28 - Tubo preparado para o ensaio de pressão externa	45
Figura 29 - Câmara de pressão para ensaio hidrostático: a) tubo dentro da câmara e b) tampa da câmara com o transdutor	46
Figura 1 - Micrografia dos laminados compósitos, aumento 200x: a) vidro longitudinal, b) vidro transversal, c) carbono longitudinal e d) carbono transversal	48
Figura 31 - Curva tensão <i>versus</i> deformação comparativa entre os laminados com fibra de vidro e com fibra de carbono	49
Figura 32 - Corpos de prova fraturados após ensaio de tração: a) e b) compósitos de fibra de vidro c), d) e e) compósitos de fibra de carbono	51
Figura 33 - Micrografia dos tubos de fibra de vidro, aumento 100x: a) corte longitudinal tubo 30°, b) corte transversal tubo 30°, c) corte longitudinal tubo 45° d) corte transversal tubo 45°, e) corte longitudinal tubo 60° e f) corte transversal tubo 60°	54
Figura 34 - Micrografia dos tubos híbridos, aumento 200x: a) corte longitudinal tubo 30°, b) corte transversal tubo 30°, c) corte longitudinal tubo 45° d) corte transversal tubo 45°, e) corte longitudinal tubo 60° e f) corte transversal tubo 60° .	55
Figura 35 - Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento representativas dos anéis dos tubos de fibra de vidro, com diferentes ângulos de enrolamento das camadas helicoidais..	57
Figura 36 - Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento representativas dos anéis dos tubos híbridos, com diferentes ângulos de enrolamento das camadas helicoidais de fibras de carbono	57
Figura 37 - Anéis fraturados de tubos de 60°: a) anel do tubo de fibra de vidro e b) anel do tubo híbrido	60
Figura 38 - Anel fraturado do tubo de fibras de vidro: a) fibras a 60° b) ampliação do anel fraturado com fibras a 60°	60
Figura 39 - Gráfico pressão <i>versus</i> tempo de carregamento para tubos com fibra de vidro	61
Figura 40 - Gráfico pressão <i>versus</i> tempo de carregamento para tubos híbridos	62
Figura 41 - Tubos fraturados após ensaio de pressão hidrostática externa: a) tubo de fibra de vidro $\pm 60^\circ$ e b) tubo híbrido $\pm 45^\circ$	64
Figura 42 - Vista interna do tubo de fibra de vidro fraturado após ensaio de pressão hidrostática externa	65

Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição de fibras de vidro	18
Tabela 2 - Propriedades mecânicas sob tração uniaxial do sistema polimérico	30
Tabela 3 - Propriedades da fibra de vidro tipo E	30
Tabela 4 - Propriedades da fibra de carbono	30
Tabela 5 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados	47
Tabela 6 - Comparação entre as propriedades dos laminados de fibra de vidro e de carbono	50
Tabela 7 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos de fibra de vidro e híbridos	52
Tabela 8 - Tensão de ruptura e deslocamento médios para diferentes ângulos de enrolamento da fibra	58
Tabela 9 - Valores de pressão <i>versus</i> tempo de carregamento para ensaio de pressão hidrostática externa	63

1 – Introdução

O petróleo, fonte de energia não renovável tão utilizada e explorada atualmente, desperta múltiplos interesses e exige constantes soluções para otimizar sua extração e seu uso. Portanto, faz-se necessária a busca por novas tecnologias e pesquisas de desenvolvimento de materiais que minimizem custos e aperfeiçoem a produção.

Até o momento ainda não foi apresentada uma matriz energética viável para substituir em curto prazo os combustíveis fósseis, como o petróleo. Assim sendo, a tão propalada auto-suficiência na produção de petróleo alcançada pelo Brasil em 2006 foi, sem dúvida, uma conquista assaz importante para o país do ponto de vista estratégico. Recentes descobertas na bacia de Santos reforçam ainda mais esta posição. Não obstante, as reservas de petróleo no Brasil se encontram principalmente em regiões de águas profundas (400 a 1000 m) e ultraprofundas (mais de 1000 m de profundidade) (LOPES, 2004).

Com a grande demanda de exploração *offshore* de petróleo em águas cada vez mais profundas, aumenta a necessidade de aprimoramento de equipamentos e plataformas. Um desses equipamentos que tem sofrido com o aumento da profundidade de exploração do petróleo é o *riser*, tubo que faz o transporte de petróleo do poço, no leito marinho, aos navios e plataformas na superfície. Um *riser* pode estar submetido a tensões trativas em função de seu próprio peso e flexivas devido às oscilações do mar, além de terem que resistir à pressão interna devido à passagem de fluido em seu interior e pressão externa devido à profundidade. Os *risers* feitos por materiais compósitos apresentam vantagens sobre os convencionais em aço porque são mais leves, sem deixar a desejar em resistência mecânica, e exibem maior resistência à fadiga e à corrosão (SOUZA *et al.*, 2007).

A diminuição de peso do *riser* acarreta uma vantajosa diminuição de custos, pois minimiza reforços estruturais nas plataformas, investimentos em flutuadores e tensionadores e equipamentos que sustentam a coluna de *riser*.

Portanto, tendo em vista a grande demanda na área de exploração *offshore*, o objetivo deste trabalho foi fabricar e caracterizar tubos compósitos com matriz

epoxídica e reforço de fibra de vidro e híbrido (fibras de vidro e de carbono). Objetivou-se também, avaliar se há melhora significativa no reforço com introdução das fibras de carbono e qual a influência da variação do ângulo de enrolamento de fibras nas propriedades mecânicas.

2 – Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão sobre materiais compósitos e suas aplicações em *risers*, dando-se ênfase aos tópicos relacionados com o presente trabalho.

2.1 – Materiais compósitos

Um compósito pode ser considerado como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER, 2002). A grande vantagem dos materiais compósitos é agregar as melhores propriedades de mais de um tipo de material num só.

Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma é chamada de matriz, que é continua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa ou reforço. Os compósitos podem ser classificados em três grupos, de acordo com o seu tipo de reforço. São eles: compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais.

As fibras num compósito podem estar dispostas como fibras curtas, ou como fibras longas. Quando as fibras possuem comprimento superior ao comprimento crítico de fibras são consideradas fibras longas e quando possuem comprimento inferior, são consideradas fibras curtas (CALLISTER, 2002).

A interface fibra-matriz é a responsável por transmitir para as fibras solicitações a que a matriz é submetida. Se não houver uma adesão adequada entre as fibras e a matriz, dizemos que o reforço não é eficaz e a resistência mecânica pode ser inferior a do material da matriz utilizado monoliticamente; isto porque a fibra ao invés de reforçar pode atuar como um concentrador de tensões na matriz (CHAWLA, 1987).

2.1.1 – Matriz

A matriz de um material compósito exerce total influência em suas propriedades, pois determina a resistência do compósito à maioria dos processos degradativos que

causam, eventualmente, a falha da estrutura, incluindo os danos de impacto, a delaminação, a absorção de água, ataque químico, resistência à corrosão e resistência à oxidação. Além de exercer influencia nas propriedades do compósito, a matriz contribui para uma maior ou menor facilidade de conformação na fabricação do material compósito e influencia no custo final do produto. As funções de uma matriz num compósito reforçado por fibras são: manter as fibras em suas posições, transferir tensão entre as fibras, prover uma barreira contra as intempéries do ambiente tal como ataques químicos e umidade, e proteger a superfície das fibras de mecanismos de degradação.

Os polímeros, ou resinas, como também são chamados, são materiais comumente utilizados como matrizes de compósitos. Um polímero é definido como uma longa cadeia molecular contendo unidades ligadas covalentemente que se repetem ao longo da cadeia. Estes podem ser classificados de acordo com sua processabilidade como, termoplásticos ou termofixos.

Em um polímero termoplástico, as cadeias não estão quimicamente ligadas, elas estão unidas devido a ligações secundárias, tais como ligações de hidrogênio e Van der Waals. Portanto, com aplicação de calor, as ligações secundárias podem ser temporariamente quebradas e as moléculas podem se arranjar em uma nova configuração se conformadas sob pressão. Com o resfriamento, as moléculas podem adquirir essa nova configuração imposta e as ligações secundárias são restauradas, dando uma nova forma ao polímero sólido (MALLICK, 2007). Portanto, um termoplástico é um plástico com capacidade de amolecer e fluir quando sujeito a um aumento de temperatura e pressão. Quando é retirado desse processo, o polímero solidifica em um produto com forma definida. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Essa alteração é uma transformação física reversível (CANEVAROLO, 2002).

Já em um polímero termofixo, ou termorrígido, as cadeias estão quimicamente ligadas por ligações primárias covalentes, formando reticulações, uma estrutura de rede tridimensional rígida (MALLICK, 2007). Portanto, um termofixo é um plástico que com o aquecimento sofre o processo de cura (transformação química irreversível), tornando-se rígido, e após a cura, é infusível e insolúvel. Posteiros aquecimentos não alteram mais seu estado físico, mas podem degradá-lo (CANEVAROLO, 2002).

Os sistemas de resinas para uso em materiais compósitos requerem as seguintes características: boas propriedades mecânicas, adesividade e boa resistência à degradação ambiental (LAPIQUE e REDFORD, 2002). Dentre essas, a característica mais

importante da resina é a capacidade de absorver energia e reduzir as concentrações de tensões, pelo fornecimento de tenacidade à fratura ou ductilidade, maximizando a tolerância a danos de impacto e o tempo de durabilidade do compósito (PILATO e MICHNO, 1994).

Os polímeros termofixos são os mais comumente utilizados como matrizes em compósitos estruturais, pois são de fácil processamento, devido à sua baixa viscosidade. Entre estes, epóxides, poliésteres e vinil ésteres correspondem a maior parte das matrizes empregadas em compósitos de alto desempenho.

A resina epóxi apresenta as seguintes características: alto módulo de elasticidade, baixa fluência, razoável desempenho em alta temperatura, boa resistência a água (menor absorção) e menor contração (aproximadamente 2% de seu volume) (MALLICK, 2007).

2.1.1.1 – Resinas epoxídicas

Segundo MAY (1988), uma resina epoxídica é definida como qualquer composto contendo um ou mais grupos epóxides capaz de ser convertido a uma forma termofixa (uma rede de estrutura tridimensional).

O grupamento epóxi é um anel constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, como mostrado na Figura 2.

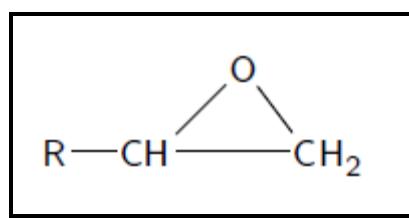


Figura 2 - Grupo epoxídico.

A resina epóxi mais comum é o diglicidil éter de bisfenol A, DGEBA, que se origina da reação da epicloridrina com o bisfenol A. Sua molécula apresenta dois grupos epóxides, um em cada extremidade da molécula, conforme apresentado na Figura 3.

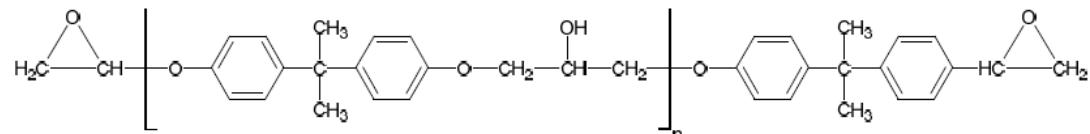


Figura 3 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA.

O excepcional desempenho da resina epóxi DGEBA é expresso pelo bisfenol-A, que proporciona rigidez e elevado desempenho em altas temperaturas, pelo éter que promove resistência química e pelo grupo epóxi, que possui boas propriedades adesivas ou reatividade com uma ampla variedade de agentes químicos de cura.

A reação de cura da resina epóxi envolve a abertura do anel epoxídico. O termo cura é usado para descrever o processo pelo qual a resina e o agente de cura são transformados a partir de materiais de baixo peso molecular em uma rede altamente reticulada.

Os agentes de cura para resina epoxídica podem ser divididos em dois principais grupos: alcalinos e ácidos. Os agentes alcalinos incluem as bases de Lewis, amidos, poliaminas alifáticas primárias e secundárias, e outros compostos contendo nitrogênio. Os agentes de cura ácidos incluem os ácidos de Lewis, fenóis, ácidos orgânicos, ácido carboxílico, tióis e anidrido (GOODMAN, 1998).

As aminas são os agentes de cura mais usados. Entretanto, em algumas aplicações, as aminas são preferidas em relação ao anidrido ácido, porque esse último fornece um longo tempo de vida, baixo pico exotérmico, menor contração do sistema polimérico e é menos irritante à pele.

Outros produtos, como por exemplo, aceleradores, podem ser adicionados para alterar as características da reação, aumentando a velocidade de reação e diminuindo o tempo de cura. Alguns aceleradores atuam também como iniciadores da reação de cura. Dentre esses, destacam-se os imidazoles, iniciadores classificados como alcalóides, que agem como inibidores de corrosão (MAY, 1988).

2.1.2 – Reforço

Fibras são o principal constituinte em um material compósito reforçado por fibras. Elas ocupam preferencialmente a maior fração volumétrica e suportam a maior

porção de carregamento numa estrutura compósita. Portanto, a seleção do tipo, fração volumétrica, comprimento e orientação das fibras são muito importantes, visto que influenciam algumas características de um laminado compósito, tais como massa específica, módulo de elasticidade, resistência à tração e à compressão, resistência à fadiga, condutividade elétrica e térmica, e custo.

As fibras podem se apresentar em diferentes configurações, entre elas se destacam os tecidos, mantas e *rovings*. Os tecidos apresentam as fibras entrelaçadas numa rede multidirecional organizada. As mantas apresentam as fibras descontínuas e dispostas aleatoriamente ligadas com poliéster bisfenólico de alta inércia química. Os *rovings* são carretéis nos quais as fibras contínuas se apresentam enroladas com seus filamentos paralelos, uns aos outros.

As fibras comumente usadas como reforços em materiais compósitos são as fibras de vidro e as fibras de carbono ou, ainda, para algumas aplicações específicas, são empregadas fibras poliméricas como aramida, por exemplo. Num determinado compósito podem ser utilizadas fibras de um mesmo tipo ou de mais de um tipo. Quando utilizado mais de um tipo de fibra no mesmo compósito, chamamos a este compósito de híbrido (MALLICK, 2007).

2.1.2.1 – Fibra de vidro

As fibras de vidro são o reforço mais usual em compósitos de matriz polimérica. As principais vantagens das fibras de vidro são seu baixo custo, alta resistência à tração, alta resistência química e excelentes propriedades isolantes. As desvantagens são: módulo em tração e resistência à fadiga relativamente baixos, alta massa específica (em comparação às fibras comerciais), sensibilidade à abrasão durante o manuseio (o que diminui a resistência à tração) e alta dureza (que causa excessivo desgaste às ferramentas de moldagem e corte). A estrutura interna das fibras de vidro é tridimensional e, constituída por uma longa rede de silício, oxigênio e outros átomos arranjados de modo aleatório. Portanto, as fibras de vidro são amorfas e isotrópicas (MALLICK, 2007).

Os dois tipos mais comuns de fibras de vidro são S e E, mas também há a fibra de vidro do tipo C. A fibra de vidro do tipo C, de nome baseado na palavra *corrosion*, é usada em aplicações químicas que requerem maior resistência à corrosão (HULL e

CLYNE, 1996). A fibra de vidro do tipo S, originalmente desenvolvida para componentes de aeronaves e revestimentos de projéteis, tem sua nomenclatura oriunda da palavra inglesa *strength*, devido à excelente resistência à tração que a mesma apresenta. A fibra de vidro do tipo E apresenta alta resistividade elétrica (10^{15} ohm.cm) e seu nome foi atribuído a partir da palavra *electrical* (CARVALHO, 1992).

Uma composição típica para fibras de vidro dos tipos E e S é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição de fibras de vidro (MALLICK, 2007)

Fibra de vidro	Composição em porcentagem em peso						
	Tipo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O
E	54,5	14,5	17	4,5	8,5	0,5	
S	64	26	-	10	-	-	

Na tabela acima pode ser observado que as fibras do tipo E e tipo S apresentam alguns constituintes em comum tais como sílica, alumina e magnésia, porém em proporções diferentes. Já os óxidos de cálcio, boro e sódio estão presentes apenas na fibra do tipo E. Essa diferença de composição das fibras influencia suas propriedades mecânicas.

A fibra de vidro do tipo E tem mais baixo custo de todas as fibras de reforço avaliadas, razão pela qual é a mais amplamente aplicada como fibra de reforço (MALLICK, 2007).

2.1.2.2 – Fibra de carbono

As fibras de carbono têm excelentes propriedades, dentre as quais destaca-se sua excepcional razão entre resistência mecânica e peso e alta razão de módulo elástico e peso. Outras vantagens são o coeficiente de expansão térmica linear muito baixo, alta resistência à fadiga e alta condutividade térmica. As desvantagens das fibras de carbono são sua baixa ductilidade na fratura, baixa resistência ao impacto, alta condutividade elétrica e alto custo.

Fibras de carbono são manufaturadas a partir de dois tipos de precursores, precursores sintéticos e o piche. O precursor mais comum é o PAN, um polímero de nome poliacrilonitrila, embora o piche, um co-produto de refino do petróleo, tenha menor custo de produção.

As etapas de fabricação de fibras de carbono são: estabilização, carbonização e dependendo das características que se deseje obter também há uma ultima etapa de grafitização. Geralmente a etapa de estabilização ocorre por volta de 200 a 300°C, a etapa de carbonização a cerca de 1000° a 2000°C e a de grafitização acima de 2000°C. Para se obter fibras de alto módulo elástico, porém com resistência mecânica menor, são realizadas as etapas de estabilização, carbonização e grafitização. Já quando se deseja obter fibras de alta resistência mecânica, porém com menor módulo elástico, a etapa final de grafitização não é realizada.

As fibras de carbono comerciais têm módulo de elasticidade que pode variar desde 207 GPa até 1035 GPa. Em geral, fibras de baixo módulo têm massa específica mais baixa, custo mais baixo, resistência à tração e compressão mais altas e se deformam mais antes da fratura do que as fibras de alto módulo de elasticidade.

Estruturalmente, fibras de carbono contêm uma blenda de carbono amorfo e carbono grafítico. Na forma grafítica os átomos de carbono estão arranjados numa estrutura cristalográfica de planos ou camadas paralelas. Fortes ligações covalentes existem entre os átomos de carbono de um mesmo plano atômico, mas carbonos de planos diferentes são ligados por forças do tipo Van der Waals, que são muito mais fracas. Isso resulta em uma alta anisotropia das propriedades físicas e mecânicas das fibras de carbono (MALLICK, 2007), ao contrário das fibras de vidro, que exibem comportamento isotrópico.

2.2 – Métodos de fabricação de materiais compósitos

Compósitos podem ser fabricados por diversos métodos. No presente trabalho, foram utilizados os métodos de laminação manual e enrolamento filamentar sendo, portanto, tais métodos descritos nos próximos sub-itens.

2.2.1 – Laminação manual

A laminação manual ou *hand lay-up* se caracteriza por ser um método simples de confecção de um compósito, não envolvendo nenhum investimento em equipamentos. A laminação consiste em sobrepor camadas de tecidos, mantas ou fibras, intercalando-as com uma resina (PARDINI e NETO, 2006).

A primeira etapa durante a laminação manual consiste em aplicar um desmoldante sobre a superfície na qual irá ser confeccionado o laminado. Posteriormente, é colocada uma camada de resina e uma de fibras, que são pressionadas com auxílio de um rolo ou espátula para que a resina impregne nas fibras e haja a obtenção de um laminado com menos defeitos e vazios. É feita então a sobreposição de camadas alternadas de resina e fibras sucessivamente, até terminar a aplicação da última camada de resina, quando for atingida a espessura desejada.

2.2.2 – Enrolamento filamentar

O método de enrolamento filamentar, do inglês *filament winding*, ou ainda bobinagem contínua, tem se mostrado o método ideal para manufatura de componentes de revolução ou axissimétricos, como por exemplo, tubos e vasos cilíndricos, utilizando matriz polimérica e reforços de fibras contínuas, por exemplo, de carbono, vidro e aramida, ou híbridos destas (PARDINI e NETO, 2006).

O processo de enrolamento filamentar é mecanizado e consiste no enrolamento contínuo de fibras em angulações específicas sobre um mandril. O mandril, ou molde é o tubo cilíndrico usado para laminação por enrolamento. Uma vantagem da técnica de enrolamento filamentar é sua rapidez e precisão de enrolamento de multicamadas (CARVALHO, 1992).

Durante o processo de enrolamento filamentar, o mandril gira em torno de seu eixo central horizontal enquanto as fibras são aplicadas a partir de um carrinho que se move paralelamente ao eixo do mandril.

Há três modos pelos quais as fibras podem ser arranjadas em torno de um mandril: polar, helicoidal e circunferencial. A Figura 4 apresenta esses padrões de enrolamento.

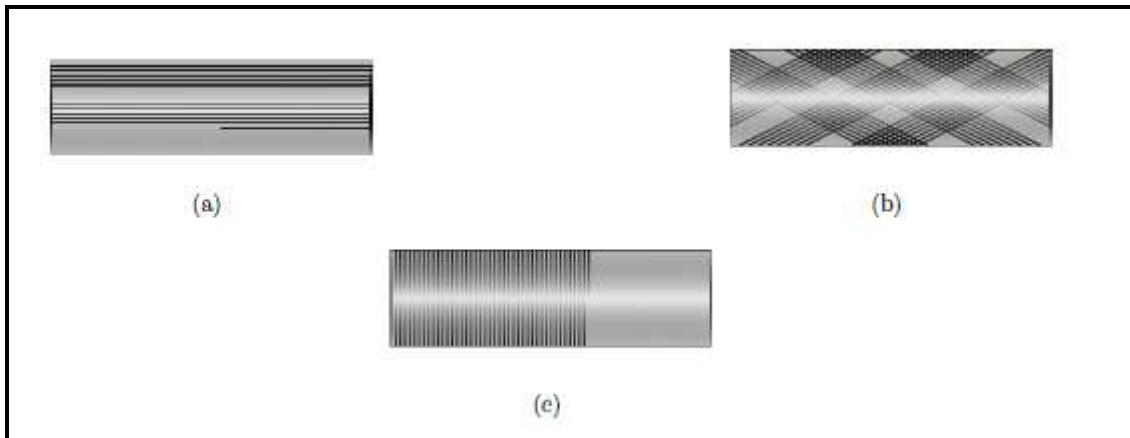


Figura 4 - Padrões de enrolamento da fibra sobre o mandril: a) polar, b) helicoidal e c) circunferencial (SOBRINHO, 2009).

O ângulo de enrolamento da fibra em relação ao eixo do mandril, (Θ), é o ângulo que define o tipo de enrolamento. No enrolamento polar as fibras são colocadas em ângulo próximo de 0° , passando ao redor dos pólos do mandril, tangenciando as extremidades da peça. O enrolamento circunferencial apresenta Θ próximo a 90° , e no enrolamento helicoidal Θ varia geralmente entre 5° e 80° (SHEN, 1995).

Em enrolamento filamentar, o ângulo de enrolamento determina as propriedades do tubo produzido. Camadas com ângulos pequenos em relação ao eixo da máquina propiciam resistência ao carregamento axial. Por sua vez, ângulos grandes de enrolamento (próximos a 90° , em relação ao eixo do mandril) garantem elevada resistência circunferencial, o que no caso de risers, que operam a grandes profundidades, são camadas de extrema importância, uma vez que as mesmas irão proferir resistência ao colapso. A melhor combinação de ângulos de enrolamento entre camadas internas e externas é aquela que nos fornece o máximo de resistência à pressão interna e externa, sem comprometer a resistência à tração e flexão. Segundo MENICONI (2001), JOHNSON (2000 e 2001) e SOLDAN (2008), a seqüência de empilhamento que propicia maior resistência à pressão hidrostática é de camadas externas e internas circunferenciais e intermediárias helicoidais.

A Figura 5 mostra detalhes geométricos importantes no arranjo das fibras no mandril, onde Θ é o ângulo de enrolamento da fibra em relação ao eixo do mandril, W é a largura de faixa e p é o passo.

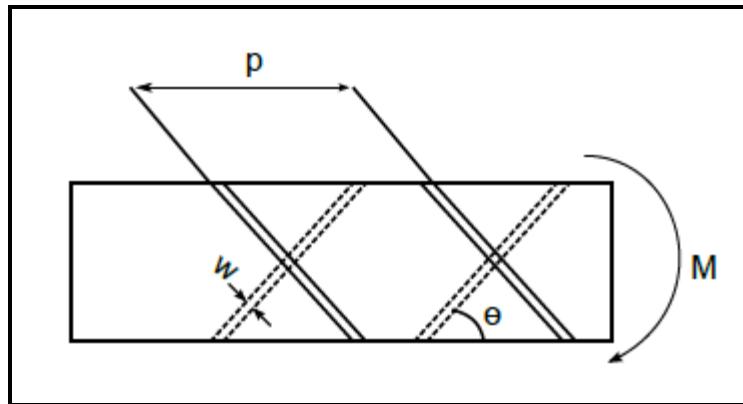


Figura 5 - Detalhes geométricos do processo de enrolamento (Sobrinho, 2009).

O parâmetro W , largura de faixa, é dado pela medida da largura das fibras de um *roving* multiplicada pelo número de *rovings* utilizados. Este é um dos parâmetros levados em consideração para o número de passos p .

O número de passos p determina quantas vezes o carrinho que conduz as fibras tem que percorrer o comprimento do mandril para que as camadas helicoidais se fechem, ou seja, estejam paralelas e adjacentes entre si. Quando o carrinho de fibras percorre o comprimento do mandril de seu início até o final, dizemos que o ângulo de enrolamento da fibra sobre o mandril foi $+ \Theta$, e quando o carrinho volta dizemos que o ângulo de enrolamento da fibra sobre o mandril foi $- \Theta$, portanto quando o carrinho vai e volta as fibras fazem um ângulo de $\pm \Theta$ em relação ao eixo do mandril.

A produção por enrolamento filamentar envolve variáveis que influenciam as propriedades mecânicas do produto final. Algumas variáveis são classificadas como variáveis de projeto e outras como variáveis de processo. As variáveis de projeto levam em consideração as condições de carregamento e ambientais a que o material será submetido durante sua aplicação, para que sejam determinados os seguintes parâmetros: tipo de resina, viscosidade e vida útil, tipo de fibras e/ou uso de reforço pré-impregnado, ângulos de enrolamento, seqüência de empilhamento de camadas, número de camadas para cada ângulo, número total de camadas e presença de *liner* para propiciar uma barreira contra ataque químico ou com função de dividir os carregamentos aplicados externamente. As variáveis de processo são tensão de enrolamento do reforço, tempo de enrolamento entre as camadas e padrão de deposição das fibras (grau de cruzamento entre as fibras) (MANTELL e COHEN, 2000).

2.3 – *Falhas em compósitos*

Neste trabalho, serão avaliadas as falhas de materiais compósitos na configuração de laminados ou tubos.

2.3.1 – *Falhas de laminados*

A fratura de um laminado compósito é classificada de maneira geral em dois modos: modo fibra e modo matriz. O modo fibra está relacionado ao carregamento longitudinal à direção do reforço, seja trativo ou compressivo. Já o modo matriz está relacionado ao carregamento transversal ao reforço ou a uma carga cisalhante no plano, também trativo ou compressivo (SUN *et al.*, 1996).

Segundo DANIEL e ISHAI (2006), à medida que se submete um material compósito a um determinado esforço trativo, tal material irá falhar quando a deformação que a ele for aplicada for equivalente à deformação máxima do constituinte que tem a menor capacidade de deformação. Portanto, um compósito de matriz polimérica reforçado por fibras orientadas longitudinalmente na direção do tensionamento irá falhar quando a deformação a que o compósito é submetido atinge a deformação máxima das fibras. Então, nesse compósito quem irá determinar sua deformação na fratura serão as fibras.

Como compósitos são heterogêneos e constituídos por dois ou mais materiais, existem múltiplos mecanismos de fratura sob diferentes tipos de carregamento. Sob tração, os mecanismos são: quebra da fibra, trinca na matriz, descolamento fibra-matriz e delaminação. O descolamento é a separação de uma junta colada, ou especificamente, nesse caso, entre a fibra e a matriz. A delaminação é a separação de camadas em um laminado ao longo de um plano (OCHOA, 2006).

Em materiais compósitos com resistência dominada pelas fibras podemos fazer uma simplificação considerando que todas as fibras têm resistência igual e a lâmina de compósito fratura imediatamente depois da fratura da fibra. Na prática, a resistência da fibra não tem um valor único; ao invés disso, segue uma distribuição estatística. Algumas fibras quebram em níveis de tensões mais baixos do que a média e outras em um nível um pouco acima da média (MALLICK, 1997).

Os tipos de micro-fratura foram definidos por MALLICK (1997) e (HULL) (2006) e podem ser observados na Figura 6.

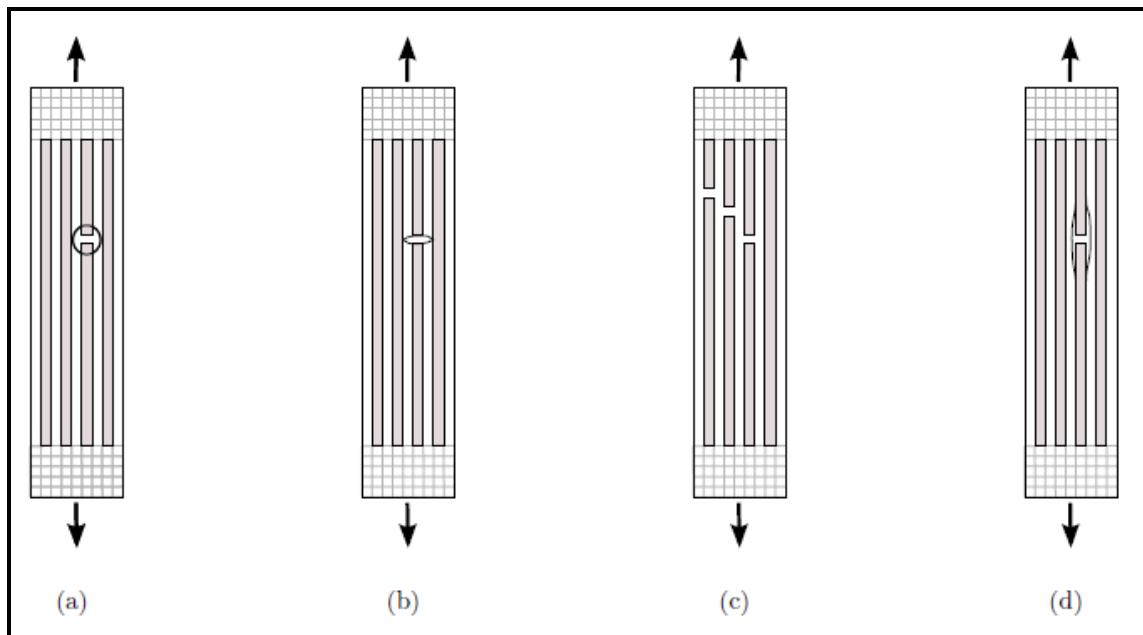


Figura 6 - Modos de micro-fratura em laminados com carregamento longitudinal à orientação das fibras: a) quebra de fibra, b) iniciação de trinca na matriz, c) fratura de outras fibras, d) descolamento na interface fibra-matriz (SOBRINHO, 2009).

Quando uma fibra quebra (Figura 6a) o estado de tensão na região próxima das extremidades da fibra quebrada apresenta: concentração de tensão no vazio criado pela quebra da fibra, alta concentração de tensão cisalhante na matriz próxima da região de quebra da fibra e um aumento da tensão normal média das fibras adjacentes. O aumento de tensão provocado pela quebra da fibra possibilita a ocorrência de diversos tipos de micro-fraturas: iniciação de micro-trinca na matriz (Figura 6b), quebra de outras fibras próximas àquela primeira que fraturou (Figura 6c), e o descolamento da interface fibra-matriz (Figura 6d) (MALLICK, 1997 e HULL, 1996).

2.3.2 – Falhas de tubos

De acordo com HULL e CLYNE (1996), quando tubos fabricados por enrolamento filamentar contendo múltiplos ângulos de enrolamento das fibras são testados sob carregamento circunferencial puro, a parede do tubo é sujeita à mesma condição de carregamento que um laminado sob tensão uniaxial.

Quando o modo de falha do tubo é explosão (pressão interna), o documento da prática recomendada, DNV-RP-F202 (2003), define a falha como ruptura da membrana da parede do tubo, causada pela pressão interna, possivelmente em combinação com tração axial (caso o carregamento não seja circunferencial puro) ou momentos de dobramento. Neste caso, a DNV classifica como mecanismo de falha o trincamento da matriz ou a falha da fibra.

2.4 – *Risers*

O *riser* é um elemento tubular que interliga a cabeça do poço petrolífero no fundo do mar à plataforma petrolífera em sua superfície. Este pode ser aplicado para extração de petróleo, transporte de gás ou ainda de água.

Risers podem ser classificados de acordo com a norma API RP 2RD (1998) quanto à constituição estrutural, configuração e finalidade.

Quanto à sua configuração, ele pode ser vertical, em catenária livre ou em catenária complexa, conforme mostra a Figura 7.

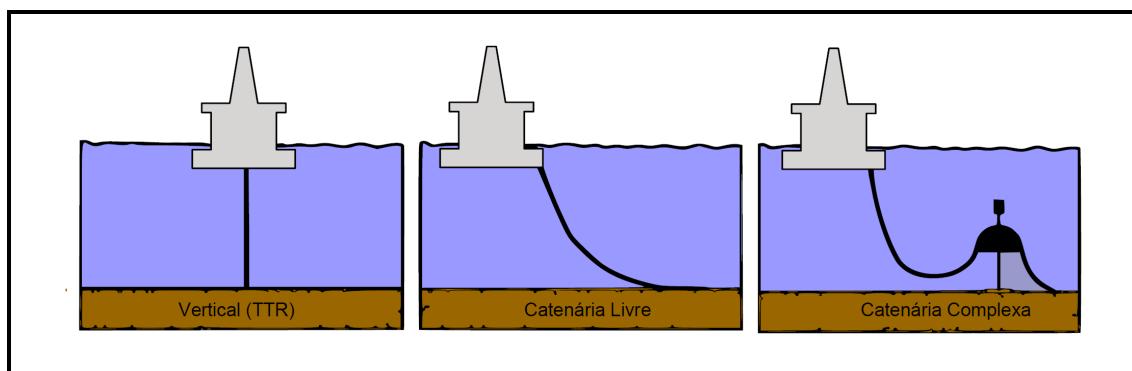


Figura 7 - Tipos de configurações para *risers* (SOBRINHO, 2009).

- Vertical: É aplicada uma força de tração no topo, com a finalidade de manter o *riser* sempre tracionado, evitando sua flambagem.
- Catenária Livre: Na maioria dos casos não é aplicada força de tração ao topo. As extremidades (topo e fundo) não estão alinhadas.

- Catenária Complexa: semelhante à configuração em catenária, apresenta duas catenárias através da instalação de flutuadores ou bóias submersas com poitas.

Quanto à sua constituição estrutural, os *risers* podem ser rígidos, flexíveis ou híbridos.

O *riser* flexível é composto por camadas alternadas de polímero e metal, cada qual com uma função em particular (COSTA *et al.*, 2003).

O *riser* rígido usualmente é feito por aço, mas também pode ser de titânio ou compósito. Uma grande vantagem é sua fácil inspeção por não apresentar várias camadas. Como consequência, é mais simples identificar uma possível trinca, inicio de corrosão ou qualquer outro problema, já que é fácil acessá-lo.

O *riser* híbrido é composto por uma seção superior em catenária de um duto flexível e uma seção vertical inferior de um duto rígido. Os *risers* híbridos reúnem as vantagens de um *riser* rígido vertical e um *riser* flexível num único sistema. Os *risers* rígidos diminuem o peso a que o sistema está submetido, enquanto que os flexíveis lhe conferem maior mobilidade.

Os *risers* podem ainda ser classificados como de injeção, perfuração, completação ou produção, de acordo com sua finalidade.

O *riser* de perfuração é responsável pelo transporte do fluido de perfuração e por guiar a broca desde a embarcação até a cabeça do poço. Geralmente é usado para isso o *riser* rígido vertical, e seu diâmetro varia entre 0,5 m e 1,0 m.

O *riser* de completação tem a função de iniciar ou garantir a produção de um poço, equipando-o para produzir óleo ou gás.

Os *risers* de produção são os responsáveis por conduzirem o fluido bruto do poço para a plataforma, na superfície.

O *riser* de injeção tem como finalidade injetar gás ou água no interior do reservatório, visando melhorar o desempenho do mesmo, ou injetar gás diretamente no poço, de forma a diminuir a massa específica do óleo e facilitar a sua subida à plataforma. *Risers* de injeção de água estão submetidos a menores tensões mecânicas e incorrem em mínimo risco de impacto ambiental.

2.5 – *Risers* compósitos

Poucos trabalhos têm sido publicados sobre *risers* compósitos, ainda assim dentre esses, raros são os que fornecem informações completas e detalhadas sobre o estudo. Não obstante, são descritos a seguir alguns trabalhos que relatam os materiais e configurações típicas utilizados na fabricação de *risers* compósitos.

Segundo um levantamento feito por JOHNSON *et al.* (2001), *risers* rígidos feitos por materiais compósitos têm sido desenvolvidos há mais de vinte anos, mas apenas recentemente foi viabilizada sua comercialização devido ao surgimento de testes que possam qualificar e certificar tais materiais.

O surgimento de práticas recomendadas como a DNV-RP-F202 – Composite Risers (DNV, 2003) possibilita a implementação de materiais compósitos em aplicações offshore de forma normalizada e confiável, de modo que estes possam vir a ganhar mais espaço em um mercado em crescente expansão, permitindo de forma segura a exploração de petróleo em águas ultra-profundas.

Em 2002, SALAMA *et al.* descreveram em seu *paper* a primeira demonstração de um *riser* compósito que foi conduzida em uma plataforma no Mar do Norte. Com isso, abriram caminho para o uso comercial de *risers* compósitos em águas profundas.

MENICONI *et al.* (2000) desenvolveram um *riser* híbrido com fibras de carbono e vidro, consistindo de camadas externa e interna circunferenciais de fibra de vidro e, helicoidal a $\pm 20^\circ$ de fibra de carbono. A principal conclusão dos autores foi que há grande viabilidade na aplicação desse material.

JOHNSON *et al.* (2000) estudaram tubos compósitos híbridos com fibras de vidro e carbono em matriz de resina epóxi. No estudo, um total de 90 protótipos foi fabricado e testado, para determinar a tensão limite de resistência, vida em fadiga em regime estático e cíclico a longos e baixos ciclos e, por fim, caracterização de tolerância a danos. Eles concluíram que os *risers* compósitos apresentaram custo, peso e performance consistentes com a proposta de trabalho.

ODRU *et al.* (2003) conduziram uma pesquisa comparativa entre *risers* de aço e de materiais compósitos. Os *risers* compósitos foram feitos com fibras de carbono e de vidro, sendo as fibras de carbono enroladas a $\pm 90^\circ$ e $\pm 10^\circ$ e as de vidro a $\pm 55^\circ$ ou $\pm 10^\circ$. Os autores observaram que o tubo compósito seria uma solução mais competitiva,

devido aos baixos níveis de tensão induzida pelo próprio peso, alta flexibilidade e resistência à fadiga.

Uma análise numérica comparativa entre *risers* de metal, compósito e metal-compósito foi conduzida por BEYLE *et al.* (1997). O material compósito aplicado foi resina epóxi com fibra de carbono ou fibra de vidro tipo S, e os metais, aço e liga de alumínio. Os pesquisadores constataram que a introdução de camadas compósitas diminui o fator de segurança mantendo a capacidade de carregamento da estrutura.

Outros tubos compósitos fabricados por enrolamento filamentar, não exclusivamente para aplicações como *risers*, têm sido largamente estudados. CARROLL *et al.* (1995) fabricaram tubos de matriz epoxídica e fibra de vidro enrolada a $\pm 55^\circ$ e avaliaram seu comportamento sob carregamento em tração e descrevem que camadas com angulações a $\pm 55^\circ$ exibem melhores valores de resistência sob carregamento combinado de pressão interna e tensão uniaxial.

BAI *et al.* (1996) estudaram laminados que continham 56% de fração volumétrica de fibras, por meio de ensaios mecânicos sob carregamento de tensão pura, pressão interna e carregamento combinado, para determinar os mecanismos de falha. Foi concluído que todo o processo de falha pode ser descrito pelos três passos seguintes: iniciação do processo de dano por meio de micro-trincamento, delaminação entre as diferentes camadas e o desenvolvimento e coalescimento de vazios em diferentes camadas, resultando na falha final.

Já MERTINY *et al.* (2004), estudaram o efeito da variação do ângulo de enrolamento da fibra sobre a resistência mecânica, com camadas com ângulos de enrolamento $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ ou $\pm 60^\circ$, e verificaram que com a diminuição do ângulo de enrolamento a deformação axial foi reduzida. Concluíram também que há melhora na resistência dos tubos quando há mais de um ângulo de reforço.

ROSSEAU *et al.* (1999) caracterizaram a influência do grau de ondulações produzidas pelas fibras dentro das camadas, sobre o desempenho mecânico, em oito estruturas cilíndricas sob vários carregamentos. Foram produzidos tubos de fibra de vidro pré-impregnada com resina epóxi em arranjos de $\pm 55^\circ$ e 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.

3 – Materiais e métodos

Neste capítulo é feita a descrição dos materiais utilizados no presente trabalho, bem como das metodologias adotadas nos testes realizados e na fabricação dos tubos e laminados.

3.1 – Materiais

Nesta seção são descritos os materiais utilizados na fabricação de laminados e tubos.

3.1.1 – Sistema polimérico

A resina utilizada foi uma epóxi DGEBA, de cura à quente, denominada LY 1556, de nome comercial Araldite® da Hunstman, com massa específica de 1,20 g/cm³, indicada para aplicações na fabricação de produtos de alto desempenho.

A fim de obter as propriedades desejadas, proporcionando o grau de cura necessário, à resina epóxi 1556 é adicionado o endurecedor 917 e o acelerador DY 070. Ao conjunto resina epóxi, endurecedor e acelerador é dado o nome de sistema polimérico.

A Tabela 2 a seguir mostra as principais propriedades do sistema polimérico utilizado nesse trabalho.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas sob tração uniaxial (norma ISO 527) do sistema polimérico

PROPRIEDADE	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
VALOR	83 - 93	3,1 - 3,3

Fonte: Hunstman Ltda.

3.1.2 – Reforço

Foram utilizadas como reforço fibras de vidro do tipo E, da marca Owens Corning – 111A type 30® em Roving e fibra de carbono STS 24k HTA-7C F301 da Tejin® (Toho Tenax) de alta resistência, cujo precursor é a poliacrilonitrila (PAN).

As Tabelas 3 e 4 mostram algumas propriedades da fibra de vidro e da fibra de carbono, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades da fibra de vidro tipo E

PROPRIEDADE	TEX (g/km)	*Resistência à tração (MPa)	*Módulo de elasticidade (GPa)	*Resistência ao cisalhamento (MPa)	Massa específica (g/cm³)
VALOR	1100	256	80	69,8	2,58

Fonte: Owens Corning.

* em anidrido epóxi

Tabela 4 - Propriedades da fibra de carbono

PROPRIEDADE	TEX (g/km)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Elongação (%)	Massa específica (g/cm³)
VALOR	1600	4070	240	1,7	1,75

Fonte: Tejin.

3.2 – Métodos

Nesta seção estão descritas as metodologias que foram utilizadas para confeccionar e caracterizar os compósitos estudados.

3.2.1 – Fabricação e caracterização de laminados compósitos

Foram confeccionados dois laminados compósitos reforçados com fibras unidirecionais, epóxi/fibra de vidro e epóxi/fibra de carbono, dos quais foram retirados corpos de prova para ensaio de tração, análise micrográfica e determinação de massa específica e fração volumétrica de fibras.

Para tanto, inicialmente foram produzidas camadas de fibras pelo método de enrolamento filamentar. Neste processo, as fibras contínuas são enroladas circumferencialmente em um cilindro e em seguida cortadas e estiradas. Uma camada pronta de fibra de vidro pode ser observada na Figura 8.



Figura 8 - Camada de fibra de vidro.

Posteriormente à obtenção das camadas de fibras, os laminados compósitos com reforço de fibras longas foram processados pelo método de lamação manual. Sobre uma superfície plana e lisa, foi colocado um plástico transparente e sobre ele foi aplicado um desmoldante. A lamação foi iniciada pela aplicação de uma camada de resina em cima do plástico coberto de desmoldante. Em seguida colocou-se uma

camada de fibras e outra de resina sucessivamente, de acordo com o número de camadas desejadas, sendo a última camada de resina. Utilizou-se uma espátula e um pequeno rolo de laminação a fim de impregnar e molhar uniformemente as fibras com a resina.

Para obtenção de laminados compósitos com a fração volumétrica de fibras desejada (55%) foram feitos cálculos da massa específica do compósito e da fração em peso de fibras.

A massa específica do compósito foi calculada pela regra das misturas direta:

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_r \cdot v_r, \quad \text{eq. 3.1}$$

onde:

ρ_c = massa específica do compósito em g/cm³,

ρ_f = massa específica da fibra em g/cm³,

ρ_r = massa específica da resina em g/cm³,

v_f = fração volumétrica de fibras e

v_r = fração volumétrica de resina.

A fração em peso de fibras foi calculada por meio da equação 3.2:

$$w_f = \frac{v_f \cdot \rho_f}{\rho_c} \quad \text{eq. 3.2}$$

Finalmente, após o término da laminação, o laminado foi levado para uma estufa para ser curado. A cura do laminado seguiu o ciclo de cura de 4 h a 80°C e 4 h a 120°C, conforme indicado pelo fabricante da resina. Na Figura 9 pode-se ver o laminado já curado, do qual posteriormente foram retirados corpos de prova para caracterização.



Figura 9 - Laminado de fibra de vidro.

3.2.1.1 – Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados

De cada um dos laminados compósitos foram extraídas 5 amostras de regiões aleatórias para o cálculo de massa específica por meio do método de picnometria.

O picnômetro foi pesado cheio de água destilada. As cinco amostras foram pesadas separadamente e depois pesadas dentro do picnômetro uma de cada vez. A determinação de massa específica das amostras foi feita tendo o conhecimento da massa específica da água ($0,99753 \text{ g/cm}^3$) e calculando o volume de água deslocada pela presença da amostra dentro do picnômetro com água. Por fim, foi calculada a média aritmética dos valores de massa específica das cinco amostras.

A fração volumétrica de fibras foi calculada por meio da queima de 3 amostras retangulares de $1,0 \times 1,5 \text{ cm}$ de cada um dos laminados. As amostras foram pesadas e levadas a um forno à temperatura de 500°C por 2 h e depois da degradação da resina, os resíduos de fibras foram pesados. Então, conhecendo-se a massa específica das fibras e do compósito e as massas das amostras compósitas e de fibras calculou-se a fração volumétrica de fibras, por meio da equação 3.4:

$$v_f = \frac{m_f \rho_c}{\rho_f m_c}$$

eq. 3.4

onde:

v_f = fração volumétrica de fibras em %.

m_f = massa de fibras em g.

ρ_c = massa específica do compósito em g/cm³.

m_c = massa do compósito em g.

ρ_f = massa específica de fibras em g/cm³.

3.2.1.2 – Análise micrográfica dos laminados

As imagens para análise microestrutural dos laminados foram obtidas em um microscópio óptico da marca Leica no Laboratório de Microscopia do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ. Foram utilizados aumentos de 50 x, 100 x ou 200 x.

Para análise microscópica foram retiradas duas amostras de cada um dos laminados. Uma das amostras da direção longitudinal à orientação das fibras e outra da direção transversal, com dimensões 20 mm x 10 mm. As amostras foram então embutidas em resina epóxi de cura a frio e posteriormente lixadas e polidas. A seqüência de lixas utilizadas foi 220, 320, 400, 500 e 600 μ m e o polimento foi realizado com alumina 1 e 2.

3.2.1.3 – Ensaio de tração dos laminados

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina eletromecânica EMIC modelo DL 10000 com capacidade de até 10 kN, no Laboratório de Propriedades Mecânicas do Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais da COPPE/UFRJ.

Foram extraídos 8 corpos de prova de cada um dos laminados compósitos, de acordo com a norma ASTM D3039M-95, na qual se especifica um corpo de prova retangular de dimensões 250 mm x 15 mm, conforme esquematizado na Figura 10.

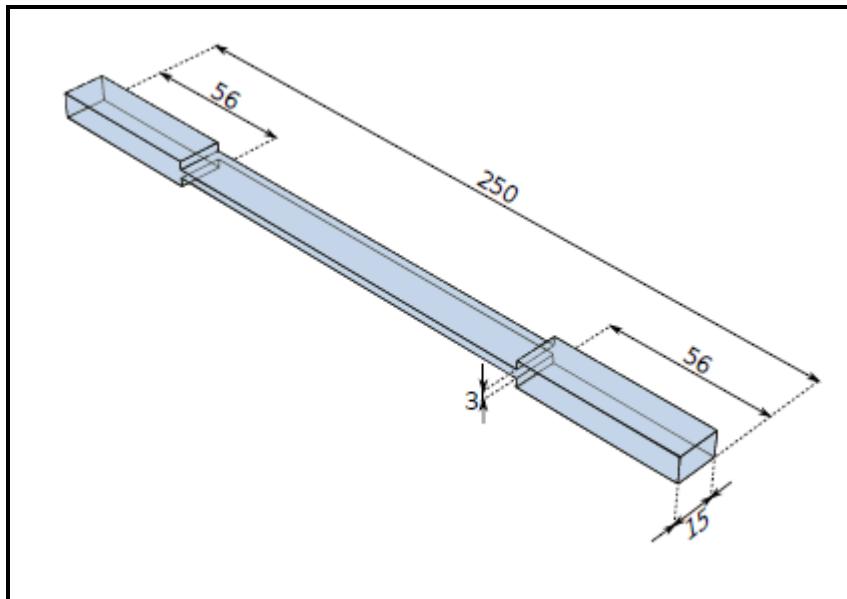


Figura 10 - Dimensões do corpo de prova de ensaio de tração (SOBRINHO, 2009).

Nas extremidades do corpo de prova, onde a garra da máquina de tração o segura, foram colados *tabs* (proteção ao corpo de prova para evitar que a fratura ocorra sempre no local em que a garra da máquina fixa o corpo de prova).

Nas Figura 11 e Figura 12, são mostrados os corpos de prova para ensaio de tração dos laminados de fibra de vidro e carbono, respectivamente.

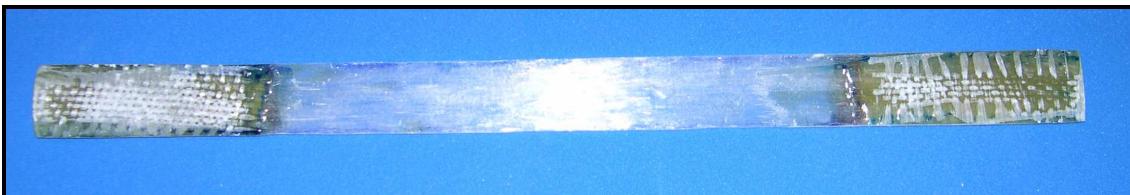


Figura 11 - Corpo de prova para ensaio de tração do laminado de fibra de vidro.



Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de tração do laminado de fibra de carbono.

No ensaio de tração dos laminados de fibras de vidro e de carbono foram utilizadas células de carga de 2 kN e 5 kN, respectivamente. A velocidade do travessão foi de 2 mm/min para ambos os laminados. O deslocamento foi medido utilizando-se

um extensômetro EMIC posicionado no centro do corpo de prova, com distanciamento de 23,6 mm.

3.2.2 – Fabricação e caracterização de tubos compósitos

Os tubos compósitos foram produzidos em uma máquina de enrolamento filamentar de dois eixos da Tecservice (Figura 13) para mandris rotatórios entre 30 e 500 mm de diâmetro e 3 m de comprimento.



Figura 13 - Máquina de enrolamento filamentar.

Utilizando-se um mandril colapsável de aço, com 4" (101,6 mm) de diâmetro externo, foram confeccionados um total de 6 tubos compósitos, todos eles com a mesma matriz polimérica, sendo 3 deles reforçados por fibra de vidro e os outros 3 híbridos, reforçados por fibras de vidro e de carbono.

A seqüência de camadas utilizada em cada um dos tubos foi 1:2:1, ou seja, 1 camada circumferencial interna, 2 camadas helicoidais intermediárias e 1 camada

circunferencial externa. As camadas circunferenciais foram orientadas à $\pm 88^\circ$ (próximo à 90°) e as camadas helicoidais ora $\pm 30^\circ$, ora $\pm 45^\circ$ e ora $\pm 60^\circ$.

A Figura 14 é um esquema das configurações dos tubos fabricados.

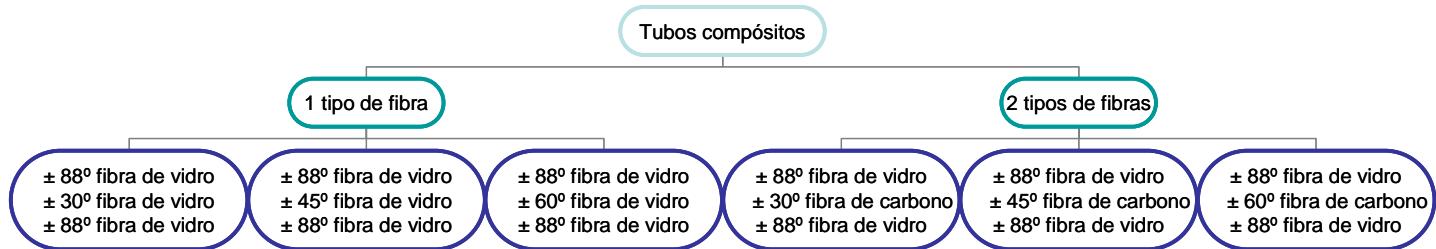


Figura 14 - Configurações dos tubos compósitos fabricados.

As Figuras 14 a 23 apresentam a seqüência de passos que foi adotada para fabricação dos tubos compósitos.

Inicialmente, para facilitar a retirada do tubo compósito, a superfície do mandril foi recoberta com um agente desmoldante (Figura 15) e revestida por um plástico de teflon (Figura 16). O desmoldante utilizado foi terebentina, um produto separador QZ 13 BR da Hunstman.



Figura 15 - Mandril colapsável cuja superfície recebeu desmoldante.

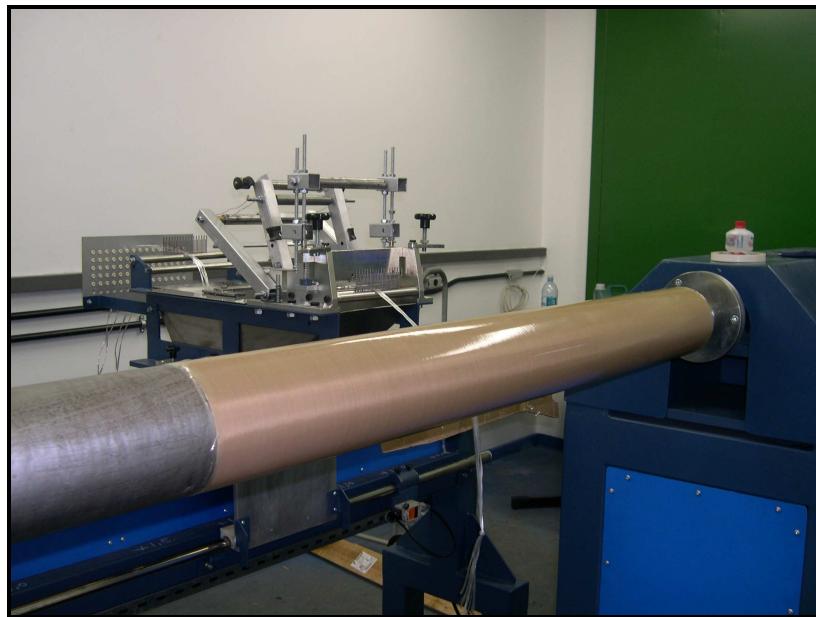


Figura 16 - Revestimento do mandril com plástico de teflon.

Sobre o teflon foi colocado um tecido de poliéster, conhecido como véu (Figura 17), e o mesmo foi molhado manualmente com o sistema polimérico (Figura 18). Tais procedimentos foram realizados com intuito de proporcionar melhor acabamento interno ao tubo compósito.



Figura 17 - Mandril enrolado pelo tecido de poliéster.



Figura 18 - Mandril com tecido já molhado por resina.

Após essa preparação do mandril iniciou-se o processo de enrolamento filamentar propriamente dito. A Figura 19 mostra a primeira camada de fibra de vidro enrolada circumferencialmente sobre o mandril.

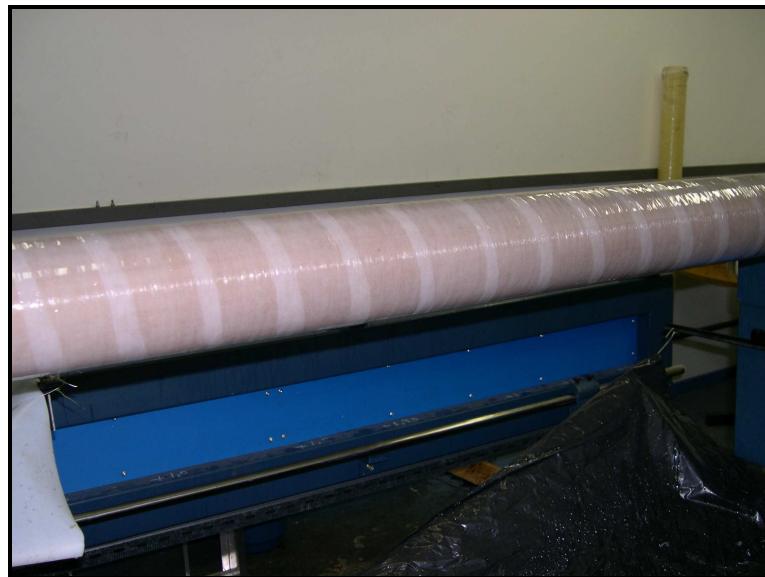


Figura 19– Camada de fibra de vidro circumferencial.

A Figura 20 mostra, como exemplo, a camada helicoidal de fibra de vidro enrolada a $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo do mandril, sobre a primeira camada circumferencial de fibra de vidro.

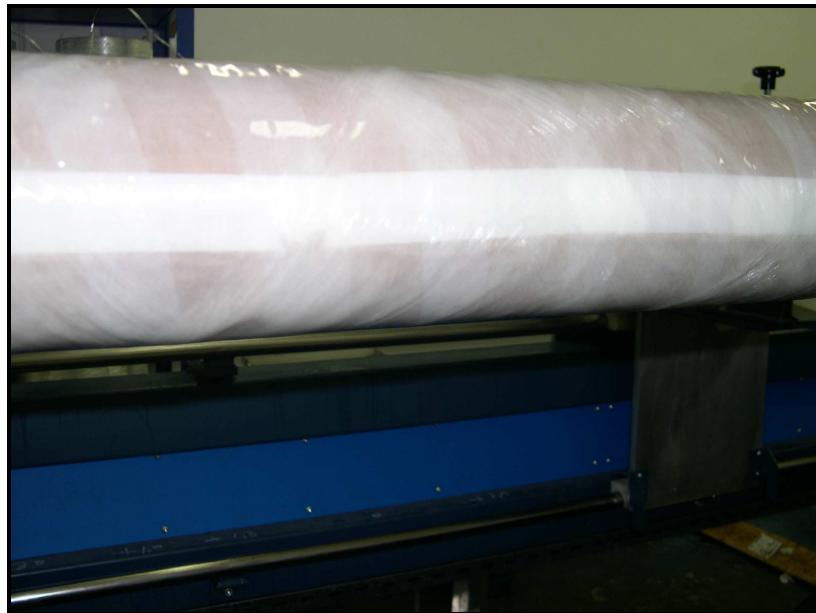


Figura 20 - Fibra de vidro com ângulo de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo do mandril.

Na Figura 21, é apresentado, como exemplo, um tubo híbrido com camada helicoidal de fibra de carbono a $\pm 45^\circ$ sobre a primeira camada circunferencial de fibra de vidro.



Figura 21 - Tubo híbrido com camada de fibra de carbono enrolada a $\pm 45^\circ$.

Por fim, o tubo híbrido da Figura 22 mostra a última camada circunferencial de fibra de vidro sendo enrolada sobre as duas camadas helicoidais de fibra de carbono e a primeira camada circunferencial de fibra de vidro.

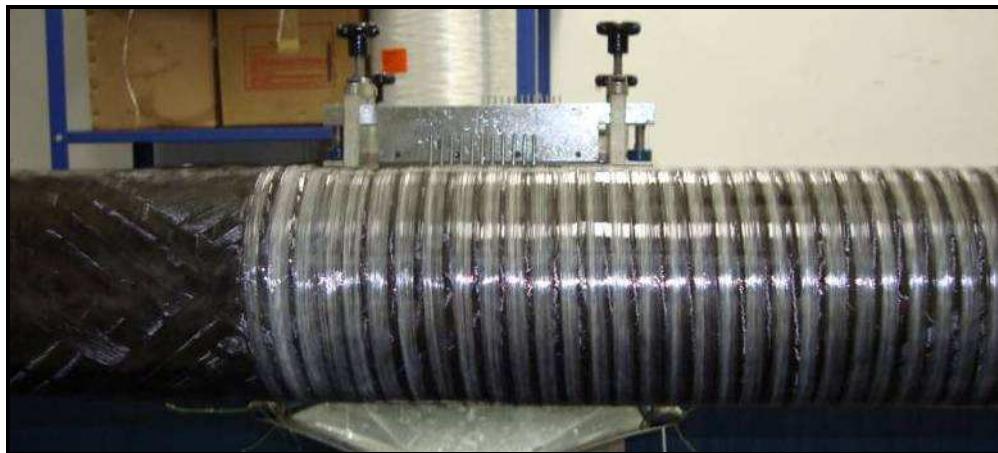


Figura 22 - Camada circunferencial de fibra de vidro sobre a camada helicoidal de fibra de carbono no tubo híbrido.

Ao fim do processo, os tubos compósitos, ainda em torno do mandril, foram levados à estufa (Figura 23) para a cura da matriz polimérica, seguindo o ciclo de cura descrito anteriormente.



Figura 23 - Estufa contendo tubo híbrido.

Após retirado da estufa, o tubo compósito é extraído do mandril. A Figura 24 mostra um tubo com fibras de vidro e outro com fibras de vidro e carbono, após o processo de cura.



a)



b)

Figura 24 - Tubo após processo de cura: a) com fibras de vidro e b) com fibras de vidro e carbono.

3.2.2.1 – Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos

A massa específica e fração volumétrica de fibras das amostras dos tubos foram determinadas da mesma forma como foi feito para as amostras dos laminados.

Os tubos híbridos, por possuírem fibras de vidro e de carbono, que têm massas específicas diferentes, $2,58 \text{ g/cm}^3$ e $1,75 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, passaram por uma etapa adicional antes de terem sua fração volumétrica de fibras determinada. Em função da diferença de coloração das fibras, as mesmas puderam ser separadas com o auxílio de uma pinça, pesadas e então, foi feito o cálculo da fração volumétrica de fibras.

3.2.2.2 – Análise micrográfica dos tubos

Para análise micrográfica, foram retiradas duas amostras de cada um dos tubos, uma na direção longitudinal ao eixo do tubo e outra na direção transversal. As mesmas foram embutidas, lixadas e polidas, do mesmo modo como preparadas as amostras dos laminados, e suas imagens foram visualizadas no microscópio óptico, com aumentos de 100 ou 200 vezes.

3.2.2.3 – Ensaio de anel

Foram ensaiados 5 anéis de cada tubo, de acordo com a norma ASTM D2290 00. As medidas padronizadas dos corpos de prova para o ensaio de anel são apresentadas na Figura 25.

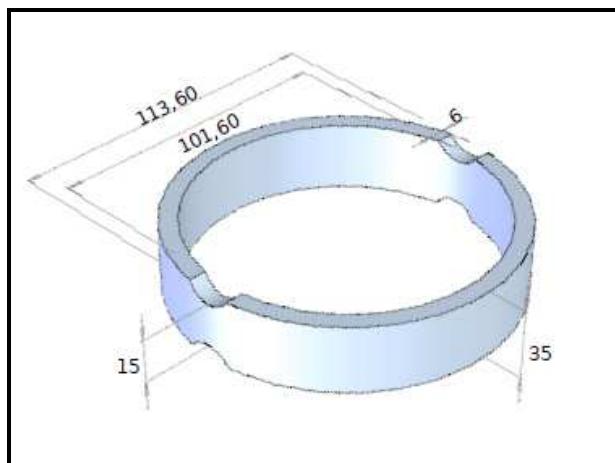


Figura 25 - Anel para ensaio de tração (SOBRINHO, 2009).

O ensaio de anel dos tubos de fibra de vidro foi realizado na máquina eletromecânica EMIC, a mesma na qual foi realizado o ensaio de tração dos laminados. A célula de carga utilizada foi de 10 kN e a taxa de deslocamento do travessão da máquina foi de 5 mm/min. Um dos anéis de fibra de vidro pode ser observado na Figura 25.



Figura 26 - Corpo de prova para ensaio de anel do tubo de fibra de vidro.

O ensaio dos anéis dos tubos híbridos foi realizado em uma máquina hidráulica Shimadzu UHF 1000 kN, no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Um dos anéis com fibras de vidro e carbono pode ser observado na Figura 27.



Figura 27 - Corpo de prova de tubo híbrido para ensaio de anel.

O dispositivo da Figura 28, foi confeccionado especialmente para esse tipo de ensaio.



Figura 28 - Dispositivo mecânico para ensaio de anel.

3.2.2.4 – Ensaio de pressão hidrostática externa

Os tubos compósitos fabricados por enrolamento filamentar com as configurações descritas anteriormente foram ensaiados até seu colapso, por meio de pressão hidrostática externa.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) do Programa de Engenharia Naval e Oceânica da COPPE/UFRJ, segundo recomendação DNV RP F202-03.

A primeira etapa do ensaio de pressão externa consiste da preparação do tubo. As extremidades dos tubos são vedadas com uma cabeça metálica colada por adesivo epoxídico e nele é passada uma tinta, também epoxídica, que atua na vedação do tubo.

Na foto da Figura 29 é possível observar o tubo já preparado para o ensaio.



Figura 29 - Tubo preparado para o ensaio de pressão externa.

A seguir o tubo é introduzido numa câmara (Figura 30) e, após a vedação completa da mesma, o ensaio hidrostático propriamente dito começa. A pressão da câmara é aumentada gradualmente até que o tubo é colapsado. Os valores de pressão são captados por meio de um transdutor localizado na tampa da câmara.



a)



b)

Figura 30 - Câmara de pressão para ensaio hidrostático: a) tubo dentro da câmara e b) tampa da câmara com o transdutor.

4 – Resultados e discussões

O presente capítulo destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos neste trabalho.

4.1 – *Laminados*

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização mecânica e microestrutural dos laminados compósitos fabricados.

4.1.1 – Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados

A Tabela 5 apresenta os resultados de massa específica e fração volumétrica de fibras de ambos os laminados, tanto os fabricados com fibra de vidro quanto os fabricados com fibra de carbono.

Tabela 5 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos laminados

Fibra	Massa específica (g/cm ³)	Fração volumétrica de fibras (%)
Vidro	1,87 ± 0,10	50,75 ± 0,08
Carbono	1,18 ± 0,08	37,30 ± 1,76

A fração volumétrica de fibras dos laminados pode ser estimada teoricamente antes do processo de fabricação por lamação manual, e foi estimada em 55% de fibras, tanto para o laminado de fibras de vidro quanto para o laminado de fibras de carbono. O laminado de fibra de vidro apresentou valor próximo ao estimado (aproximadamente 7% mais baixo). Porém, o laminado de fibra de carbono apresentou valor bastante inferior ao estimado (33% mais baixo).

CHAWLA (1987), discute acerca da oxidação das fibras de carbono durante seu aquecimento. Por tratar-se de fibras orgânicas, embora de resistência elevada, quando aquecidas, as fibras de carbono podem ser oxidadas, ainda que apenas parcialmente, o que faria com que a fração volumétrica de fibras do material compósito determinada pelo método de queima fosse inferior à fração real de fibras contida no dito compósito. O autor descreve ainda que a resistência à oxidação de fibras de carbono aumenta com o aumento do módulo de elasticidade das fibras e descreve que fibras de carbono com módulo de elasticidade de 240 GPa apresentaram perda de massa de aproximadamente 3% quando submetidas à temperatura de 350°C por 500 h.

A fibra de carbono utilizada neste trabalho possui módulo de elasticidade de 240 GPa e quando submetida ao mesmo aquecimento aplicado para cálculo de fração volumétrica de fibras (500°C por 2 h) apresentou perda de massa média de 14%. Portanto, percebemos que a reduzida fração volumétrica de fibras de carbono (37%) em comparação com o valor projetado (55%), justifica-se devido à degradação parcial de fibras de carbono que ocorre durante o processo de queima para determinação da fração volumétrica de fibras. No entanto, o método de queima do compósito para determinação de fração volumétrica de fibras é um método simples e pode ser aplicado desde que se observe se ocorre ou não degradação de fibras. No caso de ocorrência de degradação esse valor de perda de massa deve ser levado em consideração durante a determinação da fração volumétrica de fibras.

4.1.2 – Análise micrográfica

A Figura 31 mostra a micrografia dos laminados planos de vidro e carbono, com cortes transversais e longitudinais à orientação das fibras.

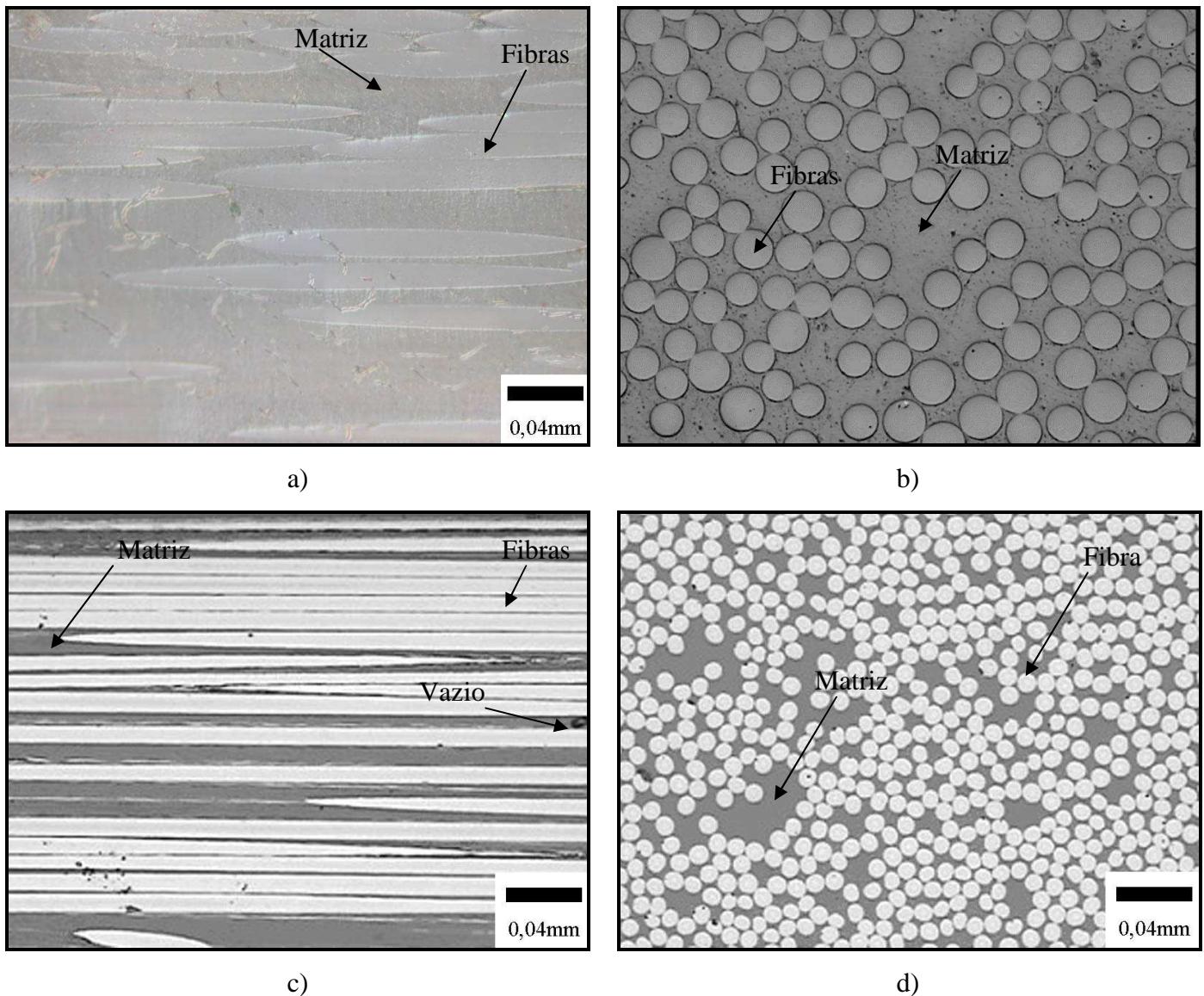


Figura 31 - Micrografia dos laminados compósitos, aumento 200x: a) vidro longitudinal, b) vidro transversal, c) carbono longitudinal e d) carbono transversal.

As regiões circulares são seções das fibras vistas transversalmente e as regiões alongadas são as fibras vistas longitudinalmente. A matriz polimérica é a região que envolve as fibras e regiões mais escuras são vazios, onde a resina não penetrou. É possível observar por meio das micrografias da Figura 30 (comparando as letras a e c),

que as fibras de carbono possuem menor diâmetro do que as fibras de vidro. As micrografias mostram-se coerentes com as já estudadas por CAMUSSI (2007), FARO (2008) e SOBRINHO (2009), as quais apresentam, além de regiões bem distribuídas contendo fibras e resina, vazios e regiões de resina com ausência de fibras. Regiões de vazios e resina sem fibras certamente poderão atuar como concentradores de tensão, reduzindo a resistência mecânica dos laminados. Porém, esta heterogeneidade na distribuição de fibras e a presença de vazios ou defeitos são inerentes aos processos de fabricação de compósitos, e estão presentes em maior ou menor quantidade dependendo do processo de fabricação utilizado.

4.1.3 – Ensaio de tração

A Figura 32 mostra o comportamento em tração representativo dos corpos de prova retirados dos laminados de fibras de vidro e de carbono.

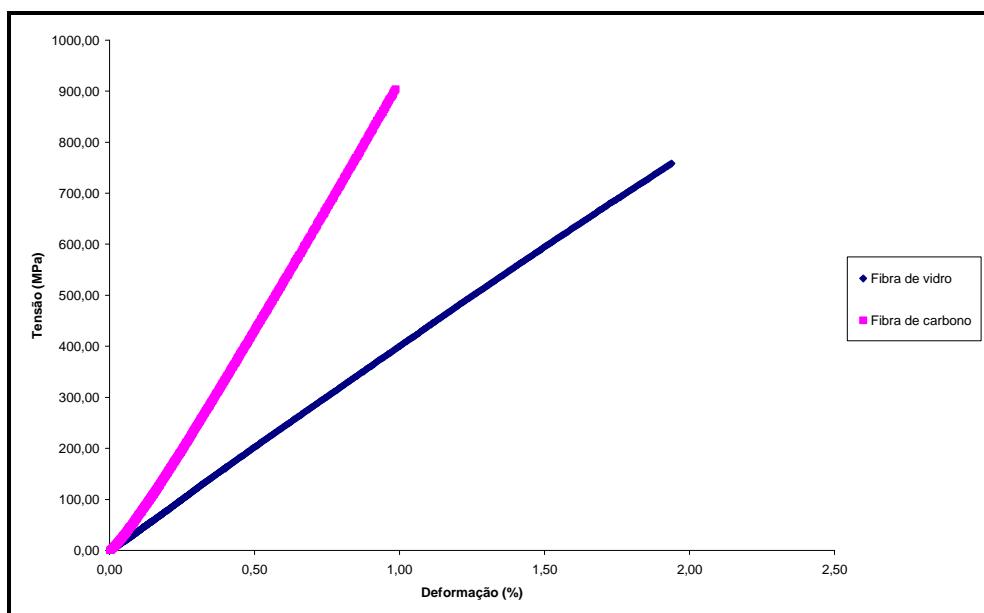


Figura 32 - Curva tensão *versus* deformação comparativa entre os laminados com fibra de vidro e com fibra de carbono.

O comportamento observado no gráfico da Figura 32, bem como os valores para tensão de fratura e deformação, mostraram-se coerentes com os resultados demonstrados por CAMUSSI (2007) e FARO (2008).

Alguma propriedades médias dos corpos de prova ensaiados em tração estão expostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação entre as propriedades de tração dos laminados de fibra de vidro e de carbono

Fibra	Tensão Média de Fratura (MPa)	Deformação Média (%)	Módulo de Elasticidade Médio (GPa)
Vidro	775 ± 37	$2,10 \pm 0,13$	37 ± 1
Carbono	921 ± 116	$1,08 \pm 0,11$	99 ± 11

De acordo com a Tabela 6 é possível observar que o laminado compósito com fibra de carbono apresentou maiores valores de tensão e módulo elástico do que o laminado compósito de fibra de vidro, o que já era esperado, visto que a fibra de carbono monoliticamente possui superioridade nessas propriedades quando comparada à fibra de vidro.

FARO (2008) realizou ensaio de tração para laminados de resina epóxi e fibra de vidro do tipo E, e obteve os seguintes resultados: tensão de ruptura de 498 MPa, deformação de 1,70% e módulo de elasticidade de 29 GPa, sendo portanto, esses valores inferiores aos valores obtidos para o mesmo material no presente trabalho, o que se justifica pela diferença de fração volumétrica de fibras empregada, pois neste trabalho obteve-se fração volumétrica de fibras de 51% e no trabalho de FARO (2008), a fração volumétrica de fibras foi de 33%. Portanto, verifica-se que um aumento da fração volumétrica de fibras reflete em um correspondente aumento em resistência à fratura.

A Figura 33 mostra os corpos de prova fraturados de compósitos com fibras de vidro e fibras de carbono.



a)



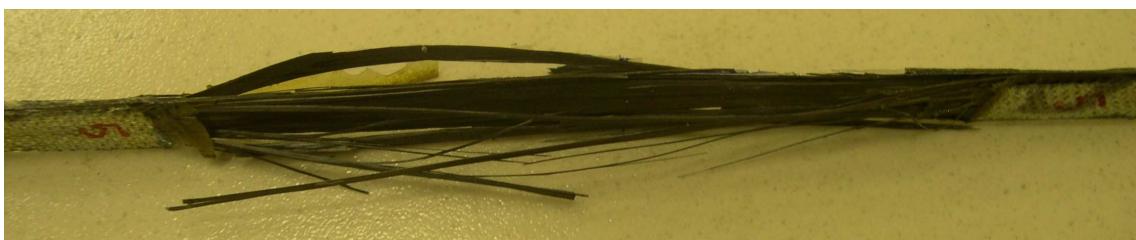
b)



c)



d)



e)

Figura 33 - Corpos de prova fraturados após ensaio de tração: a) e b) compósitos de fibra de vidro c), d) e e) compósitos de fibra de carbono.

A partir dessas imagens, pode-se observar que ambos os tipos de laminados apresentaram os mesmos modos de fratura: quebra de fibras e descolamento fibra-matriz.

Como a capacidade de deformação da resina é superior à das fibras, a falha dos laminados, para carregamento longitudinal à orientação das fibras, ocorre quando se atinge a deformação máxima das fibras.

4.2 – *Tubos*

Para caracterização microestrutural e mecânica dos tubos compósitos foram realizados cálculo de massa específica e fração volumétrica de fibras, microscopia óptica, ensaio de anel e ensaio hidrostático (pressão externa).

4.2.1 – Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos

Na Tabela 7 são apresentados os valores de massa específica e fração volumétrica de fibras para todos os tubos.

Tabela 7 - Massa específica e fração volumétrica de fibras para os tubos de fibra de vidro e híbridos

Tubo	Massa específica (g/cm ³)	Fração volumétrica de fibras (%)
Vidro 30°	1,69 ± 0,10	40,69 ± 0,18
Vidro 45°	1,79 ± 0,07	45,32 ± 1,02
Vidro 60°	1,59 ± 0,13	37,58 ± 0,45
Híbrido 30°	1,32 ± 0,04	31,39 ± 0,80
Híbrido 45°	1,29 ± 0,13	32,35 ± 1,65
Híbrido 60°	1,47 ± 0,12	32,46 ± 1,29

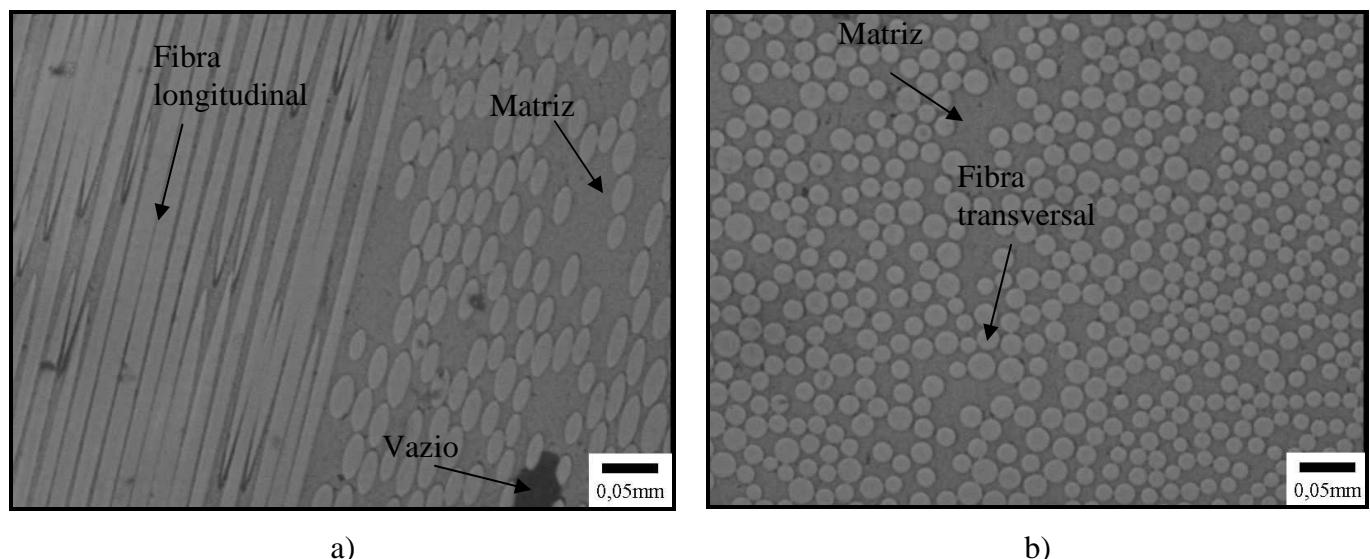
As massas específicas dos tubos híbridos são inferiores a dos tubos de fibra de vidro devido ao fato da massa específica da fibra de carbono ser inferior à massa específica da fibra de vidro. Observa-se que mesmo o maior valor de massa específica

dentre os tubos estudados ($1,79 \text{ g/cm}^3$), ainda é apenas cerca de 22% da massa específica de um *riser* rígido de aço ($7,9 \text{ g/cm}^3$).

A fração volumétrica de fibras de cada um dos tubos, que não é possível ser completamente controlada durante o procedimento de confecção do tubo por enrolamento filamentar, se apresenta maior para os tubos que têm somente fibra de vidro. Isso, novamente, pode ser atribuído à degradação parcial da fibra de carbono, como já discutido anteriormente.

4.2.2 – Análise micrográfica dos tubos

As Figuras 33 e 34 mostram as micrografias dos tubos compósitos de fibra de vidro e híbridos, respectivamente.



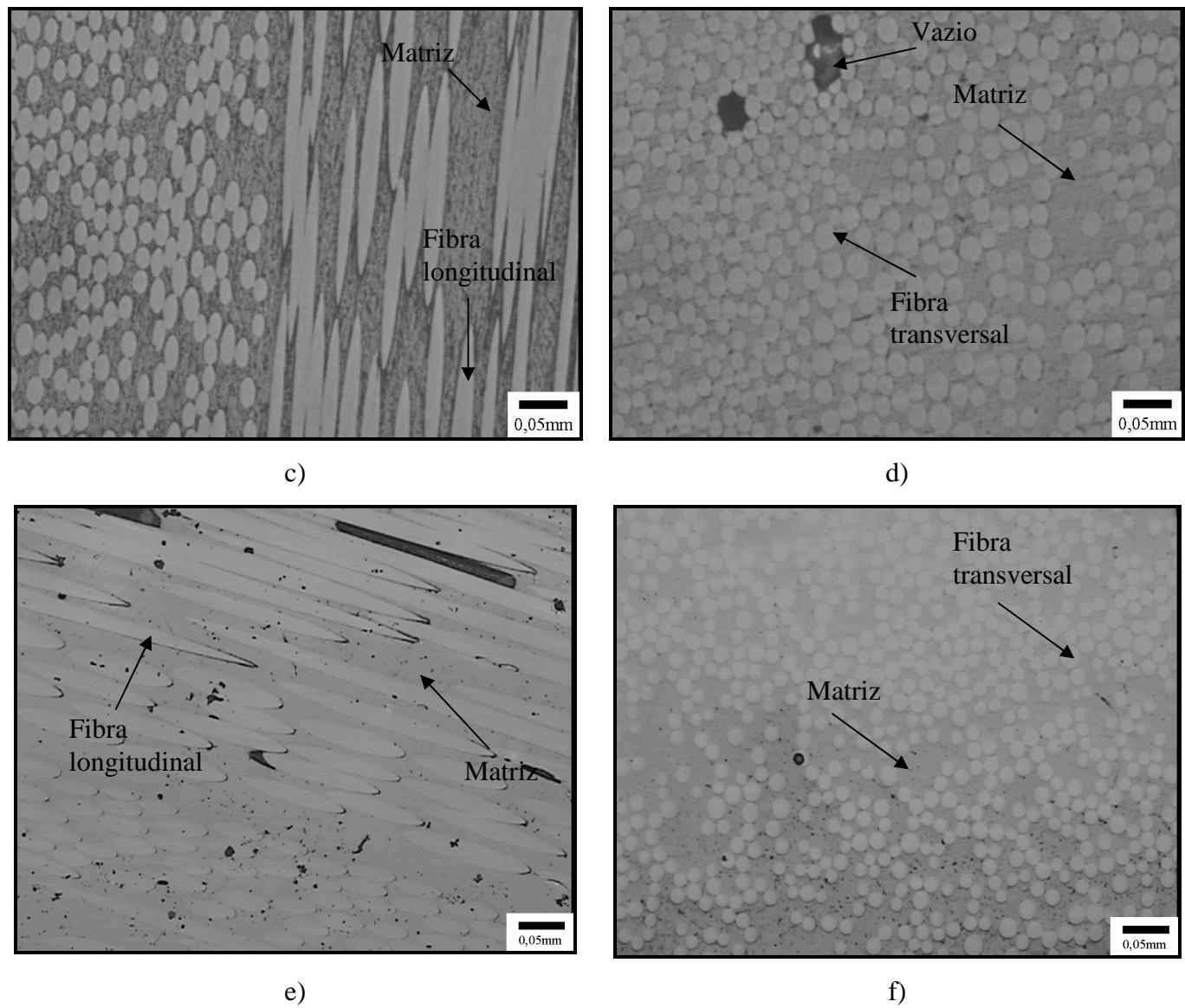
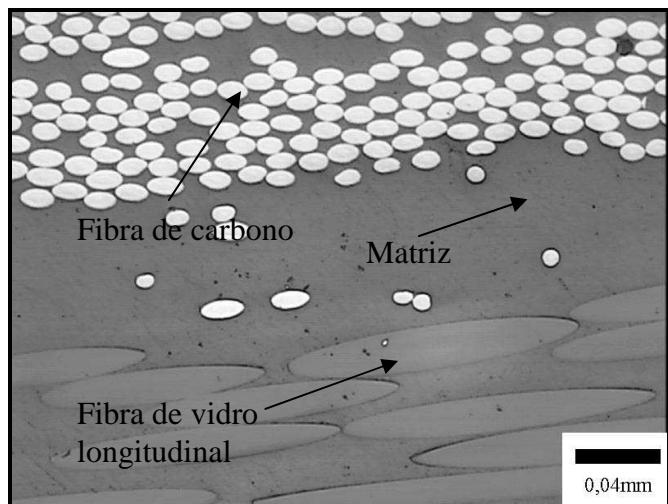
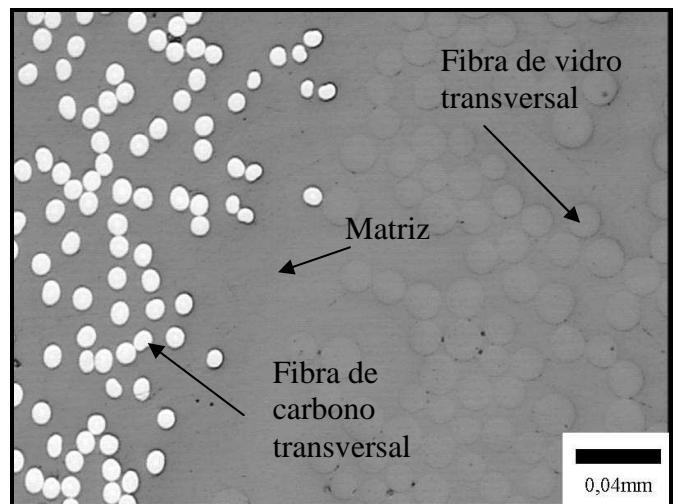


Figura 34 - Micrografia dos tubos de fibra de vidro, aumento 100x: a) corte longitudinal tubo 30°, b) corte transversal tubo 30°, c) corte longitudinal tubo 45° d) corte transversal tubo 45°, e) corte longitudinal tubo 60° e f) corte transversal tubo 60°.

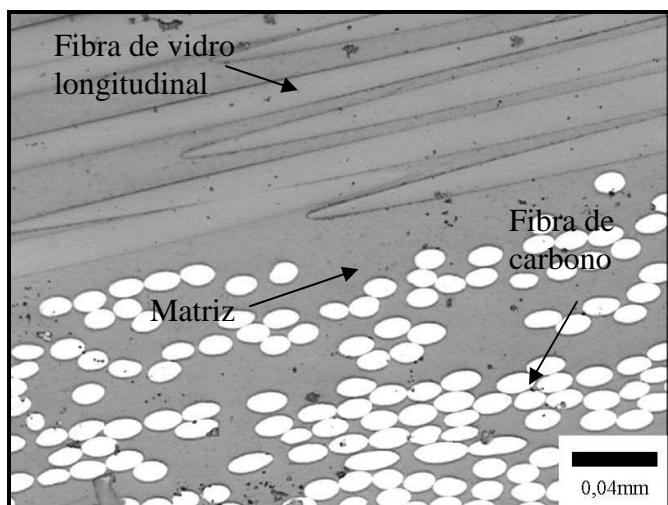
Analizando as micrografias dos tubos de fibra de vidro é possível verificar que a microestrutura é semelhante para os tubos com diferentes angulações e equivalentes às micrografias analisadas por FARO (2008) e SOBRINHO (2009) que estudaram tubos com camadas helicoidais orientadas à $\pm 55^\circ$. Observa-se que as micrografias, como já discutido anteriormente, apresentam heterogeneidades e vazios inerentes aos processos de fabricação de compósitos.



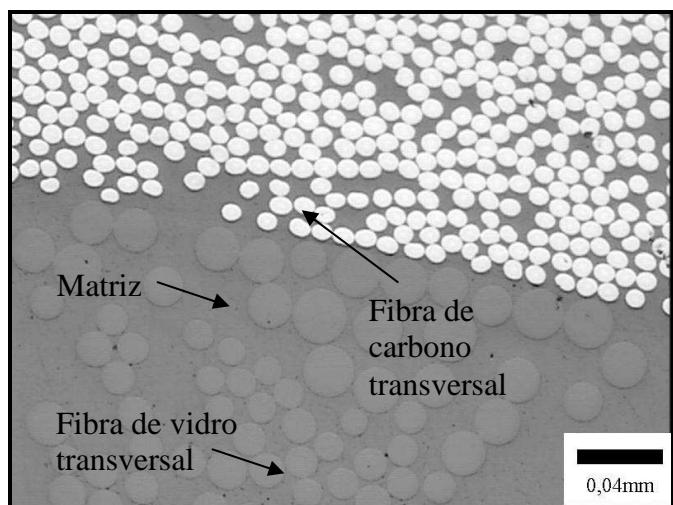
a)



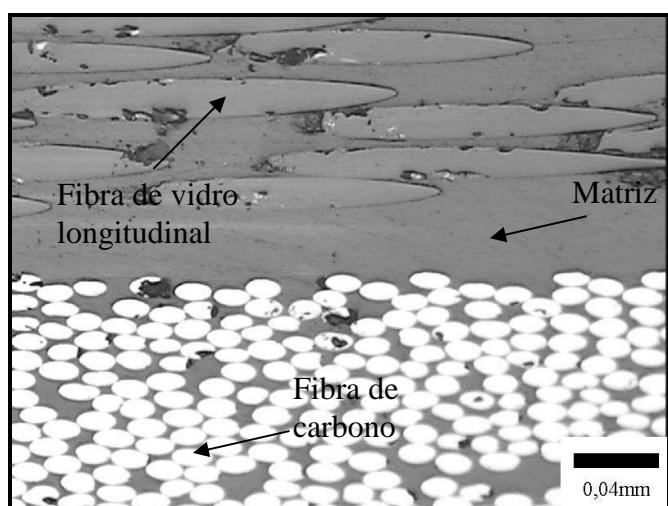
b)



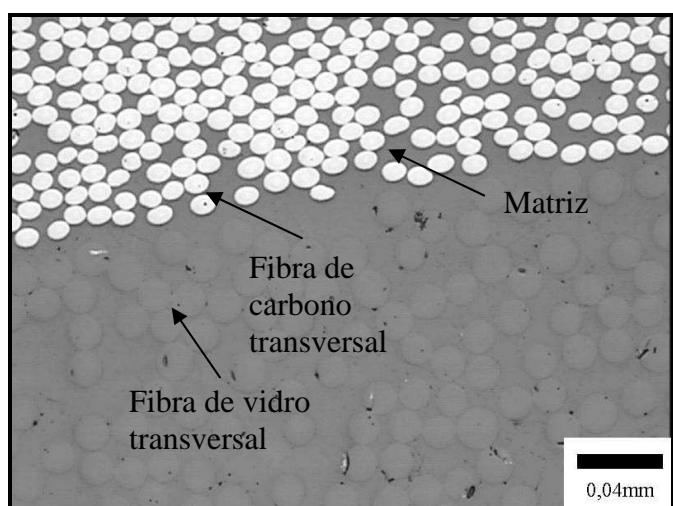
c)



d)



e)



f)

Figura 35 - Micrografia dos tubos híbridos, aumento 200x: a) corte longitudinal tubo 30°, b) corte transversal tubo 30°, c) corte longitudinal tubo 45° d) corte transversal tubo 45°, e) corte longitudinal tubo 60° e f) corte transversal tubo 60°.

Na Figura 35, onde estão expostas as micrografias dos tubos híbridos, é importante evidenciar que as fibras de carbono se apresentam mais nítidas do que as de vidro, que apresentam vários defeitos provocados durante o lixamento e polimento. Essa dificuldade em se obter amostras de qualidade para observação em microscópio óptico é comum quando dois materiais possuem características superficiais diferentes, como o caso das fibras de carbono e vidro, que apresentam além de rugosidades diferentes, provavelmente durezas diferentes, respondendo de formas distintas à abrasão a que são submetidas. As micrografias dos tubos híbridos apresentam-se coerentes com as estudadas por FARO (2009).

4.2.3 – Ensaio de anel

Os anéis ensaiados em tração foram analisados em dois grupos diferentes: no primeiro grupo foram analisados os anéis dos tubos de fibra de vidro e no segundo os anéis dos tubos híbridos. A análise feita consiste na comparação do comportamento mecânico para os diferentes ângulos de enrolamento das camadas helicoidais. Posteriormente foi feita uma análise da influência do tipo de fibra sobre a resistência mecânica.

As Figuras 35 e 36 mostram as curvas tensão *versus* deslocamento características dos anéis extraídos dos tubos de fibra de vidro e híbridos, respectivamente. A Tabela 8 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas a partir dessas curvas.

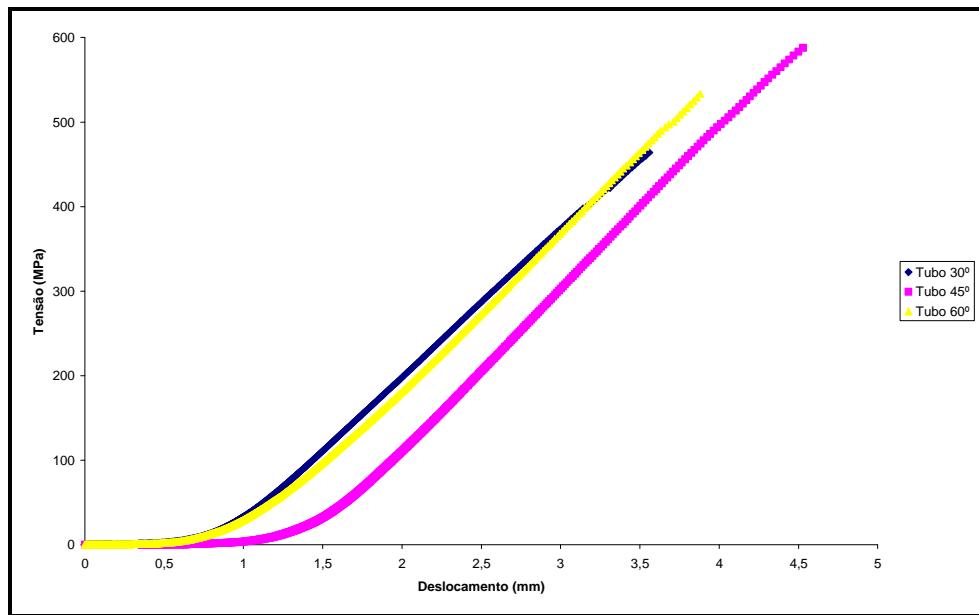


Figura 36 - Curvas tensão *versus* deslocamento representativas dos anéis dos tubos de fibra de vidro, com diferentes ângulos de enrolamento das camadas helicoidais.

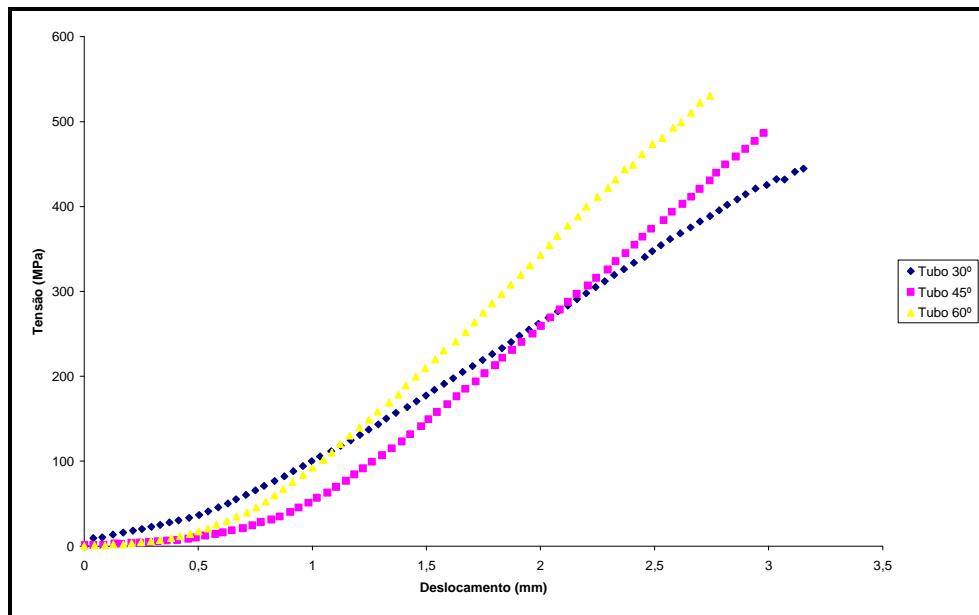


Figura 37 - Curvas tensão *versus* deslocamento representativas dos anéis dos tubos híbridos, com diferentes ângulos de enrolamento das camadas helicoidais de fibras de carbono.

Tabela 8 - Tensões e deslocamentos de ruptura médios para diferentes ângulos de enrolamento da fibra

Ângulo	Tensão de ruptura média (MPa)	Deslocamento de ruptura médio (mm)
Vidro 30°	461 ± 66	3,89 ± 0,41
Vidro 45°	585 ± 45	4,16 ± 0,35
Vidro 60°	533 ± 38	3,84 ± 0,11
Híbrido 30°	462 ± 89	3,47 ± 0,54
Híbrido 45°	490 ± 46	4,30 ± 0,52
Híbrido 60°	533 ± 70	4,47 ± 1,19

Segundo dados da literatura, (KAYNAK *et al.*, 2005), maior resistência mecânica de anel sob tração pode ser obtida a partir do aumento do ângulo de enrolamento das fibras em relação ao eixo do tubo, tanto para fibras de vidro quanto para fibras de carbono. Este fenômeno é decorrente da aproximação da fibra de reforço da direção de carregamento. Entretanto, no presente estudo, trabalhou-se com camadas alternadas na seguinte seqüência: circunferencial/helicoidal/circunferencial, enquanto KAYNAK *et al.*, (2005), trabalharam apenas com um único ângulo de enrolamento por tubo. No presente trabalho não se observou um aumento da resistência mecânica com o aumento do ângulo de enrolamento como observado no trabalho de KAYNAK *et al.*, (2005), pois apesar de os valores de resistência para os tubos híbridos apresentarem-se aparentemente crescentes, verificou-se por meio de análise estatística com 95% de confiança pelo teste LSD (*Least Square Difference*) de Fisher que os valores de tensão não apresentam diferença estatisticamente significativa (anexo). Provavelmente, o fato de os valores de tensão de ruptura não terem apresentado aumento com o aumento do ângulo de enrolamento das fibras das camadas helicoidais, deve-se ao fato de que todos os tubos fabricados neste trabalho continham camadas circunferenciais, que são as

camadas que efetivamente suportam esse tipo de carregamento ao qual os anéis são submetidos e, portanto as camadas helicoidais não exerceram influência significativa na resistência mecânica.

Quando comparamos a influência do tipo de fibra, para a mesma angulação, verifica-se que os valores de tensão tanto para 30°, quanto para 60°, não apresentam diferenças entre si, porém para o ângulo de 45° a fibra de vidro se mostrou muito mais resistente em média do que a fibra de carbono. Essa superioridade de comportamento da fibra de vidro com relação à fibra de carbono aparentemente pode parecer contraditória, uma vez que a fibra de carbono apresenta resistência à tração superior à fibra de vidro. Porém, deve-se considerar a anisotropia da fibra de carbono e o fato de que a 45° ocorre intenso cisalhamento. Como relatado por DANIEL, I. M. e ISHAI, O. (2006), as fibras de carbono têm menor resistência ao cisalhamento em laminados com epóxi do que as fibras de vidro e, portanto, a resistência nessa orientação fica diminuída.

Segundo mencionado anteriormente, quando tubos fabricados por enrolamento filamentar contendo fibras com múltiplos ângulos são testados sob carregamento circunferencial interno puro, como é o caso do ensaio de anel, a parede do tubo é sujeita à mesma condição de carregamento que um laminado sob tração uniaxial (HULL e CLYNE, 1996).

CAMUSSI (2007) ensaiou em tração laminados unidirecionais seguindo as orientações de 0°, 90° e 45°, para fibras de vidro e carbono, e relatou que para os laminados de fibras de carbono orientadas à 45° houve uma suave torção das fibras, fenômeno que é atribuído ao acoplamento entre flexão, torção e alongamento em arranjos assimétricos, conforme demonstrado matematicamente em TECHNOMIC PUBLICATION, 1992, *apud* CAMUSSI (2007). Portanto, verifica-se que as fibras de carbono devido à inerente anisotropia que possuem e possibilidade de ocorrência de acoplamento, necessitam de um estudo mais específico principalmente para o arranjo de 45°, que é uma direção de intenso cisalhamento.

A Figura 38 apresenta as imagens das superfícies de fratura dos anéis de fibra de vidro e fibras híbridas.



a)



b)

Figura 38 - Anéis fraturados de tubos de 60°: a) anel do tubo de fibra de vidro e b) anel do tubo híbrido.

Em todas as amostras, para ambos os grupos de anéis, a fratura foi semelhante e ocorreu na área da seção reduzida, havendo quebra de fibras e delaminação em todos os casos, como pode-se observar melhor na Figura 39, que mostra uma vista mais ampliada da superfície de fratura.



a)



b)

Figura 39 – Anel fraturado do tubo de fibras de vidro: a) fibras a 60° b) ampliação do anel fraturado com fibras a 60°.

Os modos de fratura e as imagens anteriormente apresentadas são similares ao observado na literatura (KAYNAK *et al.*, 2008, FARO, 2008, SILVA, 2008 e SOBRINHO, 2009).

4.2.4 – Ensaio de pressão hidrostática externa

A Figura 40 apresenta as curvas pressão *versus* tempo de carregamento dos tubos contendo somente fibras de vidro.

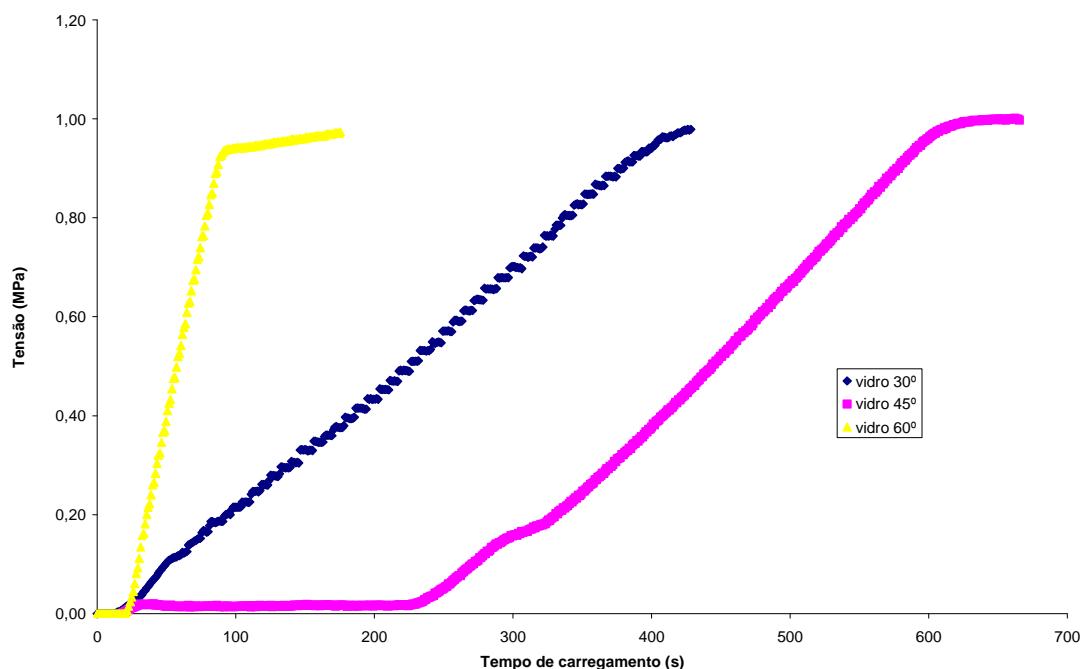


Figura 40 - Gráfico pressão *versus* tempo de carregamento para tubos com fibra de vidro.

Observando o gráfico pressão *versus* tempo de carregamento da Figura 40, é importante ressaltar que os valores baixos para pressão de colapso (em média, 149 psi ou 1,03 MPa) são justificados pela fina espessura dos tubos, que se deve ao reduzido número de camadas de enrolamento (4).

SOBRINHO (2009), em seu trabalho verificou a influência da quantidade de camadas de compósitos na resistência ao colapso, a partir de tubos Epóxi/CTBN/fibra de vidro S2 com a mesma seqüência de empilhamento utilizada neste trabalho (circunferencial/helicoidal/circunferencial). A autora observou que com o aumento do número de camadas de 8 para 16, a pressão de colapso do tubo teve um aumento de

aproximadamente 4,4 vezes, passando de 792 psi (5,46 MPa) para 3552 psi (24,50 MPa).

Deste modo, acredita-se que a aplicação desse material para águas ultra-profundas, seja viável, desde que se faça um aumento do número de camadas para aproximadamente 16.

Comparando as curvas pressão *versus* tempo para os tubos contendo somente fibras de vidro verifica-se que o tubo que apresentou maior resistência ao colapso foi o que possuía camada helicoidal com ângulo de $\pm 45^\circ$, e que os tubos com ângulos de $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$ apresentaram pressões de colapso muito próximas e inferiores ao com ângulo de $\pm 45^\circ$, embora tenham colapsado em tempos diferentes. Esses resultados nos mostram então, que para esse material, o ângulo que apresentou a melhor contribuição de reforço foi o de $\pm 45^\circ$.

Na Figura 41 são apresentadas as curvas pressão *versus* tempo de carregamento dos tubos híbridos.

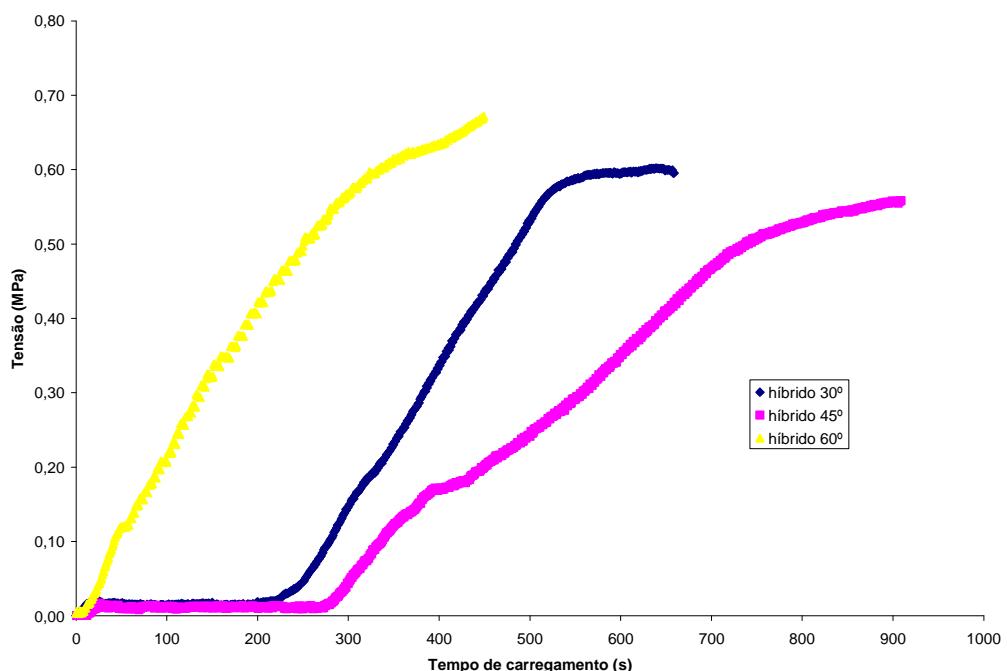


Figura 41 - Gráfico pressão *versus* tempo de carregamento para tubos híbridos.

O tubo híbrido que apresentou a menor tensão de colapso foi o com camada helicoidal a $\pm 45^\circ$ e os tubos com ângulos de $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$ apresentaram pressões de colapso muito próximas e superiores ao tubo com ângulo de $\pm 45^\circ$.

Para ambos os grupos de tubos, os constituídos somente com fibras de vidro e os híbridos, foi verificado que as curvas registram comportamentos diferentes, no início de cada ensaio. Em algumas curvas, a contagem de tempo se inicia sem que o tubo tenha ainda sido submetido a qualquer pressão. Tais variações do modo inicial de aquisição de dados dependem do operador que realiza o ensaio, e não afetam o decorrer do mesmo, nem influenciam em seu resultado final.

A Tabela 9 apresenta uma comparação entre as pressões de colapso e respectivos tempos de ensaio para todos os tubos testados.

Tabela 9 - Valores de pressão de colapso e tempo para ensaio de pressão hidrostática externa

Tubo	Pressão de colapso (MPa)	Pressão de colapso (psi)	Tempo de carregamento (s)
vidro 30°	0,98	142	428
vidro 45°	1,14	165	436
vidro 60°	0,97	141	154
híbrido 30°	0,74	107	488
híbrido 45°	0,56	81	630
híbrido 60°	0,78	113	449

Os tubos contendo apenas fibras de vidro apresentam resistência à pressão externa superior à dos tubos híbridos. Apesar deste resultado parecer contraditório, visto que a fibra de carbono possui resistência nominal sob tração bastante superior à resistência da fibra de vidro, o que foi também observado neste trabalho quando analisamos os resultados dos ensaios de tração dos laminados de vidro e carbono, outros tipos de carregamento atuam durante o ensaio hidrostático e devem ser considerados.

O ensaio de pressão externa provoca uma tensão cisalhante sobre os tubos, e as fibras de carbono apresentam resistência ao cisalhamento inferior a das fibras de vidro, demonstrando, portanto, a coerência dos resultados obtidos. Deste modo, verificou-se que as fibras de carbono, nos testes realizados, não foram eficientes em aumentar o reforço proporcionado pelas fibras de vidro. Observou-se ainda, que os tubos híbridos tinham espessura inferior aos tubos com fibras de vidro, o que pode também ter corroborado para a menor resistência à pressão externa dos mesmos.

Neste caso, observou-se também a influência do tipo de fibra (isotrópica/anisotrópica) na resistência ao colapso dos tubos contendo camadas helicoidais a $\pm 45^\circ$ (região de intenso cisalhamento) e, portanto, o tubo contendo fibras de carbono apresentou resistência ao colapso inferior ao tubo de fibras de vidro.

A Figura 42a mostra um tubo de fibras de vidro fraturado, cujo ângulo de enrolamento das camadas helicoidais foi de $\pm 60^\circ$, como exemplo do modo de fratura que ocorreu em todos os outros tubos, com exceção do tubo com fibra de carbono à $\pm 45^\circ$, que pode ser observado na Figura 42b.



a)



b)

Figura 42 - Tubos fraturados após ensaio de pressão hidrostática externa: a) tubo de fibra de vidro $\pm 60^\circ$ e b) tubo híbrido $\pm 45^\circ$.

O dano provocado pelo aumento da pressão externa sobre o tubo com fibra de carbono a $\pm 45^\circ$ foi menos intenso do que o observado para os demais tubos, provavelmente devido à menor deformação necessária para rompê-lo.

Como descrito anteriormente, os tubos compósitos foram processados em um mandril colapsável com objetivo de facilitar a retirada dos mesmos. No entanto,

observou-se o aparecimento de uma linha protuberante de resina, no interior do tubo, segundo a linha de desacoplamento do mandril colapsável. Essa linha de resina pode atuar como um concentrador de tensões. Foi observado que nos tubos testados o início da fratura ocorreu na região de acúmulo de resina. Na Figura 43 pode-se observar o início da fratura do tubo na região da linha de resina.



Figura 43 – Vista interna do tubo de fibra de vidro fraturado após ensaio de pressão hidrostática externa.

SOBRINHO (2009) e SILVA (2008) fizeram uso desse mesmo mandril colapsável, e posterior ensaio de pressão externa, e não observaram iniciação de fratura nessa linha de resina, provavelmente devido a maiores espessuras de tubo adotadas, para as quais as dimensões da linha de resina se mostraram irrelevantes. Uma solução seria aumentar a espessura dos tubos estudados no presente trabalho, pois as vantagens da utilização de mandril colapsável em substituição a um mandril inteiriço já foram observadas pelos mesmos autores em seus respectivos trabalhos.

5- Conclusões

A fração volumétrica de fibras, tanto para laminados quanto para tubos, apresentou-se inferior para compósitos contendo fibras de carbono em função da molhabilidade da fibra de carbono ser superior a da fibra de vidro e da ocorrência de degradação parcial dessas fibras durante o método de queima.

O comportamento e os valores de tensão de ruptura e deformação para os laminados de fibras de vidro e de fibras de carbono ensaiados em tração se mostraram coerentes com os resultados obtidos por CAMUSSI (2007) e FARO (2008) e são proporcionais às frações volumétricas aferidas.

Em carregamento circunferencial puro, como no ensaio de anel, a diferença de contribuição para tipos de fibras distintas é evidente apenas para o ângulo de $\pm 45^\circ$ em função da anisotropia da fibra de carbono e devido ao fato de haver à $\pm 45^\circ$ intenso cisalhamento.

Não foi observado aumento estatisticamente significativo de resistência mecânica sob tração de anel conforme se aumentou o ângulo de enrolamento das fibras, provavelmente devido à influência de camadas de ângulos diferentes no mesmo tubo.

Os tubos contendo somente fibras de vidro, quando submetidos à pressão externa, apresentaram resistência superior aos tubos contendo fibra de carbono, principalmente para o ângulo de enrolamento de $\pm 45^\circ$. Isso se deve provavelmente à anisotropia da fibra de carbono e resistência à compressão e espessura inferiores com relação à fibra de vidro.

6 - Sugestões para trabalhos futuros

Realizar ensaio de tração de tubos compósitos para diferentes ângulos de enrolamento de fibras das camadas helicoidais, tanto para fibras de vidro quanto para fibras de carbono, visto que os tubos são submetidos tanto a solicitações circunferenciais quanto em tração quando da aplicação como *risers*.

Medir a fração volumétrica de vazios por meio de um programa de análise de imagens, bem como o ângulo de enrolamento de fibras das camadas helicoidais.

Realizar ensaios de anel para tubos compósitos envelhecidos em água salina, em temperatura superior à do ambiente e por radiação UV.

Avaliar as propriedades mecânicas para as configurações dos tubos já estudados após a adição de um *liner*.

Realizar testes de flexão para determinar o raio de curvatura, a resistência e a deformação máxima dos tubos ao dobramento.

7 - Referências Bibliográficas

- ASTM D2290, 2000, “Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method”.
- ASTM D3039/D3039M, 1995, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”.
- DNV-RP-F202, 2003, Det Norske Veritas “Recommended Practice Composite Risers”.
- RP-2RD, A., 1998, “Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)”, American Petroleum Institute, Washington, USA.
- 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.
- BAI, J., SEELEUTHNER, P., BOMPARD, P., 1997, “Mechanical Behaviour of $\pm 55^\circ$ Filament-Wound Glass-Fibre/Epoxy-Resin Tubes: I. Microstructural Analyses, Mechanical Behaviour and Damage Mechanisms of Composite Tubes Under Pure Tensile Loading, Pure Internal Pressure, and Combined Loading”. In: *Composites Science and Technology*, vol 57, pp. 141-153.
- BEYLE, A. I., GUSTAFSON, C. G., KULAKOV, V. L., TARNOPOL Y. M., 1997, “Composite Risers for Deep-Water Offshore Technology: Problem and Prospects. 1. Metal-Composite Riser”. In: *Mechanics of Composite Materials*, vol 33, nº5.
- CALLISTER JR, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC.
- CAMUSSI, A. B. S., 2007, *Desenvolvimento de Material Compósito Visando a Fabricação de Risers Rígidos por Enrolamento Filamentar*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CANEVAROLO JR, S. V., 2002, *Ciência dos Polímeros um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*. 1 ed. São Paulo, Artliber ABpol.
- CARVALHO, A., 1992, *Fiberglass x Corrosão Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos*. São Paulo, ASPLA.
- CARROLL, M., ELLYIN, F., KUJAWSKI, D., CHIU, A. S., 1995, “The Rate-Dependent Behaviour of $\pm 55^\circ$ Filament-Wound Glass-Fibre/Epoxy Tubes Under Biaxial Loading”. In: *Composites Science and Technology*, vol 55, pp. 391-403.

- CHAWLA, K. K., 1987, *Composite Materials*. 1 ed. Springer-Verlag New York.
- COSTA, C. H. O., ROITMAN, N., MAGLUTA, C., ELLWANGER, G. B., “Caracterização das Propriedades Mecânicas das Camadas de um Riser Flexível”. In: *2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás/UFRJ*, Rio de Janeiro.
- DANIEL, I. M., ISHAI, O., 2006, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2 ed. Nova York, Oxford University Press.
- FARO, A. A. S., 2008, *Desenvolvimento de Tubos Compósitos Produzidos por Enrolamento Filamentar para Possíveis Aplicações como Risers Rígidos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HULL, D., CLYNE, T. W., 1996, *An Introduction to Composite Materials*. 2nd ed. *Cambridge solid state science series*, Cambridge University Press: New York, NY.
- JOHNSON, D.B., BALDWIN, D.D., LO, K.H., 2001, “Composite Production Riser Development and Qualification Test Results”. In: *Proceedings of the Workshop on Composite Materials for Offshore Operation*, pp. 109-123, University of Houston. Texas, USA.
- JOHNSON, D.B., LO, K.H., WU, H.F., 2000, “Development of Rigid Composite Risers- a Status Report”. In: *Sampe Journal*, v.36, n5, pp. 26-33.
- KAYNAK, C., ERDILLER, E. S., PARNAS, L., SENEL, F., 2005, “Use of Split-Disk Tests for the Process Parameters of Filament Wound Epoxy Composite Tubes”. In: *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 648 – 655.
- KUBOTA, H. Y., 2003, *Comportamento Dinâmico de um riser rígido de produção*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- LAPIQUE, F., REDFORD, K., 2002, “Curing Effects on Viscosity and Mechanical Properties of a Commercial Epoxy Resin Adhesive”. In: *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v.22, pp. 337-346.
- LOPES, F. C., 2004, *O conflito entre a Exploração Offshore de Petróleo e a Atividade Pesqueira Artesanal*. Monografia de bacharelado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MALLICK, P. K., 2007, *Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design*. 3 ed. Michigan, LLC.
- MANTELL, S. C., COHEN, D., 2000, *Filament Winding, Processing of Composites*. Warren Baker Hanser.

- MAY, C. A., 1988, *Epoxy Resins Chemistry and Technology*. 2 ed. Nova York, Marcel Dekker.
- MENICONI, L. C. M., REID, S. R., SODEN, P. D., 2001, “Preliminary Design of Composite Riser Stress Joints”. In: *Composites*: part A, v. 32, pp. 597-605.
- MERTINY, P., ELLYIN, F., HOTHAN, A., 2004, “An Experimental Investigation on the Effect of Multi-Angle Filament Winding on the Strength of Tubular Composite Structures”. In: *Composites Science and Technology*.
- MORIOKA, K., TOMITA, Y., 2000, “Effect of Lay-Up Sequences on Mechanical Properties and Fracture Behavior of CFRP Laminate Composites”. In: *Materials Characterization*.
- NETO, F. L., PARDINI L. C., 2006, *Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo, Edgard Blücher.
- OCHOA, O. O., 2006, “Composite Riser Experience and Design Guidance”. *Offshore Technology Research Center*. Texas, USA.
- ODRU, P., POIRETTE, Y., STASSEN, Y., SAINT MARCOUX, J. F., ABERGEL, L., 2003, “Composite Riser Export Line Systems for Deep Offshore Applications”. In: *22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Cancum, México.
- PILATO, L. A., MICHNO, M. J., 1994, *Advanced Composite Materials*. Springer-Velag, New York.
- 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., STJERN, G., STORHAUG, T., SPENCER, B., ECHTERMEYER A., 2002, “The First Offshore Field Installation for a Composite Riser Joint”. In: *Offshore Technology Conference* 14018.
- SHEN, F. C., 1995, “A filament-wound structure technology overview”. In: *Materials, Chemistry and Physics*, vol. 42, pp. 96-100.
- SOUSA, S. R. M., PINA FILHO, A. C., DUTRA, M. S., 2007, “Estudo de Falhas em Risers Fabricados em Material Compósito”. *4^o PDPETRO*. Campinas.
- SOBRINHO, L. L., 2005, *Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

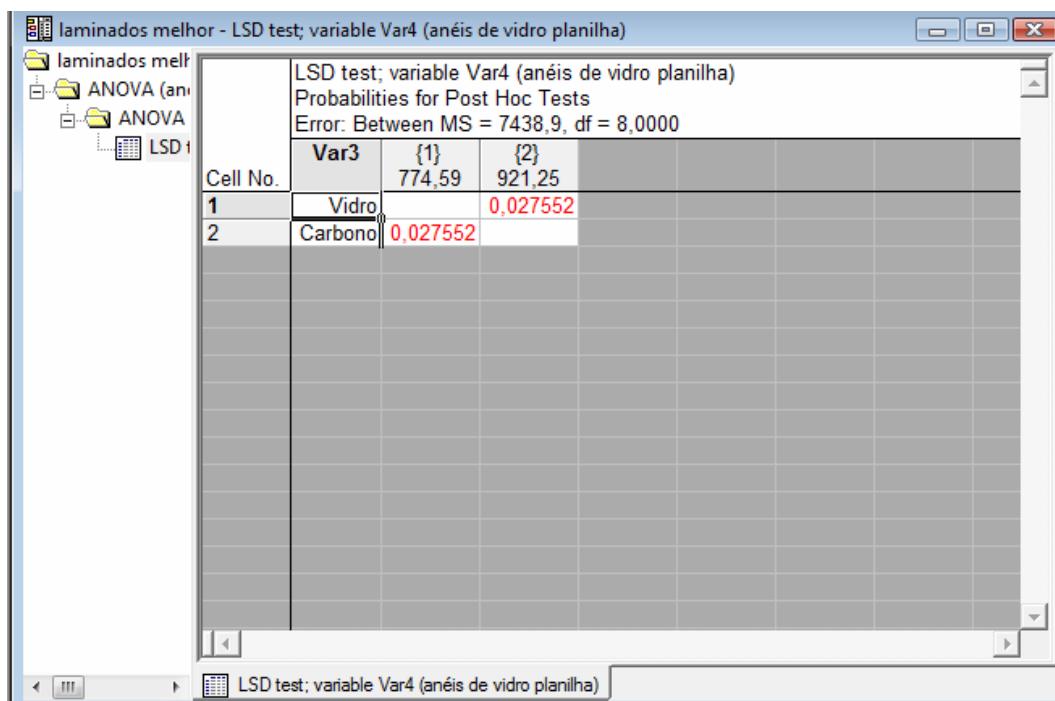
- SOBRINHO, L. L., 2009, *Desenvolvimento de Tubos Compósitos para Possíveis Aplicações como Risers*. Teses de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SOLDAN, L., 2008, *Estudo Numérico e Experimental Visando o Desenvolvimento de Risers Compósitos por Enrolamento Filamentar*. Monografia de bacharelado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, R. A. F., 2008, *Estudo Numérico e Experimental Visando o Desenvolvimento de Dutos Compósitos Submarinos pela Técnica de Enrolamento Filamentar*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SUN, C., QUINN, B., TAO, J., 1996, *Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates*, Tech. rep., U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- TECHNOMIC PUBLICATION, 1992, “Characterization and Behavior of Structural Composites”, Primer on composite materials analysis, 2 ed, chapter 7, Pennsylvania, USA.

8 – Anexo

Apresenta-se neste anexo as tabelas referentes à análise estatística realizada, tendo como auxílio o programa Statistica. O teste utilizado foi o LSD de Fisher.

A Tabela 10 apresenta a análise estatística para os valores de tensão dos laminados compósitos. A cor vermelha indica que há diferença estatisticamente significativa entre os valores comparados, para 95% de confiança.

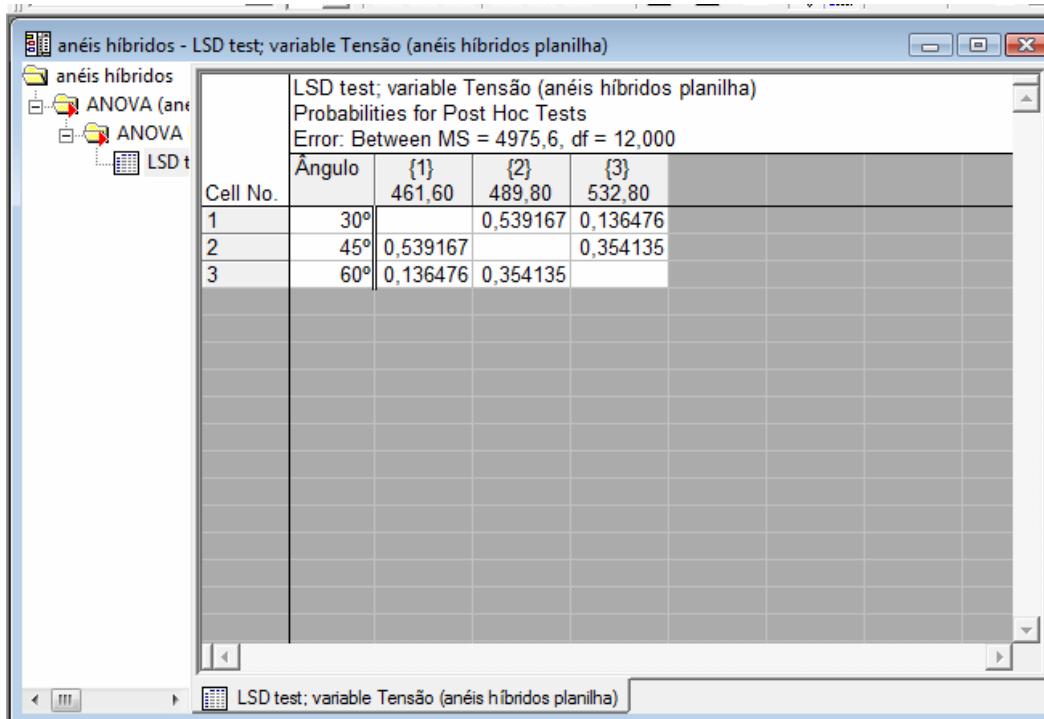
Tabela 10 - Análise estatística para os valores de tensão dos laminados compósitos



Cell No.	Var3	{1}	{2}
1	Vidro	774,59	921,25
2	Carbono	0,027552	0,027552

A Tabela 11 apresenta os valores de análise estatística para os valores de tensão de ruptura dos anéis híbridos. A cor preta indica que os valores analisados não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si, para 95% de confiança.

Tabela 11 - Análise estatística para os valores de tensão dos tubos híbridos

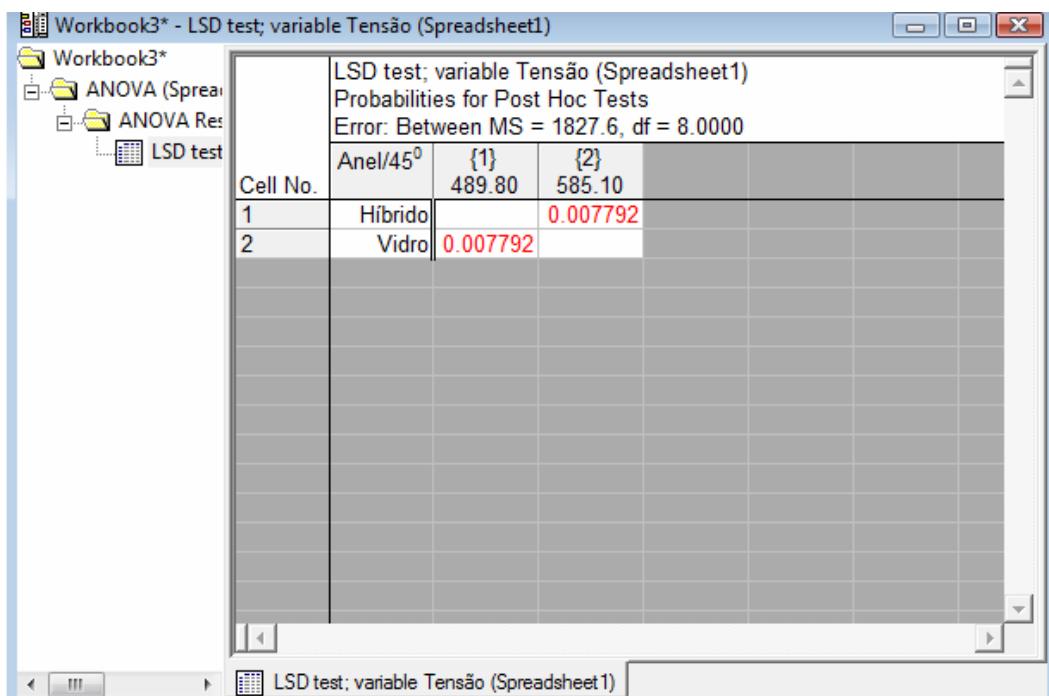


The screenshot shows a software interface with a title bar 'anéis híbridos - LSD test; variable Tensão (anéis híbridos planilha)'. The left sidebar shows a tree structure with 'anéis híbridos', 'ANOVA (anéis híbridos)', 'ANOVA', and 'LSD t'. The main area displays the 'LSD test; variable Tensão (anéis híbridos planilha)' results. The text within the main area includes 'Probabilities for Post Hoc Tests' and 'Error: Between MS = 4975,6, df = 12,000'. A table is shown with the following data:

Cell No.	Ângulo	Probabilities for Post Hoc Tests		
		{1}	{2}	{3}
1	30°	461,60	489,80	532,80
2	45°	0,539167		0,354135
3	60°	0,136476	0,354135	

A Tabela 12 apresenta a análise estatística para os valores de tensão dos tubos a $\pm 45^\circ$ com 95% de confiança.

Tabela 12 - Análise estatística para os valores de tensão dos tubos a $\pm 45^\circ$



The screenshot shows a software interface with a title bar 'Workbook3* - LSD test; variable Tensão (Spreadsheet1)'. The left sidebar shows a tree structure with 'Workbook3*', 'ANOVA (Spreadsheet1)', 'ANOVA Res', and 'LSD test'. The main area displays the 'LSD test; variable Tensão (Spreadsheet1)' results. The text within the main area includes 'Probabilities for Post Hoc Tests' and 'Error: Between MS = 1827.6, df = 8.0000'. A table is shown with the following data:

Cell No.	Anel/45°	Probabilities for Post Hoc Tests	
		{1}	{2}
1	Híbrido		0.007792
2	Vidro	0.007792	