

# DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS PARA UNIÃO DE RISER RÍGIDOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA E LINER DE LIGA DE ALUMÍNIO

Marcelo de Araujo Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Fernando Luiz Bastian

Rio de Janeiro Junho de 2011

## DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS PARA UNIÃO DE RISERS RÍGIDOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA E LINER DE LIGA DE ALUMÍNIO

Marcelo de Araujo Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof<sup>a</sup>. Verônica Maria de Araújo Calado, D. Sc.

Prof<sup>a</sup>. Marysilvia Ferreira da Costa, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL JUNHO DE 2011

#### Gomes, Marcelo de Araujo

Desenvolvimento de juntas para união de risers rigidos compósitos de matriz polimérica e liner de liga de alumínio/ Marcelo de Araujo Gomes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIX, 134 p. 29,7 cm

Orientador: Fernando Luiz Bastian

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de

Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 121 - 129

Tubos Compósitos. 2. Enrolamento Filamentar. 3.
Risers. 4. Juntas. I. Bastian, Fernando Luiz. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

## Dedico este trabalho a toda minha família e muito amor a

meu pai.

"Pai! Eu não faço questão de ser tudo Só não quero e não vou ficar mudo Prá falar de amor Prá você..." Fábio Jr

## Agradecimentos

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

À Universidade Federal do Rio de Janeiro e ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE por me proporcionarem essa oportunidade de conhecimento.

Ao meu orientador de mestrado Professor Doutor Fernando Luiz Bastian, por todos os ensinamentos sobre compósitos e ensaios mecânicos, por me orientar ativamente durante estes dois anos e meio de trabalho, e por conduzir nosso laboratório de maneira séria e harmoniosa.

À instituição MARINHA DO BRASIL- CIAGA, por toda compreensão e liberação de horários na escola de formação de oficiais da marinha mercante para a finalização da minha dissertação na COPPE/UFRJ.

Aos meus amigos do Laboratório de Compósitos pela amizade e grande ajuda: Rafael, Daniel, Ledjane, Camila Mayworm, Sânia, Miguel, Marcelo, Letícia, Carol, Camila Lorenção e em especial ao Luiz por se dispor com a sua vasta experiência neste trabalho.

Ao grande amigo de Laboratório de Compósitos Luiz (Aluno de Doutorado) em especial, pelos seus grandes conselhos.

Aos técnicos da Faculdade de Engenharia de Materiais – COPPE/UFRJ, pela grande disponibilidade: Robson e Flávio.

As Professoras Verônica Maria de Araújo Calado e Marysilvia Ferreira, por aceitarem a participar da defesa desta dissertação.

V

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

## DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS PARA UNIÃO DE RISERS RÍGIDOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA E LINER DE LIGA DE ALUMÍNIO.

Marcelo de Araujo Gomes

Junho/2011

Orientador: Fernando Luiz Bastian

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O presente trabalho abrange a pesquisa e desenvolvimento de juntas para aplicações em tubos compósitos com uma camada interna de liga de alumínio, conhecida como liner, para futuras aplicações como risers. Elas foram projetadas para manter a integridade do conjunto e suportar profundidade elevadas. Em primeiro lugar, foi determinado o uso de fibra de vidro tipo "E" e matriz epóxi para a produção do material compósito, onde esses elementos apresentam propriedades mecânicas razoáveis preço mais acessível. Em um passo seguinte, para o *liner* de alumínio, foi definida a liga 6061 que apresenta boa disponibilidade no mercado e boas propriedades. Foi processado o enrolamento filamentar destas fibras já impregnadas com a resina, no liner de alumínio obtido. Com os tubos de compósito com liner de alumínio produzidos foram desenvolvidas juntas de união com um mecanismo de conexão utilizando filetes de rosca. Desta forma, as juntas foram caracterizadas mecânica e estruturalmente. As juntas foram estudadas quanto ao seu comportamento em ensaios hidrostáticos de colapso, teste de adesão do alumínio no compósito e ensaios de anel, para o material compósito presente. Os resultados obtidos mostraram que a presença do material compósito junto com a liga de alumínio proporcionou um produto final de boas características mecânicas, apresentando assim altas pressões de colapso e boa estanqueidade. Também, este produto final viabiliza a sua utilização em grandes profundidades, levando em conta que uma conexão é o ponto crítico de um seguimento de tubos.

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

## DEVELOPMENT OF THE JOINTS FOR RIGID RISER COMPOSITE OF POLYMERIC MATRIX AND ALUMINUM ALLOY LINER

Marcelo de Araujo Gomes

June /2011

Advisor: Fernando Luiz Bastian

Department: Metallurgical and Material Science Engineering

This work includes research and development of joints for applications in composite tubes with an inner layer of aluminum alloy, known as liner, for future applications in the wake of risers. They are designed to maintain the integrity of the whole and high depth support. It was first determined using fiberglass type "E" and epoxy matrix to produce the composite material, where these elements have good mechanical properties and lower cost. In a next step for the aluminum liner was set to 6061 which has good market availability and good properties. It was processed as filament winding, these fibers already impregnated with resin in the liner of aluminum obtained. Tubes with composite liner made of aluminum were developed together with a union of connection mechanism using fillets thread. Thus, the joints were characterized mechanically and structurally. Joints were studied as to their behavior in hydrostatic testing of collapse, adhesion test of aluminum in the composite ring and tests for the composite material present. The results showed that the presence of composite material together with the aluminum alloy brought a final product with good mechanical properties, thus presenting high pressures of collapse and a good seal. The final product allowed its use in high depths, taking into consideration that a connection is the critical point of continuum tubes.

	,
<b>CITE</b>	
	ілки
<b>NUT 1</b>	

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - Histórico da Atividade de Exploração Offshore no Brasil	4
2.2 - Águas Profundas	9
2.3 - Sistemas flutuantes de exploração e à explotação de petróleo	10
2.4 - Risers	15
2.4.1 - Risers flexíveis	17
2.4.2 - Risers rígidos	17
2.4.3 - Classificados quanto à sua finalidade	18
2.5 - Juntas metálicas para risers	20
2.6 - Roscas	22
2.6.1 - Alguns tipos de rosca	22
2.6.2 - Tipos de conexões	23
2.7 - Materiais Compósitos	30
2.7.1 - Características principais dos materiais reforçados com fibra	31
2.7.2 - Matrizes Para Compósitos	31
2.7.2.1 - Matriz Polimérica Epóxi	31
2.7.2.2 - Processo de Cura	32
2.7.2.3 - A escolha entre matrizes	33
2.7.3 - Fibras para compósitos	33
2.7.3.1 - Fibra de vidro	35
2.7.3.2 - Comparações de fibras	36
2.8 - Adesões entre compósito e outros matérias	37
2.9 - Alumínio	38
2.10 - <i>Riser</i> de compósitos	40
2.11 - Juntas para riser de compósitos	43
2.12 - Enrolamento Filamentar	44
2.12.1 - Configurações de Enrolamento	46
3 - Proposta de Trabalho	50
1	

4 - Materiais e Métodos	52
4.1 - Materiais	52
4.1.1 - <i>Liner</i> de liga de alumínio	52
4.1.2 - Compósito	53
4.1.3 - Massa epóxi de aplicação subaquática	54
4.2 - Métodos	55
4.2.1 - Preparo superficial do tubo de alumínio, ou mandril, antes do	55
enrolamento filamentar das fibras.	
4.2.2 - Processo de fabricação das juntas por enrolamento filamentar	55
das fibras de vidro impregnadas por resina epóxi no <i>liner</i> de liga de alumínio.	
4.2.3 - Determinação do tipo de conexão da junta	57
4.2.4 - Determinação da rosca utilizada no sistema	59
4.2.5 - Montagens com suas etapas	63
4.2.6 - Determinação da resistência ao cisalhamento da junta	66
compósito / <i>liner</i> de alumínio.	
4.2.7 - Análise microestrutural das juntas de união.	70
4.2.8 - Determinação da fração volumétrica das fibras do material	75
compósito pelo processo de queima e pesagem	
4.2.9 - Ensaio de anel de segmentos de compósito das juntas	80
4.2.10 - Ensaio hidrostático com pressões nas juntas	82
5 - Resultados e Discussões	87
5.1 - Análise micro-estrutural do compósito presente nas juntas	87
5.2 - Determinações da fração volumétrica de fibra e resina (matriz) no	94
compósito	
5.3 - Determinações da densidade e fração volumétrica do alumínio nas	96
juntas	
5.4 - Ensaios de tração de anéis de compósito de segmentos das juntas.	98
5.5 - Ensaios de adesão superficial compósito e liner de alumínio nas juntas	100
5.6 - Ensaios hidrostáticos com pressões externas	104
5.7 - Ensaios hidrostáticos com pressões internas	113

6 - Conclusões	118
7 - Trabalhos Futuros	120
Referências Bibliográficas	121
Anexos	130

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Supridor aproximando-se de uma unidade	03
Figura 2 - Plataforma Fixa	06
Figura 3 - Plataforma Sedco	07
Figura 4 - Evolução da produção em águas profundas	10
que reagem para a formação das cadeias poliméricas	
Figura 5 - Estrutura offshore: a) jaqueta, b) gravidade, c) semi-submersível, d)	11
navio de produção, e) plataformas de pernas atirantadas e f) Spar-Buoy.	
Figura 6 - Exemplo de plataforma semi-submersível de produção	12
Figura 7 - Exemplo de plataforma Navios-sonda	12
Figura 8 - Exemplo de plataforma FPSO e ilustração de seus riser.	13
Figura 9 - Exemplo de plataforma Jack up	14
Figura 10 - Exemplo de plataforma fixa jaqueta	14
Figura 11- Exemplo de plataforma Spar-Buoy	15
Figura 12 - Riser com configuração vertical	15
Figura 13 - Riser com configuração em catenária livre	16
Figura 14 - Riser com configuração lazy S.	16
Figura 15 - Riser flexível	17
Figura 16 - Riser rígido em catenária conectado à plataforma P-18	18
Figura 17- Junta rosqueada de metal	20
Figura 18 - Junta aparafusada de um riser de perfuração com linhas auxiliares	20
Figura 19 - Junta flexível em corte mostrando seu centro de rotação	21
Figura 20 - Esquema do riser deformado devido presença da corrente marinha e	21
passeio da unidade, apresentando um ângulo na junta flexível	
Figura 21 - Conjunto de filetes de rosca	22
Figura 22 - Exemplos de formatos bases de filetes de rosca	22
Figura 23 - Visualização de algumas definições	23
Figura 24 - Visualizações mais gerais	23
Figura 25 - Exemplo de conexão NPT	25
Figura 26 - Visualização da conexão e esmagamentos dos filetes em rosca NPT	25

Figura 27 - Rosca NPTF cônica	26
Figura 28 - Rosca NPSF paralela	26
Figura 29 - Rosca NPSI paralela interna e PTF externa curta	27
Figura 30 - Rosca PTF curta	27
Figura 31 - a) sistema métrico em formato cônico – b) Sistema métrico em formato	28
paralelo.	
Figura 32 - Idéia de formato de sistema inglês de roscas	28
Figura 33 - Rosca BSP com pressão de aperto	29
Figura 34 - Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A	32
(DGBEA)	
Figura 35 - Polímeros com resistência à oxidação, tenacidade e processabilidade	33
Figura 36 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um	34
dado volume em função da razão de aspecto (l/d)MO após ensaio de microdureza.	
Figura 37 - Resistência à tração específica em função do módulo de elasticidade à	36
tração específica para fibras de reforço	
Figura 38 - Tratamento químico em um material	38
Figura 39 - Granalhamento em um material	38
Figura 40 - Exemplo de <i>riser</i> metal compósito: <i>liner</i> interno metal (1), camada de	41
enrolamento circunferencial (2), camada de enrolamento helicoidal (3,4) e camada	
de proteção externa (5)	
Figura 41 - Enrolamento filamentar do riser rígido produzido	42
Figura 42 - Duto tipo sanduíche	43
Figura 43 - Riser desenvolvido de fibra de carbono	44
Figura 44 - Enrolamento circunferencial	46
Figura 45 - Enrolamento helicoidal	47
Figura 46 - As várias etapas do enrolamento helicoidal	47
Figura 47 - Detalhamento de uma peça em enrolamento	48
Figura 48 - Ilustração de um equipamento de enrolamento filamentar molhado	48
Figura 49 - Vista isométrica do riser de compósito com liner de liga de alumínio	50
com suas roscas nas extremidades.	

Figura 50 - Vista explodida do riser de compósito com liner de liga de alumínio	50
com a junta de união do <i>riser</i> com <i>liner</i> de liga de alumínio com rosca interna.	
Figura 51 - Vista isométrica do riser de compósito com liner de liga de alumínio	51
com sua junta de união do <i>riser</i> com <i>liner</i> de liga de alumínio com rosca interna.	
Figura 52 - Vista isométrica do riser de compósito com liner de liga de alumínio	51
com sua junta de união e o formato da montagem da braçadeira meia calha de aço	
inox na peça.	
Figura 53 - Curva de tensão deformação da liga de alumínio 6061-T6	53
Figura 54 - Etapas de enrolamento filamentar.	56
Figura 55 - Disposição de orientação de fibras	56
Figura 56 - Esquema do tipo de conexão	57
Figura 57 - Seguimentos de tubos para a fabricação das juntas de união.	58
Figura 58 - Formato da rosca, mais detalhado	60
Figura 59 - Esquema de localização das medidas da Tabela 12.	61
Figura 60 - Comparação entre profundidades de filetes de rosca da norma e o	62
projetado.	
Figura 61 - Formato de filetes de rosca NPT corrigida projetados	63
Figura 62 - Tubo com filetes de rosca no alumínio em suas pontas	63
Figura 63 - Junta de união entre os tubos	64
Figura 64 - Visualização do espaço entre a parte de compósito das duas partes.	64
Figura 65 - Peças auxiliares para montagem de juntas e tubos	65
Figura 66 - Massa epóxi presente entre as peças	66
Figura 67 - Finalização de montagem do conjunto	66
Figura 68 - Ilustração de localização de retirada dos corpos de prova para os	67
ensaios de adesão	
Figura 69 - Exemplo de anéis de compósito com <i>liner</i> de alumínio para ensaio de	67
adesão.	
Figura 70 - Ensaio de adesão.	68
Figura 71 - Mecanismo de ensaio de adesão.	69
Figura 72 - Metodologia de ensaio de adesão	69
Figura 73 - Amostras embutidas já polidas para observação microscópica	70

Figura 74 - Corte da amostra para análise pelo método de razão de aspecto	71
Figura 75 - Projeção da imagem da face de formato da fibra	72
Figura 76 - Régua virtual para medição	72
Figura 77 - Corte da amostra para análise na superfície externa do compósito	73
Figura 78 - Esquema de análise da superfície pelo método 2	74
Figura 79 - Exemplo de utilização de régua virtual para determinação da angulação	74
das fibras em relação ao eixo longitudinal	
Figura 80 - Localidade da retirada das amostras.	76
Figura 81 - Amostras retiradas para queima no forno.	77
Figura 82 - Forno com as 4 amostras para queima da resina.	77
Figura 83 - Picnometro com as amostras para a determinação da densidade do	78
compósito	
Figura 84 - Amostras para determinação da fração volumétrica e densidade do	79
alumínio.	
Figura 85 - anel de compósito com as devidas dimensões para o ensaio	80
Figura 86 - Diagrama esquemático de ensaio de anel.	80
Figura 87 - Aparato de ensaio de anel	81
Figura 88 - Aparato montado na máquina eletromecânica EMIC de tração	81
Figura 89 - Retirada de anéis da junta de união	82
Figura 90 - Anéis de compósito para ensaios	82
Figura 91 - Câmara hiperbárica	83
Figura 92 - Exemplo de cabeça de vedação em pressões externas.	83
Figura 93 - Esquema de atuação de pressões externas no corpo de prova	84
Figura 94 - Aparato para simulação de pressões externas	84
Figura 95 - Exemplo de cabeça de vedação em pressões internas	85
Figura 96 - Esquema de atuação de pressões internas no corpo de prova	86
Figura 97 - Aparato para simulação de pressões internas	86
Figura 98 - Amostra com 500 x de aumento (55°).	88
Figura 99 - Amostra com 200x de aumento (88°).	89
Figura 100 - Amostra com 50x de aumento.	90
Figura 101 - Amostra com 100x de aumento.	91

Figura 102 - Imagem ilustrativa de distribuição das fibras em aumento de 100x	92
Figura 103 - Tipos de tratamentos superficiais usados.	93
Figura 104 - Interface compósito/alumínio	94
Figura 105 - Curva de tração dos anéis	98
Figura 106 - Corpo de prova 1.	99
Figura 107 - Corpo de prova 2.	100
Figura 108 - Corpo de prova 3.	100
Figura 109 - Exemplos dos corpos de prova de adesão já ensaiados.	101
Figura 110 - Teste de adesão do primeiro grupo.	101
Figura 111 - Teste de adesão do segundo grupo.	102
Figura 112 - Junta.	105
Figura 113 - Ensaio de pressão externa de juntas.	105
Figura 114 - Foto das juntas depois de realizado o ensaio de pressão externa.	107
Figura 115 - Visão do esmagamento dos filetes de rosca para junta somente	107
alumínio em pressões externas.	
Figura 116 - Visão do esmagamento dos filetes de rosca para junta de compósito e	108
alumínio em pressões externas.	
Figura 117 - Detalhes de falha das fibras nas juntas.	108
Figura 118 - Profundidade atingida pelas juntas na presença de pressões externas.	109
Figura 119 - Ensaio de pressão externa na junta sem a presença da massa epóxi	110
entre as conexões.	
Figura 120 - Junta sem massa epóxi (vazamento).	111
Figura 121 - Junta desmontada.	112
Figura 122 - Profundidade atingida até o vazamento da conexão sem massa epóxi	112
referente a pressões internas.	
Figura 123 - Ensaio de pressão interna.	113
Figura 124 - Ensaio de pressão interna das juntas.	114
Figura 125 - Junta somente de alumínio depois de ensaio de pressão interna.	115
Figura 126 - Junta de compósito e alumínio depois de ensaio de pressão interna.	115
Figura 127 - Aparatos presentes acima das conexões.	116
Figura 128 - Curva de tração de anel de compósito (software Abaqus).	130

Figura 129 - Exemplo de formação de filetes em espiral na parte externa da liga de 133 alumínio.

Figura 130 - Outro exemplo de formação de filetes em espiral cruzados na parte 134 externa da liga de alumínio.

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos	35
Tabela 2 - Propriedades dos tipos de fibras de vidro utilizadas como reforços em	35
compósitos.	
Tabela 3 - Dados de dimensões e propriedades do <i>liner</i> de alumínio – 6061 – T6	52
Tabela 4 - Propriedades do Araldite ® LY 556*	53
Tabela 5 - Propriedades do Aradur 917*	54
Tabela 6- Propriedades do Accelerator DY 070*	54
Tabela 7 - Propriedades da fibra de vidro Advantex 111A	54
Tabela 8 - Propriedades da massa epóxi Tubolit MEP 301	55
Tabela 9 - Dimensões dos tubos e juntas de união	59
Tabela 10 - Características de conexão NPTF	59
Tabela 11 - Dados de medidas de rosca NPT pela norma ANSI B2.1	60
Tabela 12 - Rosca NPT corrigida	62
Tabela 13 - Valores experimentos de razão de aspecto para ângulos de 55°	88
Tabela 14 - Valores experimentos de razão de aspecto para ângulos de 88°	89
Tabela 15 - Valores experimentais obtidos pelo método 2 para o ângulos de 55°	90
Tabela 16 - Dados de densidade de fibra e da água	95
Tabela 17 - Determinação da densidade do compósito	95
Tabela 18 - Determinação da fração de fibra e matriz	96
Tabela 19 - Determinação da densidade da liga de alumínio 6061 T-6	97
Tabela 20 - Fração volumétrica de compósito e alumínio no material	97
Tabela 21 - Tensão máxima de colapso dos anéis	99
Tabela 22 - Valores médios da tensão máxima de cisalhamento das interfaces	103
Tabela 23 - Coeficientes de expansão térmica dos materiais	104
Tabela 24 - Valores das de pressões externas máximas	106
Tabela 25 - Máximas profundidades suportadas pelas juntas para pressões externas	109
Tabela 26 - Pontos importantes da curva tensão-tempo	111
Tabela 27 - Comparação entre materiais com e sem massa epóxi	113
Tabela 28 - Valores máximos de pressões interna	116

- Tabela 29 Valores máximos de colapso de anel de compósito (software Abaqus)130
- Tabela 30 Composição química e aplicações das ligas alumínio-magnésio-silício 131

## ANEXOS

ANEXO a - Método numérico para determinação de colapso de anel de	130
compósito das juntas	
ANEXO b - Composições químicas e aplicações típicas	131
ANEXO c - Preparação de superfícies externa da lida de alumínio para	132
possível melhor adesão entre o metal e o material compósito	

#### 1 - Introdução

O desenvolvimento de novos campos de petróleo, muitos deles em águas profundas e ultra-profundas, e neste momento, motivados pelas altas cotações do preço do petróleo, tem levado a indústria à aplicação e ao desenvolvimento de *risers* e linhas flexíveis para funcionamento em condições cada vez mais extremas. Tal condição vem fazendo com que os recursos disponíveis para o projeto e avaliação sejam cada vez mais sofisticados e continuamente melhorados. Assim, como vem acontecendo na área de *risers* nos últimos anos, a análise de dutos vem se tornando uma atividade de grande importância na indústria de petróleo no Brasil.

O duto de escoamento entre o poço marítimo e a unidade flutuante é denominado *riser*, de acordo com a terminologia da norma norueguesa *DNV-OS-F201*. Estes podem ser denominados *risers* flexíveis ou *risers* rígidos conforme o material empregado na sua fabricação. Sendo assim, *risers* flexíveis são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais e *risers* rígidos são formados por tubos fabricados normalmente em aço (ÁVILA, 2005).

Uma das maiores preocupações atualmente está voltada para a determinação dos danos causados pela fadiga ao longo do conjunto de *risers* de perfuração, basicamente devido as grandes profundidades, sendo especialmente voltada para os conectores destes *risers*, já que estes apresentam maiores concentrações de tensão devido a sua forma.

Desta maneira materiais compósitos têm atraído considerável atenção da indústria *offshore* principalmente devido a sua alta resistência específica. Além de redução de peso, compósitos são esperados oferecer benefícios adicionais, como excelente propriedade de resistência a fadiga, amortecimento, e isolamento térmico, e alta resistência à corrosão (KIM, 2007).

Apesar da fabricação de compósitos terem altos encargos, a transição de *risers* metálicos para *risers* de compósitos tornou-se desejável devido a sua influência sobre outros componentes de sistema e os custos operacionais (KIM, 2007).

Esta grande procura de petróleo em operações de exploração e produção ultraprofundas levou ao desenvolvimento de sistemas compósitos como mencionado anteriormente com reduções de peso e alta resistência. Desta maneira, junções para matérias compósitos, *risers* fabricados por enrolamento filamentar, tem sido uma grande preocupação devido à complexidade e as dificuldades envolvidas na seleção de

1

material, concepção de conexão, o modos de falha complexos e sua confiabilidade a longo prazo (CHEN *et al.*, 2004).

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de juntas de compósito e liner de liga de alumínio para união de risers rígidos a serem utilizadas no seguimento *offshore*. Desta forma, projetando a mesma para oferecer o máximo de beneficias, como redução de peso, alta resistência e uma confiabilidade do sistema na sua utilização.

#### 2 - Revisão Bibliográfica

A atividade conhecida no jargão da indústria mundial de petróleo, como de *offshore*, ocupa um capítulo relativamente recente na história marítima dos povos, mas nem por isso de pequena importância.

A indústria de petróleo nasceu em terra, nos Estados Unidos, mais ou menos na segunda metade do século XIX. No correr do século XX, cresceu com vigor, buscando fontes de óleo no Oriente Médio, principalmente, mas também na América Central e no norte da América do sul.

Mas a história do petróleo, em especial no Oriente Médio, é marcada por uma sucessão de crises políticas entre os países que possuem petróleo em seu subsolo e as grandes potências que lideram a indústria e o comércio de petróleo no mundo.

Desde 1920, alguns milhares de poços já vinham sendo perfurados ao longo da costa norte da Europa, numa tentativa de encontrar soluções para a economia do petróleo, diante de fatores negativos da política.

Os primeiros resultados foram decepcionantes, mas a política tem uma característica peculiar: ao mesmo tempo em que se constitui em fator de grande perturbação, fornece o incentivo para viabilizar projetos que nos primeiros embates são marcados por frustração. A Figura 1 a seguir mostra uma aproximação de uma unidade de perfuração de petróleo por uma embarcação supridor.



Figura 1 - Supridor aproximando-se de uma unidade (SILVEIRA, 2002)

A crise de Suez em 1956 e mais tarde a criação da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) - com seus dois choques de petróleo em 1973 e 1979 - viabilizaram a tecnologia de produção de petróleo *offshore*, no Mar do Norte e em outras regiões marítimas do planeta.

Quando se abria a década de 70 do século passado, a produção de petróleo no Brasil atingia cerca de 170 barris por dia, uma produção muito pequena para atender às necessidades de um país em expansão. A PETROBRÁS voltou-se para o mar. Desde então, a produção neste ambiente cresceu e hoje alcança cerca de 80% do total da produção do petróleo extraído do território brasileiro.

Operando embarcações e equipamentos altamente especializados nacionais e estrangeiros, a PETROBRÁS desenvolveu uma extraordinária capacitação. Hoje detém o recorde de produção em águas profundas, produzindo em lâmina d'água de mais de 1.300 metros, na Bacia de Campos, onde já foram localizadas jazidas de petróleo e gás, entre 1.800 e 2.800 metros, nos campos de Marlim, Albacora e Roncador.

Este o motivo que nos leva a compilar algumas informações preliminares para o conhecimento desta atividade, com o propósito de nos familiarizar com o trabalho dessa nova categoria de homens do mar - os operadores *offshore*, a bordo de estruturas de perfuração e produção, e de embarcações especializadas no apoio à indústria de petróleo (SILVEIRA, 2002).

#### 2.1 - Histórico da Atividade de Exploração Offshore no Brasil

#### <u>As Primeiras Atividades: Nordeste</u>

A exploração de petróleo em reservatórios situados na área *offshore* no Brasil iniciou-se em 1968, na Bacia de Sergipe, campo de Guaricema, situado em lâmina d'água de cerca de 30 metros na costa do estado de Sergipe, na região Nordeste.

Para o desenvolvimento na bacia de Sergipe aplicaram-se as técnicas convencionais da época para campos de médio porte: plataformas fixas de aço, cravadas através de estacas, projetadas somente para produção e teste de poços, interligadas por uma rede de dutos multifásicos. Todo o complexo era ligado, também, por duto multifásico, a uma estação de separação e tratamento de fluidos produzidos localizada em terra.

As primeiras plataformas, principalmente as instaladas nos campos de Guaricema, Caioba, Camorim e Dourado, eram, com pequenas variações, do tipo padrão de quatro pernas, convés duplo, guias para até seis poços, sistema de teste de poços e de segurança. O processo de perfuração dos poços era executado por plataformas autoelevatórias posicionadas junto à plataforma fixa. Posteriormente os projetos foram implementados e a perfuração dos poços passou a ser feita, também, por sondas moduladas instaladas diretamente no convés superior das plataformas e assistidas por navios *tender* (SINDPETRO, 2008).

Nos anos seguintes, com o aumento da atividade, não só na costa de Sergipe, mas também nas de Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará, a Petrobras decidiu desenvolver projetos próprios de plataformas que atendessem às características de desenvolvimento dos campos. Este esforço resultou em 3 projetos de plataformas fixas distintos, conhecidas como plataformas de  $1^a$ ,  $2^a$  e  $3^a$  famílias.

A plataforma de 1<sup>a</sup> família era similar às plataformas fixas iniciais desenhada para ter até 6 poços de produção e podiam ser instaladas em lâmina d'água de até 60 m; se necessário com um pequeno módulo para acomodação de pessoal.

A plataforma de 2<sup>a</sup> família comportava a produção de até 9 poços, permitia a separação primária de fluidos produzidos, sistema de transferência de óleo, sistema de teste de poços, sistema de segurança e um sistema de utilidades. Era uma com acomodações de pessoal.

As plataformas de 3<sup>a</sup> família tinham a concepção mais complexa. Permitiam a o processo de perfuração de até 15 poços e as facilidades de produção podiam conter uma planta de processo completa (teste, separação, tratamento e transferência de fluidos), sistema de compressão de gás, sistema de recuperação secundária, sistemas de segurança e de utilidades e acomodação de pessoal. As plataformas de 3<sup>a</sup> família tinham concepção apropriada para atuarem como plataformas centrais (SINDPETRO, 2008).

Em 1975, para o desenvolvimento dos campos de Ubarana e Agulha, no Rio Grande do Norte, além das plataformas de aço convencionais, decidiu-se pela utilização de plataformas de concreto gravitacionais, segundo concepção do consórcio francobrasileiro Mendes Jr. - Campenon Bernard.

Foram utilizadas 3 destas plataformas, duas em Ubarana e uma em Agulha. Pela concepção original, cada plataforma comportava todo processo de perfuração de até 13 poços, separação, tratamento, armazenamento e transferência de óleo, compressão de gás além dos sistemas de utilidades, segurança e alojamento de pessoal. As plataformas, em formato de caixa têm um convés único medindo cerca de 2.500 m<sup>2</sup> além de um espaço interno, chamado de "galeria técnica", para instalação de bombas de transferência, sistema de lastro e tratamento/descarte de água produzida.

A planta de processo de cada plataforma comportava uma produção de 5.000  $m^3$ /dia de óleo e a capacidade do tanque de armazenamento era de 20.000  $m^3$ . A altura total da plataforma era de 25 metros, instalada em locais de lâmina d'água aproximada

de 13 metros. São instalações que se destinavam a operar como plataformas centrais onde se pode ver uma ilustração de um dos tipos logo abaixo de uma plataforma fixa na Figura 2 (SILVEIRA, 2002).



Figura 2 - Plataforma Fixa (SINDPETRO, 2008)

As plataformas de concreto, que tiveram largo uso no Mar do Norte, têm uso limitado na área *offshore* brasileira em pequenas lâminas d'água.

• Primeiras descobertas "A Bacia de Campos"

Até 1977 as atividades de produção *offshore* no Brasil limitaram-se às áreas do Nordeste brasileiro em lâminas d'água de até 50 metros.

Em 1974 houve a primeira descoberta de petróleo na Bacia de Campos, atualmente a principal província petrolífera do Brasil, localizada na parte marítima do estado do Rio de Janeiro, na região Sudeste do país.

Entretanto, a atividade começou em agosto de 1977, na segunda descoberta, com o campo de Enchova, em lâmina d'água de 120 metros. Um novo conceito, em termos de explotação, foi introduzido, denominado **Sistema Antecipado de Produção** (EPS).

Na fase 1 deste desenvolvimento a plataforma de perfuração semi-submersível *Sedco-135D* foi equipada com uma planta de processamento simples. A produção fluía para a superfície através de uma árvore teste (árvore EZ) suspensa pela plataforma de perfuração, dentro do sistema de prevenção de *blowout* (BOP) e do riser. O BOP (*Blow Out Preventor*) é um conjunto de válvulas que permitirá bloquear o influxo indesejado de fluido para dentro do poço atuando como das barreiras de segurança. Desta forma, na plataforma *Sedco-135D* o óleo e o gás eram separados e o gás queimado. O óleo processado era então transferido através de uma mangueira flutuante para um navio tanque ancorado nas proximidades, ligado a um sistema de ancoragem de quatro pontos.

Na segunda fase, uma outra semi-submersível, Penrod-72, também parcialmente convertida em plataforma flutuante de produção, foi usada.

Como na fase inicial, a plataforma era posicionada sobre um poço produtor usando uma árvore de BOP de superfície, enquanto um segundo poço submarino era colocado em produção através de uma árvore "molhada", a uma profundidade de água recorde de 189 metros. Da árvore submarina, a produção fluía para a Penrod-72 através de um sistema flexível livre de linhas de escoamento e *riser*, que incluía um umbilical de controle para comunicação entre a árvore e a plataforma. O óleo processado dos dois poços era transportado através de uma linha de escoamento e riser flexíveis até uma monobóia ancorada por um sistema de pernas em catenária, *Catenary Anchor Leg Mooring* (CALM). Uma segunda linha de escoamento e *riser* flexíveis era conectada entre a Penrod-72 e a Sedco-135D, o que proporcionava uma capacidade de produção contínua como pode ser visto na Figura 3 (SINDPETRO, 2008).



Figura 3 - Plataforma Sedco 135-D (SS-06) (SILVEIRA, 2002)

Foi o nascimento do Sistema de Produção Antecipada, capaz de antecipar a produção, e, ao mesmo tempo, fornecer dados detalhados sobre o reservatório. Estes dados foram então usados para o projeto do sistema permanente de exploração que, uma vez no local, permitia o emprego dos EPS em outra área. As vantagens do uso de *risers* flexíveis foram a acomodação do movimento das unidades flutuantes e a facilidade de sua instalação. Adicionalmente, os *risers* e linhas de fluxo flexíveis eram freqüentemente reutilizados em novos sistemas.

O campo de Garoupa, primeiro a ser descoberto, também em lâmina d'água de 120 metros, somente entrou em produção em 1979, juntamente com o de Namorado, este em lâmina d'água de 160 metros. Apesar de se tratar de campos com potencial superior aos campos marítimos do Nordeste, a utilização de sistema de produção com plataformas fixas e tubulações rígidas não era economicamente viável por serem isolados e muito distantes do litoral, cerca de 80 km.

Optou-se então pelo conceito de sistema flutuante de produção utilizando navio. A concepção envolvia tecnologia pioneira e foi um marco na atividade *offshore* mundial. O sistema compreendia 8 poços de produção, sendo todo o sistema interligado por tubulações flexíveis.

A concepção não voltou a ser utilizada pela Petrobras por problemas técnicos e econômicos particulares do projeto (SINDPETRO, 2008). Contudo, contornados os problemas e eliminados os aspectos pioneiros, mostrou-se perfeitamente viável. Paralelamente, um programa de implantação de um sistema definitivo de produção foi desenvolvido. O programa compreendeu o projeto, fabricação, transporte, instalação e montagem de 7 plataformas fixas de aço, de grande porte, e o projeto, fabricação e lançamento de aproximadamente de 500 km de dutos rígidos no mar e 500 km em terra, para escoamento de óleo e gás.

As plataformas do Sistema Definitivo da Bacia de Campos, implantado em 1983, foram instaladas em lâminas d'água variando entre 110 e 175 metros e concebidas segundo dois tipos principais:

- Plataformas Centrais: Tipo fixa de aço, cravadas por estacas, com 8 pernas, para perfuração e produção de poços, equipadas com plantas completas de processo da produção, sistema de tratamento e compressão de gás, sistemas de segurança e utilidades e acomodação de pessoal. A capacidade de produção dessas plataformas varia de 15.000 a 32.000 m<sup>3</sup>/dia de óleo (95.000 a 200.000 bpd) (SILVEIRA, 2002).
- ✓ Plataformas Satélites: Semelhantes às plataformas centrais, porém a planta de processo da produção compreendendo apenas um estágio de separação primária de fluidos produzidos. A capacidade varia de 8.000 a 10.000 m³/dia de óleo (50.000 a 63.000 bpd). Estas plataformas com concepção semelhante às utilizadas no Mar do Norte, são bastante diversas daquelas instaladas na região Nordeste do Brasil que têm concepção semelhante às plataformas do Golfo do México.

#### <u>Pólo Nordeste</u>

A partir de 1984, a Bacia de Campos começou a mostrar seu completo potencial, com a descoberta de campos gigantes em águas profundas que, à época, variavam de 300 a mais de 1.000 metros de lâmina d'água.

Enquanto a Petrobras analisava o desenvolvimento de tecnologia para produzir esses campos, o desenvolvimento do Pólo Nordeste - abrangendo os campos de Pargo, Carapeba e Vermelho - era realizado. A partir de 1989, 7 plataformas fixas foram instaladas, todas utilizando bombas elétricas submersas (ESP) (SILVEIRA, 2002). O desenvolvimento do Pólo Nordeste inclui:

- ✓ Instalação de 6 templates;
- ✓ Perfuração e completação de 120 poços, com ESP;
- ✓ Instalação de 5 plataformas satélites de produção e 1 sistema central com duas plataformas germinadas, uma para a planta de processo e outra para utilidades (Pargo 1A e Pargo 1B);
- ✓ Lançamento de 70 km de linhas de escoamento e 50 km de cabos elétricos de força submarinos.

### 2.2 - Águas Profundas

Em 1984, o campo de Albacora foi descoberto seguido por: Marimbá (1985), Marlim (1985), Marlim Sul (1987), Marlim Leste (1987), Barracuda (1989), Caratinga (1989) e Roncador (1996). Esses campos estão situados em lâminas d'água superiores a 300 metros (profundidades limite para o uso de mergulhadores na instalação, operação e manutenção) e demandaram o desenvolvimento de tecnologia pioneira para serem postos em produção (SINDPETRO, 2008).

Um exemplo destas descobertas é o campo de Marimbá, localizado em lâminas d'água que variam entre 350 e 650 metros, pode ser considerado um verdadeiro laboratório onde a tecnologia de produção em águas profundas com sistema flutuante de produção com semi-submersível, foi testada e colocada em produção. Desta forma logo abaixo a Figura 4 mostra a evolução de descoberta e produção de águas profundas.



Figura 4 - Evolução da produção em águas profundas (SINDPETRO, 2008).

Em função dessas descobertas em águas profundas e da necessidade de suprir a demanda do País, a Petrobras veio estabelecendo sucessivos recordes de profundidade de poço em produção e a necessidade de desenvolvimentos de novas tecnologias de matérias para este ato.

#### 2.3 - Sistemas flutuantes de exploração e à explotação de petróleo

Com a necessidade crescente de se produzir mais petróleo para atender a demanda e a descoberta de campos petrolíferos em águas cada vez mais profundas, houve a necessidade de encontrar soluções que possibilitassem a produção econômica, explotação, destes campos. Deste modo surgiram diferentes concepções de plataformas. Estas concepções podem ser divididas conforme a sua geração. A primeira e a segunda geração de plataformas são constituídas de plataformas fixas, como jaquetas e plataformas de gravidade para pequenas lâminas de água. Pode-se considerar os sistemas flutuantes de produção, tais como as semi-submersíveis, como a terceira geração das plataformas, as quais representam uma mudança na filosofia de explotação de petróleo. Um esboço destes sistemas flutuantes de produção é apresentado na Figura 5 (ÁVILA, 2005).



Figura 5 - Estrutura offshore: a) jaqueta, b) gravidade, c) semi-submersível, d) navio de produção, e) plataformas de pernas atirantadas e f) Spar-Buoy.

As plataformas flutuantes podem ser divididas em função da **árvore de natal** em dois grupos:

- Com árvore de natal molhada, ou seja, móveis;
- Com árvore de natal seca, ou seja, fixas.

Árvore de Natal: conjunto de válvulas responsáveis pelo controle do poço de petróleo.

As plataformas flutuantes com árvore de natal molhada ou móveis são dos tipos semi-submersíveis e navio plataforma (ÁVILA, 2005). Esse tipo de plataforma se apóia em flutuadores submarinos, cuja profundidade pode ser alterada através do bombeio de água para dentro ou para fora dos tanques de lastro. Isso permite que os flutuadores fiquem posicionados sempre abaixo da zona de ação das ondas.

✓ Plataforma semi-submersível de produção: Este tipo de plataforma se apóia em flutuadores submarinos, cuja profundidade pode ser alterada através do bombeamento de água para o tanque de lastro. Esta plataforma, onde pode ser vista na Figura 6, de produção fica estacionária numa locação em torno de vinte anos.



Figura 6 - Exemplo de plataforma semi-submersível de produção (SILVEIRA, 2002)

Navios-sonda - NS (*Drilling Ship*): Os navios-sonda, como na Figura 7, são unidades empregadas na perfuração em lâmina d'água profunda, por possuírem posicionamento dinâmico, e também serviços de curta duração, devido à facilidade de deslocamento de uma locação à outra. Este tipo de unidade possui todas as características de uma plataforma semi- submersível com a navegação de um navio, quando necessário.



Figura 7 - Exemplo de plataforma Navios-sonda (SILVEIRA, 2002)

 Navio plataforma, FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*): A Figura 8 exemplifica este tipo de unidade estacionária de produção consiste na utilização de um navio petroleiro ancorado. Este suporta no seu convés uma planta de processo, armazena o óleo produzido e ainda permite o escoamento da produção para outro navio, chamado aliviador, que é periodicamente amarrado ao FPSO para receber e transportar o óleo até os terminais petrolíferos.



Figura 8 - Exemplo de plataforma FPSO e ilustração de seus riser.

As **plataformas com árvore de natal seca** são dos tipos fixas em aço, fixas em concreto, com pernas atirantadas e Spar-Buoy (ÁVILA,2005).

Plataforma Auto-elevatória - PA (*Jack up*): Tipo de plataforma que utiliza pernas estruturadas e macacos hidráulicos com cremalheiras para a autoelevação como na Figura 9. Estas pernas se apóiam no fundo em sapatas e não devem possuir inclinação durante a subida. Ao suspender as pernas seu casco flutua podendo ser rebocada. Este tipo de unidade pode ser posicionado, normalmente, em uma lâmina d'água de até 100 metros. É considerada fixa durante a operação por estar apoiada diretamente no fundo.



Figura 9 - Exemplo de plataforma Jack up (SILVEIRA, 2002)

Plataforma Fixa - Jaqueta: Plataforma apoiada em uma estrutura submersa, como a Figura 10 abaixo, com os conveses de operação em continuidade. É o tipo de unidade voltado normalmente às áreas de produção. Podem possuir sondas de perfuração direcionais expandindo assim o número de poços a serem monitorados.



Figura 10 - Exemplo de plataforma fixa jaqueta (PORTAL NAVAL)

Plataforma Spar-Buoy: consiste de um único cilindro vertical de aço de grande diâmetro operando com um calado de aproximadamente 200 metros. Esta forma, como é visto na Figura 11, associada a um sistema de ancoragem apresenta pequenos movimentos verticais e possibilita a adoção de *risers*

rígidos verticais de produção. É necessário utilizar supressores de vórtices em torno do cilindro.



Figura 11 - Exemplo de plataforma Spar-Buoy (ENGINEERING GRAND CHALLENGES)

### 2.4 - Risers

A palavra *riser* é de origem inglesa e, de acordo com a terminologia da norma *DNV-OS-F201*, pode ser definida como o duto de escoamento entre o poço marítimo e a unidade flutuante.

Segundo a norma *API RP 2RD*, os *risers* podem ser classificados segundo a sua configuração geométrica, a sua finalidade e o material empregado na sua fabricação. Quanto à sua configuração geométrica, os *risers* podem ser classificados como verticais, em catenária livre, ou em catenária complexa (ÁVILA, 2005).

Os *risers* verticais são tracionados no topo, a fim de se evitar o fenômeno de flambagem da linha. A Figura 12 apresenta um exemplo de *riser* com configuração vertical.



Figura 12 - Riser com configuração vertical

Os *risers* em catenária livre consistem em linhas que descrevem a configuração geométrica de uma catenária, sendo esta curva formada e sujeito à ação do seu peso próprio. Nesta configuração, a região do topo está sob tração constante. As extremidades podem não estar no mesmo alinhamento vertical e a relação entre a rigidez flexional e a profundidade da lâmina de água deverá ser pequena. A Figura 13 apresenta um exemplo de um *riser* com configuração em catenária livre.



Figura 13 - Riser com configuração em catenária livre

Os *risers* em catenária complexa têm suas configurações derivadas da configuração em catenária livre. Através da instalação de bóias ou flutuadores que são mantidos submersos, o *riser* assume uma geometria em forma de catenária dupla. São exemplos destas configurações: *lazy-S, lazy-wave, step-S* e *step-wave*. A Figura 14 apresenta um exemplo de um *riser* com configuração em catenária complexa.



Figura 14 - Riser com configuração lazy S.

Os *risers* podem ser classificados quanto ao material empregado na sua fabricação como **flexíveis** ou **rígidos**.

#### 2.4.1 - Risers flexíveis

Os *risers* flexíveis são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais, como aço e polietileno, que apresentam uma finalidade estrutural específica. As camadas de aço promovem resistência à tração, à torção e às pressões externa e interna, enquanto que as camadas de polietileno proporcionam estanqueidade, proteção contra corrosão e evitam a abrasão das camadas metálicas. A Figura 15 mostra um exemplo de como são dispostas as camadas de um *riser* flexível, conforme a norma americana *API Specification 17J* (ÁVILA,2005).



Figura 15 - Riser flexível (ÁVILA, 2005, FREITAS, 2006)

#### 2.4.2 - Risers rígidos

Os *risers* rígidos são formados por tubos fabricados normalmente em aço, podendo ser instalados tanto verticalmente, quanto em forma de catenária, segundo a norma americana *API RP 2RD*.

Ele pode ser instalado em plataformas com pernas atirantadas (*TLP - Tension Leg Platform*), Spar-Buoys e também em configurações do tipo *riser tower*. Neste último, o peso do *riser* é sustentado por uma bóia de sub-superfície a fim de não sobrecarregar a unidade flutuante.

Este *riser* rígido em catenária (SCR – Steel Catenary Riser) é uma concepção nova e foi introduzido com o objetivo de substituir o *riser* flexível de grande diâmetro,
que apresenta custo elevado. O *riser* rígido pode ser instalado em forma de catenária em plataformas com pernas atirantadas, TLP, Spar-Buoys, semi-submersíveis, ou em navios plataforma FPSO. A Figura 16 mostra um exemplo de um *riser* rígido em catenária conectado à plataforma P-18 da PETROBRAS (ÁVILA, 2005).



Figura 16 - Riser rígido em catenária conectado à plataforma P-18 (ÁVILA, 2005).

Em navios plataforma FPSO, o *riser* rígido pode ser instalado em uma configuração variante do tipo lazy-wave. Esta pode ser mais indicada em função dos movimentos maiores impostos no topo do *riser* pelo corpo flutuante e das limitações de sustentação de carga deste tipo de embarcação.

# 2.4.3 - Classificados quanto à sua finalidade

Os *risers* podem ser classificados quanto à sua finalidade como de perfuração, de completação, de produção, de injeção, ou de exportação.

O *riser* de perfuração tem a função de proteger e guiar a coluna de perfuração, bem como permitir o retorno da lama do poço para a plataforma, auxiliando assim nas operações de perfuração. Estas operações são executadas a partir do fundo do mar até atingir a rocha reservatório. A operação de perfuração de um poço é executada em vários estágios, com brocas de diferentes dimensões e revestimentos de diferentes diâmetros. Posteriormente os revestimentos são cimentados para garantir a estanqueidade entre os vários reservatórios e a transmissão de carga do poço para as camadas de rocha de sub-superfície. O *riser* de perfuração apresenta geometria vertical e é fabricado geralmente em aço.

O *riser* de completação é utilizado nas operações de completação, que tem como finalidade iniciar ou garantir a produção de um poço, equipando-o para produzir óleo ou gás. O *riser* de completação apresenta geometria vertical e pode ser flexível ou rígido, sendo o primeiro bem mais complexo que o último.

O *riser* de produção tem a função de conduzir o petróleo bruto do poço à superfície, para ser separado em óleo, água e gás. O *riser* de produção pode ser rígido, instalado verticalmente, ou em catenária, como também pode ser flexível instalado em catenária.

O *riser* de injeção tem a função de injetar gás ou água no interior do reservatório, visando a melhorar o desempenho do mesmo, ou injetar gás diretamente no poço *(gas lift)*, de forma a diminuir a densidade do óleo e facilitar a sua subida à plataforma. O *riser* de injeção pode ser rígido, instalado verticalmente, ou em catenária, como também pode ser um flexível instalado em catenária.

O *riser* de exportação tem a função de enviar da plataforma o óleo e o gás produzidos à outra unidade ou à terra.

A escolha do tipo de *riser* a ser adotado depende da concepção global do projeto, o qual é balizado pelas restrições técnicas e econômicas.

Os *risers* flexíveis são especialmente projetados para acomodar grandes movimentos, entretanto, com o aumento da profundidade, os *risers* rígidos em catenária atingem flexibilidade suficiente para também serem considerados como uma alternativa economicamente atrativa. Existem ainda sistemas bastante complexos, onde os *risers* homogêneos são substituídos por *risers* mistos, apresentando uma parte flexível e outra rígida em aço ou em titânio.

Por razões de economia e de segurança, o *riser* deve ser capaz de resistir às forças estáticas e às forças dinâmicas as quais está submetido. Em conseqüência, são necessários métodos de análise estrutural adequados para garantir a segurança na construção e na operação. Estruturalmente um *riser* pode ser considerado uma viga coluna, isto é, uma peça que resiste às cargas através de resistências à flexão e à tração.

19

# 2.5 - Juntas metálicas para risers

Em *risers* de perfuração, dentre os componentes importantes estão as conexões ou juntas de segmentos de duto metálicos, podendo ser rosqueadas, aparafusadas ou soldadas. Um exemplo de uma junta rosqueada metálica e mostrado na Figura 17 fabricada pela FMC Technologies para conexões de *risers*.



Figura 17 - Junta rosqueada de metal (FMC Technologies)

A definição de um conector ou juntas de um *riser* de perfuração seria adaptado a qual tipo de sistema que se queira interligar, ou seja, que melhor faça a conexão entre dutos rígidos ou flexíveis, sendo adaptadas para melhor se reduzir os riscos que são gerados nessas conexões, que são as concentrações de tensões que podem provocar problemas graves no sistema como rompimento do mesmo com o decorrer do tempo podendo ser por fadiga ou até mesmo por não suportar uma devida tensão que seria exigida pela mesma em todo o *riser*. A Figura 18 temos um exemplo de uma junta aparafusada de um *riser* de perfuração de alumínio que suporta as linhas de *choke* e *kill* e as linhas auxiliares (GELFGAT *et. al.*, 2004).



Figura 18 - Junta aparafusada de um riser de perfuração com linhas auxiliares (GELFGAT *et. al.*,2004)

Em outros casos, juntas flexíveis são usadas para permitir desalinhamento angular entre o *riser*, reduzindo o momento de flexão no *riser* e também são instalados no topo do *riser* para permitir movimentos da sonda. Em alguns casos são instalados em nível intermediário, para diminuir as tensões no *riser* segundo a norma americana *API* 16Q (*RP16Q*).

Um modelo da junta flexível com seu centro de rotação pode ser visto na Figura 19. E o modelo do *riser* deformado, devido a presença da corrente marinha e do passeio da unidade, pode ser visto na Figura 20, que também apresenta um ângulo para a junta flexível inferior (BARBOSA, 2007).



Figura 19 - Junta flexível em corte mostrando seu centro de rotação (BARBOSA, 2007).



Figura 20 - Esquema do *riser* deformado devido presença da corrente marinha e passeio da unidade, apresentando um ângulo na junta flexível (BARBOSA, 2007).

## 2.6 - Roscas

As roscas são um conjunto de filetes em torno de uma superfície cilíndrica como mostra a Figura 21 abaixo, são conhecidas pelo seu tamanho (diâmetro da rosca), pelo número de filetes em cada centímetro ou polegada, e pela grossura do filete (rosca fina ou grossa).



Figura 21 - Conjunto de filetes de rosca

# 2.6.1 - Alguns tipos de rosca

Exemplos diversos de formatos bases dos filetes de rosca podem ser visualizados na Figura 22, onde dependendo da escolha e aplicabilidade da mesma poderá ser atribuído formas que melhor forneça acoplamento entre peças.





Desta forma, antes da apresentação dos tipos de alguns tipos conexões usados industrialmente, veremos umas breves definições sobre nomenclaturas presentes no contexto e as Figura 23 e 24 abaixo ajudaram a reconhecer visualmente seus posicionamentos.



Figura 23 – Visualização de algumas definições

- Perfil básico → Perfil teórico da rosca no plano axial determinado pelas dimensões teóricas lineares e angulares comuns para rosca interna e externa.
- Triangulo básico → Triângulo do qual são deduzidas de maneira simples, a forma e as dimensões do perfil básico. Os vértices desse triângulo coincidem com três intersecções consecutivas das extensões dos flancos do perfil básico para rosca métrica ISO, como visto na figura.
- Altura do triângulo básico H → Altura do triângulo básico é em função do passo P e ângulo β. Várias funções constantes de H definem o contorno da rosca completa.
- Passo P → Distância axial entre um ponto no flanco da rosca e um ponto equivalente no flanco adjacente.



Figura 24 – Visualizações mais gerais

- Sulco  $\rightarrow$  Espaço vazio entre os dois flancos adjacentes.
- Crista  $\rightarrow$  A superficie da rosca no topo do filete que liga os flancos adjacentes.
- Raiz → A superfície da rosca que liga os flancos adjacentes na base do vão da rosca.
- Altura da rosca → Distância radial entre a crista e a raiz da rosca, perpendicular ao eixo.
- Flanco → Parte da superfície helicoidal da rosca, gerada por um dos lados do triângulo básico não paralelo ao cilindro gerador perfeito.
- Filete → Porção de material entre os dois flancos adjacentes
- Ângulo do filete da rosca α → Ângulo formado por dois flancos adjacentes no plano axial.
- Ângulo do flanco  $\beta \rightarrow$  Ângulo entre um flanco e a perpendicular ao eixo da rosca no plano axial.

Segundo John C. Cox é gerente de desenvolvimento de negócios da *Swagelok Company* e a ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, alguns tipos de conexões para tubulações podem ser vistos logo abaixo.

# Sistema Americano

No sistema americano, as conexões estão caracterizadas segundo os termos abaixo, onde este sistema será os mais detalhado e futuramente usada em projeto desta dissertação.

**Conexões NPT** – um dos tipos mais comuns de conexão encontrados em sistemas de transmissão de fluídos são as conexões rosqueadas. Utilizadas com muita freqüência no mercado, as conexões NPT (abreviação de *American National Standard Taper Pipe Thread*) apresentam roscas cônicas nas extremidades macho e fêmea, como mostra a Figura 25.

N = "National", de American National Standard;

P = "pipe" - tubo;

T = "taper" – cônico;



Figura 25 – Exemplo de conexão NPT

A vedação é, na verdade, uma "vedação por esmagamento" entre as superficies de metal que entram em contato e ocorrem nos flancos, topo e raiz das roscas. Devido à afinidade de fusão que o metal tem consigo mesmo, especialmente ao unir peças de açocarbono ou de aço inoxidável, podem ocorrer descamação e ruptura do metal durante a instalação. Ao unir conexões NPT rosqueadas, é imperativo que se aplique um lubrificante ou um vedante com o agente lubrificante na rosca macho para protegê-la. Uma vedação muito utilizada é a fita veda-rosca de PTFE (politetrafluoroetileno). Desta maneira é possível observar esse tipo conexão de esmagamento dos filetes de rosca na Figura 26 abaixo.



Figura 26 - Visualização da conexão e esmagamentos dos filetes em rosca NPT

Ainda existem outros tipos de rosca para utilizações específicas, também contidas neste mesmo sistema americano de roscas, desta forma podemos citar os exemplos abaixo.

**Conexões NPTF** – Roscas com vedação seca, onde o "F" do termo NPTF designa este fato, possuem raízes de filete mais truncadas que os topos, portanto uma interferência de

montagem faz com que as raízes deformem o topo da rosca durante a junção das duas partes. A teoria por trás desse conceito de rosca é que, quando o topo, raiz e flancos da rosca estão conectados, o contato pleno é sempre obtido, criando uma vedação sem lubrificação. Infelizmente, algumas propriedades inerentes de metais, como aço-carbono e aço inoxidável, provocam descamação neste tipo de vedação sem lubrificação, tornando a instalação inicial difícil e uma nova conexão impossível. Assim um exemplo desta conexão é visto na ilustração da Figura 27 seguinte.



Figura 27 – Rosca NPTF cônica

**Conexões NPSF** – Onde o "S" = "*Straight*" palavra que significa rosca interna paralela, não oferecendo vedação na raiz e crista; trata-se de rosca utilizada para acoplamento de elementos de tubulação sob pressão e com necessidade de aplicação de vedante nos filetes, podendo ser exemplificada esse formato na Figura 28.



Figura 28 – Rosca NPSF paralela

**Conexões NPSI** – Rosca interna, paralela intermediária vedante com acoplamento cônico externo. Conexão esta como a apresentada na Figura 29 não oferece garantia de vedação na montagem com PFT.



Figura 29 – Rosca NPSI paralela interna e PTF externa curta

**Conexões PTF** – Outro tipo de rosca como é relatado pela Figura 30 de perfil igual à NPTF, porém mais curta e por isso conhecida como PTF – SAE SHORT, onde o seu comprimento é encurtado em um filete na extremidade do diâmetro menor.



Figura 30 – Rosca PTF curta

Outros sistemas de roscas também podem ser apresentados, o sistema métrico ou internacional (ISO), o sistema inglês ou *whitworth*.

### Sistema métrico ou internacional (ISO)

No sistema métrico, as medidas das roscas são determinadas em milímetros. Os filetes têm forma triangular, ângulo de 60°, crista plana e raiz arredondada. Desta maneira, apresentando a geometria de todos seus dentes de rosca sem qualquer diferença entre eles. E pode se apresentar, como o sistema inglês e americano, de forma cônica ou paralela, respectivamente para conexões de alta pressão ou para simples acoplamento de materiais.

O Sistema Internacional (S.I.) foi adotado no Congresso Internacional para a padronização das roscas, realizada em Zurique em 1898. Existe uma folga entre o contato da raiz e a crista fixada em um máximo de 1/16 da altura do triângulo fundamental. Este sistema formado a base da série normal métricas (ISO threads) de

muitos países europeus, Japão e muitos outros países, incluindo métricas discussão normas dos Estados Unidos (OBERG *et. al.*, 2004)

ISO refere-se à *International Organization for Standardization*, uma federação mundial de organismos nacionais de normalização (por exemplo, o norte-americano *National Standards Institute* ISO é o órgão que representa os Estados Unidos), que desenvolve padrões em uma grande variedade de assuntos. Desta maneira podemos ver logo abaixo na Figura 31 dois exemplos de formato do sistema métrico.



Figura 31 - a) sistema métrico em formato cônico – b) Sistema métrico em formato paralelo.

# Sistema inglês

Neste sistema, como mostra à Figura 32, as medidas são dadas em polegadas. Nesse sistema, o filete tem a forma triangular, ângulo de 55°, crista e raiz arredondadas.



Figura 32 – Idéia de formato de sistema inglês de roscas

São especificações que podem ser feitas para tubos com fios de rosca onde a pressão de aperto nas juntas ou contato entre os dentes das roscas não é necessário, podendo ser da forma paralela ou cônica de fixação dos seus fios de rosca que são geralmente utilizados para a fixação de fins tais como a montagem de componentes mecânicos de acessórios, torneiras e válvulas. Embora possa ter também para articulações ou conexões, a necessidade de uma pressão de aperto entre os fios da rosca, onde é o caso de componentes como tubos, onde é necessária uma vedação mais eficiente e uma rigidez maior no contato entre as peças, contato este que é feito pelo esmagamento no contato entre os dentes da rosca que são de maneira proposital todos desiguais, similarmente a uma conexão NPT cônica do sistema americano. Desta forma podemos ver logo abaixo na Figura 33 este tipo de especificação de conexão com vedação (OBERG *et. al.*, 2004).



Figura 33 – Rosca BSP com pressão de aperto

Desta maneira algumas designações são dadas para esse tipo de sistema, tendo semelhança com as figuras mostradas anteriormente de rosca, tendo como diferença ângulo de 55° entre as paredes de um filete com cristas e raízes arredondadas. A simbologia *whitworth*, a rosca é caracterizada pela sigla **BSW** (*british standard whitworth* - padrão britânico para roscas normais). Nesse mesmo sistema, a rosca fina é caracterizada pela sigla **BSF** (*british standard fine* – padrão britânico para roscas finas), a sigla **BSP** (*british standard pipe* – padrão britânico para tubos roscados) **BSPT** (*british standard pipe thread tapered* – padrão britânico para tubos filetes de roscas cônicas) e **BSPP** (*british standard pipe thread pipe thread parallel* - padrão britânico para tubos com filetes de roscas paralelos)

Em resumo, compreender os beneficios e as desvantagens dos diferentes projetos e tecnologias de conexões, bem como prestar atenção às considerações de instalação e manutenção para assegurar que as conexões obtenham seu melhor desempenho, podem prevenir por muito tempo as conseqüências negativas de vazamentos no sistema.

#### 2.7 - Materiais Compósitos

Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente as relacionadas com aplicações relacionadas em áreas, tais como aeronáutica, aeroespaciais, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil e de artigos esportivos, entre outras, somente se torna viáveis após o advento dos compósitos estruturais. Esta classe de matérias é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os matérias metal/compósito e os concretos estruturais, e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica. Por tanto, a característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos, duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Os compósitos obtidos a partir de reforços contínuos apresentam um excelente desempenho estrutural, considerando-se a resistência e a rigidez específica. Estes matérias são muito resistentes a vários tipos de corrosão (PARDINI *et al.*, 2006).

O campo dos materiais compósitos é ao mesmo tempo novo e antigo. É antigo na perspectiva de que muitos objetos naturais, incluindo o corpo humano, são compósitos. É novo na perspectiva de que somente a partir da década de 1960 é que foram desenvolvidos materiais compósitos fibrosos artificiais. Historicamente, os materiais compósitos têm uma origem muito antiga, datando dos primórdios da humanidade. Tijolos para a construção civil, constituídos de barro argiloso com ramos secos de capim, provavelmente foram os primeiros tipos de material compósito artificial utilizado pela humanidade.

Desta forma este material composto é formado pela união de dois materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de desempenho superior àquela de seus componentes tomados separadamente. O material resultante é um arranjo de fibras, contínuas ou não, de um material resistente (reforço) que são impregnados em uma matriz de resistência mecânica inferior as fibras.

Na indústria do petróleo e gás natural, por exemplo, algumas das utilizações destes materiais são como dutos, tubos de esgoto e água potável, tanques, reservatórios, grades de piso, calhas para passagem de instalações elétricas, guarda-corpos, escadas, *tendons, risers* e *caissons*. Na plataforma de Pampo, da Petrobras, por exemplo, foi realizada a substituição de 20% das grades de piso em aço por compósitos poliméricos, representando uma economia anual de 600 mil reais segundo a *Revista Plástica Reforçado*.

#### 2.7.1 - Características principais dos materiais reforçados com fibra

Os diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si, e os seus usos, em diferentes aplicações, dependendo de fatores, tais como desempenho estrutural, preço e disponibilidade das matérias-primas, e a cadência dos processos de fabricação, entre outros parâmetros. Atualmente, o desempenho estrutural dos compósitos sintéticos, em muitos aspectos, ainda supera os dos compósitos naturais (PARDINI *et al.*, 2006).

#### 2.7.2 - Matrizes Para Compósitos

As matrizes têm como função principal, transferir as solicitações mecânicas as fibras e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc.), minerais (carbono) e metálicas (ligas de alumínio). Onde se terá ênfase nesse trabalho a matriz epóxi, sendo essa um tipo de matriz termorrígida.

#### 2.7.2.1 - Matriz Polimérica Epóxi

As resinas epóxi são termorrígidas de alto desempenho que contêm pelo menos dois grupos epóxi terminais, conhecidos também como grupos oxirano ou etoxilina, por molécula. Estas resinas são matérias-primas em vários setores industriais, como a indústria eletroeletrônica, de embalagem, construção civil e transporte (LEE, 1967). As aplicações de maior vulto incluem recobrimentos projetivos, adesivos, equipamentos para indústria química, compósitos estruturais, laminados elétricos e encapsulados eletrônicos. Os maiores produtores mundiais de resina epóxi atualmente são a Shell, a Dow Química e a Huntsman e respondem por aproximadamente 70% da produção mundial.

As resinas epóxi mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), cuja estrutura básica é mostrada na Figura 34, e é sintetizada a partir de uma reação entre a epicloridrina e o bisfenol-A (ELLIS, 1993).

Figura 34 - Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A (DGBEA) (PARDINI *et al.*, 2006).

Uma enorme variedade de agentes de cura é empregado no processamento de resinas epóxi e estes são adequados aos ciclos de processamento. O tipo de agente de cura utilizado determina o tipo de reação de cura que ocorre, influencia a cinética de cura e o ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo) e a gelação ou endurecimento, que irão afetar as propriedades do material curado.

A relação epóxi /endurecedor afeta, após a cura, a transição vítrea, módulo elástico e a resistência mecânica. As resistências à tração de sistemas epóxi curada variam de 40 a 90 MPa, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,5 a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1 a 6%. A resistência a compressão é de 100 a 220 MPa.

## 2.7.2.2 – Processo de Cura

A cura de polímeros termorrígidos é um processo de polimerização e, durante o decurso desse processo, ocorre um aumento no peso molecular médio do polímero. Os polímeros, quando submetidos ao processo de cura, desenvolvem uma rede interconectada tridimensional molecular com ligações cruzada. É importante, nesse caso, a funcionalidade das unidades de monômero, ou seja, o número de ligações moleculares que um determinado monômero pode fazer com outras moléculas, e o grau de ligações cruzadas que ocorre no mesmo (PARDINI *et al.*, 2006). A funcionalidade das unidades de monômero define as características microestruturais da rede polimérica. A densidade de ligações cruzadas, entendidas aqui como número de ligações moleculares por unidade de volume, que é dependente da funcionalidade das unidades de monômero, define as propriedades viscoelásticas e mecânicas do polímero.

#### 2.7.2.3 - A escolha entre matrizes

Os principais tipos de matrizes utilizadas em compósitos podem ser classificados segundo sua estrutura e natureza química como matrizes poliméricas (termorrígidas e termoplásticas), cerâmicas, carbono e metálicas. Na formação dos compósitos, as matrizes formam a fase contínua e têm como função aglutinar reforços e distribuir ou transferir carregamento ou tensões aplicadas aos compósitos entre reforços. A escolha do tipo de matrizes a ser utilizada na manufatura do compósito se prende primeiramente à aplicação a que o mesmo se destina e ao processo de obtenção. No atual estágio tecnológico dessa área da ciência e engenharia de materiais uma variedade imensa de combinações de materiais, formadores da matriz pode ser efetuada durante o processamento do compósito. A versatilidade é tal que compósitos pertencentes a uma determinada classe, como por exemplo, os compósitos poliméricos, podem ser transformados em compósitos de matriz cerâmica (PARDINI *et al.*, 2006). Tanto a tenacidade à fratura quanto temperatura de uso mais elevadas são requisitos almejados para uma adequada seleção de matrizes, como mostra esquematicamente o gráfico da Figura 35.



Figura 35 - Polímeros com resistência à oxidação, tenacidade e processabilidade (PARDINI *et al.*, 2006).

#### 2.7.3 - Fibras para compósitos

Os reforços para compósitos podem ser apresentados na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. As fibras ou filamentos são os elementos de reforço dos compósitos estruturais que suportam carregamento mecânico. As fibras comerciais são produzidas basicamente por três processos: fiação por fusão, fiação a unido e fiação a seco.

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. Acredita-se que foi Griffith que primeiro demonstrou esse fato na prática em 1920 (GORDON, 1991). À medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que possam induzir falhas e, dessa forma, a resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos.

As fibras, entretanto, não têm utilidade estrutural se não forem aglutinadas por uma matriz. A configuração geométrica das mesmas, ou seja, pequeno diâmetro e grande comprimento permitem um alto valor na relação área superficial/volume e, por conseqüência, a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência por unidade de volume de fibra aumenta em função da relação comprimento/diâmetro, como pode ser verificado na Figura 36 (GIBSON, 1994). A Figura 36 mostra ainda que a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência de tensão por unidade de volume da fibra aumenta proporcionalmente ao aumento da relação comprimento/diâmetro, passando por um mínimo equivalente a uma partícula de formato esférico.



Figura 36 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um dado volume em função da razão de aspecto (l/d) (GIBSON, 1994).

Como foi o caso das matrizes, será abordada neste trabalho a fibra de vidro, pois ela que irá ser usada em projeto de *riser* de compósito que logo mais será apresentado.

#### 2.7.3.1 - Fibra de vidro

O tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica é a fibra de vidro, devido principalmente ao baixo custo, alta resistência à tração, e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são associadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, auto-abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósito. Composições típicas para fibras de vidro são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos (PARDINI *et al.*, 2006)

Constituintes	SiO <sub>2</sub> (%)	$Al_2O_3$	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
		(%)				
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

As fibras de vidro têm condutividade térmica equivalente a 1,3 W/m.K e calor específico de 850 J/Kg.K. A composição do vidro pode variar significativamente as propriedades da fibra obtida, como pode ser observado pela Tabela 2. As fibras de vidro do tipo S têm uma dificuldade inerente de serem estiradas devido à estrita faixa de temperatura para formação do filamento e, portanto, apresentam maior custo.

Tabela 2 - Propriedades dos tipos de fibras de vidro utilizadas como reforços em compósitos (PARDINI *et al.*, 2006)

Tipos de fibras cerâmicas	Vidro E	Vidro S	Vidro AR
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,55	2,70
Módulo de elasticidade (GPa)	70	86	75
Resistência a tração (GPa)	2,40	2,80	1,70
Módulo específico (Mn)	27	34	34
Preço (US\$)/Kg	1,65 - 2,20	13,0 - 17,5	-
Preço (US\$)/Kg de tecido	10 - 20	20 - 40	-

Embora o desempenho das fibras de vidro do tipo E são satisfatórias em ambientes aquosos neutros, se tornam susceptíveis de degradação em ambientes ácidos e alcalinos. Por esta razão **fibras do tido C**, utilizadas na forma de véu para barreiras químicas em equipamentos e reservatórios químicos, e fibras de vidro do tipo AR para reforços de cimento têm encontrado crescente utilização. As fibras AR contém  $ZrO_2$  e Na<sub>2</sub>O que conferem resistência à corrosão proveniente da alcalinidade do cimento.

#### 2.7.3.2 – Comparações de fibras

Na fabricação de compósitos, a escolha da fibra é principalmente baseada nos requisitos de projeto do produto final. As propriedades mecânicas finais dos compósitos são influenciadas não só pelo tipo de fibra, mas também pela atividade química superficial das mesmas, isto é, os grupos químicos superficiais presentes, ou mesmo por sua topografia superficial.

A comparação que põe em evidência as propriedades de fibras de reforço para compósitos com outros materiais é realizada considerando-se a resistência e módulo de elasticidade dividido pela massa específica. A Figura 37 mostra estes resultados. Pode-se observar que as fibras de carbono se destacam tanto em relação ao módulo específico quanto à resistência específica em relação aos metais e outros materiais.



Figura 37 - Resistência à tração específica em função do módulo de elasticidade à tração específica para fibras de reforço (PARDINI *et al.*, 2006).

### 2.8 – Adesões entre compósito e outros matérias

O termo adesão é geralmente utilizado para se referir à atração entre substâncias, sendo, portanto uma manifestação de forças atrativas entre os átomos e /ou superfícies.

A adesividade alcançada em um conjunto de materiais, muito depende da qualidade da superfície aderente. Portanto, a preparação da superfície é fundamental para a criação de interações interfaciais bem sucedidas. As preparações de superfícies são realizadas para remover camadas fracas em poder de adesão e aumentar a molhabilidade das superfícies. Algumas superfícies de baixa energia devem ser modificadas por tratamento de plasma, o condicionamento ácido, tratamento com chama, ou algum outro meio para criar forças atrativas necessárias para a boa aderência. Para preparar as superfícies, todas as partículas de poeira, graxa, óleo e estrangeiros devem ser removidas das superfícies. É importante para a otimização da aderência das nas interfaces ter uma tensão superfícial de um dos materiais em questão maior que a do outro, um, por exemplo, seria cobrir a superfície de uma peça de alumínio com um compósito de fibra e resina, onde na interfase do conjunto a tensão superfícial na superfície de alumínio seria maior que a da superfície de compósito provocando uma melhor interação entre elas.

A preparação de superfície pode variar de simples do solvente de limpeza a jacto de granalha de um metal (como por exemplo, granalha de alumina) ou vidro, onde granalha de vidro geralmente usada para limpeza de fáceis, portanto com seus devidos tamanhos de grão destes materiais poderão ser usados para diferentes fins de criação de maior ou menos formação de rugosidade nas interfaces ao ataque químico ou combinações destes. Os metais são mais limpos por vapor desengorduramento com tricloroetano, seguido de jateamento ou, preferencialmente, decapagem química. Ácido crômico é usado freqüentemente como um processo de ataque químico em aços. Assim superfícies de alumínio são preparadas para melhorar a sua interação interfacial (MAZUMDAR, 2002).

Desta forma exemplos podem ser vistos na Figuras 38 e 39 logo abaixo, sendo dois tratamentos de superfícies muito usados, que são o ataque químico e o granalhamento nas peças.

37



Figura 38 – Tratamento químico em um material



Figura 39 - Granalhamento em um material

Outra forma de se obter essa rugosidade, mais não tão eficiente quanto os outros métodos acima mencionados é o do lixamento manual das faces dos materiais, onde apresenta uma significativa vantagem de inferior custo de realização e dependendo da aplicabilidade do conjunto não sendo necessário o uso de métodos de custo elevado, sendo suficiente a obtenção de uma rugosidade não tão elevada para determinado caso.

# 2.9 – Alumínio

O alumínio é um metal leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza prateado e fosco, devido à fina camada de óxidos que se forma rapidamente quando exposto ao ar.

- > Principais características do alumínio (RIBEIRO *et.all.*, 2005)
- Baixo peso. O alumínio apresenta densidade 2,6 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 1/3 da densidade do aço.

- Excelente condutividade elétrica e térmica (de 50 a 60% da condutividade do cobre), sendo vantajoso seu emprego em trocadores de calor, evaporadores, aquecedores, cilindros e radiadores automotivos.
- Resistente à corrosão atmosférica, corrosão em meio aquoso (inclusive água salgada), óleos, e diversos produtos solventes.
- Ductilidade elevada (estrutura CFC) permitindo conformação de componentes com elevadas taxas de deformação.
- Não é ferromagnético (característica importante para aplicações eletroeletrônicas)
- Não é tóxico e portanto, é largamente empregado em embalagens
- A resistência mecânica do alumínio puro é baixa (~90MPa), entretanto, são empregados os seguintes mecanismos de endurecimento:
  - ✓ Endurecimento por solução sólida (ligas não tratáveis)
  - ✓ Endurecimento por dispersão de partículas (ligas não tratáveis)
  - ✓ Encruamento (ligas não tratáveis)

 ✓ Endurecimento por dispersão de partículas coerentes ou sub-microscópicas (ligas tratáveis termicamente)

 A principal limitação do alumínio é a sua baixa temperatura de fusão (660 °C), o que, limita a temperatura de trabalho destas ligas.

Os principais elementos de liga das ligas de alumínio incluem combinações dos seguintes elementos:

- ✤ Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn) e
- ✤ Zinco (Zn).

Estes dois grupos se subdividem em:

- LIGAS NÃO-TRATÁVEIS Não são endurecidas por meio de tratamento Térmico.
- ✓ LIGAS TRATÁVEIS TERMICAMENTE São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

É importante destacar que o termo "tratamento térmico" é, no seu sentido mais amplo, qualquer operação de aquecimento ou resfriamento realizada para modificar as propriedades mecânicas, estrutura metalúrgica ou estado te tensões internas de um produto metálico. Nas ligas de alumínio, o tratamento térmico é restrito a operações específicas utilizadas para aumentar a resistência e dureza de ligas endurecíveis por precipitação (conformadas ou fundidas) (RIBEIRO *et.all.*, 2005).

# **Exemplo de nomenclatura da liga e do estado de endurecimento**

# <u>SÉRIE 6XXX</u>

O MAGNÉSIO e o SILÍCIO são os elementos de liga principais.

A proporção de Mg e Si visa a formação da fase  $Mg_2Si$ , formando ligas tratáveis termicamente. As ligas da série 6xxx apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem e de usinagem e boa resistência à corrosão.

T – tratado termicamente – refere-se aos produtos que sofreram tratamentos térmicos visando aumento de resistência. Como exemplo deste fato, mostra-se a seguinte nomenclatura:

✤ T6 – produtos solubilizados e envelhecidos artificialmente.

# 2.10 - Riser de compósitos

*Risers* produzidos em material compósito têm um grande potencial de redução de custos, principalmente pela redução de peso que resultará em baixa tração no topo do *riser*, daí baixas cargas suportadas pela plataforma. Uma redução de cargas no convés possibilita redução estrutural no peso do mesmo, reduzindo tensões nos *risers* e nos

sistemas de suporte, possibilitando uma menor unidade flutuante ou casco, reduzindo o sistema de amarras, simplificando a ancoragem ou fundação. Outros benefícios em potencial do *riser* em compósito incluem: a redução de manutenção e inspeção no revestimento, redução nos custos de instalação, redução da proteção catódica e aumento da limitação térmica (TARNOPLO'SKII *et al.*, 1990).

Funcionalmente, *risers* compósitos devem ter a performance semelhante aos de aço. Geralmente, as funções são: controlar o fluido contido e pressões no poço; ser um membro estrutural do sistema; ser o envoltório contendo o conduto para transportar fluidos para o reservatório, e do reservatório; ser um dispositivo para guiar perfuradoras e ferramentas para dento do poço (FISHER *et al.*, 1977). Nessas funções, *risers* compósitos não exigem nenhuma técnica especial de manuseio ou equipamentos comparados com os convencionais.

Neste *riser* uma variação pode ser adicionada ao mesmo, sendo neste caso o uso de uma camada interna de um metal, que assegura uma maior resistência no todo em carregamentos que sejam axiais e esse revestimento interno sendo chamado de *liner*. Podendo desta forma, esse material de reforço (*liner*) é considerado o molde ou mandril pelo qual o *riser* de compósito será construído, aplicado a técnica de enrolamento filamentar obtendo, desta forma, uma peça com suas especificações desejadas. Um exemplo deste material com *liner* pode ser visto na Figura 40 logo abaixo.



Figura 40 - Exemplo de *riser* metal compósito: *liner* interno metal (1), camada de enrolamento circunferencial (2), camada de enrolamento helicoidal (3,4) e camada de proteção externa (5) (TARNOPLO'SKII *et al*, 1990).

Um exemplo deste material, "*riser* de compósito", está sendo lançado por uma gigante suíço-sueca ABB, que promete muitas vantagens em relação aos tradicionais *risers* metálicos. A principal delas, e que pode representar uma grande mudança nas operações de *drilling* no mundo, seria a redução em mais de 50% do peso da coluna

de perfuração, permitindo que as sondas possam operar com aumento de 30% da capacidade em termos de profundidade.

Segundo os técnicos da ABB, o *riser* de compósito eliminaria a necessidade de as empresas adaptarem suas plataformas para operar em águas mais profundas. "Este equipamento representa uma inovação fantástica para o mercado, porque viabiliza a perfuração em lâminas d'água maiores com as mesmas plataformas que se tem hoje, sem necessidade de *upgrade*. Ou seja, os custos serão muito menores", afirma o diretor de Desenvolvimento de Negócios da ABB, Flávio Tomagnini. O diretor aponta outras vantagens do *riser* de compósito: ele seria mais resistente à tração e à fadiga e teria menor custo de manutenção como mensionada por CORDEIRO (2008).

Este material teria uma desvantagem em relação ao tradicional - o custo seria maior. O preço do protótipo, por exemplo, custou de duas a três vezes mais que um convencional. Mas se trata apenas de um protótipo, sem os ganhos de uma fabricação em escala. Mesmo assim, a ABB garante que, no fim das contas, as operadoras teriam uma grande economia com a redução dos custos de afretamento de sondas. "O potencial de mercado é muito grande, porque várias empresas de perfuração estão com sistemas de *risers* velhos e precisando de renovação", disse Tiago Di Pierro Celestino, engenheiro do projeto no Brasil. Um protótipo deste *riser* tem 8 m e foi fabricado em uma das três fábricas de *risers* de perfuração da ABB, em Houston. Ele será testado durante seis meses a um ano na plataforma P-17 (equipada para operar a 700 m de profundidade), a princípio no campo de Marimbá.

Em 1979 o instituto de Petróleo da França (IFP) e Aeroespacial desenvolveram um tubo compósito, completamente aplicável à indústria offshore, de 4 polegadas e que trabalhava a pressões 5000psi (JOHNSON *et al*, 2001). Logo abaixo, pode ser visto na Figura 41 um exemplo de enrolamento filamentar, onde é produzido um *riser* rígido de compósito.



Figura 41 - Enrolamento filamentar do *riser* rígido produzido (STORHAUG *et al*, 2001).

Outro novo conceito visto sobre o mesmo pensamento em compósitos é o dos dutos tipo "sanduíche". Seu conceito é recente e diversos estudos estão em desenvolvimento para entender seu comportamento estrutural. Estes dutos são formados por dois tubos de aço montados concentricamente com o espaço anular preenchido por polipropileno, com o objetivo, além de satisfazer os requisitos térmicos, fornecer maior capacidade de resistência, quando comparado a um duto de parede simples. E ainda, diferentemente do conceito de dutos *pipe-in-pipe* (os quais possuem seu espaço anular preenchido ou não por um material com boas propriedades de isolamento térmico), onde os dutos de aço são projetados independentemente para suportar os carregamentos desconsiderando a camada entre eles, no caso dos dutos tipo sanduíche, a resistência é calculada considerando-se todo o conjunto. A aplicação *offshore* deste tipo de duto ainda está em estudo. Um exemplo de duto do tipo sanduíche é mostrado na Figura 42 (FROUFE, 2006).



Figura 42 - Duto tipo sanduíche (FROUFE, 2006)

### 2.11 - Juntas para riser de compósitos

A grande demanda de exploração de petróleo e operações de produção em ultras-aguas profundas levou a desenvolvimento sério de sistemas de *riser* de compósito devido as sua grande vantagem em propriedades oferecidas. Devido a este fato o acoplamento de *risers* desse material tem sido uma preocupação importante, por causa das complexidades e dificuldades envolvidas em seleção de um material, projeto de conectores, que consigam dar segurança entre essas extremidades de *risers* de compósito em longo prazo (CHEN *et. al.*, 2004).

Um exemplo desta tecnologia foi proposta pela Vetco Gray e a Petrobras onde testariam em setembro de 2005, um novo tipo de *riser*, sendo a novidade uma junta inteiramente de material compósito, uma espécie de fibra de carbono e um polímero especial, que seria conectado a uma coluna de *riser* convencional feita de aço. Desta forma, sendo o primeiro teste de campo desta junta que seria testada na plataforma P-17,

na Bacia de Campos. O objetivo deste seria o estudo do comportamento do compósito na perfuração, em ambiente submarino. Antes de ser transportada ao Brasil, a junta foi extensivamente testada no laboratório da Vetco Gray, em Houston.

A junta de fibra de carbono foi destinada a base de Macaé, da Vetco Gray e, a pedido do centro de pesquisa da Petrobras (Cenpes), foi instrumentada com medidores de tensão (*strain gauges*) para avaliar o comportamento do equipamento em diversas profundidades e sob diferentes solicitações segundo a revista MACAÉ OFFSHORE.

Já na Figura 43, logo abaixo, é mencionado outro exemplo de *riser* com sua respectiva união, onde esse conjunto e sua junção são feitos de liga metálica hibrida com fibra de carbono, foi desenvolvido e colocado para analise pela *Conoco-Kvaerner Composite* quanto sua operação. O *riser* foi fabricado por enrolamento filamentar com fibra de carbono com uma devida matriz epóxi, e internamente com um *liner* de liga de titânio (CONOCO, 2001, KVAERNER, 2001).



Figura 43- *Riser* desenvolvido de fibra de carbono (CONOCO, 2001, KVAERNER, 2001)

# 2.12 - Enrolamento Filamentar

Originalmente, as técnicas de fabricação de compósitos consistiam exclusivamente em trabalho manual. No início dos anos 50, com a diversidade e o volume de aplicação destes materiais tornando-se consideráveis, a indústria iniciou uma busca por formas de automatização e sistemas de produção mais operacionais (MARGOLIS, 1985).

O Enrolamento Filamentar foi originalmente desenvolvido como um método contínuo e barato para a fabricação de elementos cilíndricos. Com o desenvolvimento de máquinas e ferramentas mais versáteis, a fabricação de peças com geometrias mais complexas, tornou-se viável. A técnica abastece uma série de segmentos do mercado, incluindo a área automotiva, esportiva, aeroespacial e militar. Como exemplos de

produtos fabricados pelo método podem-se citar tubos, vasos de pressão, tanques, eixos, mancais, seções de fuselagem de mísseis.

A seleção correta da fibra e da resina favorece a otimização do elemento compósito fabricado. A principal função das fibras é a de resistir ao carregamento e fornecer a rigidez necessária ao compósito. Quase todos os reforços contínuos podem ser utilizados no enrolamento filamentar. As fibras de vidro são as mais utilizadas, sendo seguidas pelas de carbono e de aramida, cujos altos preços são compensados pelas suas excelentes propriedades. Outros tipos de fibras utilizadas como reforço incluem as de quartzo, de boro, de cerâmica, e fitas e arames metálicos. Os vários tipos de reforço podem ser misturados de forma a otimizar as propriedades do material compósito.

No enrolamento filamentar, um dispositivo móvel enrola fibras contínuas em torno de um mandril giratório, em um padrão controlado de forma a se obter estruturas ocas. O método permite a utilização de resinas termoplásticas e termofixas. As fibras podem ser pré-impregnadas (*towpreg*), ou passadas por um banho de resina antes de serem aplicadas no mandril (enrolamento molhado), ou enroladas secas e depois imersas em resina, num segundo processo (POTTISH, 2005). No caso deste trabalho vai-se o enrolamento molhado, que será, portanto, o apresentado. Esse método é o mais empregado por vários motivos - o custo de material é mais baixo, o tempo de enrolamento é menor se comparado com o das fibras pré-impregnadas e a formulação da resina pode ser modificada de forma a atender necessidades específicas de diferentes partes do produto (COHEN *et al.*, 2008)

O processo tem início com a aplicação de um produto desmoldante sobre o mandril, se desejar desmembrar o tudo depois de fabricado do mesmo. Os mandris de para um mais fácil desmembramento usam-se filmes de poliéster (*Mylar, Melinex ou Terphane*) aplicados em conjunto com substância líquida desmoldante.

A técnica permite a variação da tensão nas fibras, do ângulo de enrolamento e da quantidade de resina em cada camada de reforço. Várias peças podem ser fabricadas simultaneamente no mesmo equipamento, com precisão no ângulo das fibras e bom controle da quantidade de resina (PETERS, 1991).

#### 2.12.1 - Configurações de Enrolamento

A orientação do reforço é um fator decisivo na resistência das estruturas reforçadas por fibras. No enrolamento filamentar ela é determinada pela combinação entre a velocidade de giro do mandril e a velocidade de translação do carrinho. Numa mesma peça podem ser aplicadas camadas com diferentes ângulos de enrolamento; a combinação ideal depende da magnitude e da natureza do carregamento a que o elemento será submetido.

Sobre mandris cilíndricos, como os utilizados para a fabricação de tubos, as fibras podem ser enroladas com determinada angulação. Para cada rotação do mandril, a mecha de fibras é depositada a intervalos regulares de distância longitudinal, chamada de passo do enrolamento. Existe uma relação direta entre o diâmetro do mandril, o ângulo de enrolamento a largura de faixa e o passo. Fibras enroladas com passo igual a zero e fibras depositadas axialmente ao mandril encontram-se a "90" e "0" graus com relação ao eixo do tubo, respectivamente (STUART, 1985).

# ✓ Enrolamento Circunferencial

No enrolamento circunferencial, as fibras são depositadas lado a lado, o que resulta na cobertura completa do mandril com apenas um passe do carrinho. O passo do enrolamento circunferencial possui a mesma dimensão da largura de faixa, isto é, a largura da mecha de fibras. Um esquema é apresentado na Figura 44, onde se pode observar que os ângulos se aproximam de 90 graus (STUART, 1985).



Figura 44 - Enrolamento circunferencial (STUART, 1985).

# ✓ Enrolamento Helicoidal

No caso do enrolamento helicoidal, as fibras são depositadas com um ângulo que varia entre 5 e 80 graus (SHEN, 1995). Conforme observado na Figura 45, neste caso o passo do enrolamento é maior que a largura de banda (STUART, 1985).



Figura 45 - Enrolamento helicoidal (STUART, 1985).

No enrolamento helicoidal, o carrinho se move sucessivamente de um lado para o outro, paralelamente ao mandril, parando em cada extremidade e iniciando o ciclo inverso. Pode ser visto pela Figura 46 que o enrolamento é tal que a cobertura completa do mandril somente é obtida após várias idas e vindas do carrinho (AINSWORTH, 1971).



Figura 46 - As várias etapas do enrolamento helicoidal (AINSWORTH, 1971).

Desta forma, para dar início ao processo, o ângulo de enrolamento  $\Theta$  é estabelecido pela conjugação adequada da largura de faixa "w", do passo de hélice "p" e do número de passadas "n" requerido para cobertura completa do mandril. O carrinho, contendo a banheira e o cabeçote alimentador, corre paralelo ao eixo do mandril com velocidade "Vc". O mandril gira com "M" rotações por minuto. O passo da hélice é designado por "p", significando que o carinho percorre esta distância no mesmo tempo em que o mandril completa uma rotação. A Figura 47 abaixo mostra esse detalhe sobre uma peça em enrolamento.



Figura 47 - Detalhamento de uma peça em enrolamento

A Primeira passada do carrinho descreve o enrolamento cruzado ou helicoidal mostrado na Figura 47 com linhas cheias, com ângulo +  $\Theta$ . Ao voltar, o carrinho descreve outro enrolamento cruzado, como mostrado na figura anterior em linhas pontilhadas, com ângulo –  $\Theta$ . Em seguida o ciclo é repetido com outro enrolamento helicoidal de ângulo +  $\Theta$  justaposta à primeira, sem superposição entre elas. O processo é repetido n vezes até cobrir completamente o mandril. Portanto, após "n" idas e voltas do carrinho, as hélices descritas no mandril o cobrem completamente. Ficam assim completamente duas camadas (lâminas) de fibra de vidro contínuas sobre o mandril, uma com ângulo +  $\Theta$  e outra com ângulo –  $\Theta$ . Depois tudo se repete, sendo aplicadas tantas lâminas quantas necessárias para completar a espessura requerida pela estrutura. A Figura 48 abaixo ilustra o processo como um todo.



Figura 48 - Ilustração de um equipamento de enrolamento filamentar molhado (AGARWAL, *et. al.*, 1990).

Desta forma foram estabelecidas equações que ajustam o equipamento para o tipo de estrutura que se deseja construir.

W=( P/n ) sen 
$$\Theta$$
Equação (1)P=  $(\pi \Phi)/tg \Theta$ Equação (2)

N = (% fibra vidro . t . 10000) Equação (3)tex . [(% fibra vidro/2,60) + (100-% fibra vidro)/ 1,20]

Onde:

- ✓ Φ diâmetro do mandril.
- ✓ n número de passadas do carrinho para cobertura completa do mandril. É também o número de faixas que o mandril percorre em uma rotação.
- ✓  $\Theta$  ângulo de enrolamento.
- ✓ N é o número de bobinas necessárias para compor a largura de faixa w desejada, esse número depende do teor de vidro desejado no laminado, da espessura aplicada e do TEX (densidade linear do *roving* - fibras contínuas).
- $\checkmark$  t é a espessura de cada camada
- ✓ P é a determinação do passo a ser aplicado no material
- ✓ W é a largura faixa que se deseja para um determinado material

### 3 - Proposta de Trabalho

Este trabalho tem como objetivo o projeto de juntas de união de compósito com *liner* interno de liga de alumino, para *riser* rígidos com o mesmo *liner* interno, semelhante a juntas fabricadas unicamente de metal, com características próximas de resistência mecânica, redução de peso da peça, que ajuda na redução de esforços no conjunto e com o aprimoramento de novas possibilidades de conexão, entre *risers*, com a utilização de filetes de rosca. Esta junta é conectada por roscas presentes internamente na mesma e no *liner* interno do *riser*, sendo o *liner* maior em comprimento comparado à parte contendo o compósito, para que a rosca fique na parte externa do *liner* de liga de alumínio, ou seja, na parte em excesso de *liner*. E, após, para aumentar o reforço da peça é colocado uma luva meia calha parafusada recobrindo toda a junta (conexão) do *riser*. Desta forma, pode ser visualizado um esboço do conjunto nas Figuras 49 a 52 abaixo, obtido usando o software *SOLIDWORKS*.



Figura 49 - Vista isométrica do riser de compósito com liner de liga de alumínio com suas roscas nas extremidades.



Figura 50 - Vista explodida do *riser* de compósito com liner de liga de alumínio com a junta de união do *riser* com *liner* de liga de alumínio com rosca interna.



Figura 51 - Vista isométrica do *riser* de compósito com *liner* de liga de alumínio com sua junta de união do *riser* com *liner* de liga de alumínio com rosca interna.



Figura 52 - Vista isométrica do *riser* de compósito com *liner* de liga de alumínio com sua junta de união e o formato da montagem da braçadeira meia calha de aço inox na peça.

#### 4 - Materiais e Métodos

#### 4.1 - Materiais

#### 4.1.1 - Liner de liga de alumínio

Alumínio ASA SCHEDULE 40

Este material é uma liga de alumínio 6061–T6 que apresenta a nomenclatura de mercado ASA SCHEDULE 40, onde *ASA* significa Associação Americana de Normas (*America Standards Association*) e *Shedule* (SCH), que é a denominação dada ao resultado calculado pela formula abaixo:

SCH = P/S

Onde:

P é a pressão de trabalho do tubo e S é a tensão (pressão) correspondente a 60 % do limite de escoamento do material a 20 C°. Portanto para um mesmo diâmetro externo de um tubo de condução, quanto maior o SCH maior a espessura de parede em relação ao seu diâmetro.

O *Schedule* define, portanto, a espessura de parede do tubo de condução, sendo que os valores estabelecidos para cada *Schedule* (espessura) nos vários diâmetros são tabulados e convencionados nas normas correspondentes (TEBECHERANI, 2003).

Para detalharmos mais o tubo de alumínio disponível para uso, logo abaixo na Tabela 3 são fornecidos dados de dimensões e propriedades do mesmo, seguido pela Figura 53 mostrando a curva de tensão deformação do material.

(RIBEIRO *et all* 2005)

	)
Diâmetro nominal (in)	3 1/2
Diâmetro externo (mm)	101,60
Diâmetro interno (mm)	90,12
Espessura de parede (mm)	5,74
Peso linear (Kg/mm)	4,689
Limite de resistência a tração (MPa)	290
Limite de Escoamento (MPa)	255
Densidade [g/cm3]	2,67

Tabela 3 – Dados de dimensões e propriedades do *liner* de alumínio – 6061 – T6



Figura 53 – Curva de tensão deformação da liga de alumínio 6061-T6 (RIBEIRO *et.all.*, 2005).

# 4.1.2 – Compósito

# ➢ <u>Matriz epóxi;</u>

Neste componente do material compósito foi utilizada a resina Araldite® LY 556\*, Aradur 917\* e Accelerator DY 070\* da HUNTSMAN, que é um material de cura a quente, onde é necessário um tempo de permanência em estufa de 4 horas com temperatura de 80°C (para período de cura da resina) e 4 horas com temperatura de 120°C (para período de pós-cura da resina) para o devido endurecimento do material por completo. Logo abaixo temos as Tabelas 4, 5 e 6 com as devidas propriedades de Araldite® LY 556\*, Aradur 917\* e Accelerator DY 070\* fornecidas pela HUNTSMAN.

Tabela 4 - Propriedades do Araldite ® LY 556\* (HUNTSMAN, 2003).

Araldite LY 556		Unidades
Aspecto visual	Líquido claro, amarelo-pálido	
Viscosidade em 25°C (ISO		
12058-1)	10000 - 12000	[MPa s]
Densidade em 25°C (ISO		
1675)	1.15 - 1.20	[g/cm3]
Tabela 5 - Propriedades do Aradur 917\* (HUNTSMAN, 2003).

Aradur 917		Unidades
Aspecto visual	Líquido claro	
Viscosidade em 25°C (ISO 12058-1)	50 - 100	[MPa s]
Densidade em 25°C (ISO 1675)	1.20 - 1.25	[g/cm3]

Tabela 6 - Propriedades do Accelerator DY 070\* (HUNTSMAN, 2003).

Accelerator DY 070		Unidades
Aspecto visual	Líquido claro	
Viscosidade em 25°C (ISO 12058-1)	$\leq 50$	[MPa s]
Densidade em 25°C (ISO 1675)	0.95 - 1.05	[g/cm3]

Fibra de vidro tipo E.

Para a parte de reforço, foi utilizada a fibra de vidro tipo E Advantex® tipo30® -111A da Owens Corning®, que ela apresenta as propriedades mostradas logo na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades da fibra de vidro Advantex 111A (OWENS CORNING, 2010)

Propriedades da fibra	Vidro E
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,58
Módulo de elasticidade (GPa)	80
Resistência a tração (GPa)	2,56
TEX	1100 g/km

# 4.1.3- Massa epóxi de aplicação subaquática

Um produto utilizado no processo de montagem das juntas é a massa epóxi Tubolit MEP301, sendo a mesma uma massa utilizada para revestimento e reparo de alta resistência. E de uso direto em aço, concreto e outros materias, presentes em estruturas parciais ou totalmente submersas, oleodutos, hidrelétricas, emissários submarinos, plataformas de petróleo, estacas de concreto em piers e tanques ou reservatórios de caixa d'agua (TUBOLIT, 2006). Este material vai ser utilizado entres os filetes de rosca produzidos nas partes de alumínio das juntas de conexãode compósito e liner de alumínio e o tubo em sí de mesmo material. A Tabela 8 apresenta propriedades deste produto.

Propriedades da massa epóxi	Massa
	epóxi
Temperatura de endurecimento inicial	25°C
Tempo de cura final	24 horas
Peso específico a 25°C	1,5g/cm <sup>3</sup>
Temperatura máxima de resistência	110°C

Tabela 8 - Propriedades da massa epóxi Tubolit MEP 301 (TUBOLIT, 2006)

#### 4.2 - Métodos

# 4.2.1 – Preparo superficial do tubo de alumínio, ou mandril, antes do enrolamento filamentar das fibras.

Para o processo de adesão da parte de compósito na liga de alumínio, o procedimento aplicado de tratamento da superfície foi principalmente o lixamento, onde na grande maioria dos corpos de prova usou-se uma lixa própria para superfícies metálicas de granulação de número 36. Para outro teste utilizou-se tanto corpo de prova com superfície lixada e outra granalhada, com a idéia de comparar esses dois tipos de tratamentos da superfície do alumínio.

# 4.2.2 - Processo de fabricação das juntas por enrolamento filamentar das fibras de vidro impregnadas por resina epóxi no *liner* de liga de alumínio.

Foi utilizada a máquina de enrolamento filamentar Tecserve da Figura 54 abaixo. Como mandril foi utilizado o tubo de alumínio onde o mesmo faz parte da camada interna da junta na qual posteriormente são feitos os filetes de rosca. O mandril tinha 3 metros de comprimento e 4 polegadas (10,16 cm) de diâmetro. Após o enrolamento e cura do compósito o tubo de compósito com *liner* de alumínio foi cortado no tamanho desejado para as juntas de conexão projetadas e os tubos em si, para serem posteriormente unidos.



Figura 54 - Etapas de enrolamento filamentar (a) Máquina de enrolamento, b) Tubo de alumínio (mandril) e c) Processo de enrolamento.

O desenvolvimento das juntas para tubos compósitos seguiram os seguintes procedimentos:

- I. Preparo da mistura de resina Araldite® LY 556\*/ Aradur 917\* / Acelerador DY 070\* para posterior adição à fibra de vidro tipo E.
- II. Preparo da superfície de contato do tubo de alumínio para receber a fibra já impregnada com a resina epóxi.
- III. Enrolamento das fibras utilizando dois tipos de arranjos, como é mostrado na Figura 55.



Figura 55 – Disposição de orientação de fibras

# $\rightarrow$ Camada ± 88°:

Para orientações de ângulos de fibra maiores, com um limite máximo de 90°, que não é atingido por limitações do equipamento, obtém-se uma maior resistência radial do tubo. Logo, com uma angulação de  $\pm$  88° tem-se uma melhor aproximação da resistência que se obteria se fosse possível a angulação de 90°.

 $\rightarrow$  Camada  $\pm$  55°:

A escolha desta orientação é pelo fato de que quanto menor o ângulo de enrolamento melhor a resistência axial do tubo de compósito, seguindo a ideologia mencionado por MENICONI *et al.* (2001) com uma pequena diferença que em seu trabalho usou orientação  $\pm 45$  tendo referência angulação de armaduras de *risers* flexíveis.

CARROLL *et al.* (1995) descrevem que camadas com angulações a  $\pm 55^{\circ}$  exibem melhores valores de resistência sob carregamento combinado de pressão interna e tensão uniaxial. Esse comportamento do reforço a  $\pm 55^{\circ}$  também foi mostrado teoricamente por GREENWOOD (1977) e experimentalmente por SPENCER e HULL (1978).

Desta forma será desenvolvendo o material compósito com a configuração de 2 camadas em arranjo de fibras em 88°, em relação ao eixo do tubo na parte interna, mais 4 camadas em arranjos de fibras em 55° e por fim 2 camadas na parte externa em arranjo de fibra com 88°, como foi observado na Figura 59.

#### 4.2.3 - Determinação do tipo de conexão da junta

A idéia básica colocada em prática foi à tentativa de unir essas peças pela metodologia mostrada na Figura 56.



Figura 56 – Esquema do tipo de conexão

A idéia é ter-se o encaixe entre os dois tubos e uma peça de união central, de mesmo material dos tubos. Para esse sistema, foi necessário, depois do término do

processo de enrolamento filamentar do compósito na parte externa do tubo de alumínio, deixar um determinado trecho das pontas dos tubos sem a parte externa de compósito.

A partir dos tubos com liner fabricados, cortou-se segmentos de tubos para a fabricação das juntas de união, com comprimentos de 30 cm (300 mm), de acordo com o projeto dessas juntas.

A Figura 57 ilustra os segmentos a partir dos quais serão fabricadas as juntas de união.



Figura 57 – Seguimentos de tubos para a fabricação das juntas de união.

Nessa junta de união, internamente em cada ponta, foi idealizada a presença de filetes de rosca, semelhantemente às das pontas do tubo anteriormente citadas, para o devido acoplamento.

Pode-se ver logo a seguir o tipo de rosca escolhida nas peças com suas devidas medidas de comprimento de tubo e junta de união arbitrada no momento.

Para testar o sistema de união escolhido, foram preparados tubos e juntas de união com as dimensões apresentadas na Tabela 9.

Peça	Comprimento total (mm)	Comprimento da parte de compósito (mm)	Comprimento da parte de alumínio (mm)	Comprimento da parte roscada em cada ponta (mm)
Tubo	1000	930	1000	35
Junta de união	300	300	300	35

Tabela 9 – Dimensões dos tubos e juntas de união.

#### 4.2.4 - Determinação da rosca utilizada no sistema

As roscas escolhidas são aquelas utilizadas por fabricantes de tubos para suportar altas pressões, sendo muito utilizadas roscas cônicas da família NPT, onde uma delas é a uma junta estanque obtida por pressão, sem o uso de um vedante, podendo ser otimizadas em ambos os componentes roscados, desde que teoricamente a interferência (vedação) ocorra em todos os filetes. Existe, nesse caso, um acoplamento por esmagamento das partes internas e externas roscadas para a montagem NPTF(interna)-NPTF(externa). Os dados de medidas desse tipo de conexão são mostrados a seguir pela Tabela 10 segundo a norma ABNT NBR 12630. O formato da rosca é mostrado na Figura 58.

Fios por 25,4	Passo (p)	Altura do	Ângulo de
mm	em mm	triângulo	Conicidade
		básico em mm	
8	3,18	2,75	1°47' 22"
11,5	2,21	1,91	1°47' 22''
14	1,81	1,57	1°47' 22''
18	1,41	1,22	1°47' 22"
27	0,94	0,82	1°47' 22"

Tabela 10 - Características de conexão NPTF



Figura 58 - Formato da rosca, mais detalhado ((a) – mostra a altura H do triângulo básico para os filetes de rosca, (b) – filetes de rosca interna e externa montadas, (c) – mostra o acoplamento das partes interna e externa de filetes e o passo (p) entre eles, (d) – identifica o ângulo de conicidade ( $\beta$ ) do tipo de conexão.

A Tabela 11, encontrada na norma ANSI B2.1, mostra especificações de filete de rosca NPT convencional para cada tipo de diâmetro nominal de tubo e a Figura 59 abaixo mostra a localização de cada dado mencionado na Tabela 11.

Nominal							
(in)	Fios p/ (in)	Profundidade (in)	A (in)	B (in)	E (in)	F (in)	P(in)
1/8	27	0,02963	0,36351	0,37476	0,2639	0,180	0,03704
1/4	18	0,04444	0,47739	0,48989	0,4018	0,200	0,05556
3/8	18	0,04444	0,61201	0,62701	0,4018	0,240	0,05556
1/2	14	0,05714	0,75843	0,77843	0,5337	0,320	0,07143
3/4	14	0,05714	0,96768	0,98887	0,5457	0,339	0,07143
1	11.1/2	0,06957	1,21363	1,23863	0,6828	0,400	0,08696
1.1/4	11.1/2	0,06957	1,55713	1,58338	0,7068	0,420	0,08696
1.1/2	11.1/2	0,06957	1,79609	1,82234	0,7235	0,420	0,08696
2	11.1/2	0,06957	2,26902	2,29627	0,7565	0,436	0,08696
2.1/2	8	0,06957	2,71953	2,76216	1,1375	0,682	0,12500
3	8	0,10000	3,34062	3,38850	1,2000	0,766	0,12500
4	8	0,10000	4,33438	4,38712	1,3000	0,844	0,12500
5	8	0,10000	5,39073	5,44929	1,4053	0,937	0,12500
6	8	0,10000	6,44609	6,50597	1,5125	0,958	0,12500
8	8	0,10000	8,43359	8,50003	1,7125	1,063	0,12500

Tabela 11 - Dados de medidas de rosca NPT pela norma ANSI B2.1



Figura 59 – Esquema de localização das medidas da Tabela 11.

Assim, com os dados da Tabela 11 anterior, pode ser visto as informações de dimensionamento para filetes de rosca de tubos com diâmetro nominal de 3 e 4 polegadas (in), sendo estes bem próximos do tubo obtido para o projeto com 3 1/2 in de diâmetro nominal. Esse dimensionamento diz que, para estes diâmetro nominal, a profundidade de cada filete seria 0,10000 in (2,54 mm) desta rosca NPT cônica. Desta forma, foi observado que esta profundidade mencionada pela norma, para cada filete de rosca, seria muito grande comparado a espessura do próprio tubo de alumínio de 0.2259 in (5,74 mm) onde seria utilizado para o projeto das conexões, fato este que no desenvolvimento dos filetes de rosca no tubo de alumínio poderia comprometer a estrutura do metal, neste local, pois deixaria muito fina a espessura do alumínio. Logo, foi necessária arbitrada a diminuição da profundidade dos filetes para o valor de 0,039 in (1 mm) desta rosca cônica originalmente relatada pela norma ANSI B2.1. Contudo, foi garantida com essa profundidade, não tão elevada, uma espessura não tão fina para este local onde se encontra a rosca. A Figura 60 abaixo mostra uma comparação entre os filetes como a norma relata e como ficou com a redução desta profundidade dos mesmos no aplicado ao tubo.



Rosca com profundidade de filetes de 0,039 in





Figura 60 – Comparação entre profundidades de filetes de rosca da norma e o projetado.

Assim, a Tabela 12, fornece informações básicas sobre essa rosca que foi intitulada como de NPT corrigida e a Figura 61, foi obtido um molde para melhor visualização do formato dos filetes projetados.

Passo (p)	Altura do	Ângulo de
	triângulo básico	Conicidade
2 mm	1,0 mm (0.039 in)	1°47' 22"

Tabela 12 – Rosca NPT corrigida



a) Filetes de rosca interno e externo encaixados



b) Formato dos filetes das parte interna e externa

Figura 61 – Formato de filetes de rosca NPT corrigida projetados

#### 4.2.5 - Montagens com suas etapas

#### ✓ Primeira parte

Nesta primeira parte, como mostra a Figura 62, tem-se o tubo com suas pontas contendo filetes de rosca para o devido acoplamento na parte seguinte.



Figura 62 – Tubo com filetes de rosca no alumínio em suas pontas

# ✓ Segunda parte

Nesta parte tem-se a junta que acoplará dois tubos como mostrado na Figura 62 anterior. A junta apresenta nas suas extremiades roscas internas semelhantes a do tubo como mostrado na Figura 63.





Figura 63 – Junta de união entre os tubos

# ✓ Acoplamento da primeira e segunda parte

Nesta etapa mostra-se o acoplamento propriamente dito das roscas da primeira e segunda parte. Assim, depois desse acoplamento foi observado que as partes de reforço de compósito das duas peças não se tocaram, provocando assim um bem pequeno espaço vazio entre as mesmas, deixando a mostra um pequeno trecho de alumínio, sendo esse fato de ocorrência necessária, pois é justamente o trecho que não se tem filetes de rosca, onde é deixado pelo próprio equipamento que usinou esses filetes de rosca cônica no alumínio. E assim, esse espaço, podendo sim ser minimizado mais não excluída a sua ocorrência neste projeto para esse tipo de processo de união. Contudo pode ser visualizado na Figura 64 seguinte esse espaço vazio relatado de mínimo tamanho.



Figura 64 – Visualização do espaço entre a parte de compósito das duas partes.

# ✓ Terceira parte

Pelo fato relatado anteriormente da ocorrência de espaço vazio entre a parte de compósito das duas peças, foi feita uma braçadeira de aço inox com parafusos em suas

pontas e uma parte interna com um anel de compósito de fibra do tipo E, anel esse sem qualquer capacidade de suporte de tensões se usado sem a braçadeira. Esse anel foi utilizado basicamente para não deixar visível a parte de alumínio e ajudar a própria braçadeira em aumentar a homogeneidade de fornecimento de suporte de pressão sobre essa área crítica sem oferecer agressão à superfície do compósito do tubo e da junta pelo metal da própria braçadeira. Desta maneira a Figura 65 mostra essa duas peças usadas no acoplamento do conjunto.



Figura 65 – Peças auxiliares para montagem de juntas e tubos ( a) – Anel seccionado de compósito com fibras tipo E e b) – Braçadeira de aço inox com parafusos nas pontas).

Outro produto usado nessas conexões é a massa epóxi utilizada para equipamentos *offshore* como cola adesiva super resistente em pressões elevadas, que é colocada nesses espaços vazios e um pouco na superfície acima desses mesmos antes de colocar as peças auxiliares mencionadas anteriormente, de anel de compósito e braçadeira, sem esquecer-se da colocação até mesmo de uma pequena quantidade dessa massa epóxi nos filetes de rosca, provocando um reforço ainda maior nas roscas NPT corrigidas que foram desenvolvidas. A Figura 66 mostra a idéia da colocação desta massa de alta resistência no conjunto como foi dito neste parágrafo. Desta forma, essa união de materiais como a braçadeira e a massa epóxi pode propiciar uma maior proteção com respeito a tensões que possam ocorrer nesse ponto crítico da conexão comparado como o mesmo acoplamento se não tivesse nada preenchendo este trecho, ou seja, sem o anel com a braçadeira e massa descrito anteriormente.



Figura 66 – Massa epóxi presente entre as peças

# ✓ Acoplamento finalizado

Esta finalização desse processo de montagem pode ser exemplificada na Figura 67, que posteriormente vai ser submetido a testes de colapso de pressão interna e externa com todos seus devidos aparatos de ensaio.



Figura 67 - Finalização de montagem do conjunto

# 4.2.6 – Determinação da resistência ao cisalhamento da junta compósito / *liner* de alumínio.

No ensaio de adesão em anéis de compósito com a parte interna de alumínio são retirados os corpos de prova de uma junta de união, produzindo 4 amostras com interface entre o alumínio e o compósito granalhada e outras 4 lixadas segundo metodologia exemplificada na Figura 68.



Figura 68 - Ilustração de localização de retirada dos corpos de prova para os ensaios de adesão.

Para estes testes não se tem uma norma específica, Assim, as amostras produzidas foram dimensionadas arbitrariamente na forma padronizada entre elas, para haver regularidade e coerência nos resultados que se quer produzir. As dimensões de comprimento destes anéis são de 27 mm e se localizam tanto na parte central quanto nas extremidades da peças originais, como é exemplificado na Figura 68 e exemplos vistos na Figura 69.



Figura 69 – Exemplo de anéis de compósito com *liner* de alumínio para ensaio de adesão.

O teste de adesão, com o mecanismo de ensaio desenvolvido no laboratório de compósitos do PEMM/COPPE, é executado, como mostro na Figura 70, em uma máquina de tração e compressão EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 10 kN, no Laboratório de Propriedades Mecânicas do PEMM/COPPE. No ensaio, a máquina aplica as forças necessárias para haver o desacoplamento dos elementos que compõem o anel, fornecendo assim um gráfico com informações relevantes da força aplicada para obter um devido deslocamento entre os componentes do anel. Os ensaios foram efetuados à temperatura ambiente com velocidade de trabalho da máquina de 0,057 mm/s.



Figura 70 – Ensaio de adesão.

Na Figura 71 é apresentado o sistema desenvolvido para os ensaios de adesão.

No ensaio, a máquina trabalhando em compressão força a peça superior de aço para baixo. Quando a carga máxima tolerada pela junta é atingida, a peça de aço processa o deslizamento do anel de alumínio para baixo, provocando assim o desacoplamento do revestimento compósito do *liner* de alumínio. A seqüência desse ensaio é ilustrada na Figura 72.

A tensão de cisalhamento na junta compósito / *liner* alumínio ( $\tau$ ) é calculada pela seguinte expressão:

 $\tau = F/A$ 

# Onde

- F é a força máxima atingida no ensaio.
- A é a área de superfície de contato entre o compósito e o alumínio.



Figura 71 – Mecanismo de ensaio de adesão.



Figura 72 – Metodologia de ensaio de adesão (a) – visão externa do ensaio e (b) – visão interna do ensaio

#### 4.2.7 – Análise microestrutural das juntas de união.

#### > Distribuição das fibras no compósito

A distribuição das fibras no revestimento compósito foi analisada microestruturalmente usando um microscópio, da marca OLYMPUS, modelo BX60. Assim, foram cortadas amostras de cada junta, da partes do compósito em diferentes posições da peça. Elas foram embutidas com resina epóxi 331 e endurecedor D.E.H. 24 da marca EPOXTEC Ind. E Com. LTDA em um anel de PVC. As amostras foram embutidas à seguinte seqüência de lixamento; lixas 320, 400, 500, 600, 1200 e 2400 e polidas com alumina 1 e 2. Na Figura 73 são ilustrados exemplos de amostras embutidas para subseqüente observação no microscópio ótico.



Figura 73 - Amostras embutidas já polidas para observação microscópica.

Foram utilizados dois métodos de análise, como é mostrado a seguir, para se checar o ângulo de posicionamento das fibras em relação ao eixo longitudinal da junta, ou conexão, conforme anteriormente imposto nos parâmetros de controle da máquina de enrolamento filamentar, para a fabricação dos tubos.

#### • Método 1 - Razão de aspecto

Nesse método, a amostra foi retirada to tubo como mostra na Figura 74. Ela é então preparada metalograficamente e observada no compósito.



Figura 74 - Corte da amostra para análise pelo método de razão de aspecto

Assim, a imagem da superfície no microscópio é capturada como mostra a Figura 75, com os formatos de geometrias das fibras, ou melhor, seus aspectos geométricos projetados, dando valiosas informações de qual o ângulo de disposição das fibras em relação ao eixo longitudinal do tubo compósito, pela seguinte Equação 5.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\text{Diâmetro menor}}{\text{Diâmetro maior}}\right)$$
Equação (5)

Onde:

Diâmetro menor da imagem da face de formato da fibra. Diâmetro maior da imagem da face de formato da fibra.

Esta Equação 5, também usada por ALEXANDRE *et al.* (2007), fornece o ângulo de inclinação das fibras em função da geometria da projeção da face de formato da fibra na superfície que foi analisado pelo microscópio como é mostrado na figura 83, podendo estar mais circunferencial ou elíptico seu perfil.

Esta projeção, sendo cada vez mais cirfunferencial prova que o ângulo de inclinação das fibras, ou seja, ângulo do enrolamento filamentar feito pela máquina no tubo de alumínio seja aproximadamente 90°, em relação ao eixo de enrolamento. Os valores de diâmetro menor e maior da Equação 5 estariam cada momento ficando mais próximos. Nas projeções elípticas, a angulação do enrolamento filamentar feito direcionam-se a valores menores de angulação, como por exemplo, valores de 55° e 30° ou menores. Desta forma, os valores do diâmetro menor e maior da imagem, onde

tendem a valores distintos entre eles. Na Figura 83 abaixo mostra a projeção da imagem da face de formato da fibra que apresentam sua geometria mais circunferencial e a outro mais elíptico.



Figura 75 - Projeção da imagem da face de formato da fibra ((a) – imagem elíptica da face da fibra, (b) imagem aproximadamente circunferencial da face da fibra e (c) forma da fibra no material compósito).

Com o simples uso de uma régua virtual, mais precisa que as usadas rotineiramente por todos manualmente, a medida desses diâmetros foram feitas para obter os devidos cálculos necessários. Um exemplo desse tipo de ferramenta, como mostra a Figura 76, pode ser obtido na internet como software gratuito.



Figura 76 - Régua virtual para medição

### Método 2

Este método segue o mesmo princípio de retirada da amostra do material compósito em questão, só com a seguinte diferença, que a superfície analisada é a própria superfície externa do material como mostrado na Figura 77 a seguir.

Superfície que será analisada em microscópio



Figura 77 – Corte da amostra para análise na superfície externa do compósito

Neste processo, depois de lixada a amostra ao ponto de visivelmente deixar transparecer as fibras do material compósito, foi usado o mesmo tratamento para a observação da superfície usado no método 1. Desta forma, na face de análise, como mostra a Figura 78 abaixo, exemplifica como foi possível analisar a inclinação das fibras com as suas respectivas angulações com o simples uso da mesma régua virtual mencionada no método 1. Assim, foi feito medições das dimensões das projeções de triângulos nesta face, com um dos lados representando as direções das inclinações das fibras e o outro lado sendo o eixo longitudinal da junta, que foi exposto na superfície do compósito. Com esses dados foi utilizado a simples Equação 6 que fornece as informações do ângulo de posicionamento das fibras, em relação ao eixo já mencionado.

$$\Theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$
Equação (6)

#### Onde:

Y é o cateto oposto do triangulo das projeções e

X é o cateto adjacente do mesmo triângulo

Os dados obtidos para os devidos cálculos de angulação são aferidos com a régua virtual como mostrado na Figura 79, com os valores de X e Y necessários.

Superfície que será analisada em microscópio



Figura 78 – Esquema de análise da superfície pelo método 2 ((a) – amostra com a fase que será analisada, (b) – projeções das direções das fibras em  $\approx 90^{\circ}$  em relação ao eixo longitudinal da junta e (c) – projeções das direções das fibras com ângulos < 90° em relação ao eixo longitudinal da junta).



Figura 79 – Exemplo de utilização de régua virtual para determinação da angulação das fibras em relação ao eixo longitudinal ((a) – projeções das direções das fibras em  $\approx 90^{\circ}$  em relação ao eixo e (b) – projeções das direções das fibras com ângulos < 90° em relação ao eixo).

# 4.2.8 - Determinação da fração volumétrica das fibras do material compósito pelo processo de queima e pesagem

As propriedades dos materiais são características mecânicas essenciais para a análise de tensões e o projeto de componentes estruturais em engenharia. Desta forma com essas propriedades é possível relacionar as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem em um material, assim fração volumétrico de fibra e matriz no material tem grande influência nas propriedades finais do conjunto.

E a determinação da fração volumétrica de fibra e resina nos tubos compósitos envolve basicamente o método experimental da queima de amostras retiradas de compósito. Assim, a estimativa tanto da fração volumétrica e mássicas da fibra e da matriz, utilizou-se as seguintes formula.

✓ Sabendo-se que:

$Wf = \frac{mf}{mc}$ Equação (7)	$Wm = \frac{mm}{mc}$	Equação (8)
----------------------------------	----------------------	-------------

Onde

Wf = Fração mássica de fibras;

Wm = Fração mássica de matriz;

mf = massa de fibras presente no compósito na amostra;

mm = massa de matriz presente na amostra e

mc = massa de compósito presente na amostra.

✓ Tendo as seguintes formulas de densidade:

$ \rho_{f} = \frac{mf}{Vf} $ Equação (9)	$\rho m = \frac{mm}{Vm}$	Equação (10)	$\rho c = \frac{mc}{Vc}$	Equação (11)
--	--------------------------	--------------	--------------------------	--------------

Onde:

 $\rho f = Densidade da fibra;$ 

 $\rho m = Densidade da matriz e$ 

 $\rho c = Densidade do compósito.$ 

✓ Unindo as expressões acima teremos:

$Wf = \frac{\rho f}{\rho c} \cdot \frac{Vf}{Vc} \qquad Eq$	uação (12)	$Wm = \frac{\rho m}{\rho c} \cdot \frac{Vm}{Vc}$	Equação (13)
--	------------	--	--------------

Onde:

Vf = Volume de fibras presentes; Vc = volume do compósito e Vm = Volume da matriz presente.

✓ Com as equações anteriores podemos obter as equações 13 e 14.

$vf = \frac{Vf}{Vc}$ Equação (14)	$vm = \frac{Vm}{Vc}$ Equação (15)

Sendo:

*vf* = Fração volumétrica de fibra e *vm* = Fração volumétrica de matriz

✓ E finalmente obtemos fórmulas mais simplificadas de fração volumétrica de

fibra e matriz em função das densidades e das seguintes frações mássicas.

$vf = \frac{\rho c}{\rho f} \cdot Wf$ Equação (16)	$vm = \frac{\rho c}{\rho m} \cdot Wm$	Equação (17)
--	---------------------------------------	--------------

Assim, na parte de compósito, foram retiradas quatro amostras de pontos diferentes da superfície da junta, onde pertencem a parte central e as outras mais próximas as extremidades da junta como mostra a Figura 80. Desta forma, duas amostras foram tiradas do centro e uma de cada ponta com dimensões de 10x25 mm, onde elas são vistas, pela Figura 81, dentro do cadinho antes da queima da matriz material do material compósito.



Figura 80 – Localidade da retirada das amostras.



Figura 81 - Amostras retiradas para queima no forno.

A queima das amostras foi realizada em um forno durante duas horas à 500°C, obtendo a queima da matriz (resina) presente no material compósito como mostra a figura 82 abaixo.



Figura 82 – Forno com as 4 amostras para queima da resina.

Um dado muito importante para a determinação das frações volumétricas tanto do compósito como a do alumínio presente na junta é a determinação da densidade do compósito fabricado e do alumínio, usado como *liner*. Utilizou-se assim um picnometro para poder aferir essas densidades. Para mostrar esse equipamento temos logo abaixo uma Figura 83, com quatro amostras retiradas para a determinação desta propriedade para o compósito.



Figura 83 – Picnometro com as amostras para a determinação da densidade do compósito

Para esta propriedade foi utilizada a seguinte metodologia experimental para cada amostra:

✓ Pesou-se a amostra em balança de precisão e se obtém a massa da amostra (Ma);

✓ Completou-se o picnometro com água até o seu nível especificando, com a amostra em seu interior;

- ✓ Pesou-se o picnometro com água e a amostra apresentando massa (Mb);
- ✓ Pesou-se o picnometro somente com água apresentando massa (Mc);
- ✓ Depois foi aplica a Equação 18 abaixo;

### Mad = (Mc + Ma) - Mb

Equação (18)

Onde:

Mad é a massa de água deslocada no picnómetro

✓ Com a massa de água obtida anteriormente, pode-se determinar a o volume de água deslocada (Ve) usando a Equação 19 seguinte e

$$Ve = \frac{Mad}{\rho \, água}$$

Equação (19)

✓ Desta forma finalmente obteve-se com a última Equação 20 seguinte, para essa metodologia, a densidade do compósito em questão.

$$\rho(\text{compósito}) = \frac{\text{Ma}}{\text{Ve}}$$

### Equação (20)

A Figura 84 abaixo mostra as amostras obtidas das juntas para a determinação tanto da fração volumétrica do alumínio da junta projetada, quando para a obtenção da densidade do mesmo, onde este fato foi determinado usando a metodologia logo acima mencionada.

Determinação da fração volumétrica



Determinação de densidade



Figura 84 – Amostras para determinação da fração volumétrica e densidade do alumínio.

#### 4.2.9 - Ensaio de anel de segmentos de compósito das juntas

Os ensaios, segundo a norma ASTM D2290, foram desenvolvidos para o ensaio de colapso da parte de compósito da junta de união projetada com *liner* interno de alumínio, onde fornece a resistência à tensão máxima obtida pelo material. A Figura 85 abaixo mostra a geometria e as dimensões dos anéis.



Figura 85 – anel de compósito com as devidas dimensões para o ensaio (a =106,6 mm; b =101,6 mm; c =35,0 mm; d =17,0 mm e r = 9,0 mm )

Logo a seguir na Figura 86 é apresentado um exemplo de como é feito a simulação do ensaio de anel, com suas devidas peças necessárias.



Figura 86 – Diagrama esquemático de ensaio de anel.

Para esse esquema mencionado acima, temos abaixo a Figura 87 com o aparato para a realização do mesmo. A Figura 88 mostra um corpo de prova preparado para o decorrer do ensaio de tração, que foi realizado na máquina eletromecânica EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 10 kN, no Laboratório de Propriedades Mecânicas do PEMM/COPPE.



Figura 87 - Aparato de ensaio de anel



Figura 88 - Aparato montado na máquina eletromecânica EMIC de tração

Os corpos de prova de compósito foram retirados da junta de união no devido local mostrado na Figura 89 abaixo, onde dos três corpos de prova obtidos, um deles é da parte central e os outros dois da extremidade da junta. Essas amostras já retiradas, com as devidas especificações que a norma ASTM D2290 estabelece, são visualizadas na Figura 90.



Figura 89 - Retirada de anéis da junta de união



Figura 90 – Anéis de compósito para ensaios

### 4.2.10 - Ensaio hidrostático com pressões nas juntas

Os ensaios de pressão interna e externa das juntas de compósito com *liner* de alumínio projetadas no laboratório de compósito foram realizados no laboratório de Tecnologia Submarina do Programa de Engenharia Oceânica/COPPE. Logo abaixo, na Figura 91, é visto o local para o devido ensaio de pressões com uma câmara hiperbárica de 5 m de comprimento e 0,38 m de diâmetro interno, com capacidade máxima para 10000 PSI (68,94 MPa) de pressão.



Figura 91 – Câmara hiperbárica

### ✤ Pressão Externa

Na realização deste ensaio, com da junta projetada e já acoplada a dois seguimentos de tubos como relatado anteriormente neste trabalho, foi concluído a metodologia de preparo da amostra para dar início ao teste. Metodologia esta seguida pela utilização de cabeças maciças de aço nas pontas do copo de prova contendo massa epóxi para ajudar na vedação e adicionalmente recobertas com tinta epóxi por todo corpo de prova para evitar a permeação de água pela superfície. Para maior observação destas cabeças de vedação, a Figura 92 abaixo mostra o seu formato.



Figura 92 - Exemplo de cabeça de vedação em pressões externas.

Assim, tendo início à pressurização na câmara em regime lento de 60 psi/min, até o devido colapso do tubo em sua pressão de resistência externa. Logo a seguir, na Figura 93 tem-se o exemplo da atuação das pressões no corpo de prova em questão. Esses ensaios fornecem informações quantitativas de qual o máximo de pressão externa um material criado pode suportar.



Figura 93 - Esquema de atuação de pressões externas no corpo de prova

Como forma de esclarecimento a idéia de montagem das cabeças de vedação é mostrada na Figura 94.



Figura 94 - Aparato para simulação de pressões externa

#### Pressão Interna

Este ensaio, diferentemente ao de pressão externa, informa qual foi à resistência que este material suportou na aplicação de tensões internas no mesmo. Para este feito, foi utilizado um aparato no corpo de prova de formato diferente das cabeças de vedação anteriormente vistas em pressões externas. Na Figura 94, com a mesma metodologia de preparo da amostra com o acoplamento das juntas de união com os seguimentos de tubos, foi acoplada cabeça de vedação, em cada extremidade dos corpos de prova, como é mostrado na figura 95 abaixo.



Figura 95 Exemplo de cabeça de vedação em pressões internas

O processamento desse ensaio foi utilizado com um dispositivo simulando a presença dos corpos de prova em uma linha "infinita" de tubos e juntas, ou seja, como se tivessem em operação com quilômetros de linhas de tubulações com suas juntas de união. Para está idéia que se determinou a presença desse aparato diferenciado para a realização do ensaio de pressão interna. O carregamento de pressões internas aplicadas a junta de compósito com *liner* de alumínio pode ser exemplificado segundo a Figura 96.



Figura 96 – Esquema de atuação de pressões internas no corpo de prova

Este dispositivo de simulação pode ser mostrada a sua idéia geral pela Figura 97 relatada logo em seguida.



Figura 97 - Aparato para simulação de pressões internas

#### 5 - Resultados e Discussões

Neste item serão apresentados e discutidos os dados obtidos referentes aos ensaios nas juntas desenvolvidas para *risers* de compósito com *liner* de alumínio, em juntas somente de alumínio e na no material compósito criado.

#### 5.1 - Análise micro-estrutural do compósito presente nas juntas

As imagens adquiridas para essa análise foram obtidas por microscopia ótica. Nelas foram analisados a razão de aspecto (método 1) das fibras, podendo as mesmas apresentarem formas mais elípticas ou circunferências na superfície de análise como foi mencionado no item 10.2.7 do capítulo 10, com aumento de 200x e 500x, bem como para o método 2 usando outras imagens de amostras, também mencionadas no mesmo item, com aumentos de 50x e 100x, onde foi calculada a angulação das fibras na superfície externa da parte de compósito, usando um eixo longitudinal na imagem, no mesmo sentido do eixo longitudinal das juntas como base de orientação.

O enrolamento filamentar das fibras junto com a resina epóxi no mandril, que é o próprio *liner* de alumínio já discutido anteriormente, foi feito com angulações de 55° e 88° em relação ao eixo de enrolamento. Com esses dois métodos de análise microestrutural obtidas podemos checar se realmente a máquina fez o que foi parametrizado em seu sistema.

# Razão de aspecto (método 1) para detectar a angulação de enrolamento de fibras de 55°

A microscopia óptica forneceu dados como o da Figura 98, com um aumento de 500x. Assim, foram medidos os comprimentos dos eixos maiores e menores, das imagens das fibras, que tendem à forma elíptica, para três lugares diferentes. Essas medidas foram feitas com uma régua virtual e a Equação 4, onde já foram mencionados anteriormente na metodologia do processo. As medidas e cálculos efetuados estão reunidos na Tabela 13, para o ângulo de 55.

87



Figura 98 - Amostra com 500 x de aumento (55°).

Tabela 13 - Valores experimentos de razão de aspecto para ângulos de 55°

	Eixo maior	Eixo menor	Ângulo calculado
	(mm)	(mm)	
Razão de aspecto 1	36,1	28,0	50,06°
Razão de aspecto 2	38,9	30,0	50,46°
Razão de aspecto 3	31,0	26,5	58,74°
Média			53,08° ± 2,83°

Pela Tabela pode-se observar que os valores dos ângulos de enrolamento obtidos estão bastante próximos de 55°, com valores variando para mais ou menos, contudo tendo em média um valor bem próximo do programado na máquina.

# Razão de aspecto (método 1) para detectar a angulação de enrolamento de fibras de 88°

A Figura 99, com aumento de 200x, foi realizada o estudo quanto à forma circunferencial em um grupo das fibras na imagem.

Os valores dos eixos observados e os ângulos calculados são apresentados na Tabela 14.



Figura 99 - Amostra com 200x de aumento (88°).

	Eixo maior	Eixo menor	Ângulo calculado
	(mm)	(mm)	
Razão de aspecto 1	13,5	13,2	79°
Razão de aspecto 2	10,4	10,3	82,04°
Razão de aspecto 3	10,6	10,6	90°
Média			83,68° ± 3,28°

Tabela 14 - Valores experimentos de razão de aspecto para ângulos de 88°

Os valores obtidos para a angulação ficaram próximos do esperado, com certas variações para mais e para menos do desejado de 88°. O valor médio de 83,68° foi obtido.

# ✤ Medida de inclinação (método 2) usando régua virtual como medidor e observando a inclinação das fibras na angulação de enrolamento de 55°.

Neste segundo método de investigação foi usada uma metodologia mais simples que a primeira, onde se observa a própria superfície externa do compósito previamente lixado e polido até que as fibras possam ser vistas no microscópio. Na Figura 100
abaixo foram traçados triângulos retângulos com as hipotenusas no sentido das fibras inclinadas e indicados os ângulos da inclinação das fibras no compósito.



Figura 100 - Amostra com 50x de aumento.

Os valores destas medições estão colocados na Tabela 15 abaixo, onde os números mostram que o ângulo de enrolamento das fibras tendeu ao valor esperado de 55°, embora com um valor médio de 58,1°.

Comparando os valores obtidos pelos métodos 1 e 2 pode-se constatar que os valores apresentados pelo método 2 mostraram uma dispersão bem menor do que os obtidos pelo método 1.

	Cateto adjacente (mm)	Cateto oposto (mm)	Ângulo
Medida 1	24,9	42,1	59,3°
Medida 2	32,5	52,1	58,04°
Medida 3	11,9	18,3	56,96°
Média			$58,1^{\circ} \pm 0,68^{\circ}$

Tabela 15 - Valores experimentais obtidos pelo método 2 para o ângulos de 55°.

# ✤ Medida de inclinação (método 2) usando régua virtual como medidor e observando a inclinação das fibras em angulação de enrolamento de 88°.

Para esta etapa do processo não foi adequado o uso da metodologia anteriormente exposta para a medição da inclinação de 55°, pois não se tem como utilizar o artifício do triangulo retângulo anterior como pode ser visto na Figura 101. Contudo, visualmente, as fibras são aproximadamente perpendiculares ao eixo longitudinal e assim a angulação corresponde a valores elevados e tendendo a 90°. Esse fato leva a assumir que o enrolamento foi feito com uma inclinação correspondente à desejada, de 88°.



Figura 101 - Amostra com 100x de aumento.

Desta forma, os dois processos realizados pelos métodos 1 e 2 foram muito válidos para a análise da angulação das fibras no material compósito onde os dois métodos forneceram valores bem próximos do programado na máquina, respectivamente 55° e 88°.

## Distribuição das fibras tipo "E" no compósito junto com a resina epóxi

A Figura 102 mostra que a distribuição das fibras é relativamente heterogênea com regiões de maior concentração de fibras e outros com menores, ou seja, porções com quantidades maiores e menores de resina. Com essas heterogeneidades, a resistência mecânica deste material tende a uma diminuição. No entanto, deve ser ressaltado que distribuições relativamente heterogêneas são normais em materiais compósitos, independentemente do processo de fabricação conforme constatado em trabalho de outros pesquisadores, ZHANG *et al.* (1991) *e* ALBUQUERQUE *et al.* (2005). Da mesma forma observa-se a ocorrência de vazios e porosidade que também diminuem a resistência mecânica do compósito.



Figura 102 – Imagem ilustrativa de distribuição das fibras em aumento de 100x ((a) – figura mostrando existência de vazios e (b) – figura mostrando heterogeneidade das fibras)

#### Microscopia da superfície de interface entre o compósito e o alumínio

Como mencionado anteriormente, a preparação da superfície do *liner* para acomodação do material compósito é de grande importância dependendo para que tipo de função o produto final seja utilizado. Essa preparação é feita para se ter a ancoragem da resina epóxi no material metálico, ou seja, para que ocorra uma boa ligação do compósito com o *liner*. Desta maneira, foi realizado o tratamento em corpos de prova com superfícies de alumínio lixadas com lixa de número 36 e outras granalhadas (ou

jateadas) com alumina de 40 mesh de granulométrica. As superfícies resultantes estão ilustradas na Figura 103.



## a) Superfície granalhada b) Superfície lixada

Figura 103 – Tipos de tratamentos superficiais usados.

A Figura mostra que o tratamento de granalhamento produz uma superfície com maior rugosidade e maior adesão, portanto mais adequada para produzir ancoragem do compósito no *liner*.

Assim, a Figura 104, mostra como ficou a interface entre o compósito e o alumínio com sua rugosidade, onde é visualizada a ancoragem do compósito no metal. A imagem abaixo é de um corpo de prova com superfície granalhada, com o lixamento não foi possível conseguir imagens na microscopia ótica sem que a parte de compósito descolasse instantaneamente no momento da retirada dessas amostras na junta de compósito e alumínio. Os corpos de prova com as superfícies de alumínio lixadas apresentaram facilidade de desacoplamento devido à baixa adesão provocada pela baixa capacidade de ancoragem.



Figura 104 – Interface compósito/alumínio ((a) – aumento de 25x, (b) – aumento de 100x e (c) – aumento de 200x ) – superfície do alumínio granalhada.

## 5.2 - Determinações da fração volumétrica de fibra e resina (matriz) no compósito

A densidade do compósito com fibra do tipo "E" e resina epóxi produzido, determinada pelo método de picnometria, e a fração volumétrica de fibras e da resina, obtida pelo método da queima, pode ser vista na Tabela 17 e 18, sem esquecer que para obtermos esses valores o procedimento adotado foi apresentado no capítulo 10 da dissertação utilizando os dados da Tabela 16 de densidades de fibra e da água previamente conhecidos.

Tabela 16 - Densidade de fibra fornecida por OWENS CORNING e da água por LIDE

(1990).			
Densidade da Fibra (ρf) - (g/cm³)	2,580		
Densidade da H₂O (ρH₂O) - (g/cm³) Temp. 25°C	0.997		

Massa de Volume de H<sub>2</sub>O H<sub>2</sub>O Densidade Amostra deslocad deslocad do Picnometro de Massa do Picnometro Compósit a no a no N° do + Amostra compósito picnometro + Amostra picnomet picnome ο (ρc) - $+ H_2O(g)$ cadinho ro (g) tro (cm<sup>3</sup>)  $(g/cm^3)$ (g) (g) (g) 0,66 29,24 82,21 29,90 0,38 0,38 1,73 1 2 0,56 29,24 82,20 29,80 0,30 0,30 1,89 29,76 3 0.52 29,24 82,19 0,26 0,26 1,98 0,78 82,30 30,02 0,41 0,42 4 29,24 1,87  $0,63 \pm$  $82,22 \pm$  $29,87 \pm$  $0,34 \pm$  $0,34 \pm$  $1,87 \pm$ Valores 29,24 0,06 0,02 0,06 0,04 0,04 0,05 Médios

Tabela 17 – Determinação da densidade do compósito

A dispersão dos dados foi medida pelo erro-padrão da média, onde foi observada a homogeneidade nos resultados dos parâmetros estudados, resultando um valor muito baixo de 0,05 de erro-padrão.

O processo de queima para determinação da fração volumétrica de fibras de vidro foi possível devido à alta temperatura de amolecimento destas fibras, de 916 °C, segundo a norma ASTM C338 comparada com a temperatura em que é queimada a resina, que é de 500°C, desta forma provocando a queima unicamente da resina.

		Massa	Cadinho	Cadinho	Massa	Massa	Fil	ora	Ma	triz
No	Amostra	do	+	+ Cinzas	de	de				
1	(g)	cadinho	Amostra	(fibras)	fibra	matriz	Wf	Vf	Wm	Vm
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)				
1	3,99	33,22	37,20	35,99	2,77	1,22	0,69	0,46	0,31	0,54
2	3,69	31,47	35,16	34,04	2,57	1,12	0,70	0,51	0,30	0,49
3	4,44	35,10	39,53	38,18	3,09	1,35	0,70	0,53	0,30	0,47
4	3,60	33,65	37,25	36,14	2,50	1,10	0,69	0,50	0,50	0,50
Walan	2 02 ±	22.26 ±	27.20 ±	26.00 ±	<u>272⊥</u>	1 20 +	0,69	0,50	0,35	0,50
valor	5,95 ±	55,50 ±	57,29 ±	<i>30,09</i> ⊥	2,75 ±	1,20 ±	±	±	±	±
médio	0,19	0,75	0,89	0,85	0,13	0,06	0,01	0,01	0,05	0,01
	Wf					Fração n	nássica	Fibra		
	Vf Fração volumétrica Fibra				ora					
	Wm				Fração mássica Matriz					
	Vm				Fração volumétrica Matriz					
	N°					Número	do cadi	nho		

Tabela 18 - Determinação da fração de fibra e matriz

Os valores encontrados das frações mássicas e volumétricas de fibras e matriz foram bem consistentes, pois os coeficientes de variação, para ambos, foram muito pequenos, menores que 0,02 (menores que 2%). Os valores médios de fração volumétrica de fibras de 0,5 não são muito elevados, mostrando que a resistência mecânica que esse material poderia proporcionar, ainda pode ser melhorada com uma maior quantidade de fibra.

## 5.3 - Determinações da densidade e fração volumétrica do alumínio nas juntas

Para a liga de alumínio utilizada como *liner* nas juntas de compósito/alumínio foi determinado a sua densidade e a respectiva fração volumétrica do metal nas mesmas. Foram os mesmos métodos que aqueles utilizados na determinação da densidade e fração volumétrica de compósito, sendo eles reunidos nas Tabelas 19 e 20 a seguir.

Tabela 19 –	Determinaç	ão da	densidade	da lig	a de alu	mínio (	6061	T-6	•
-------------	------------	-------	-----------	--------	----------	---------	------	-----	---

Dens.	
H <sub>2</sub> O	
$(g/cm^3)$	0,99
PIC (g)	48,44

N°	Picnometro + Amostra (g)	Picnometro +H <sub>2</sub> O+Amostra (g)	Picnometro + H <sub>2</sub> O (g)	Massa da Amostra (g)	Massa H <sub>2</sub> 0 deslocado (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	51,95	106,04	104	3,51	1,47	1,47	2,38
2	52,67	106,4	104	4,23	1,83	1,83	2,30
3	53	106,6	104	4,56	1,96	1,96	2,31
4	52,6	106,42	104	4,16	1,74	1,74	2,38
5	52,37	106,3	104	3,93	1,63	1,63	2,40
6	53,14	106,7	104	4,7	2	2,00	2,34
Valores médios	$52,62 \pm 0,32$	106,41 ± 0,16		4,18 ± 0,31	1,77 ± 0,16	1,77 ± 0,15	2,57 ± 0,03

 $N^{\circ} = N$ úmero da amostra

Tabela 20 - Fração volumétrica de compósito e alumínio no material.

N°	Volume total da amostra (cm <sup>3</sup> )	Fração vol. do Alumínio	Fração vol. do Compósito.
1	40,27	0,5078	0,4921
2	40,66	0,5108	0,4891
3	40,41	0,5095	0,4904
4	40,33	0,5095	0,4904
5	40,17	0,5099	0,4900
6	39,51	0,4983	0,5016
Valores Médios	$40,22 \pm 0,25$	0,51 ± 0,01	$0,\!49 \pm 0,\!01$

Os dados obtidos experimentalmente em amostras da liga de alumínio, quanto a sua densidade, indicaram valores bem próximos do relatado pelo fornecedor do material metálico e por publicações tais como a de RIBEIRO *et.al.*, (2005) de densidade  $\pm 2,67$ g/cm<sup>3</sup>, dando consistência à caracterização da liga de alumínio da presente dissertação, apresentando valores médios de 2,57  $\pm 0,03$  de densidade.

Com as informações obtidas, foi possível determinar a fração volumétrica do metal nas juntas projetadas e do material compósito nas mesmas. Frações volumétricas estas de aproximadamente 50% de ambos os matérias. A importância desta constatação

pode ser vista pelo fato da parte de compósito nas juntas além de reduzir o peso do todo, comparado com um tubo com 100% do metal, além de propiciar uma melhora na resistência do material final das juntas produzidas. Essas informações são confirmadas nos ensaios posteriores feitos nas mesmas.

## 5.4 – Ensaios de tração de anéis de compósito de segmentos das juntas.

As curvas tensão-deslocamento características dos anéis de epóxi/vidro "E", podem ser observadas na Figura 105. A parte inicial da curva corresponde ao ajuste do sistema (acomodação do anel e das peças).



Figura 105 – Curva de tração dos anéis

Os valores de tensão máxima obtidos, tanto em MPa e PSI para os três anéis ensaiados podem ser vistos na Tabela 21.

Amostras	Tensão máxima em MPa	Tensão máxima em PSI	Módulo de elasticidade (GPa)
Corpo de prova 1	481,53	69840,86	15,32
Corpo de prova 2	461,92	66995,51	15,39
Corpo de prova 3	501,01	72665,49	16,09
Média	481,48 ± 11,28	69833,95 ± 1636,834	$15,60 \pm 0,14$

Tabela 21 – Tensão máxima de colapso dos anéis

Esses valores podem ser comparando com dados de anéis testados por Faro *et al.* (2008), que obtiveram valores de tensão máxima de 497,70  $\pm$  28,73 MPa, onde foram usados os mesmos matérias de fibra e resina deste trabalho. Assim, obtendo valores bem próximos encontrados por este trabalho.

Um estudo de valores de módulo de elasticidade, obtidos por KAYNAK *et al.* (2005) mostrou que quanto menor o ângulo de enrolamento filamentar das fibras menores serão esses módulos. Já para FARO *et al.* (2008) encontraram valores de 14,41  $\pm$  0,79 para com ângulos de enrolamento de 88° (paralelo) e 45° (cruzado), diferente do presente trabalho onde foi usado um enrolamento cruzado maior de 55°, provocando assim um valor um pouco maior de módulo de elasticidade.

Os anéis de compósitos devidamente ensaiados apresentaram fraturas como podem ser visualizadas nas Figuras 106 até 108. Desta forma, as imagens mostram que tanto as fibras enroladas a 88° quanto a 55° romperam por completo na seção reduzida do anel, que foram efetuados segundo a norma (ASTM D2290-00).



Figura 106 – Corpo de prova 1.



Figura 107 – Corpo de prova 2.



Figura 108 – Corpo de prova 3.

## 5.5 - Ensaios de adesão superficial compósito e liner de alumínio nas juntas

O ensaio de adesão do compósito no alumínio foi realizado com segmentos de junta contendo esses dois materiais. Os testes foram divididos em dois grupos: o primeiro, com corpos de prova retirados da parte central da junta e o outro com corpos de prova retirados da extremidade. Para ambas os grupos a superfície do alumínio foi ou lixada ou granalhada. Dessa maneira, foram produzidas 4 amostras com o alumínio lixado e outras 4 com o alumínio granalhado. Na Figura 109 é apresentado um exemplo para cada tratamento superfícial do metal.



Figura 109 – Exemplos dos corpos de prova de adesão já ensaiados.

## Primeiro grupo

O gráfico apresentado na Figura 110 mostra o valor da tensão de cisalhamento em função do deslocamento do material compósito sobre o alumínio. Assim, o gráfico apresenta no eixo "y" a tensão cisalhante atuante na interface compósito/alumínio e no eixo "x" porcentagem do deslocamento do compósito sobre o alumínio.



Figura 110 – Teste de adesão do primeiro grupo.

Para este ensaio foi observado que o comportamento da tensão de cisalhamento na interface do material compósito, sobre o alumínio com a superfície lixada foi bem inferior do que a com o alumínio tendo sua superfície granalhada.

No corpo de prova com superfície granalhada, 3 picos de tensão de cisalhamento ocorreram no decorrer do ensaio. No ponto 1 ocorreu o primeiro máximo de tensão de cisalhamento, onde iniciou o desacoplamento do material de compósito da liga de alumínio. Já para o ponto 2 e ponto 3, ocorreram outros picos de tensão. Desta forma, relatando assim os outros dois pontos de pico de tensão de cisalhamento do material compósito sobre o alumínio, tem-se que a maior tensão de cisalhamento obtida foi a do ponto 2.

Assim, esses picos originados pelo atrito entre os materiais envolvidos no decorrer do ensaio de adesão.

## Segundo grupo

Neste grupo, a Figura 111 demonstra o comportamento do deslocamento do material compósito sobre o alumínio, seguindo o mesmo princípio do gráfico do primeiro grupo.



Figura 111 - Teste de adesão do segundo grupo.

O gráfico mostrado, neste grupo, com o corpo de prova com a superficie do alumínio lixada mostra que a tensão cisalhante é bem inferior do que aquela com superficie granalhada, com um detalhe onde este corpo de prova com superficie granalhada apresenta uma maior tensão de cisalhamento para o descolamento dos materiais quando comparado com a do primeiro grupo.

No corpo de prova que o alumínio apresenta tratamento superficial granalhado, semelhante ao primeiro grupo, 3 pontos de máxima tensão de cisalhamento ocorreram no decorrer do ensaio.

No ponto 1 houve o primeiro e maior valor de máximo de tensão de cisalhamento, onde novamente foi observado o inicio do desacoplamento do material de compósito da liga de alumínio como ocorreu no primeiro grupo. Já os ponto 2 e ponto 3, ocorreram novos picos de tensão motivados também pelo atrito entre as superfícies dos materiais, mais com valores de tensão de cisalhamento respectivamente decrescentes.

Para a superfície do alumínio lixada ocorre um único ponto de máximo de tensão de cisalhamento, ponto 4, onde se inicia o descolamento entre o material compósito e o alumínio.

# Fatos e conclusões observados mais detalhadamente entre a parte granalhada e lixada

A Tabela 22 abaixo mostra os valores médios das tensões máximas de cisalhamento da interface compósito/alumínio para cada tipo de tratamento superficial para os respectivos grupos.

	Alumínio Gr	analhado	Alumínio Lixado		
	Máxima	Máxima	Máxima	Máxima	
	tensão em	tensão em	tensão em	tensão em	
	(MPa)	(PSI)	(MPa)	(PSI)	
Primeiro grupo	1,06	153,2	0,03	4,18	
Segundo grupo	1,86	271,99	0,34	49,84	

Tabela 22 – Valores médios da tensão máxima de cisalhamento das interfaces.

Um fato que pode ser levado em consideração quanto à dificuldade de se obter uma adesão entre os materiais de compósito e alumínio de forma mais eficiente é a atuação da propriedade de expansão térmica dos materiais. Com produção das juntas, logo após o processo de enrolamento filamentar, a mesma é posta em uma estufa para a cura do polímero do material compósito. Desta forma, essa mudança de temperatura provoca também uma dilatação tanto da liga de alumínio quanto do material compósito. E posteriormente com o esfriamento da junta produzida até a temperatura ambiente a dilatação ocorrida anteriormente não é reduzida igualmente pelos materiais, onde o metal reduz mais significativamente a sua a dilatação ocorrida que o material compósito. Podendo este fato ser observado pela diferença de valores de expansão térmica tanto alumínio quanto da fibra tipo "E" usados. Esse fato acarreta o aparecimento entre eles. Isto motiva as baixas tesões de cisalhamento na interface e associada baixa adesão do compósito no alumínio.

Esses valores de coeficientes expansão térmica mencionados anteriormente são mostrados na Tabela 23 abaixo. Com seus valores obtidos para cada elemento do material compósito segundo a norma ASTM C338 e a HUNTSMAN (2003) (para a fibra de vidro tipo "E" e a resina epóxi respectivamente). E por fim o coeficiente de expansão térmica da liga de alumínio foi extraído do livro de propriedades gerais do alumínio segundo GEORGE *et al* (2003).

Coeficientes	Alumínio	Fibra de vidro	Resina epóxi
	(C° <sup>-1</sup> )	(tipo E) (C° <sup>-1</sup> )	(C <sup>o-1</sup> )
Expansão térmica linear	0,0000235	0,000006	0,000055
Expansão térmica	0,0000705	0,000018	0,000165
volumétrica			

Tabela 23 – Coeficientes de expansão térmica dos materiais.

#### 5.6 - Ensaios hidrostáticos com pressões externas

Para este ensaio os corpos de prova, ou seja, a junta de compósito e *liner* de alumínio e a junta somente de alumínio formam montadas com suas devidas cabeças de vedação em cada extremidade na câmera de pressão hidrostática, com a finalidade das mesmas serem submetidas a ensaios hidrostáticos com aplicação de pressão externamente às juntas. Na Figura 112 pode ser observado um corpo de prova no local de ensaio.



Figura 112 – Junta.

# Junta desenvolvida de compósito e *liner* de alumínio e outra somente de alumínio (com a presença de masssa epóxi entre conexões).

A Figura 113 apresenta a curva pressão externa de colapso em função do tempo de ensaio das juntas de compósito-alumínio produzidas. Com os resultados obtidos, expressos pelo gráfico da Figura, foi produzida a Tabela 24 com valores máximos de tensões tanto para juntas somente de alumínio, quanto às de compósito-alumínio. Deste forma, é possível fazer uma comparação entre a junta deformada com compósito e só de alumínio.



Figura 113 – Ensaio de pressão externa de juntas.

Juntas de conexão de	Pressão máxima em	Pressão máxima em
	(Mpa)	(PSI)
Alumínio (1)	13,98	2029
Compósito/alumínio (2)	20,39	2959
Melhoria de (2) em (1)	46	5%

Tabela 24 – Valores das de pressões externas máximas.

Segundo a Tabela 24, o valor da pressão máxima de colapso da junta com os dois materiais tornou-se superior à produzida somente de alumínio em 46%, sendo uma melhoria significativa nas juntas.

Uma idéia do quanto esses materiais compósitos podem oferecer de reforço quanto a pressões externas aplicadas a tubos produzidas desse material, pode ser vista no trabalho de SOBRINHO (2009). Essa pesquisadora utilizou em um de seus testes tubos de compósito produzidos com fibras de vidro do tipo "S" com o mesmo número de camadas e angulação de disposição de fibras do presente trabalho (8 camadas, 4 delas em 88° e 4 em 55°). Ela obteve valores de pressão de colapso de 15,33 MPa (2222,83 PSI) e 14,92 MPa (2163,38 PSI) em dois de seus tubos, respectivamente.

Assim, esses valores obtidos por SOBRINHO (2009) podem ser utilizados como limites inferiores de pressão de colapso máxima que as juntas produzidas neste trabalho poderiam suportar. A idéia seria de criar uma junta cujo comportamento se assemelhasse ao de um tubo inteiriço, sem qualquer junção.

Junto a esta metodologia, se tem o cuidado de se obter valores relativamente elevados de resistência, boa estanqueidade do conjunto com a presença das junções, é um objetivo recomendado pela norma DNV-RP-F202 em todos os aspectos de desenvolvimento do seguimento.

Outro fato relevante é que o gráfico da Figura 113 apresenta inclinação da curva de tensão-tempo de colapso da junta de compósito e *liner* de alumínio menor que a da junta de alumínio.

O desempenho dos filetes de roscas no acoplamento das juntas apresentou comportamento bem satisfatório, mesmo com filetes com dimensões pequenas. A junta apresentou estanqueidade eficiente em um valor apreciável de pressão na junta.

A Figura 114 ilustra o colapso total da junta tanto de compósito e alumínio quanto a só de alumínio, onde a principal região afetada são os filetes de rosca.



Figura 114 – Foto das juntas depois de realizado o ensaio de pressão externa.

Na ilustração da Figura 115 abaixo os filetes de rosca feitos na junta somente de alumínio apresentam o total desacoplamento e esmagamento dos mesmos ao atingir seu limite máximo de resistência para a rosca NPT corrigida projetada neste trabalho.



Figura 115 – Visão do esmagamento dos filetes de rosca para junta somente alumínio em pressões externas.

O mesmo fato ocorre na junta feita com compósito e *liner* de alumínio, apresentando um esmagamento no corpo da peça com um todo e o desacoplamento dos filetes de rosca. Além disso, há fratura e esmagamento também do aparato que fica na região de acoplamento, que são os seguimentos seccionados de anéis de compósito e as braçadeiras de aço inox como relata a Figura 116 abaixo.



Figura 116 - Visão do esmagamento dos filetes de rosca para junta de compósito e alumínio em pressões externas.

A Figura 117 mostra uma foto do material compósito da junta que sofreu o processo de falha. O item "a" mostra o material com pequeno aumento e o "b" em maior detalhe.



Figura 117 – Detalhes de falha das fibras nas juntas.

Com os dados obtidos os ensaios hidrostáticos com pressões externas foi feita uma análise da profundidade de água que a junta pode suportar até o colapso. Desta maneira, a Figura 118 mostra o gráfico da profundidade atingida tanto da junta produzida de compósito com *liner* de alumínio quanto a junta somente de alumínio versos a pressão.



Figura 118 – Profundidade atingida pelas juntas na presença de pressões externas.

De acordo com a Figura 118, observa-se que tanto a junta de compósitoalumínio quanto a somente de alumínio atingiram uma profundidade máxima de utilização satisfatória. Contudo, a junta produzida de compósito com *liner* de alumínio apresenta um melhor desempenho com relação à produzida somente de alumínio, que possibilita o seu uso em maiores profundidades de água.

As profundidades máximas obtidas para cada material são apresentadas na Tabela 25 para os dois tipos de junção.

Tabela 25 – Máximas profundidades suportadas pelas juntas para pressões externas.

Matarial	Profundidade máxima
Material	atingida (m H <sub>2</sub> O)
Junta de compósito/alumínio	2070,10
Junta só de alumínio	1426,52

# Junta desenvolvida de compósito e *liner* de alumínio (sem a presença de massa epóxi entre conexões).

Nesta junta de união foi realizado o ensaio sem a utilização da massa epóxi entre as conexões, como foi feito no teste anterior. Este ensaio possibilita visualizar a contribuição desta massa epóxi no comportamento. A Figura 119 abaixo mostra o comportamento da junta no ensaio de pressão externa.



Figura 119 – Ensaio de pressão externa na junta sem a presença da massa epóxi entre as conexões.

Como pode ser observado na Figura 119, ocorreu uma queda de pressão (aproximadamente 17 MPa) logo no início do teste hidrostático. Essa queda de pressão caracteriza um vazamento nesta junta nos filetes de rosca, onde logo após, nesta região há formação de uma deformação plástica provocando uma acomodação entre os filetes de rosca. Possibilitando assim, a retomada do aumento progressivo da pressão percebida pela junta. E com esse dano causado a estrutura, a pressão no sistema continuou aumentando indefinidamente sem apresentar um futuro colapso da junta.

Os pontos destacados no gráfico anterior da Figura 119 foram relatados na Tabela 26 a seguir.

Pontos da curva	Pressão em MPa	Pressão em PSI
Ponto 1 - primeiro máximo	17,00	2479
Ponto 2 - primeiro mínimo	9,80	1418

Tabela 26 – Pontos importantes da curva tensão-tempo.

Junto ao ocorrido, a utilização da massa epóxi nos filetes é um importante integrante que pode ajudar a estabelecer uma boa resistência nos filetes de rosca da junta.

Com a Figura 120 abaixo foi possível observar a região onde houve o vazamento em uma das conexões da junta de compósito e *liner* de alumínio.



Vazamento nos conexões roscadas

Esta deformação plástica nos filetes da junta pode ser observada quando feito o desacoplamento entre as partes da junta nas suas conexões. Diante disso, a Figura 121 ilustra logo abaixo com os itens "a" e "b" esta deformação estrutural do alumínio.

Figura 120 – Junta sem massa epóxi (vazamento).



Figura 121 – Junta desmontada.

Uma estimativa da profundidade atingida pelo corpo de prova até o vazamento entre as conexões da junta pode ser observada no gráfico da Figura 122. Mesmo com esse dano estrutural ocorrido na junta, a profundidade máxima atingida antes do vazamento é maior comparado a da junta produzida somente de alumínio que utilizou massa epóxi entre os filetes de rosca.

Esses dados de comparação entre as juntas mencionadas podem ser observadas na Tabela 27 abaixo.



Figura 122 – Profundidade atingida até o vazamento da conexão sem massa epóxi referente a pressões internas.

Material	Profundidade máxima atingida (m H <sub>2</sub> O)
Junta de compósito – alumínio (sem massa epóxi)	1742,90
Junta só de alumínio (com massa epóxi)	1426,52

Tabela 27 - Comparação entre materiais com e sem massa epóxi.

## 5.7 - Ensaios hidrostáticos com pressões internas

Na realização desse ensaio, a junta foi submetida a pressão interna com carregamento circunferencial puro. O teste foi conduzido até o momento em que a pressão de colapso da junta fosse atingida, tornando-se aproximadamente constante, caracterizando a ocorrência de um vazamento provocado pelo colapso.

Assim, pode ser observado o corpo de prova no local de ensaio na Figura 123.



Figura 123 – Ensaio de pressão interna.

# Juntas desenvolvidas de compósito e *liner* de alumínio e outra somente de alumínio.

Com relação às pressões internas aplicadas a esse material, o seu comportamento em termos de pressão versos tempo de aplicação no referido ensaio pode ser visualizado na Figura 124, com o gráfico com uma junta feita inteiramente de alumínio e outra de compósito e *liner* de alumínio.



Figura 124 – Ensaio de pressão interna das juntas.

Assim, com o teste realizado, foi observado que o reforço externo de compósito (fibra de vidro tipo "E" e a matriz epóxi) propiciou um aumento considerável na pressão de colapso das juntas em questão. Foi constatado, ainda que os filetes de rosca usinados no tubo de alumínio, para a efetiva conexão, mostraram grande eficiência em suportar pressões elevadas mesmo sendo filetes com pequeno diâmetro, como já citado anteriormente neste trabalho.

Contudo, esse tipo de junção, como é esperado, apresentou pontos críticos de tensões nos filetes de rosca. Depois de suportar um máximo de pressão bastante elevado, os filetes foram os locais que apresentaram as falhas de colapso apresentando esmagamentos dos filetes, juntamente com deformação do alumínio. Este fato é observado claramente na Figura 125. Na Figura 126 a junta de compósito e *liner* de alumínio apresentou significativas melhoras no suporte de pressões, como foi visto graficamente.



Figura 125 - Junta somente de alumínio depois de ensaio de pressão interna.



Figura 126 - Junta de compósito e alumínio depois de ensaio de pressão interna.

Dados anteriormente estudados por HARTE *et al.* (2003) em conexões fabricadas com fibra de vidro tipo "E" e resina epóxi em enrolamento filamentar com angulação de fibras  $\pm 54^{\circ}$  em relação ao seu eixo, utilizado em gasoduto GRE com sistema de junção roscadas com diâmetro interno de 105,2 milímetros operando em uma linha de transmissão de gás apresentou uma pressão operacional máxima de 70 bar (7 MPa ou 1015.264 PSI). Já para o trabalho de SOBRINHO *et al.* (2009), onde foram desenvolvidos e analisados tubos compósitos visando aplicação como *risers* utilizando fibra tipo "S", diferente deste trabalho, que utilizou a tipo "E", apresentou em média 17,98 MPa (2465.64 PSI) de pressão interna de colapso em tubos sem a presença de trechos de conexões no corpo do material.

Assim, com estes valores mencionados, pode ser feita uma comparação numérica com a pressão interna obtida no presente trabalho, que pode ser considerada satisfatória para o desenvolvimento deste sistema de juntas. A Tabela 28 abaixo mostra os valores obtidos no presente trabalho, tanto para o material só de alumínio quando de compósito e *liner* de alumínio. Desta forma, os valores obtidos são superiores aos dados mencionados anteriormente. Em especial, a comparação, exclusivamente numérica, entre o presente trabalho e o de SOBRINHO *et al.* (2009), que não apresentava locais de concentração de tensão ou pontos críticos de tensão é importante pois fornece subsídios importantes para o desenvolvimento de junções em dutos de compósitos.

Juntas de conexão de	Pressão máxima em	Pressão máxima em
	MPa	PSI
Alumínio (1)	17,73	2579
Compósito-alumínio (2)	36,81	5339
Melhoria de (2) em (1)	108 %	

Tabela 28 - Valores máximos de pressões interna.

Em termos de comparação entre as juntas só de alumínio e a de compósito e *liner* de alumínio observado nesta dissertação há uma melhora bem significativa fornecido pelo material compósito, como mostrado na Tabela 28 anteriormente. Esta melhoria é vista pela adição do material compósito como reforço da parece de alumínio do tubo e da presença do aparato tanto do anel de compósito colapsado e da braçadeira de metal, que é colocado logo acima da local de fragilidade das conexões, ou seja, área onde são presente os filetes de rosca do conjunto, do qual pode ser revisto está área pela Figura 127 abaixo.



Figura 127 – Aparatos presentes acima das conexões.

Desta forma, com todo esse conjunto montado, é notada uma melhoria de aproximadamente 108 % sobre a resistência da junta somente de alumínio, sem qualquer tipo de aparato.

## 6 - Conclusões

Considerando os resultados obtidos pode-se concluir deste trabalho que:

- A utilização de material compósito nas juntas projetadas com *liner* de alumínio apresentou uma grande melhora na propriedade de resistência do produto final como um todo, onde a quantidade de camadas de compósito tem um papel fundamental nas pressões de colapso das mesmas. Desta forma, foi possível aumentar a resistência ao colapso das juntas em torno de 46% a 108%, com a presença do material compósito com suas 8 camadas de reforço no arranjo [88\_/±55\_/88\_], nos ensaios de pressões hidrostáticas realizados.
- O ensaio de anel avalia de forma precisa a tensão máxima do compósito presente nas juntas, com valores próximos dos já publicados por outros autores e com dados de simulação numérica produzida, postos em anexo.
- Na escolha da liga de alumínio como *liner* das juntas, mesmo não apresentando uma elevada resistência ao colapso, a sua densidade é bem inferior a do aço. Desta forma, ela apresenta menor peso das juntas produzidas.
- Para propiciar adesão entre o material compósito e o *liner* de alumínio utilizou-se nesta dissertação tratamento de lixamento com granalhamento na superfície do alumínio nas juntas, Os valores de tensão máxima de cisalhamento entre os materiais foi de 1,06 a 1,86 MPa para a superfície granalhada e de 0,03 a 0,34 MPa para a superfície lixada. Isso mostra que o granalhamento produziu melhores resultados.
- O aparato e a técnica de ensaio de adesão desenvolvido, para o material compósito e o *liner* de liga de alumínio das juntas, desenvolvidos mostraram-se úteis para a caracterização dessa adesão.
- Nos filetes de rosca produzidos para as juntas, a correta escolha dos mesmos propicia boa resistência ao colapso e ao vazamento precoce entre as mesmas. Os filetes muito utilizados industrialmente são as cônicas de formato NPT, que foram

utilizados nesta dissertação, com algumas correções. Logo, para uma melhor conexão, a utilização de uma espessura maior, mas não tão elevada do tubo de liga de alumínio, onde são presentes os filetes, e o formato de rosca cônica NPT original poderá ser utilizado no material, com um número reduzido de correções dimensionais, melhorando ainda mais os resultados atingidos nos ensaios.

- Nas regiões onde estão presentes as conexões, a utilização de um aparato externo, formado por uma braçadeira de metal e uma massa epóxi nos filetes, fornece reforço significativo neste ponto crítico do sistema.
- Para as juntas projetadas, as profundidades que as mesmas podem atingir foram estimadas com as informações obtidos dos ensaios de pressões hidrostáticas, mostrando assim profundidades possíveis de 2070 m de lámina d'água.

## 7 - Trabalhos Futuros

- ✓ Melhoras ainda mais a forma de adesão entre o material compósito e o material metálico, onde idéias que possam ser utilizadas estão colocadas em apêndice nesta dissertação com um tratamento da superfície do metal mais diferenciado.
- ✓ Buscar melhorar os formatos de conexões com modelos diferentes e mais eficientes.
- ✓ Desenvolver um mecanismo de utilização de resinas de cura a frio no compósito, com o fim de evitar o problema da dilatação do *liner* no processo de fabricação das juntas, sendo um grande influenciador de um favorecimento do descolamento futuro do material compósito do metal.
- ✓ Testes de flexão em juntas já acopladas, para determinar o raio de curvatura máxima das mesmas que esses locais de conexões suportam.
- Melhorar a resistência do conjunto, como um todo, em termos de pressões externas que são aplicadas ao mesmo. Fato este de grande importância para se atingir profundidades mais elevadas com o material projetado, já que em termos de pressões internas as juntas apresentam sempre maior resistência máxima de colapso em relação a pressões externas aplicadas.
- Mesmo com a literatura dando boas informações sobre as boas qualidades de liga de alumínio estudada, é interessante o estudo da mesma metodologia utilizando ligas de alumínio diferentes, ou até mesmo outro metal.
- ✓ Realizar testes detalhados da composição química do metal, onde caso for, para propor uma melhoria das suas propriedades na presença de um determinado componente.
- Confrontar dados de ensaios experimentais e simulações numéricas de pressão hidrostática em juntas e ensaios de anéis com a presença do *liner*.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J., 1990, *Analysis and performance of fiber composites*. 2 ed. EUA: John Wiley & Sons, 472 p.

AINSWORTH, L., 1971, "*The state of filament winding*". In: Composites, v.2, n.1, p. 14-28.

ALBUQUERQUE, R. J., 2005, *Desenvolvimento de Material Compósito para Reforço de Dutos de Aço*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ALEXANDRE, C., EDUARDO, R. G., MARCOS, R. S., MÁRCIO, C. F., HAZIM, A. A., 2007, "Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas". In: *Revista Matéria* vol.12 no. 2.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API RP 2RD, 1998: "Design of risers for floating production systems and tension leg platforms".

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API Specification 17J, 1997: "Specification for unbounded flexible pipes".

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, ANSI B2.1, 1945: "Basic standard for steel pipe threads".

API recommended Practice 16Q (RP16Q), 1993, "*Recommended Practice for Design, Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems*". 1 ed. 1 November, American Petroleum Institute.

ASTM C338 - 93(2008), "Standard Test Method for Softening Point of Glass". In: 1992- 2008 Annual Book of ASTM Standards, v.15.03, American Society for Testing and Materials.

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.

BANNERJEE,A., SUN,L., MANTELL,S.C., COHEN,D. "Model and experimental study of fiber motion in wet filament winding". In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. v.29, n.3, Acesso em: 10 jan. 2008.

BARBOSA, R. L., 2007, Análise de forças de contato e desgaste interno em riser marinho devido ao contato com tubos de perfuração. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARROLL, M., ELLYIN, F., KUJAWSKI, D., et al., "The Rate–Dependent Behaviour of ±55\_ Filament-Wound Glass–Fibre/Epoxy Tubes under Biaxial Loading", Composites Science And Technology, v. 4, pp. 391–403, 1995.

CHEN, X. H., Yu, T. P. and WANG, S. S., 2004, "Advanced Analytical Models and Design Methodology Developments for Ultra-Deepwater Composite Risers". In:

*Composites Engineering and Applications Center (CEAC)*, and Department of Mechanical Engineering University of Houston.

CONOCO, N., A, KVAERNER, 2001, Composite riser technology advances to field applications. In: Oil & Gas Journal October 15, v.99.

CORDEIRO, R., 2008 "Novas alternativas para perfuração, disponível" In: Revista Brasil Energia., disponível em: www.Dep.fem.unicamp.br/boletim/BE25/art3\_bol25.htm. Acesso em: 06 nov. 2008, 18:30:20.

DET NORSKE VERITAS, DNV-OS-F201, 2001: "Dynamic risers. Norway". 91p.

DET NORSKE VERITAS, DNV-RP-F202, 2002, "Composite Risers, Recommended Pratice". 44p.

DONNET, J. B, 1998, Carbon Fiber. 3rded. New York, Marcell-Dekker.

ELLIS, B., 1993, "Introduction to the chemistry, synthesis, manufacture and characterization of epoxy resins". In: Ellis, B. (Ed) Chemistry and technology of epoxy resins. Blackie Academic. p. 1-35.

ENGINEERING GRAND CHALLENGES, *Foto de plataforma Spar-Buoy*. Disponível em: <u>http://ucsdengineeringgrandchallenges.blogspot.com/</u> acesso em: 02 fev. 2009, 12:00:10.

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.

FISHER, F. J.; LO, K. H.; WANG, S. S. "*Material Requirements for Risers*". In: *Twenty-Ninth Annual Offshore Technology conference*, 1977, Houston. Proceedings of the Twenty-Ninth Annual OTC, Paper OTC 8431, USA, p. 8-11, 1977.

FMC TECHNOLOGIES, *Foto de junta rosqueada de metal*, Disponível em: <u>http://www.fmctechnologies.com/</u> acesso em: 14 jan. 2009, 14:30:10.

FREITAS, S. M. S., 2006, *Ferramentas numéricas para análise e projeto de dutos e risers na exploração de petróleo*. Dissertação de Dr., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FROUFRE, L. M., 2006 *Análise comparativa de critérios de dimensionamento de risers rígidos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GELFGAT, M., GREBTSOV, N., PODRAZHANSKY, A., 2004, "High-Strength Alluminun Alloys for Deepwater Riser Applications", In: Offshore Technology Conference, 16185, Houston, Texas, USA, 3-4 May.

GIBSON, R. F., 1994, *Principle of composite materials mechanics*, 1ed. New York, McGraw Hill.

GORDON, J. E., 1976 The new science of strong materials, 2ed. England, UK: Penguim.

GEORGE E. TOTTEN, D. SCOTT M., 2003, "Handbook of Aluminum", In: Physical Metallurgy and Processes, New York Basel.

GREENWOOD, J. H., "German Work on GRP Design", Composites, v. 8, n. 9, pp. 175–184, 1977.

HARTE A.M., MCNAMARA J.F., RODDY I.D., "Evaluation of optimization techniques in the design of composite pipelines", In: Journal of Materials Processing Technology. 118 (2001) 478–484.

HUNTSMAN, 2003, "Hot curing epoxy system based on Araldite® LY 556\* / Aradur 917\* / Accelerator DY 070\*", In: Matrix Systems for Industrial Composites, São Paulo-Brasil.

JOHNSON, D. B., BALDWIN, D. D., HIM LO, K., 2002, "Composite Production Riser Development and Qualification Test Result", In: Composite Materials for Offshore Operations – 3, S. S. Wang, J. G. Williams and K. H. Lo, eds. University of Houston – CEAC, 2001, pp. 109-123.

JOHN C. COX "Em busca da conexão ideal" In: Metrologia e Instrumentação, EUA, disponível em: <u>http://www.banasmetrologia.com.br/textos.asp?codigo=886&secao=revista</u> Acesso em: 20 jun. 2009, 19:20:05

KAYNAK, C., ERDILLER, E. S., PARNAS, L., SENEL, FIKRET, 2005, "Use of Splitdisk Test for the Process Parameters of Filament Wound Epoxy Composite Tubes", In: Polymer Testing, vol. 24, pp. 648 - 655.
KIM, W. K., 2007, "Composite Production Riser Assessment", Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, pp.157.

LEE, H.; NEVILE, K., 1968 Handbook of epoxy resins. New York, McGraw Hill.

LIDE, D. R., 1990 "CRC Handbook of Chemistry and Physics 70th Edn". by Boca Raton CRC Press FL.

MACAÉ OFFSHORE, Vetco Gray e Petrobras com juntas de riser de material compósito. Disponível em: <u>http://www.macaeoffshore.com.br</u>. Acesso em: 15 jun. 2009, 10:30:00.

MARGOLIS, J.M. *Advanced Thermoset Composites*. EUA, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985. 282p.

MAZUMDAR, SANJAY K., 2002, "Composites manufacturing", In: materials, product, and process engineering by CRC Press LLC

MENICONI, L. C. M., REID, S. R., SODEN, P. D., 2001, "Preliminary Design of Composite Riser Stress, joints", In: Composites Part. A, vol.32, pp. 597-605.

OBERG, E., JONES, F. D., HORTON, H. L., RYFFEL H. H., 2004, *Machinery's Handbook*. 27<sup>th</sup> ed. New York, Industrial Press Inc.

OWENS CORNING, "*Uma Nova Era em Fibras de Vidro*" 2010. Disponível em: <u>http://www.owenscorning.com.br/nivel.asp</u> Acesso em: 20 abril 2009, 14:50:00.

PARDINI, L. C.; FLAMÍNIO, L. N., 2006 Compósitos Estruturais. 1 ed. São Paulo, Edgard Blücher.

PETERS. S.T., HUMPREY, W.D., FORAL, R.F., 1991, *Filament Winding Composite Structure Fabrication*. 2 ed. Covina, Ed. Sampe, 230p.

PORTAL NAVAL, *Foto de plataforma fixa-Jaqueta*. Disponível em: http://www.portalnaval.com.br/glossario\_interna.asp?categoria=29&subCategoria=235 &letra=f Acesso em: 20 mai. 2009, 20:00:20.

POTTISH, N., "*A Filament Winder Buyer*'s *Guide*". In: *Composite World*, agosto 2005. Disponível em: <u>http://www.compositesworld.com/ct/issues/2005/August/947/2</u> Acesso em: 20 nov. 2007.

REVISTA DO PLÁSTICO REFORÇADO, n.16, p. 12, 17, 40-50, novembro/dezembro 2000

RIBEIRO, A. S., JESUS, A. M. P., FERNANDES, A. A., 2005 "*Comportamento* elastoplástico cíclico e à fadiga da liga de alumínio 6061-T6". In: Revista Iberoamericana de Engenharia Mecânica. Vol.11, n° 2, pp. 53-65

SHAW, S. J., 1993 "Additives and modifiers for epoxy resins". In: Chemistry and technology of epoxy resins. Kluwer Academic Publishers, Ellis, B. (Ed)., p. 117-142.

SILVEIRA, M. M., 2002 *Introdução ao apoio marítimo*, 1 ed. Rio de Janeiro Navsoft, p. 1-13.

SINDIPETRO, 2008 "*A Atividade Offshore no Brasil*". Disponível em: <u>http://www.clickmacae.com.br</u>. Acesso em: 20 out 2008, 16:20:00.

SOBRINHO, L. L., 2009, *Desenvolvimento de tubos compósitos visando aplicação como risers*. Dissertação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

SPENCER, B., HULL, D., "Effect of Winding Angle on the Failure of Filament Wound Pipe", Composites, v. 9, n. 1, pp. 263–271, 1978.

STORHAUG, T., STJERN, G., PAULSHUS, B., SALAMA M. M., 2001, "Significant Achievements in Composites Techonology in 2001. Qualification and Testing of Composites Tethers and Risers for Ultra Deep Water. Including Commenced Field Demonstration at Heidrun TLP", 13th Deep Offshore Technology Conference 2001, New Orleans, USA.

STUART, D.S., 1985, "Filament Winding – Materials and Engineering". In: Materials & Design, v.6, n. 3, p. 140-144.

SMITH, W. F., 1993, "Structure and Properties of Enginnering Alloys", 2nd ed.: *Capítulo 5: Aluminium Alloys.* New York: McGraw-Hill, Inc, s.d.

TARNOPOL'SKII, YU. M., KULAKOV, V. L., MUNGALOV, D. D., 1999, "Composites in Offshore Technology in the Next Century", Mechanics of Composite Materials, vol. 35, N° 5, pp. 365-372.

TEBECHERANI, C. T. P., "*Noções básicas sobre tubos*" 2003, 13p. Disponível em: <u>http://www.pipesystem.com.br/.</u> Acesso em: 10 mar 2009, 23:50:00.

TUBOLIT, "*Massa Epoxi Poliamida de dois componentes para aplicação subaquática*" 2006. Disponível em: <u>http://www.tubolit.com.br/documentos/mep301.pdf</u> Acesso em: 20 abril 2010, 14:38:00.

## Anexo

## a) Método numérico para determinação de colapso de anel de compósito das juntas<u>.</u>

O método numérico de elementos finitos foi utilizado para reproduzir os testes experimentais de colapso de anel do material compósito das juntas. Para tal o programa ABAQUS® versão 6.6 foi utilizado. Esta técnica fornece o seguinte gráfico da Figura 128 abaixo e a Tabela 29 com a tensão de colapso máxima.



Figura 128 – Curva de tração de anel de compósito (software Abaqus).

Tabela 29 – Va	alores máximos o	le colapso de ane	el de compósito	(software Abaqua	3).
----------------	------------------	-------------------	-----------------	------------------	-----

Angulação	Tensão máxima	Deslocamento máximo	
55°/88°	529,05 Mpa	3,85 mm	

Assim, comparado com os dados experimentais, vistos anteriormente, os resultados de simulação forneceram valores máximos de tesão máxima e deslocamento máximo superiores aos experimentais. Entretanto, a curva pressão versos deslocamento, simulada apresenta um formato semelhante àquela do ensaio experimental dos anéis ensaiados, ao longo do tempo.

## b) Composições químicas e aplicações típicas. (LIGAS DE ALUMINIO MAGNESIO E SILICIO)

A combinação de Mg (0,6 a 1,2%) e Si (0,4 a 1,3%) no Al forma a base para a série 6xxx das ligas trabalhadas e endurecidas por precipitação de Al-Mg-Si. Na maioria dos casos, o Mg e Si estão presentes nas ligas em quantidades combinadas para formar fases metaestáveis de compostos intermetálicos de Mg2Si, mas o excesso de Si maior que o requerido para Mg2Si pode também ser usado. Mn ou Cr são adicionados na maioria das ligas da série 6xxx para aumentar a resistência à tração e o controle do tamanho de grão. Cobre também aumenta a resistência à tração dessas ligas, mas se presente em quantidades acima de 0,5% reduz sua resistência à corrosão (SMITH, 1993). A Tabela 30 lista a composição química e aplicações de algumas das mais importantes ligas Al-Mg-Si trabalhadas.

Tabela 30 – Composição química e aplicações das ligas alumínio-magnésiosilício.

Liga	%Mg	%Si	%Mn	%Cr	%Cu	% outros	Anlicações
6003	12	0.7	, 01/111	/ • • • •	/ • • • •	,	Recobrimento de lâminas e chapas
6005	0.5	0.8					Estruturas marítimas.
6009	0.6	0.8	0.5		0.38		Corpos de lâminas metálicas.
6010	0.8	1	0.5		0.38		Corpos de lâminas metálicas.
6053	1,3	0,7		0,25	,		Arames para rebites.
6061	1	0,6			0,27		Estruturas de dutos onde a resistência
				0,2			a corrosão é necessária.
6063	0,7	0,4					Canos, móveis.
()((	1 1	1 2	0.8		0.0		Forjamento e extrusão para estruturas
0000	1,1	1,5	0,8		0,9		soldadas.
6070 0	0.8	1 /	0.7	0,7 0,3	03		Estruturas soldadas de dutos,
0070	0,0	1,4	0,7			tubulações.	
6101	0,6						Condutores de alta resistência.
6151	0.6						Moderada resistência de forjamentos
0151	0,0						para máquinas automotivas.
6162	0.9						Estruturas que necessitam moderada
0102	0,5						resistência.
6201	0,8	0,7					Condutores elétricos de alta tensão.
6253	12	07		0 25		2,0 Zn	Componentes de arames e barras
	-,-	•,,		•,=•			revestidas.
6262	<b>6262</b> 1 0,	0,6 0,09		0.09	0,27	0,55 Pb;	Produtos torneados (melhor
			- ,	- 2 /	0,55 B1	resistência a corrosão que 2021).	
(1(2)	0.7	0.4				Baixo	
6463	0,7	0,4				Fe (0,15	<b>A A A A</b>
						máx.)	Arquiteturas e extrusões.

A primeira liga de Al com constituintes de  $Mg_2Si$  balanceados foi a 6053, a qual foi desenvolvida na década de 30 e contêm 2%  $Mg_2Si$  e 0,25% Cr. Esta liga foi seguida pela 6061 a qual é também uma liga com conteúdo balanceado de 1,5% Mg2Si e 0,25% de Cr, e 0,27% de Cu. A liga 6061 é uma liga estrutural com resistência intermediária. Usada em grande parte hoje, é uma das mais importantes ligas de alumínio. As ligas de Al-Mg-Si de alta resistência tal como a 6066 e a 6070 com mais alto conteúdo de Si foram introduzidas em 1960.

Para facilitar a extrudabilidade de vários formatos, a liga 6066 com mais baixa resistência foi desenvolvida, a qual contém em torno de 1% de Mg<sub>2</sub>Si. Esta liga pode ser resfriada durante ou depois da operação de extrusão, evitando assim a expansão do tratamento de solubilização. As variações da liga 6063 tal como 6463 tem sido desenvolvidas para melhores características de acabamento no trabalho a quente. Na liga 6463 o nível de Fe é mantido tão baixo que o brilho do Al será melhorado após a anodização (SMITH, 1993).

As ligas de Al-Mg-Si têm excelente resistência à corrosão em toda a atmosfera natural e na maioria das artificiais. As resistências à corrosão dessas ligas são melhores nos materiais que são resfriados rapidamente e envelhecidos artificialmente.

## c) Preparação de superfícies externa da lida de alumínio para possível melhor adesão entre o metal e o material compósito.

Tratamentos superficiais específicos podem ser propostos para melhorar a adesão entre o material compósito e a liga de alumínio. As Figuras 129 e 130 mostram exemplos de formação de filetes em espiral na superfície externa do alumínio para futura aplicação do material compósito, onde a profundidade dos mesmos não são tão elevadas, para minimizar problemas estruturais que possam ser criadas no metal com este tratamento superficial. Desta forma, é possível associar estas formas de tratamentos com o granalhamento, já mencionado nesta dissertação, melhorando ainda mais adesão entre os materiais.



Figura 129 – Exemplo de formação de filetes em espiral na parte externa da liga de alumínio.



Figura 130 – Outro exemplo de formação de filetes em espiral cruzados na parte externa da liga de alumínio.