

Dissertação de Mestrado

**Tubulações de PRFV com adição de areia
quartzosa visando sua aplicação na indústria
do petróleo**

Gustavo de Araujo Barros

Natal, janeiro de 2007

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Tubulações de PRFV com adição de areia quartzosa
visando sua aplicação na indústria do petróleo

Gustavo de Araujo Barros

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Mecânica

sendo aprovada em sua forma final.

José Daniel Diniz Melo

Orientador

Banca Examinadora:

Rubens Maribondo do Nascimento

Membro da Banca Examinadora

Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior

Membro da Banca Examinadora

Flamínio Levy Neto

Membro externo da Banca Examinadora

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos Alberto e Maria Lúcia, que durante minha vida me deram todas as condições para que eu pudesse seguir aprendendo, que me mostraram o caminho da verdade e da ética, me ensinaram a importância do caráter e da moral e que me serviram de inspiração para ingressar na área tecnológica.

Agradecimentos

Aos meus pais Carlos Alberto Cortês Barros e Maria Lúcia de Araujo Barros, que sem eles nada disso seria realidade;

Ao Professor José Daniel Diniz Melo, pelo apoio, confiança e excelente orientação durante todo o trabalho;

Ao Professor Luis Pedro de Araújo pela grande confiança que me foi depositada e pelo apoio que foi decisivo para o desenvolvimento do trabalho.

Ao metrologista Walter Link, pelas muitas discussões técnicas e pela grande ajuda com as medições;

Ao Nupeg, ANP e ao Prh-14 e aos professores Afonso e Osvaldo, pela ajuda financeira e pelo pronto atendimento em todas as questões solicitadas;

A UFRN e ao PPGEM, por toda a infra-estrutura disponibilizada e pela oportunidade que me foi dada para fazer este mestrado;

A Karilany Dantas Coutinho, pela grande ajuda na preparação deste documento, pelo amor, carinho e muita paciência ao longo desta trajetória;

Ao Eng. Evans Paiva da Costa Ferreira, pelas muitas discussões técnicas e grande colaboração em todas as etapas do trabalho, e pela amizade;

A Tecniplas, por ter fabricado os tubos utilizados neste trabalho e por ter disponibilizado toda sua infra-estrutura, além da mão de obra para montagem e manuseio dos equipamentos pesados;

Ao CTGÁS, pela realização das análises com microscópio eletrônico e com o EDX;

Ao Professor Lúcio, que gentilmente cedeu as instalações da Oficina Mecânica, além de alguns materiais disponíveis;

Aos professores Rubens Maribondo do Nascimento, Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior e Flávio Levy Neto que gentilmente se disponibilizaram para compor a banca examinadora.

A todos os meus amigos e amigas, colegas de universidade, professores e funcionários que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Sumário

1. Introdução.....	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Definição dos Objetivos	15
1.3 Apresentação do Trabalho	16
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1 Materiais Compósitos	17
2.1.1 Processos de Fabricação de Compósito de Matriz Polimérica.....	19
2.1.2 Fatores de Influência nas Propriedades dos Compósitos Poliméricos	23
2.2 Tubulações em Plástico Reforçado com Fibras de Vidro.....	25
2.2.1 Parâmetros de Projeto.....	28
2.2.2 Tubulações em PRFV na Indústria do Petróleo.....	29
2.2.3 Utilização da Areia em Tubulações de PRFV	32
2.3 Aplicações de Areia com Matrizes Poliméricas – Concreto Polimérico.....	34
3. Procedimento Experimental	37
3.1 Materiais Utilizados.....	37
3.2 Fabricação dos Tubos	38
3.3 Preparação dos Corpos-de-Prova e Procedimentos de Ensaios.....	43
3.3.1 Ensaio de Tração Axial.....	44
3.3.2 Ensaio de Tração Circunferencial.....	46
3.3.3 Ensaio de Rigidez	48
3.3.4 Ensaio de Pressão Hidrostática.....	49
3.3.5 Análises Microscópicas e Química	54
4. Resultados e Discussões	55
4.1 Ensaio de Tração Axial.....	55
4.2 Ensaio de Tração Circunferencial.....	57
4.3 Ensaio de Rigidez	59
4.4 Ensaio de Pressão Hidrostática	61
4.4.1 Resultados com o Medidor da Variação do Perímetro	64
4.5 Análises Microscópicas e Químicas	67
4.5.1 Caracterização da Areia.....	67

4.5.2 Análise Microscópica do Laminado	70
4.6 Análise Comparativa de Custos.....	75
5. Conclusões.....	77
Sugestões de Trabalhos Futuros	79
Referências Bibliográficas.....	80
Apêndice 1	88
Apêndice 2.....	90
Apêndice 3.....	91

Lista de Figuras

Figura 1: Utilização de areia na fabricação de tubos em PRFV.....	14
Figura 2: Processo de filamento recíproco.....	21
Figura 3: Processo de filamento com mandril de avanço contínuo [3].....	22
Figura 4: Processo de fabricação por centrifugação (a) e (b) [3].....	22
Figura 5: Tubulações em plástico reforçado com fibras de vidro (300 mm).....	26
Figura 6: Sistema de reparo com injeção de resina [45].....	28
Figura 7: Areia utilizada como agregado nas tubulações de PRFV.....	33
Figura 8: Mandris utilizados para fabricação de tubos.....	39
Figura 9: Etapas da fabricação da barreira química (a, b, c, d).....	40
Figura 10: Processo de fabricação da estrutura do tubo.....	41
Figura 11: Tubos na mesa giratória de cura.....	42
Figura 12: Seção transversal da parede do tubo do tipo A, obtida por MEV.....	43
Figura 13: Dispositivo para preparação de corpos-de-prova em tiras.....	44
Figura 14: Preparação dos <i>tabs</i>	45
Figura 15: Ensaio de tração axial.....	45
Figura 16: Corpos-de-prova finalizados.....	45
Figura 17: Dispositivo para preparação de corpos-de-prova cilíndricos.....	46
Figura 18: Corpo-de-prova para ensaios de tração circunferencial.....	47
Figura 19: Dispositivo de ensaio <i>split disc</i>	48
Figura 20: Corpos-de-prova de rigidez.....	49
Figura 21: Ensaio de rigidez.....	49
Figura 22: Corpos-de-prova para ensaios hidrostáticos.....	50
Figura 23: Instalação dos <i>strain gauges</i>	51
Figura 24: Dispositivos utilizados nos ensaios de pressão hidrostática.....	52
Figura 25: Dispositivo de ensaios hidrostáticos.....	53
Figura 26: Medidor da variação do perímetro.....	53
Figura 27: Curvas típicas de força-deslocamento – tração axial.....	56
Figura 28: Trincas na estrutura da parede do tubo.....	57
Figura 29: Ruptura da barreira química antes do rompimento total do corpo-de-prova.....	58
Figura 30: Ruptura total do corpo-de-prova.....	58
Figura 31: Curvas características dos ensaios de rigidez.....	60

Figura 32: Curvas características dos ensaios de pressão hidrostática.....	62
Figura 33: Tubo A - Trinca na camada interna (a); local do vazamento (b).	63
Figura 34: Tubo C – Trinca na camada interna (a); local do vazamento (b).....	63
Figura 35: Característica da falha nos ensaios hidrostáticos.	64
Figura 36: Curvas dos três <i>strain gauges</i> da amostra N° 5 e do dispositivo de medição.....	66
Figura 37: Curvas de deformação obtidas com <i>strain gauges</i> e com o dispositivo de medição.....	66
Figura 38: Histograma da areia.	68
Figura 39: Morfologia da areia.....	69
Figura 40: Detalhes do grão de areia.....	69
Figura 41: Dano na fibra causado pelo contato com a areia (plano transversal).....	70
Figura 42: Tipo de contato mais comum entre as fibras e a areia, sem indícios de danos (plano transversal).....	71
Figura 43: Contato entre fibras e areia (plano longitudinal)	71
Figura 44: Laminado antes do carregamento (plano transversal).....	72
Figura 45: Laminado após o carregamento hidrostático (plano transversal).....	72
Figura 46: Laminado antes do carregamento (plano longitudinal).....	73
Figura 47: Laminado após o carregamento hidrostático (plano longitudinal).....	73
Figura 48: Descolamento na interface areia-matriz (plano longitudinal).....	74
Figura 49: Detalhe da trinca na interface areia-matriz (plano longitudinal).	74

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais aplicações de tubulações de PRFV	26
Tabela 2: Características dos tubos para gasodutos [57].....	31
Tabela 3: Materiais utilizados na fabricação dos tubos.....	38
Tabela 4: Especificações dos tubos estudados.	38
Tabela 5. Características dos laminados utilizados nos tubos.....	42
Tabela 6. Composição dos tubos.....	43
Tabela 7. Resultados dos ensaios de tração axial.....	55
Tabela 8. Resultados dos ensaios de tração circunferencial.....	57
Tabela 9. Resultados dos ensaios de rigidez.....	59
Tabela 10: Resultados dos ensaios de pressão hidrostática.....	61
Tabela 11: Resultados obtidos com o medidor de variação do perímetro.....	65
Tabela 12: Composição química da areia.....	67
Tabela 13: Granulometria da areia.....	67
Tabela 14: Contribuição percentual de cada componente no custo final dos tubos.....	75

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
E	Módulo de elasticidade do compósito (em flexão)
I	Momento de inércia da parede do tubo
PS	Rigidez do tubo
r	Raio do tubo, tomando como referência a linha de centro da parede
t	Espessura da parede do tubo
F_r	resultante de tensão (kN/m)
Q	Carga aplicada ao corpo-de-prova no momento da ruptura (kN)
b	Largura do corpo-de-prova
b_1, b_2	Larguras das seções reduzidas dos corpos-de-prova (m)
l	Comprimento do corpo-de-prova (m)
d_i	Diâmetro interno do tubo (m)
P	Pressão (kPa)
E_c	Módulo de elasticidade circunferencial (kN/m)
e	Deformação circunferencial do corpo-de-prova

Resumo

Cargas de adição são utilizadas com frequência, em materiais compósitos, para atingir propriedades mecânicas requeridas por normas e para redução de custos. As tubulações em plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV), utilizadas para aplicações com altas pressões, devem atender a requisitos mínimos de projeto estabelecidos em normas. Para tanto, a areia vem sendo utilizada como carga de adição, no sentido de manter os tubos em PRFV competitivos no mercado. A areia é adicionada para aumentar a espessura da parede, aumentando com isso a rigidez.

Este trabalho teve como principal objetivo analisar a influência da areia nas propriedades mecânicas de tubulações de PRFV, visando sua aplicação na indústria do petróleo e do gás, através de ensaios comparativos entre tubos com e sem a adição de areia. Os tubos foram fabricados com fibras de vidro tipo E na forma de fios contínuos e manta, resina poliéster ortoftálica e areia quartzosa. A fabricação foi realizada em duas etapas distintas, sendo a primeira camada do tubo denominada de barreira química (processo de laminação manual) e a segunda camada denominada estrutura (fabricada pelo processo de filamento contínuo). A areia é adicionada no tubo juntamente com as camadas de filamento contínuo e, portanto, é um constituinte da estrutura do tubo.

A análise comparativa foi conduzida através de ensaios de tração axial e circunferencial, pressão hidrostática e rigidez, além de análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foram avaliadas as forças resultantes de ruptura e o módulo de elasticidade circunferencial, além da rigidez. As análises com MEV foram conduzidas para verificar a presença de danos causados as fibras, durante o processo de fabricação, e para verificar as condições do laminado após os ensaios de pressão hidrostática.

Os resultados mostraram que a adição de areia causou uma redução na pressão de ruptura do tubo de 17 %. Porém esta perda foi compensada pelo grande acréscimo na rigidez que foi da ordem de 380 % . As análises no MEV mostraram que ocorrem danos durante o processo de fabricação, mas em quantidades muito pequenas. Na maioria dos casos o contato areia/fibras ocorre sem evidências de danos.

Em resumo, a areia representa uma redução de 27,8 % no custo final do tubo, que somado aos bons resultados obtidos nos ensaios mecânicos, faz deste material uma excelente opção de carga de adição para tubulações de PRFV utilizadas com altas pressões.

Palavras chaves: tubos de PRFV, compósitos, filamento contínuo, areia quartzosa.

Abstract

Fillers are often added in composites to enhance performance and/or to reduce cost. Fiberglass pipes must meet performance requirements and industrial sand is frequently added for the pipe to be cost competitive. The sand is added to increase pipe wall thickness, thus increase pipe stiffness.

The main goal of the present work is to conduct an experimental investigation between pipes fabricated with and without the addition of sand, to be used in the petroleum industry. Pipes were built using E-glass fibers, polyester resin and siliceous sand. The fabrication process used hand lay up and filament winding and was divided in two different parts: the liner and the structural wall. All tested pipes had the same liner, but different structural wall composition, which is the layer where siliceous sand may be added or not.

The comparative investigation was developed considering the results of longitudinal tensile tests, hoop tensile tests, hydrostatic pressure leak tests and parallel-plate loading stiffness tests. SEM was used to analyze if the sand caused any damage to the glass fibers, during the fabrication process, because of the fiber-sand contact. The procedure was also used to verify the composite conditions after the hydrostatic pressure leak test.

The results proved that the addition of siliceous sand reduced the leak pressure in about 17 %. In the other hand, this loss in pressure was compensated by a stiffness increment of more than 380 %. MEV analyses show that it is possible to find damage on the fiber-sand contact, but on a very small amount. On most cases, the contact occurs without damage evidences.

In summary, the addition of sand filler represented a 27.8 % of cost reduction, when compared to a pipe designed with glass fiber and resin only. This cost reduction combined to the good mechanical tests results make siliceous sand filler suitable for fiberglass pressure pipes.

Key-words: Fiberglass pipes, composites, filament winding, siliceous sand.

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais distintos combinados com a finalidade de fornecer propriedades mecânicas inatingíveis com cada material separadamente [1]. Os compósitos vêm a cada dia conquistando novos setores da indústria pelo fato de apresentarem propriedades como baixa densidade, alta resistência específica, alto módulo de elasticidade, alta resistência química, além de permitir a fabricação de peças com geometrias complexas [2]. Uma das formas mais utilizadas destes materiais é o PRFV (plástico reforçado com fibras de vidro), que é muito comum, por exemplo, em tubulações [3].

A utilização de materiais compósitos do tipo PRFV em tubos data do ano de 1948, sendo sua primeira aplicação na indústria do petróleo [3]. Os tubos em PRFV tornaram-se uma alternativa, frente aos materiais empregados na época, por apresentarem menor custo, maior durabilidade e maior resistência mecânica específica e à corrosão. Isso elimina a necessidade de revestimentos de proteção internos e externos, ou da utilização de proteção catódica. Estas tubulações oferecem grande flexibilidade de projeto com um amplo leque de diâmetros e acessórios padrões para atender às mais variadas aplicações do mercado. Tipicamente, as tubulações em PRFV estão disponíveis comercialmente em diâmetros que vão de 25 mm até 3600 mm e para pressões desde a atmosférica até alguns milhares de kPa [3].

As tubulações em PRFV projetadas para sistemas de transmissão de água, esgoto, resíduos industriais e gás devem atender a requisitos apontados pelas normas técnicas. Além das especificações dimensionais, as normas exigem valores mínimos para a tensão axial, tensão circunferencial, carga de viga, pressão de ruptura e rigidez [4-10]. Alguns destes requisitos são facilmente atingidos com tubos de parede fina, graças à versatilidade e eficiência do PRFV. No entanto, com relação à rigidez, a espessura da parede do tubo tem grande influência, porque seu momento de inércia é função esponencial desta dimensão. Desta forma, mesmo utilizando materiais com boas propriedades mecânicas, a rigidez especificada por norma é normalmente atendida adicionando-se material para aumentar a espessura da parede do tubo. Esta adição extra de material, para atender as exigências de

rigidez, torna a tubulação de PRFV muito cara quando se utiliza apenas fibras de vidro e resina. Além disso, para atender ao critério de rigidez, a adição de material torna os demais requisitos super-dimensionados. Para tanto, areia vem sendo utilizada como carga (Figura 1), por alguns fabricantes de tubulações, permitindo a concepção de projetos rentáveis e ecologicamente corretos, pois reduz o custo do produto e o consumo de matéria-prima industrializada.



Figura 1: Utilização de areia na fabricação de tubos em PRFV.

O conhecimento sobre a influência da adição de areia nas propriedades mecânicas do laminado é imprescindível, no sentido de conceber estruturas eficazes, além de confirmar a aplicabilidade deste material em tubulações. O presente trabalho tem como foco principal a realização de ensaios mecânicos comparativos entre corpos-de-prova com e sem adição de areia, no sentido de avaliar a contribuição da areia para cada tipo de carregamento estabelecido por norma. Para tanto, foram realizados ensaios mecânicos de tração axial e circunferencial, rigidez e pressão de ruptura em três tipos de tubos, permitindo uma análise não só das propriedades mecânicas, mas também da redução de custo com a utilização da areia. Foram realizadas, também, análises microscópicas nos materiais produzidos com o intuito de verificar a presença de danos causados às fibras, durante o processo de fabricação, pelo contato entre as fibras e a areia.

O gás natural é a fonte de energia que deverá apresentar a segunda maior taxa de expansão até 2020, cerca de 2,7% ao ano, superada apenas pelo petróleo. E juntos, gás natural e petróleo, serão responsáveis por 66% da energia primária que o mundo demandará em 2020 [11]. No Brasil, a produção e o consumo de gás natural devem aumentar em mais de 150% até 2011. A produção nacional chegará a 70 milhões m³/dia, contra os 27 milhões que são fornecidos aos consumidores hoje [11].

A Petrobras avança na prospecção dessa fonte de energia e em seu Plano de Negócios prevê, até 2011, um investimento de US\$ 6,5 bilhões para as obras de expansão da malha de gasodutos. Isto vai representar um acréscimo de 4.160 km aos 5.570 km de gasodutos de transporte que estão hoje em operação [12]. Este estudo mostra a importância de se investir em pesquisa sobre novos produtos para os sistemas de transmissão de gás natural, principalmente com grande resistência química e à corrosão, já que são previstos investimentos da ordem de US\$ 380 milhões no sistema de manutenção, para o mesmo período [12].

Este trabalho é parte de uma pesquisa científica que tem como principal objetivo validar a utilização de resinas poliéster e areia quartzosa para compor a estrutura de tubos para aplicações na indústria do petróleo e do gás. A utilização destes materiais pode resultar em uma importante economia, face ao seu baixo custo quando comparados com materiais mais nobres como as resinas epóxi e as fibras de vidro.

1.2 Definição dos Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da areia nas propriedades mecânicas das tubulações de PRFV, visando sua aplicação na indústria do petróleo.

Os objetivos específicos para que se alcance a meta principal são:

- Analisar a influência da areia nas propriedades mecânicas das tubulações de PRFV, através de ensaios mecânicos;
- Caracterizar microestruturalmente o laminado;
- Caracterizar uma determinada areia utilizada atualmente quanto à composição química, granulometria e morfologia;
- Realizar uma análise comparativa para verificar a contribuição da areia na redução de custos e de consumo de matérias-primas industrializadas.

1.3 Apresentação do Trabalho

O corpo do trabalho foi dividido em três partes principais, a revisão bibliográfica, o procedimento experimental e os resultados e discussões. Na primeira parte encontra-se uma revisão sobre materiais compósitos e tubulações em PRFV. No procedimento experimental estão descritos a fabricação dos tubos, a preparação dos corpos-de-prova e todos os ensaios realizados. Por fim, todos os resultados obtidos nos ensaios e as observações pertinentes aos mesmos podem ser vistos no item resultados e discussões.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os materiais compósitos de matrizes poliméricas e seus principais processos de fabricação. Será feita também uma abordagem sobre tubulações em plástico reforçado com fibras de vidro, com ênfase nos parâmetros de projeto, nas principais normas para fabricação e nas aplicações, com destaque para a indústria do petróleo. Por fim, será apresentada uma seção sobre concreto polimérico, uma vez que algumas camadas do tubo em estudo são compostas por este material.

2.1 Materiais Compósitos

Um dos setores da economia que tem crescido com maior velocidade em todo o mundo é o dos plásticos [13]. Inseridos nesse contexto, encontram-se os compósitos poliméricos, representando uma parcela muito importante desse segmento. Atualmente, o emprego dos compósitos poliméricos é tão extenso que estão catalogadas em todo o mundo mais de 40 mil possibilidades de aplicação desses materiais [13]. Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente nas áreas aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, e de artigos esportivos, entre outras, somente se tornaram viáveis após o advento dos compósitos estruturais [14]. Na indústria do petróleo e gás natural, algumas das utilizações incluem 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 [13].

Entre as principais vantagens desse tipo de material estão: baixa densidade (o que reduz os custos de montagem e facilita a instalação), resistência à corrosão, a pressões e temperaturas razoavelmente elevadas, ótimas propriedades mecânicas e durabilidade. A resistência à corrosão, por exemplo, é de fundamental importância para a indústria petrolífera, que vem enfrentando uma série de problemas de vazamentos em tubos, alguns decorrentes do desgaste de dutos metálicos. Além de apresentarem resistência química a uma variedade de fluidos (como água do mar, H₂S, CO₂ e hidrocarbonetos) que podem atacar os metais, os dutos compósitos podem apresentar custo inferior aos dutos de metais resistentes à corrosão

como ligas de Cu-Ni, aço inoxidável ou titânio [2]. Outra característica interessante é que dispositivos podem ser introduzidos na estrutura compósita para detecção de mudanças de pressão e vazamentos, o que permite um monitoramento remoto da sua integridade estrutural [15].

A característica básica dos compósitos poliméricos estruturais é combinar pelo menos duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Estes materiais são muito resistentes a vários tipos de corrosão, e se comparados às ligas metálicas estruturais são bem mais leves, com fatores superiores a até 4 vezes [14].

O compósito é um poderoso material para a engenharia, pois proporciona uma grande versatilidade de projeto. Através da combinação de materiais específicos e do controle das proporções dos mesmos, é possível manipular uma gama de aspectos do material, tais como: resistência estática e à fadiga, rigidez, resistência à corrosão e abrasão, temperatura de trabalho, dureza e ductilidade, aparência estética, custo e densidade [16].

Os primeiros compósitos eram reforçados com fibras naturais como madeira, tecidos, serragem, entre outros. Em 1940 passou-se a utilizar compósitos com matrizes poliméricas reforçadas com fibras de vidro, carbono e boro, que deram origem aos chamados compósitos avançados. Suas aplicações e desenvolvimento foram alavancados após a segunda grande guerra, onde passaram a ser largamente utilizados pelas indústrias aeroespacial, automobilística, naval e de eletro-eletrônicos [17].

Os compósitos avançados devem atender aos seguintes requisitos para serem considerados assim [18]:

- União de dois ou mais materiais fisicamente distintos e separáveis mecanicamente;
- Sua fabricação deve acontecer com o controle das proporções de cada um dos elementos envolvidos, no sentido de otimizar as propriedades desejadas;
- As propriedades obtidas com o material composto são superiores e únicas, quando comparadas às propriedades dos componentes em separado.

De uma forma geral, os constituintes dos compósitos estruturais têm funções distintas, sendo um deles responsável por suportar a carga (o reforço) e o outro responsável por transferir a carga externa para o reforço (a matriz). Os componentes estruturais podem ser fibrosos ou em formas de partículas como, por exemplo, as fibras de vidro e a areia, respectivamente. As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas ou termofixas. A interface reforço-matriz também desempenha um importante papel para os materiais compósitos, pois tem grande influência nas propriedades finais [19].

A escolha do tipo de reforço é muito importante, pois além de ter grande impacto nas propriedades finais do compósito, tem também grande importância no custo do produto final. Muitas vezes, é utilizado mais de um tipo de reforço com o objetivo de obter propriedades únicas e/ou reduzir custos, formando uma combinação híbrida [20].

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a fase dispersa, em [18]:

- Fibrosos: as fibras podem ser contínuas ou curtas com orientação definida ou aleatória;
- Particulado: partículas (esféricas, planas, elipsoidais, irregulares) dispersas na matriz;
- Híbridos: Mistura de dois ou mais componentes em forma de fibras ou partículas, ou os dois ao mesmo tempo.

2.1.1 Processos de Fabricação de Compósito de Matriz Polimérica

O desenvolvimento de compósitos está intimamente relacionado com o processo de fabricação. A maneira com que os diferentes componentes dos compósitos são combinados e as proporções utilizadas têm influência direta na peça final. O processo de fabricação a ser utilizado na produção de um compósito depende do que se deseja obter no produto final (propriedades, formato da peça, dimensões, acabamento) e a escala de produção necessária na fabricação. Os tipos de processos mais utilizados são [21]:

- **Laminação manual (*Hand Lay Up*)**: Esta é a técnica mais antiga e simples de manufatura de compósitos. Camadas de fibras de reforço (unidirecional, tecidos, mantas, véu e outros), são colocadas manualmente sobre a superfície de um molde. Resina é aplicada com pincel, espátula ou por spray. Camadas de reforço e resina são sucessivamente aplicadas, até formarem a espessura total desejada. O laminado geralmente cura à temperatura ambiente, embora calor possa ser aplicado para acelerar o processo.
Essa técnica permite apenas o trabalho em moldes abertos, isto é, somente uma das superfícies da peça terá contato com o molde. Essa superfície terá um acabamento superficial semelhante ao da superfície do molde.
- **Laminação à pistola (*Spray Up*)**: Este processo é uma variação da técnica de laminação manual. A diferença básica reside na etapa de deposição das camadas de

fibra e resina sobre o molde. O processo por spray é uma forma parcialmente automatizada da técnica manual.

Fibras picadas e resina são depositadas simultaneamente sobre o molde por meio de um jato contínuo produzido por um compressor de ar, através de uma pistola, num processo semelhante ao de pintura por pistola. Após a deposição, deve-se passar rolos para comprimir o material contra o molde, melhorando o aspecto da superfície, removendo excessos de resina e eliminando bolhas de ar.

- **Filamento (*Filament Winding*):** A técnica de filamento, também denominada *filament winding* ou enrolamento filamentar, é empregada na produção de sólidos de revolução, como cilindros e esferas, e atualmente encontra aplicações na produção de peças que vão desde tanques para armazenamento de produtos químicos até materiais esportivos. É bastante usada na produção de tubos, vasos de pressão, grandes tanques para a indústria química e eixos de transmissão de potência.

A máquina usada possui basicamente as mesmas características de um torno mecânico de usinagem. Um mandril, que faz as vezes do molde sobre o qual serão enroladas as fibras, é posicionado nos pontos rotativos da máquina. Fibras de diversos carretéis são bobinadas conforme o mandril gira. O posicionamento e o ângulo das fibras podem ser controlados, de acordo com os requisitos de projeto. As fibras são pré-impregnadas com resina e a fração de volume de fibras é controlada pelo seu tensionamento e outros fatores como a viscosidade da resina. Durante o processo de filamento, podem ser adicionadas cargas de adição e fibras picadas. Uma das principais vantagens deste método é a de produzir peças com alta fração de volume de fibras uniformemente distribuídas e de forma bastante rápida. Os principais métodos de filamento são o recíproco e o mandril de avanço contínuo [3].

No processo recíproco, as fibras contínuas são enroladas no mandril através de um carro com movimento alternado de ida e volta em relação às extremidades do mandril. O ângulo das fibras é determinado pelo sincronismo dos movimentos de translação (do carro) e de rotação (do mandril). O processo de filamento recíproco é ilustrado na Figura 2.

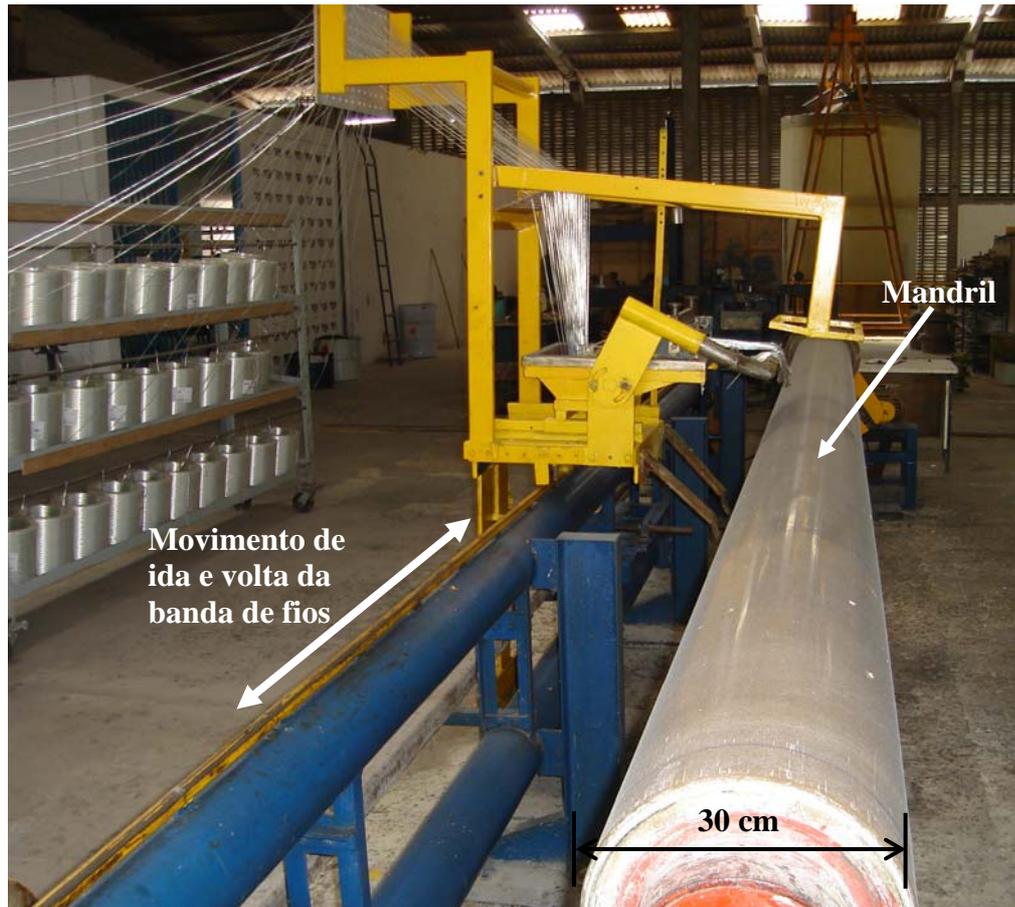


Figura 2: Processo de filamento recíproco.

O processo com mandril de avanço contínuo (Figura 3) é composto por uma fita de aço contínua, enrolada e sustentada por vigas, formando uma estrutura cilíndrica. O conjunto de vigas gira e por atrito arrasta a fita de aço. No entanto, existem mancais que permitem o avanço longitudinal da fita de forma que a estrutura cilíndrica, o mandril, possua um movimento contínuo em forma de espiral. No final da máquina, a fita é deslocada para o interior da estrutura e retorna (atravessando toda a máquina) para o início do processo, onde volta a compor a superfície externa da estrutura cilíndrica. As matérias-primas (fibras contínuas, fibras picadas, resina, areia e outras cargas de adição) são alimentadas pela parte superior. Filmes desmoldantes e véu de superfície são aplicados através de rolos adjacentes ao mandril. Após a cura, uma serra sincronizada com o avanço longitudinal do mandril, corta o tubo no tamanho predeterminado.

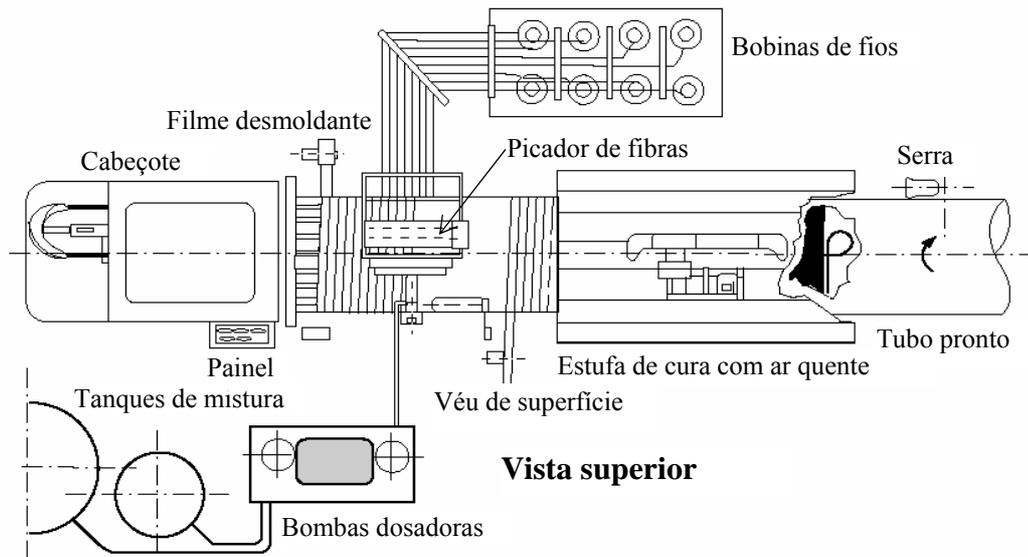


Figura 3: Processo de filamento com mandril de avanço contínuo [3].

- **Centrifugação:** Este processo é utilizado na produção de peças de revolução e pode ser entendido como sendo o oposto do processo de filamento. Neste caso o mandril é preparado para ser moldado por dentro. Resina, fibras picadas e demais componentes são introduzidos por um tubo no interior do mandril por um dos pólos do conjunto, como ilustrado na Figura 4 (a, b). A força centrífuga força os componentes contra a parede durante o processo de cura. A cura pode ser acelerada através da circulação de ar quente pelo interior do mandril.

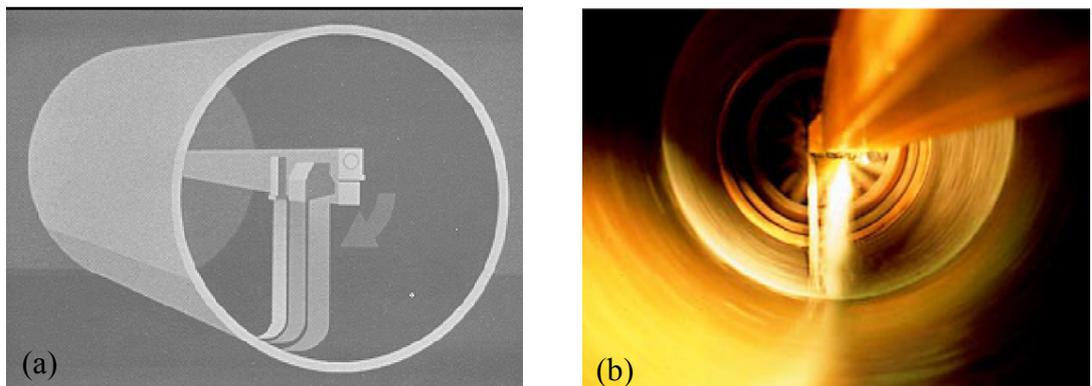


Figura 4: Processo de fabricação por centrifugação (a) e (b) [3].

- **Moldagem por compressão:** Este processo utiliza os chamados pré-impregnados (prepregs). Neste produto as fibras já são fornecidas impregnadas com resina pelo fabricante. A resina já se encontra parcialmente curada e o material é colocado em moldes aquecidos e pressionados por contra-moldes, atingindo a forma desejada.
- **Injeção:** Neste processo as fibras pré-formadas são inseridas em um molde fechado. Em seguida a resina é bombeada para o interior do molde impregnando toda a cavidade interna. Os processos por injeção mais comuns são o RTM (*Resin Transfer Molding*), o RIM (*Resin Injection Molding*) e o R-RIM (*Reinforced RIM*).
- **Pultrusão:** É um processo automático de geração de perfis contínuos de seção uniforme. As fibras são tracionadas através de um molde com o desenho da seção transversal do perfil a ser fabricado. A peça já sai do molde curada e é cortada no comprimento desejado.

2.1.2 Fatores de Influência nas Propriedades dos Compósitos Poliméricos

Um laminado típico é constituído de várias camadas, freqüentemente idênticas, variando as orientações do reforço para melhor atender aos requisitos de projeto ou de fabricação. As propriedades macroscópicas do laminado, como resistência mecânica e comportamento elástico, dependem, portanto, das propriedades das lâminas individuais que o compõem, além da ordem e orientação das mesmas [1].

Em geral são vários os fatores que influenciam o comportamento mecânico dos compósitos. Desde o processo de fabricação utilizado [22, 23], a forma com que os carregamentos são aplicados [24, 25], o mecanismo de dano desenvolvido [26, 27], a presença de condições adversas de umidade e temperatura, as respectivas frações de volume e as propriedades da interface, presença de vazios, além das propriedades dos elementos constituintes [28, 29].

A umidade é um fator que pode ter grande influência no desempenho dos compósitos. Isso porque a absorção de água pode reduzir de forma significativa as propriedades mecânicas do material, como a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade [30]. Em compósitos usados, por exemplo, em embalagens, construção civil e em tratamento de água residual, a absorção de água é um fator bastante importante, pois pode alterar as propriedades físicas e mecânicas desses materiais, afetando a estrutura da matriz e da interface fibra-matriz. Perda

de estabilidade dimensional e mudanças nas propriedades mecânicas e elétricas são exemplos do que ocorre em consequência da absorção de água [31].

Um outro fator de grande impacto nas propriedades é a configuração do compósito, ou seja, a forma com que as fibras e matriz estão arrançadas. Leva-se em consideração a orientação e o comprimento das fibras, além da quantidade de camadas do laminado. Estes fatores influenciam a distribuição das tensões quando o compósito é submetido a carregamentos externos [32, 33].

Ao ser utilizado, o compósito, como qualquer outro material, é submetido a carregamentos que podem dar origem a diferentes mecanismos de fratura ou dano. O dano é um prejuízo ocorrido nas propriedades mecânicas do material durante o carregamento [34]. Os principais tipos de danos encontrados nesses materiais são [24]:

- Fissuração na matriz: presença de fissuras na matriz do compósito;
- Ruptura de fibras: ocorrência de fratura longitudinal ou transversal na fibra;
- Desaderência fibra-matriz: quando ocorre um descolamento da interface fibra-matriz;
- Delaminação: desaderência entre as camadas do compósito na forma de laminados;
- Microflambagem: deformação que ocorre nas fibras do material quando o mesmo está submetido a esforços de compressão, causando pequenas desaderências na interface fibra-matriz.

Defeitos no processo de fabricação também causam efeitos danosos no material, como a presença de microvazios, ou bolhas, que afetam significativamente à resistência ao cisalhamento e à fadiga. Os microvazios podem agir como concentradores de tensões, reduzindo as propriedades mecânicas dos compósitos [35].

Com relação a tubulações de plástico reforçado com fibras de vidro existem muitas pesquisas já realizadas e em andamento sobre o assunto. Rosenow [36] utilizou a teoria clássica dos laminados para obter resultados de tensão e deformação de tubos fabricados pelo processo de filamento com ângulos de $\pm 15^\circ$ até $\pm 85^\circ$ e comparou seus resultados com testes experimentais. O ângulo de $\pm 55^\circ$ apresentou o melhor resultado para tubos filados com relação entre tensão circunferencial e axial de 2:1. Para o caso de pressão interna sem carga axial, o ângulo de filamento que apresentou melhor resultado foi o de $\pm 75^\circ$. XIA [37] apresentou uma forma simplificada da solução elástica para análise das tensões e deformações de tubos fabricados através do processo de filamento. Foi mostrado que as tensões e deformações dependem significativamente da seqüência de empilhamento das lâminas. A variação da distribuição de tensão, em relação à espessura da parede, depende da espessura

relativa da parede to tubo. Tubos com paredes grossas apresentam variação de distribuição de tensão não-linear e descontínua. Já nos tubos de parede fina, o comportamento é linear e contínuo. Em outro trabalho [38] os autores desenvolveram o mesmo estudo, só que para a análise das tensões e deformações térmicas.

Perreux [39] pesquisou o comportamento de tubulações sob cargas estáticas e dinâmicas. No carregamento estático, foram verificados danos e fenômenos plásticos dependentes da intensidade da carga e da seqüência de empilhamento das lâminas. No carregamento dinâmico foram mostrados os fatores de influência na vida do tubo (números de ciclos) e na cinética do dano. Chekalkin [40] investigou tubos de plástico reforçado com fibras de vidro novos e após cinco anos de serviço submetidos a temperaturas de 20°C e 70°C. Foram utilizadas técnicas de microscopia ótica e ensaios mecânicos de flexão em três pontos. As propriedades mecânicas foram analisadas antes e depois do tempo de serviço, para estimar a vida útil residual das tubulações. Foi verificado que na temperatura mais elevada houve uma redução da vida útil residual, bem como do fator de segurança de capacidade de carga. Farshad [41] desenvolveu um novo método para extrapolar a curva obtida nos ensaios de pressão hidrostática de longa duração. Para este método foi utilizada a teoria de tubos de parede grossa. Natsuki [42] desenvolveu um modelo teórico para determinar a tensão e o tipo de dano em tubos submetidos à carga de viga (ensaio de flexão em quatro pontos). Foi verificado que o ângulo de filamento tem grande influência nesta propriedade.

2.2 Tubulações em Plástico Reforçado com Fibras de Vidro

A utilização de tubos em PRFV data do ano de 1948, sendo sua primeira aplicação na indústria do petróleo. Os tubos em PRFV foram selecionados por apresentarem menor custo e maior resistência à corrosão que os materiais empregados na época [3].

No final dos anos cinquenta, grandes diâmetros tornaram-se disponíveis e os tubos em PRFV passaram a ser absorvidos também pelo mercado da indústria química. Na década de 60, os tubos em PRFV passaram a ser utilizados no mercado de água e esgoto [3]. A partir do começo dos anos setenta, as tubulações já haviam conquistado outros mercados, como o dos sistemas de dessalinização, onde a resistência à corrosão é um dos principais requisitos de projeto [43].

O desempenho das tubulações em PRFV é reconhecido por reunir qualidades como durabilidade, resistência mecânica e à corrosão. Isso elimina a necessidade de camadas de proteção e/ou proteção catódica, comuns em tubulações metálicas. As tubulações em PRFV

oferecem grande versatilidade de projeto com um amplo leque de diâmetros, conexões e acessórios disponíveis. Com isso, os fabricantes têm totais condições de atender as mais variadas exigências do mercado. Atualmente, estão disponíveis diâmetros que variam de 25 mm até 3600 mm para trabalhar com pressões desde a atmosférica até alguns milhares de kPa [3]. De acordo com a seleção da resina (poliéster, estervilílica, epóxi ou outras), as tubulações podem trabalhar em diferentes faixas de temperatura e com os mais variados ambientes agressivos.

As tubulações em plástico reforçado com fibras de vidro, Figura 5, estão presentes nos mais variados segmentos da indústria. A Tabela 1 apresenta algumas das principais aplicações [3] destas tubulações.



Figura 5: Tubulações em plástico reforçado com fibras de vidro (300 mm).

Tabela 1: Principais aplicações de tubulações de PRFV

Aplicações de tubulações de PRFV	
Processos químicos	Água potável
Dessalinização	Sistemas de refrigeração
<i>Down-hole tubing e casing</i>	Esgotamento sanitário
Dutos de ventilação	Transporte de água do mar
Efluentes e resíduos industriais	Saneamento
Irrigação	Águas pluviais
Campos de petróleo	Adutoras
<i>Topside piping</i>	

Existem diferentes processos para fabricação de tubos, sendo o filamento contínuo e a centrifugação os principais deles. As tubulações em PRFV podem ser projetadas para instalações aéreas, subaquáticas e enterradas até 16 m de profundidade [43].

As principais normas [4-10] definem como tubos de PRFV os produtos tubulares que contêm fibras de vidro como reforço, impregnadas por resina termofixa curada. A estrutura em compósito pode também conter agregado (areia, por exemplo), cargas em forma de grãos ou escamas, agentes tixotrópicos, além de pigmentos e corantes. Revestimentos externos e selantes (*liners*) de resinas termoplásticas ou termofixas podem ser incluídos. As normas também diferenciam os tubos de plástico reforçado com fibras de vidro de acordo com a utilização ou não de agregado em sua estrutura. Quando utilizado, os tubos são chamados de *Reinforced Plastic-Mortar Pipe* (RPMP). Quando não é utilizado agregado, os tubos são chamados *Reinforced Thermosetting-Resin Pipe* (RTRP). Até o momento, apenas a areia - de acordo com as especificações da norma ASTM C33 [44] - é reconhecida pelas normas como agregado. No apêndice 1 são apresentadas as principais normas relacionadas a tubulações em PRFV.

Existem vários estudos realizados e em andamento sobre tubos de PRFV, como pode ser visto no item 2.1.2. As pesquisas sobre tubulações em compósitos já avançam também no campo da manutenção. Lee [45] apresentou um método para reparos de tubulações enterradas utilizando o processo de moldagem por transferência de resina. O reparo é realizado por um equipamento que insere as fibras de vidro pré-moldadas no interior da tubulação (Figura 6 (a), (b) e (c)). Em seguida, a resina é injetada por uma máquina, como mostrado na Figura 6 (d). Após o término da injeção da resina, uma câmara de ar é pressurizada, pressionando as fibras contra a parede do tubo, Figura 6 (e).

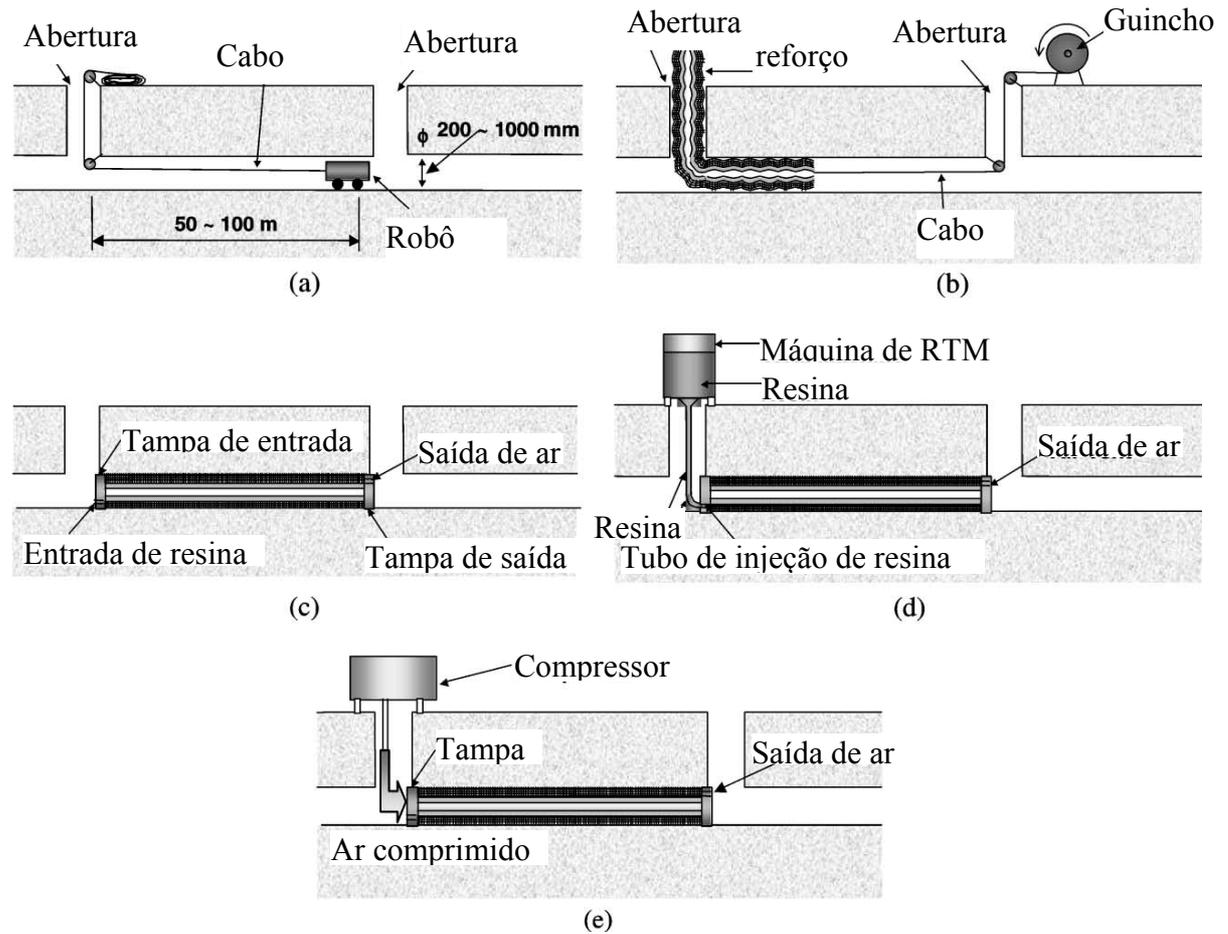


Figura 6: Sistema de reparo com injeção de resina [45].

2.2.1 Parâmetros de Projeto

Para a concepção de um tubo em PRFV faz-se necessário a determinação dos parâmetros de projeto. Deve-se conhecer bem as propriedades do laminado utilizado, os requerimentos de classe de pressão e rigidez, além das condições de instalação e funcionamento da tubulação.

Os principais aspectos que devem ser considerados na concepção de um tubo em PRFV são [43, 46]:

- Diâmetro nominal;
- Pressão e temperatura de trabalho;
- Sobre-pressão em manobras de abertura e fechamento de válvulas e da partida do bombeamento;
- Vácuo;
- Profundidade da vala e densidade do solo;

- Tipo de solo nativo;
- Posição do lençol freático;
- Fluido transportado.

As propriedades necessárias para o dimensionamento dos tubos são [43, 46]:

- Alongamento circunferencial de tração, extrapolado para 50 anos de trabalho. É obtido através do HDB (ensaios hidrostáticos de longa duração) executado de acordo com a norma ASTM D2992;
- Alongamento de flexão circunferencial, extrapolado para 50 anos de trabalho. É obtido através de ensaios de tensão de flexão de longa duração, de acordo com a norma ASTM D5365;
- Espessura nominal da parede reforçada e do *liner*;
- Módulo de tração circunferencial;
- Módulo de flexão circunferencial;
- Rigidez.

Existem várias formas de se dimensionar um tubo em PRFV. Carvalho [46] apresentou uma metodologia que leva em consideração as cargas internas e externas, além do HDB. Mendonça [1] apresentou uma metodologia, que leva em consideração as propriedades de cada lâmina que compõe a estrutura (teoria clássica de laminação). Xia [37] apresentou uma forma simplificada da solução elástica para análise das tensões e deformações de tubos fabricados através do processo de filamento. O manual AWWA M45 [3] apresenta um completo memorial de cálculo para tubulações aéreas e enterradas, além de abordar também outros assuntos importantes como instalação, processos de fabricação e dimensionamento hidráulico da linha. Este manual traz ainda informações sobre os vários materiais utilizados e algumas técnicas de reparos.

2.2.2 Tubulações em PRFV na Indústria do Petróleo

A indústria petrolífera é um dos grandes mercados para dutos de PRFV, que são utilizados, por exemplo, submersos em ambiente oceânico, para transporte de água sob pressão e nas plataformas de petróleo. A indústria petrolífera nacional importa uma grande quantidade de tubulações (o que representa milhões de dólares por ano), uma vez que muitos dos dutos nacionais não atendem (ou não são qualificados pelos órgãos responsáveis) às especificações necessárias para o uso em questão. Existe, assim, uma necessidade e uma importância muito grandes de se atuar nessa área [47].

A utilização de materiais compósitos em dutos e equipamentos para indústria do petróleo e gás natural tem sido uma alternativa aos materiais convencionais, levando a uma melhoria na segurança e confiabilidade, e redução de custos [48 – 50]. Mohitpour [15] apontou o crescente interesse no uso de dutos híbridos de metal e compósitos e citou a implantação desse material no sistema de transporte de gás TransCanada.

A maior parte das tubulações em PRFV utilizadas na indústria do petróleo é fabricada pelo processo de filamento. Southam [51] citou a utilização com sucesso de tubulações fabricadas através desse método em uma planta de tratamento de rejeitos em Adelaide, Sul da Austrália, operadas em condições corrosivas e sob pressão. Bannister [52] citou o potencial do processo de filamento para produção de componentes para a indústria de exploração em águas profundas. Em relação a essa última área, outros autores destacaram afirma que a exploração de depósitos de óleo e gás natural em profundidades superiores a 1.500 m, através de plataformas flutuantes ou semi-imersas, é impossível sem a utilização de materiais compósitos, especialmente em *risers* que podem ser fabricados pelo processo de filamento [48].

Uma das grandes áreas de utilização de tubulações em compósito na indústria petrolífera está nos *topside piping*, que são as tubulações utilizadas em águas produzidas, na condução de produtos perigosos, cinturões de incêndio, ou escoamento de efluentes da plataforma. Nos últimos dois anos, a *International Standards Organization* (ISO) introduziu duas novas normas internacionais para tubos em PRFV, para aplicações na indústria *offshore*. Uma delas é a ISO 14692 –*Petroleum and Natural Gas Industries – GRP Piping* e a outra é a ISO 15840 –*Thermosetting Resin Fiberglass Pipe and Fittings to be used for Marine Applications*. Um grande avanço em relação a normas anteriores foi a nova metodologia de projeto, que leva em consideração a tensão circunferencial, a tensão axial e a carga de viga [53].

No Brasil, já se fabrica tubos para *topside piping*, que estão sendo utilizados na plataforma P-40, em substituição a tubulações antigas, e em Mossoró / RN, onde estão sendo utilizados para transporte de água [54].

No que diz respeito aos sistemas de transmissão de gás natural com altas pressões, muitas questões ainda devem ser examinadas para que os tubos em PRFV se tornem uma opção realmente disponível para o mercado, principalmente em grandes diâmetros [55]. Dentre estas questões, está a seleção dos materiais a serem utilizados e que é um dos grandes fatores motivacionais deste trabalho. A expectativa para o cenário nacional é de um investimento de US\$ 6,5 bilhões para as obras de expansão da malha de gasodutos até 2011

[12], o que torna a escolha dos materiais utilizados um importantíssimo fator para redução de custos. Analisar a influência da areia nas propriedades mecânicas de tubulações em PRFV utilizando resina poliéster como matriz é, portanto, um importante passo neste sentido.

Para diâmetros de até 300 mm, a norma ASTM D 2517 [4], traz especificações para tubos em PRFV com resina epóxi, sem a utilização de agregado, para transporte de gás natural. Estas tubulações são muito caras em função do alto custo da resina e por não poderem utilizar agregados. No entanto, a nota-2 da referida norma [4] menciona que outras resinas e reforços podem ser incorporados, desde que sejam mostradas evidências de sua aplicabilidade para sistemas de transmissão de gás natural. Em geral, as resinas epóxi apresentam melhores propriedades mecânicas que as resinas poliéster [56]. No entanto, as resinas poliéster são em média cinco vezes mais baratas [45], o que permite a concepção de tubos com menor custo, mesmo utilizando uma quantidade de material um pouco maior.

Em termos de sollicitação mecânica, as tubulações em PRFV com resinas poliéster e areia podem suportar perfeitamente todos os carregamentos. Especificações para os tubos a serem utilizados na ampliação da malha de gasodutos da região Sudeste do Brasil são apresentadas na Tabela 2 [57]. Os níveis de pressão são bem compatíveis com as tubulações em PRFV. Um dos tubos utilizados neste trabalho, o tubo tipo B descrito no item 3.2 a seguir, tem sua pressão de ruptura estimada em mais de 100 kgf/cm^2 , e que poderia ser ainda maior, apenas com a adição de mais camadas de fio. A questão é quanto a afinidade química do poliéster com os produtos do petróleo, que pode ser contornada com a utilização de *liners* (camada interior do tubo que entra em contato com o fluido transportado) em resina epóxi ou outro material.

Tabela 2: Características dos tubos para gasodutos [57].

Características dos Dutos para Ampliação da Malha de Gasodutos no Sudeste			
	Diâmetro Nominal (polegada) / (mm)	Extensão (km)	Pressão Máxima (kgf/cm^2) / (Mpa)
Cabiunas / Reduc	16 / 400	183	100 / 9,8
Reduc / Esvol	18 / 450	95,2	65 / 6,4
Reduc / Regap	16 / 400	357	65 / 6,4
Esvol / Tevol	14 / 350	5,5	30 / 3,0
Esvol / Guararema	22 / 550	325	65 / 6,4
Guararema / Capuava	22 / 550	63	45 / 4,4
Cubatão / Capuava	12 / 300	37	35 / 3,4
Cubatão / Comgás	12 / 300	1,5	35 / 3,4

2.2.3 Utilização da Areia em Tubulações de PRFV

As tubulações em PRFV projetadas para sistemas de transmissão de água, esgoto, resíduos industriais e gás devem atender a requisitos mínimos apontados pelas normas técnicas. Além das especificações dimensionais, as normas exigem valores mínimos para a tensão axial, tensão circunferencial, carga de viga, pressão de ruptura e rigidez [4 – 10].

Em tubulações aéreas existe a carga de viga, pois o tubo tem que suportar o peso do fluido, além do seu peso próprio. Nesta situação a parede do tubo é solicitada axialmente, com esforços de tração e de compressão. No caso de tubulações enterradas, as cargas axiais surgem quando existe tendência de movimento relativo entre o tubo e o solo. Quando submetido à pressão interna, o tubo se deforma circunferencialmente (aumentando seu perímetro), e em função do coeficiente de Poisson (ν_{12}), seu comprimento também varia, tendendo a diminuir. No entanto, o solo que envolve a tubulação oferece resistência (por atrito) à contração longitudinal, resultando no aparecimento de tensões axiais.

As tensões circunferenciais são verificadas quando o tubo é submetido à pressão interna e podem ser avaliadas através de ensaios de tração em segmentos da parede do tubo, ou por ensaio de pressão hidrostática, com segmentos do tubo sendo tamponados e pressurizados. É a principal solicitação que o tubo sofre e depende da pressão interna e do diâmetro do tubo.

Os requisitos de tensão axial, tensão circunferencial e pressão de ruptura são facilmente atingidos com tubos de parede fina, graças à versatilidade e eficiência do PRFV. Com relação à rigidez, a espessura da parede do tubo tem grande influência, porque seu momento de inércia é função desta dimensão elevada a terceira potência, equação (1). Desta forma, mesmo utilizando materiais de boas propriedades mecânicas é necessário adicionar mais material para atingir a espessura mínima que forneça a rigidez especificada em projeto, equação (2) [58].

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (1)$$

$$PS = \frac{EI}{0,149r^3} \quad (2)$$

Onde,

I = Momento de inércia da parede do tubo;

t = Espessura da parede do tubo;

PS = Rigidez do tubo;

E = Módulo de elasticidade do compósito (em flexão);

r = Raio do tubo (medido no ponto médio da espessura da parede).

Esta adição extra de material, para atender a rigidez, torna a tubulação de PRFV muito cara quando se utiliza apenas fibras de vidro e resina. Além disso, para atender ao critério de rigidez, a adição de material tornaria os demais requisitos super-dimensionados. Para tanto, a areia vem sendo utilizada como agregado, permitindo a concepção de projetos mais eficazes e ecologicamente corretos, pois reduz o custo do produto e o consumo de matéria-prima industrializada (Figura 7).



Figura 7: Areia utilizada como agregado nas tubulações de PRFV.

A areia, quando de acordo com a norma ASTM C33, é contemplada pelas principais normas técnicas sobre tubulações em PRFV [3, 5-10, 44], sendo designada como agregado. É uma substância inerte, possui boa interface com matrizes poliméricas e é abundante na natureza, fator muito importante para a indústria. Com a redução de custo em função da utilização da areia, vários mercados, como o de saneamento, por exemplo, podem ter acesso a tubos fabricados com materiais mais nobres como o PRFV. A utilização destas tubulações

proporciona maior vida útil e menor custo de manutenção, além de oferecer economia no bombeamento devido ao baixo coeficiente de atrito em relação a outros materiais [43]. Além disso, os segmentos da indústria que já utilizam tubos em compósito poderão reduzir seus custos em futuros investimentos, caso a areia possa integrar a composição das tubulações.

Em um trabalho preliminar [59] a areia mostrou-se adequada para a aplicação em tubulações. Foi verificado, através de ensaios mecânicos, que a areia não traz prejuízos às propriedades do laminado, além de cumprir com eficiência a função de aumentar a rigidez do tubo.

2.3 Aplicações de Areia com Matrizes Poliméricas – Concreto Polimérico

Concreto e aço foram, há muito, considerados os mais importantes e comumente usados materiais estruturais. Entretanto, mais recentemente, o desenvolvimento de novos materiais de alto desempenho, como os compósitos, tornou-se vital para vários segmentos da indústria da construção. Cada vez mais cresce a demanda por materiais mais duráveis e resistentes que os materiais convencionais, como concreto, aço, madeira, couro e outros [60].

A utilização de concreto na construção civil é muito antiga, tendo sua primeira aplicação na história por volta de 1756. O engenheiro John Smeaton procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções. Coube, entretanto, a um pedreiro, Joseph Aspdin, em 1824, patentear a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra [61].

Posteriormente, o desenvolvimento de polímeros sintéticos revolucionou a forma como os materiais são produzidos e possibilitou a concepção de materiais mais baratos e flexíveis. A combinação de componentes orgânicos à temperatura ambiente tornou possível o desenvolvimento de materiais com base polimérica com um amplo leque de propriedades mecânicas [62]. Atualmente é possível desenvolver resinas controlando suas propriedades mecânicas e físicas, proporcionando a concepção do melhor material para uma determinada aplicação [63].

Concreto polimérico é um material compósito formado pela combinação de agregados minerais, como areia, e uma matriz polimérica, como resinas poliéster e epóxi. Sua composição final depende principalmente dos níveis de carregamentos e da necessidade de

resistência à corrosão em ambientes agressivos. Os concretos poliméricos vêm sendo utilizados como uma alternativa para o concreto comum em várias aplicações. Há mais de cinquenta anos estes materiais já são utilizados em trabalhos de acabamento, moldagem em campo, produtos pré-moldados, estradas, pontes, tubulações para água e painéis decorativos [63].

As pesquisas sobre concretos poliméricos avançam em diversas áreas, frente a sua crescente demanda de consumo. Ensaio com 15 anos de duração para analisar a absorção de água, a diferentes temperaturas, de concreto polimérico a base de resinas poliéster foram realizados [64]. O modelo de transferência de massa e calor que melhor descreveu os resultados dos ensaios foi o de Kerner. O trabalho propõe ainda um modelo para determinar o limite de absorção de água do compósito, levando em consideração a quantidade de vazios. Outros autores também estudaram a absorção de água em concreto polimérico a base de resina poliéster [65]. Foram realizados ensaios de 4 anos de duração com corpos-de-prova submersos e expostos a uma atmosfera com 98 % de umidade. Foi verificado que a absorção de água é significativamente menor quando comparado com cimentos tradicionais. No entanto, esta pequena absorção de água causa um grande impacto nas propriedades mecânicas do material. Foi verificada uma redução de 43 % na resistência à compressão com o corpo-de-prova úmido e houve uma perda irreversível de 16 %, na resistência, após a secagem do mesmo. O trabalho cita o chamado efeito Reh binder como principal causa para a perda de desempenho. A absorção de água ocorre na interface entre a resina e o reforço, ocasionando uma perda de aderência e a conseqüente perda nas propriedades mecânicas.

Muitas pesquisas também são conduzidas para avaliar a utilização de fibras como reforço em concreto polimérico. A influência das fibras de vidro adicionadas como reforço neste tipo de compósito, utilizando corpos-de-prova com fibras de 6 mm e 25 mm, com e sem tratamento superficial foi pesquisada [66]. Em todos os resultados, a adição de fibras apresentou melhoras nas propriedades mecânicas, ficando os melhores resultados com as fibras que receberam tratamento. Em outro trabalho [67] o comportamento da fratura em corpos-de-prova compostos por resina epóxi e areia foi estudado, com reforços de fibras picadas de carbono e vidro. De modo geral, foi verificado que a adição de fibras aumenta a resistência à flexão e as propriedades de fratura. A adição de fibras de carbono resultou em um acréscimo na tenacidade à fratura de 29 % e a adição de fibras de vidro promoveu um acréscimo de 13%. O mesmo autor pesquisou ainda [68] a influência das intempéries climáticas na degradação de concretos poliméricos com resina epóxi e reforços de fibras de

vidro e carbono. Foi verificado um decréscimo nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova em resina e areia e com adição de fibras de carbono. No entanto, os corpos-de-prova com adição de fibras de vidro mantiveram as propriedades mecânicas, apresentando degradação apenas estética.

O efeito das concentrações de agregados nos concretos poliméricos foi também pesquisado [69], utilizando técnicas estatísticas, no sentido de otimizar as proporções dos componentes. Foram analisadas seis diferentes gramaturas de areia com o objetivo de minimizar a presença de vazios. Um estudo comparativo entre concretos poliméricos fabricados com areia pura e areia servida (rejeito de fundições) foi realizado, no sentido de dar um destino útil e ecologicamente correto para este rejeito [70]. Foi verificado que a contaminação presente na areia servida contribui de forma discreta, mas positiva, na resistência à flexão e na tenacidade da fratura. Em um outro trabalho, a influência do tipo de resina e da adição de cinza volante nas propriedades do concreto polimérico foi considerada [71]. Foram testadas resinas poliéster ortoftálica e isoftálica com adição de cinza volante variando de 8% a 20%. Foi verificado que tanto o tipo de resina, quanto o percentual de cinza volante têm grande influência no módulo de elasticidade do compósito.

Em uma outra linha de pesquisa foram realizados ensaios para determinação do coeficiente de dilatação térmica de concretos poliméricos com resinas epóxi e poliéster [72]. A variação deste parâmetro com a temperatura, juntamente com a adição de fibras de vidro e carbono foi um dos principais focos do trabalho. Foi verificado um comportamento parabólico da variação do coeficiente de dilatação térmica em função da temperatura, onde todas as amostras apresentaram menor coeficiente a baixas temperaturas. A adição de fibras de vidro não causou impacto significativo nos resultados. Já as fibras de carbono contribuíram para a redução do coeficiente de dilatação térmica para temperaturas acima da ambiente.

A tubulação pesquisada neste trabalho é composta por várias camadas (lâminas) sobrepostas. As lâminas podem variar em espessura, composição, tipo e configuração do reforço, além da seqüência de empilhamento. O tubo estudado neste trabalho possui duas camadas compostas por resina e areia, ou seja, o tubo possui duas lâminas de concreto polimérico. Estas camadas têm como principal função aumentar a espessura da parede do tubo para proporcionar mais rigidez à tubulação (item 2.2.3). A seguir, no capítulo 3, são apresentados o processo de fabricação dos tubos e os procedimentos de ensaios.

3. Procedimento Experimental

Neste capítulo será abordado o processo de fabricação dos tubos e os materiais utilizados. Serão descritos também a forma como os corpos-de-prova foram preparados e os procedimentos utilizados em cada ensaio.

Para analisar a influência da areia nas propriedades mecânicas dos tubos em PRFV optou-se por fazer uma análise comparativa entre tubos fabricados com utilização de areia e tubos compostos apenas por resina e fibras. Em um dos tubos fabricados sem areia manteve-se a mesma quantidade e orientação das fibras de vidro, bem como os mesmos percentuais de resina de cada camada, em relação ao tubo fabricado com utilização de areia. Com estes tubos foi possível avaliar a contribuição da areia nas propriedades mecânicas das tubulações em PRFV. Um terceiro tubo, também sem areia, foi fabricado com a mesma rigidez do tubo com areia atendendo, portanto, aos requisitos de norma. Com isso foi possível avaliar a contribuição da areia na redução de custo, em função da redução do consumo de matéria prima industrializada (fibras de vidro e resina).

Os tubos foram fabricados segundo a Norma ANSI/AWWA C950 – 01, para classe de pressão de 1034 kPa e diâmetro nominal de 300 mm. O tubo com adição de areia foi projetado para a classe de rigidez de 248 kPa. A areia é adicionada com a intenção de que o tubo atinja a rigidez necessária de maneira eficiente e com baixo custo. Para o tubo fabricado apenas com materiais convencionais, como fibras de vidro e resina, e atendendo a classe de rigidez de 248 kPa, o custo é muito superior (como será mostrado neste trabalho), pois trata-se de matérias-primas caras.

3.1 Materiais Utilizados

Os tubos foram fabricados através dos processos de laminação manual e filamento contínuo. Foram utilizados mandris, fabricados também em plástico reforçado com fibras de vidro e usinados de forma a garantir as dimensões dentro das tolerâncias especificadas. O mandril é revestido inicialmente por uma camada de filme desmoldante (*terphane*). Os materiais utilizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Materiais utilizados na fabricação dos tubos.

<i>Materiais utilizados</i>
Resina poliéster ortoftálica da Ara ashland AZ 4.5, com 1 % de Mekp
Peróxido de metil etil cetona (Mekp)
Véu de poliéster termoplástico 30 g/m ²
Manta de fibras de vidro tipo E com 450 g/m ²
Fio contínuo de fibra de vidro tipo E 1100 tex
Areia quartzosa AG - 40/50 cont.

3.2 Fabricação dos Tubos

Os tubos estudados neste trabalho foram produzidos pela Tecniplas Nordeste Plásticos Reforçados Ltda. O dimensionamento dos tubos foi realizado pelo próprio corpo técnico do fornecedor, atendendo às solicitações apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 4: Especificações dos tubos estudados.

Tubo	Norma	Adição de areia	Classe de Rigidez	Pressão de Trabalho	Diâmetro Nominal
A	AWWA C 950	Sim	248 kPa	1034 kPa	300 mm
B	AWWA C 950	Não	248 kPa	1034 kPa	300 mm
C	AWWA C 950	Não	-----	1034 kPa	300 mm

O tubo A é um produto projetado para o transporte de água e é disponível comercialmente, sendo o principal objeto deste trabalho. O tubo B atende a todos os requisitos de norma e poderia ser comercializado, mas seu custo é bem mais elevado que o tubo A. O tubo C não é um produto aceito pelo mercado, pois não atende ao requisito de rigidez especificado em norma. Os três tubos foram definidos de forma a permitir a análise da influência da areia nas propriedades mecânicas de tubulações em PRFV, através da comparação dos resultados dos ensaios mecânicos realizados.

A tubulação foi fabricada através do processo de filamento contínuo, onde a matéria-prima é depositada em volta de um molde cilíndrico denominado mandril (Figura 8). Desta forma, o diâmetro interno do tubo é definido pelo diâmetro externo do mandril e o diâmetro

externo do tubo é definido pela quantidade de material utilizado. A fabricação é dividida em duas etapas, sendo a primeira a barreira química e a segunda a estrutura do tubo.



Figura 8: Mandris utilizados para fabricação de tubos.

A barreira química tem como função garantir a estanqueidade do tubo, pois é a camada interna que entra em contato com o fluido a ser transportado pelo tubo. Com o mandril girando e protegido pelo filme desmoldante é aplicada uma camada inicial de resina, Figura 9 (a). Em seguida, é aplicado o véu para garantir uma espessura mínima rica em resina, figura 9 (b). O próximo passo é a aplicação da manta de fibras de vidro que é o último componente da barreira química, Figura 9 (c). Por fim, é adicionada mais resina para concluir a impregnação, Figura 9 (d), e o laminado é compactado com rolos metálicos. Esta seqüência é feita sem aguardar a cura da resina de cada camada. No final do processo, após a compactação, o mandril é levado para uma mesa giratória, onde permanece até a cura da resina.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9: Etapas da fabricação da barreira química (a, b, c, d).

A segunda etapa do processo de fabricação do tubo, a parte estrutural, tem a função de suportar as cargas transmitidas ao tubo e é fabricada pelo processo de filamento contínuo. A estrutura é composta por várias camadas de fios de fibra-de-vidro contínuos e areia, ambas

impregnadas com resina (Figura 10). Toda a resina que compõe a estrutura, inclusive a resina que impregna a areia, é inserida através dos fios contínuos, que passam por uma bandeja de resina para serem impregnados. A quantidade de resina que vai para o tubo é definida por um raspador de borracha que remove o excesso de resina na saída da bandeja. O excesso de resina dos fios migra para a camada de areia, fazendo sua impregnação.

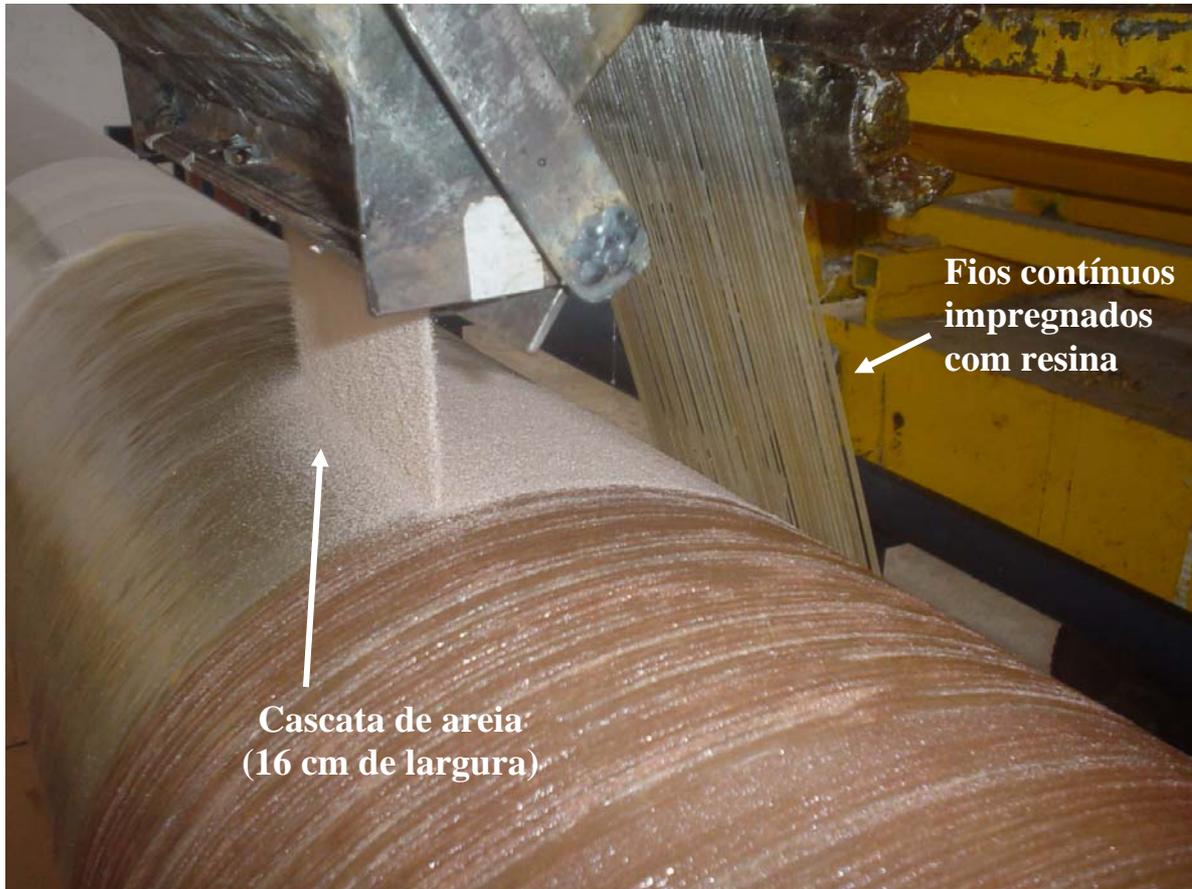


Figura 10: Processo de fabricação da estrutura do tubo.

Após a aplicação de todas as camadas necessárias, o tubo é levado para uma mesa giratória onde a cura da resina é concluída (Figura 11). A mesa giratória tem a finalidade de evitar que a resina ainda líquida escoe para a parte mais baixa do mandril. Quando a cura está completa o mandril é removido do interior do tubo através de um guincho. O tubo é então submetido aos processos de corte e usinagem para a fabricação dos corpos-de-prova.

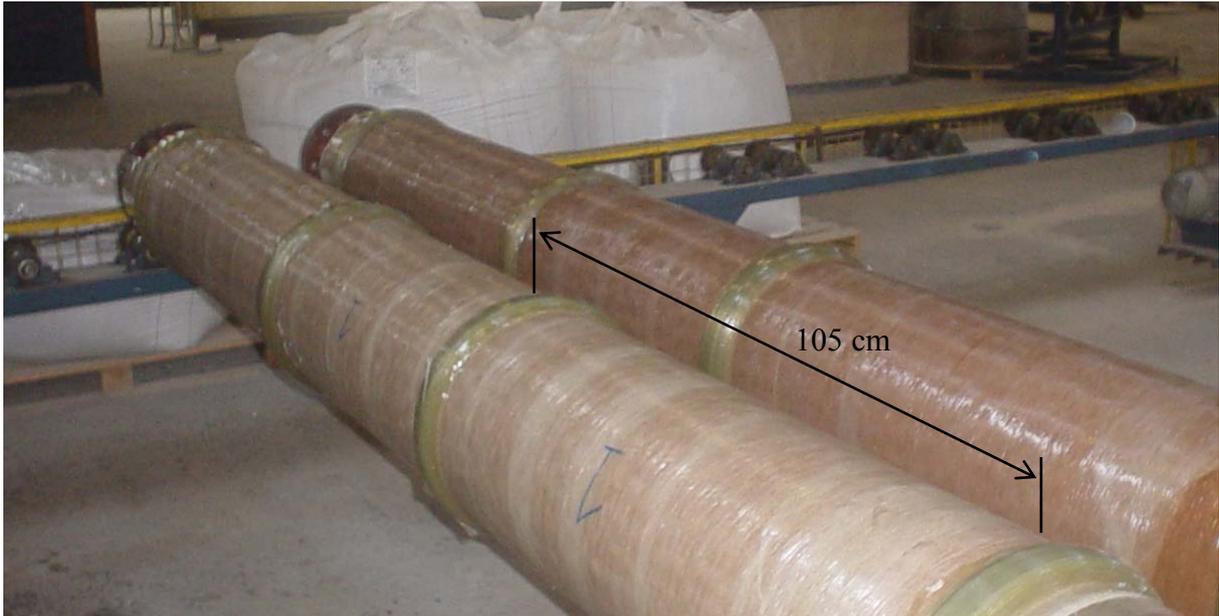


Figura 11: Tubos na mesa giratória de cura.

Foram fabricados três tubos distintos, designados por A, B e C. As barreiras químicas de todos os tubos foram fabricadas exatamente da mesma forma. A diferença entre os tubos está somente na configuração das camadas da estrutura, como mostrado na Tabela 4. A barreira química é composta de uma camada de véu de poliéster com gramatura de 30 g/m^2 e duas camadas de manta de fibras de vidro picadas tipo E, com gramatura de 450 g/m^2 . As camadas da estrutura são compostas por fios contínuos e paralelos, bobinados com um ângulo de $\pm 80^\circ$ com o eixo longitudinal do tubo. Cada lâmina de fios contínuos de fibras e resina tem densidade linear de 7 fios por polegada. No tubo com areia, as duas primeiras camadas de fios contínuos foram adicionadas juntamente com a areia, como mostrado na Figura 10. Nas demais camadas, o fluxo de areia foi cortado, continuando apenas com os fios impregnados com resina. Os tubos sem areia foram fabricados da mesma forma, porém com o fluxo de areia cortado durante todo o processo. A composição do laminado de cada tubo é apresentada na Tabela 5. A seção transversal do tubo A (com areia) é apresentada na Figura 12.

Tabela 5. Características dos laminados utilizados nos tubos.

Tubo	Laminação da barreira química (espessura: 2,5 mm)	Laminação da estrutura (quantidade e tipos de camadas)	Ângulo do filamento	Espessura mm Estrutura / Total
A	1 Véu + 2 Mantas 450 g/m^2	1 S / 1 P / 1 S / 4 P	$\pm 80^\circ$	3,6 / 5,7
B	1 Véu + 2 Mantas 450 g/m^2	13 P	$\pm 80^\circ$	2,3 / 4,4
C	1 Véu + 2 Mantas 450 g/m^2	5 P	$\pm 80^\circ$	1,4 / 3,5

S – Lâmina composta por resina poliéster ortoftálica e areia;

P – Lâmina composta por resina poliéster ortoftálica e fios contínuos paralelos;

As medições de espessura foram executadas seguindo recomendações da norma ASTM D3567.

Tabela 6. Composição dos tubos.

Tubo	Peso por metro de tubo	Peso por metro em kg % dos componentes em peso			
		Resina	Fibras picadas	Fibras contínuas	Areia
A	9,67 kg	4,4 kg 45,7 %	0,99 kg 10,3 %	1,54 kg 15,9 %	2,72kg 28,1 %
B	9,34 kg	4,36 kg 46,7 %	0,99 kg 10,7 %	3,97 kg 42,6 %	-
C	5,6 kg	3,14 kg 56,1 %	1,0 kg 17,9 %	1,46 26,0 %	-

O peso por metro de tubo foi obtido através da média da pesagem dos copos de prova utilizados nos ensaios de rigidez;

Os percentuais de cada componente foram obtidos através de ensaio de queima.

O véu utilizado na barreira química foi degradado junto com a resina no ensaio de queima, portanto seu peso está embutido no peso da resina.

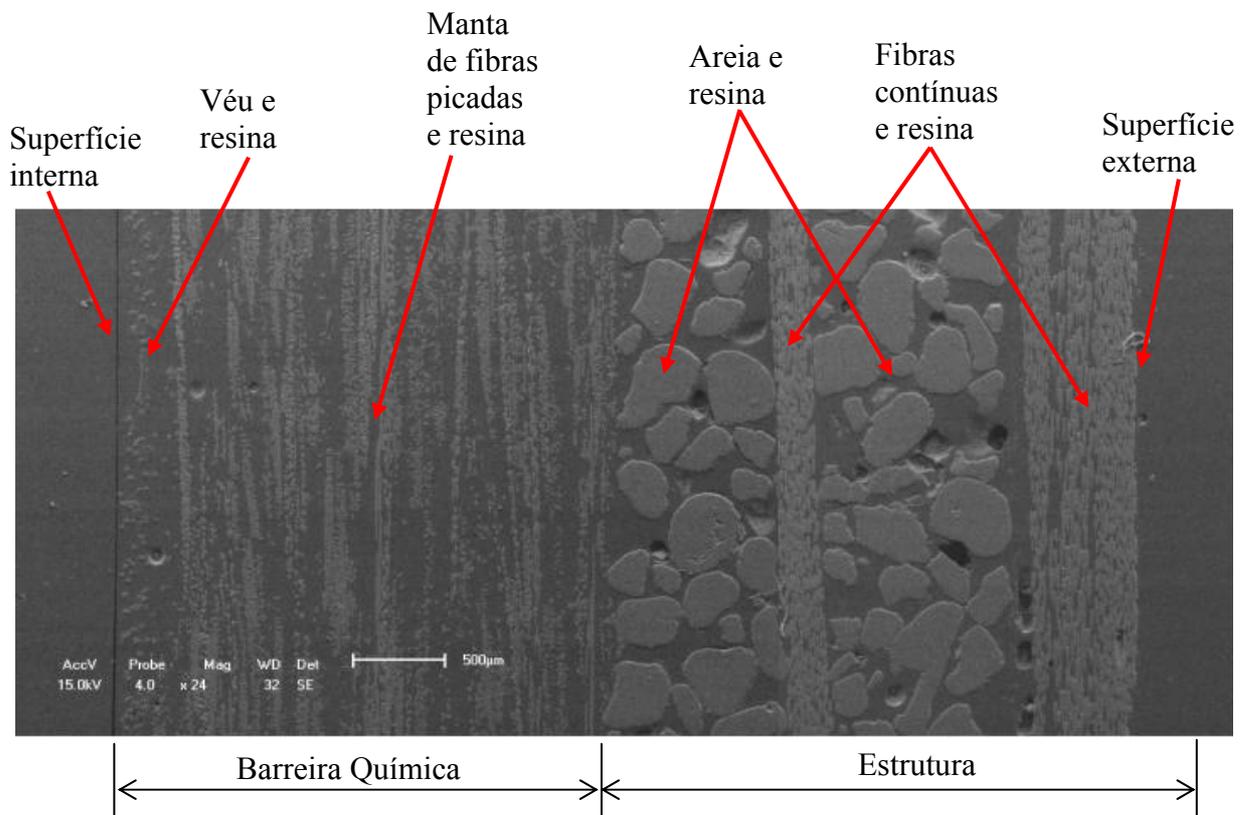


Figura 12: Seção transversal da parede do tubo do tipo A, obtida por MEV.

3.3 Preparação dos Corpos-de-Prova e Procedimentos de Ensaios

Os corpos-de-prova foram fabricados de forma a minimizar a ocorrência de danos durante os cortes e demais procedimentos. Todos os cortes foram realizados com discos de corte diamantados utilizando dispositivos desenvolvidos para cada operação. As dimensões dos corpos-de-prova e os testes realizados foram conduzidos seguindo recomendações de normas internacionais.

A seguir, estão detalhados os procedimentos de testes e de preparação dos respectivos corpos-de-prova.

3.3.1 Ensaio de Tração Axial

Os corpos-de-prova para os ensaios de tração axial foram fabricados seguindo recomendações da Norma ASTM D3039/D3039M. As amostras foram cortadas utilizando-se um dispositivo especialmente desenvolvido a partir de um torno mecânico. Tiras pré-cortadas dos tubos (na direção axial) foram posicionadas na bancada e fixadas, como ilustrado na Figura 13. O corte final foi realizado utilizando-se o mecanismo de avanço automático do torno, proporcionando um corte suave, com velocidade constante e controle dimensional satisfatório. Os corpos-de-prova têm dimensões nominais de 25 mm na largura e 300 mm no comprimento.

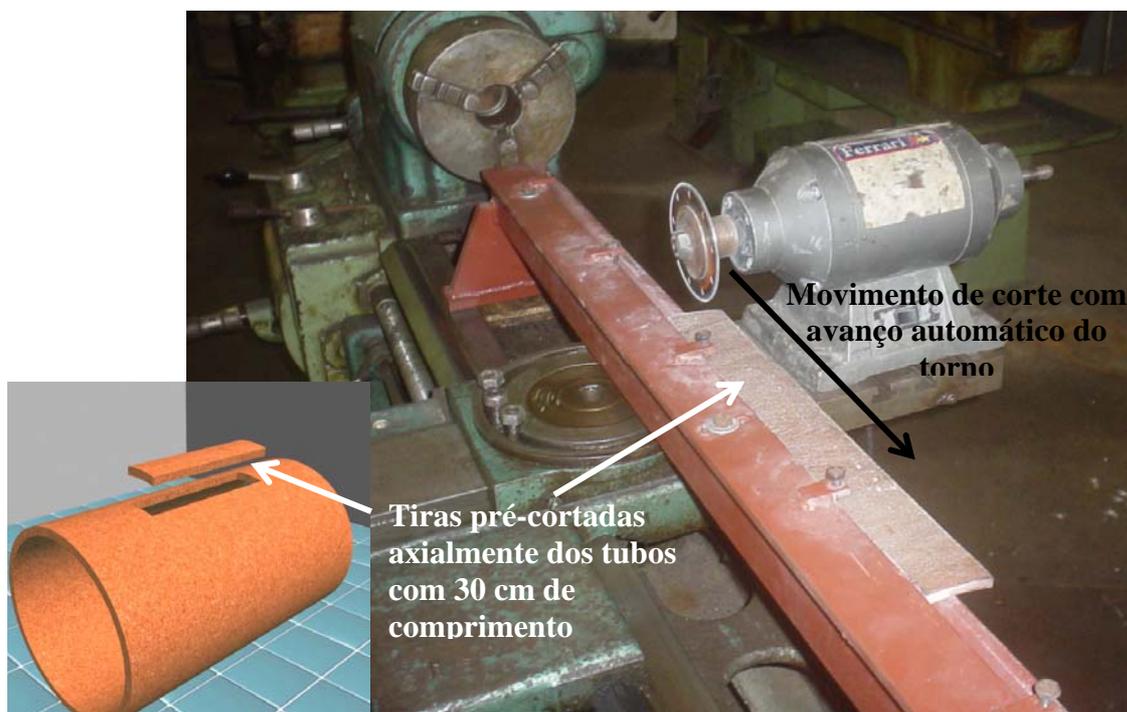


Figura 13: Dispositivo para preparação de corpos-de-prova em tiras.

Os corpos-de-prova, cortados dos tubos, possuem um raio de curvatura, o que ocasionaria tensões de flexão geradas pelas garras da máquina durante o ensaio. Para evitar este problema, foram confeccionados *tabs* com manta de fibras de vidro e resina, tornando plana a região de fixação. A colocação dos *tabs* é apresentada na Figura 14, onde os corpos-de-prova receberam a manta com resina e foram depois colocados sobre uma mesa plana para completar a cura. Blocos planos de madeira foram colocados sobre as amostras, funcionando

como um contra molde, resultando em uma seção transversal retangular nas zonas de fixação (Figura 15). Os corpos-de-prova finalizados são mostrados na Figura 16.

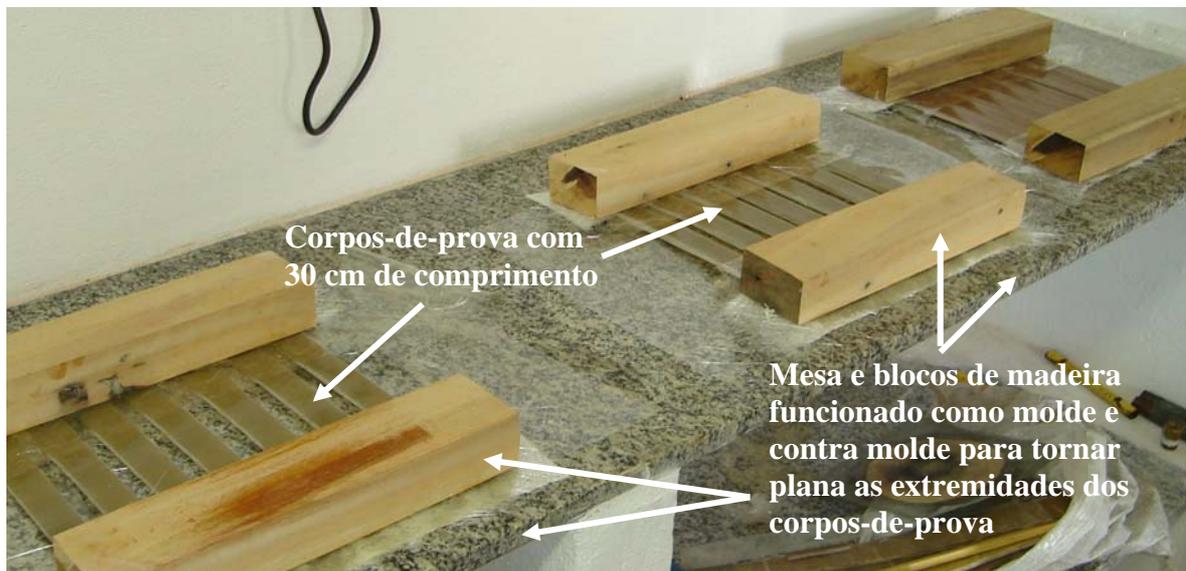


Figura 14: Preparação dos *tabs*



Figura 15: Ensaio de tração axial.

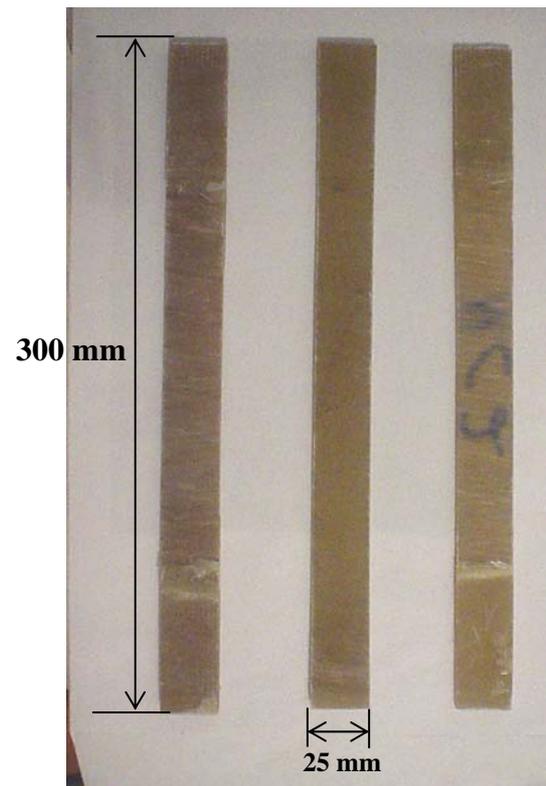


Figura 16: Corpos-de-prova finalizados.

Os ensaios foram conduzidos seguindo recomendações da Norma ASTM D3039/D3039M em uma máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph de 100 kN. A velocidade utilizada foi de 2 mm/min. Os dados de carga foram medidos pela própria célula

de carga da máquina e armazenados num computador. Para este ensaio foram avaliados apenas os valores de resultante de tensão de ruptura (equação 3). Foram fabricados cinco corpos-de-prova para cada tipo de tubo (A, B e C).

$$F_r = \frac{Q}{b} \quad (3)$$

Onde,

F_r = Resultante de tensão (kN/m);

Q = Carga aplicada ao corpo-de-prova no momento da ruptura (kN);

b = Largura do corpo-de-prova (m);

Foram fabricados também 5 corpos-de-prova compostos apenas pela barreira química do tubo. A barreira química é idêntica em todos os tubos, logo, conhecendo a capacidade de carga da mesma, é possível avaliar a contribuição desse componente do tubo para este tipo de carregamento. As amostras compostas pela barreira química também foram preparadas segundo recomendações da Norma ASTM D3039/D3039M, com dimensões nominais de 25 mm na largura e 300 mm no comprimento, sendo a sua espessura de 2,1 mm.

3.3.2 Ensaio de Tração Circunferencial

Os corpos-de-prova para os ensaios de tração circunferencial foram preparados utilizando-se o dispositivo apresentado na Figura 17. O segmento de tubo é colocado no tambor de fixação, onde são cortados anéis com 50 mm de largura. Em seguida os anéis receberam reduções na seção transversal, defasadas de 180°, como mostrado na Figura 18. As reduções foram realizadas com uma broca de 6,35 mm de diâmetro, resultando em uma seção transversal com 25 mm de largura.



Figura 17: Dispositivo para preparação de corpos-de-prova cilíndricos.

Os ensaios foram realizados com um dispositivo denominado *split disc*, ilustrado na Figura 19. Este dispositivo foi acoplado a uma máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph de 100 kN. Os ensaios foram realizados seguindo recomendações da Norma ASTM D 2290, salvo as dimensões dos corpos de prova que foram aumentadas em quatro vezes, com exceção do diâmetro do furo para redução da seção transversal, que foi mantido o mesmo valor de 6,35 mm, estabelecido pela norma. Os ensaios foram realizados com velocidade controlada de 2,5 mm/min. Foram fabricados cinco corpos-de-prova para cada tipo de tubo (A, B e C).



Figura 18: Corpo-de-prova para ensaios de tração circunferencial.

A análise destes corpos-de-prova também foi realizada com os resultados de resultante de tensão na ruptura. Esta força é calculada dividindo-se a carga de ruptura pela soma das larguras das seções reduzidas (figura 18), como pode ser visto na equação 4.

$$F_r = \frac{Q}{b_1 + b_2} \quad (4)$$

Onde,

F_r = Resultante de tensão (kN/m);

Q = Carga aplicada ao corpo-de-prova no momento da ruptura (kN);

b_1 e b_2 = Larguras das seções reduzidas dos corpos-de-prova (m);

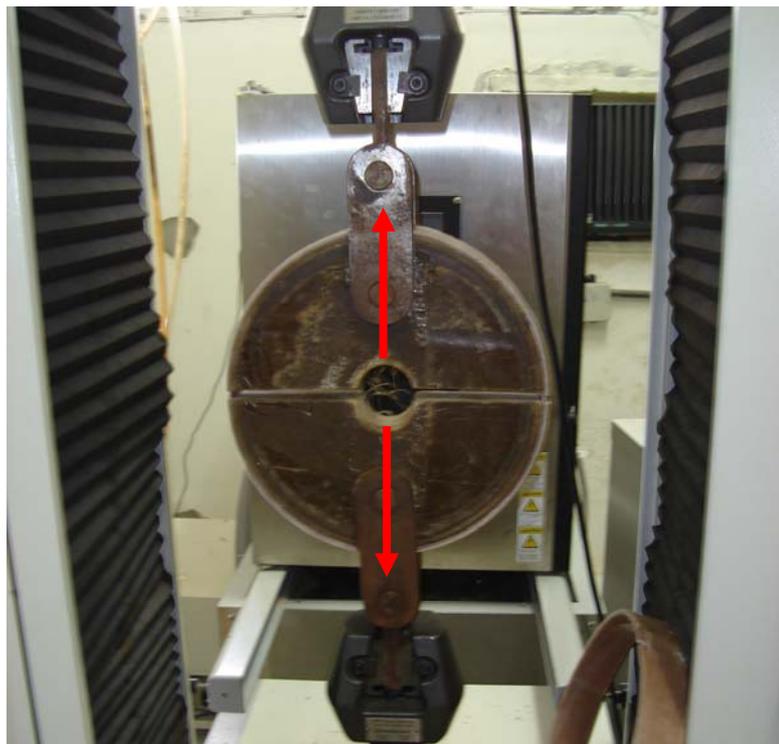


Figura 19: Dispositivo de ensaio *split disc*.

3.3.3 Ensaio de Rigidez

Os corpos-de-prova para realização dos ensaios de rigidez foram preparados seguindo recomendações da Norma ASTM D2412. Segmentos de tubos foram cortados com uma serra de disco diamantado, inicialmente, com 35 cm de comprimento. Estes segmentos pré-cortados foram colocados no mesmo dispositivo de corte apresentado na figura 17 para o corte final. O comprimento das amostras é de 30 cm (Figura 20).

Os ensaios de rigidez foram realizados seguindo recomendações da Norma ASTM D2412. Os corpos-de-prova foram colocados entre dois pratos planos e paralelos (Figura 21). Os pratos se aproximam com velocidade constante de 12,5 mm/min e a carga para determinação da rigidez é medida quando o corpo-de-prova é defletido em 5% do seu diâmetro interno. A rigidez do tubo é determinada pela equação 5.

Os ensaios de rigidez foram realizados utilizando-se uma máquina de ensaios universais Shimadzu Autograph de 100 kN. Os valores de carga foram computados pela própria célula de carga da máquina e armazenados, simultaneamente aos valores de deslocamento, em um computador. Para a realização deste ensaio foram fabricados cinco corpos-de-prova de cada tipo de tubo (A, B e C).



Figura 20: Corpos-de-prova de rigidez

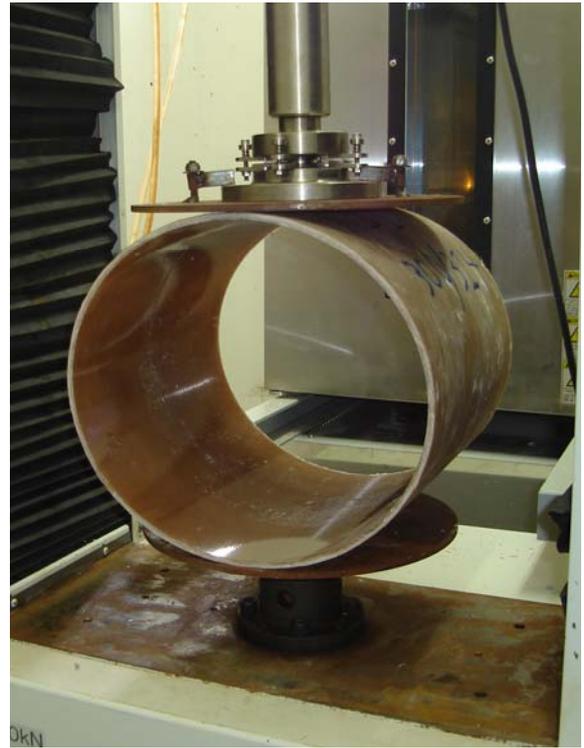


Figura 21: Ensaio de rigidez

$$PS = \frac{Q}{0,05l d_i} \quad (5)$$

Onde,

PS = Rigidez do tubo (kPa) (mesmo significado que na equação 2);

Q = Carga aplicada ao corpo-de-prova para 5% de deflexão transversal (kN);

l = Comprimento do corpo-de-prova (m);

d_i = Diâmetro interno do corpo-de-prova (m);

3.3.4 Ensaio de Pressão Hidrostática

Os corpos-de-prova para ensaios de pressão hidrostática foram cortados, com o auxílio de uma serra com disco de corte diamantado, próximo aos anéis inseridos nos tubos durante a fabricação, como podem ser vistos na Figura 11 (página. 42). Os cortes foram realizados de modo que os anéis ficaram delimitando as extremidades do corpo-de-prova. Os anéis foram

usinados para confecção da sede do anel de vedação do caps. Os segmentos de tubos foram preparados de forma que seus comprimentos úteis fossem no mínimo iguais a três vezes o diâmetro, seguindo recomendações da norma ASTM D1599.

Para este ensaio não foram fabricados tubos do tipo B, pois o equipamento utilizado para estes ensaios não teria capacidade para rompê-los. Isso porque o acréscimo de fios para atender ao requisito de rigidez faz com que a pressão de ruptura aumente significativamente, ultrapassando a capacidade do equipamento disponível que é de 100 bar. Foram fabricadas 5 amostras dos tubos tipo A e 5 do tipo C (Figura 22).



Figura 22: Corpos-de-prova para ensaios hidrostáticos.

Uma pequena área, cerca de 50 mm x 50 mm, no centro de cada amostra foi preparada para receber os *strain gauges*. Como a superfície externa do tubo é rugosa, foi necessária a aplicação de uma fina camada de resina seguida de lixamento, com a finalidade de proporcionar uma área lisa para a colagem dos *strain gauges*. Esta operação foi conduzida no sentido de adicionar e remover o mínimo de material, para não causar interferência no resultado do ensaio. A área após a preparação da superfície é mostrada na Figura 23 (a) e a instalação dos *strain gauges* é destacada na Figura 23 (b).

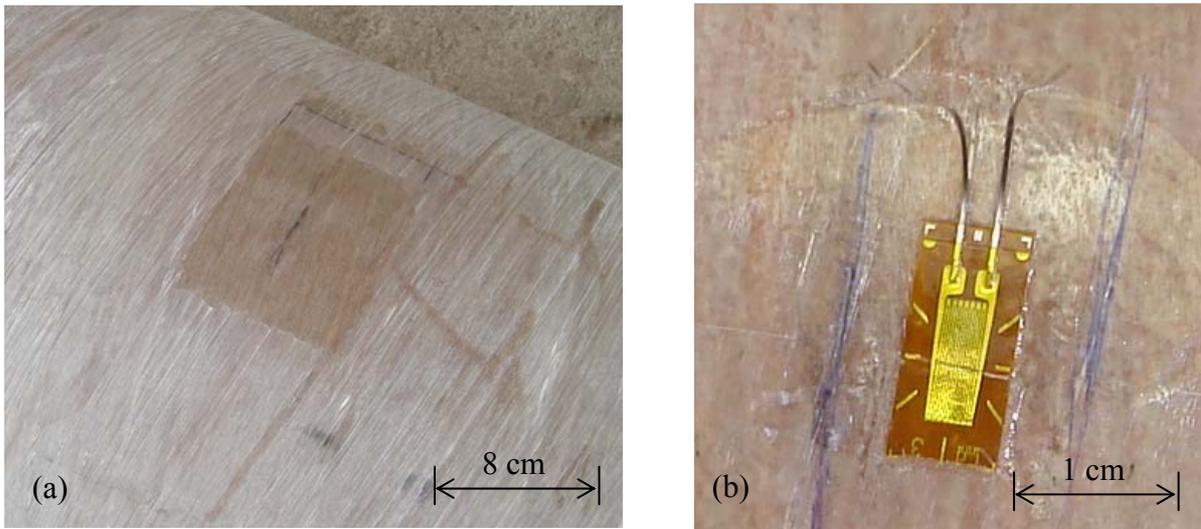


Figura 23: Instalação dos *strain gauges*.

Os *strain gauges* utilizados (apêndice 2) foram do tipo unidirecional e o tipo de ligação utilizada foi meia-ponte, seguindo recomendações do fabricante. Este tipo de ligação permite a utilização de um segundo *strain gauge* instalado em um corpo-de-prova semelhante, porém isento de carregamento, para compensação de temperatura [73]. Cada corpo-de-prova recebeu dois conjuntos de *strain gauges* ligados em meia-ponte, com voltagem de excitação de 2,5 v e instalados a 180° um do outro (na mesma circunferência), com a finalidade de se obter um valor médio. Os dados de pressão foram computados utilizando-se um transdutor de pressão de 100 bar devidamente calibrado (apêndice 3). Os conjuntos de *strain gauges* e o transdutor de pressão foram ligados a um sistema de aquisição de dados e amplificador (*Spider 8*) e um computador, de forma que os valores de deformação e pressão foram armazenados simultaneamente. A figura 24 apresenta os dispositivos utilizados nas medições durante os ensaios.

O tubo, por questões de segurança, fica separado por uma parede que possui apenas uma pequena abertura para a passagem dos cabos dos *strain gauges* e da haste do medidor da variação do perímetro (que será detalhado nos próximos parágrafos). As figuras 24 e 25 mostram os lados opostos da parede de proteção. Na figura 25 o medidor da variação do perímetro está posicionado de forma a tornar mais claro o seu funcionamento. Durante a execução dos ensaios, a haste do dispositivo cruza a parede de proteção, pela abertura, posicionando o visor na área de segurança (figura 24).

No procedimento de teste, o corpo-de-prova é montado em um dispositivo composto por *caps*, tirantes e tampões (Figura 24), e é ensaiado seguindo recomendações da norma ASTM D1599. A montagem dos *caps* é do tipo ponta bolsa anel, com anel de vedação

toroidal. A pressão é elevada gradativamente até a ruptura do corpo-de-prova. Apesar da norma estabelecer um tempo de ruptura entre 60 s e 70 s, este tempo ficou em torno de 5 min devido à limitação do equipamento utilizado. Entretanto, este aumento no tempo de ruptura não deve afetar de forma significativa o comportamento mecânico estudado.

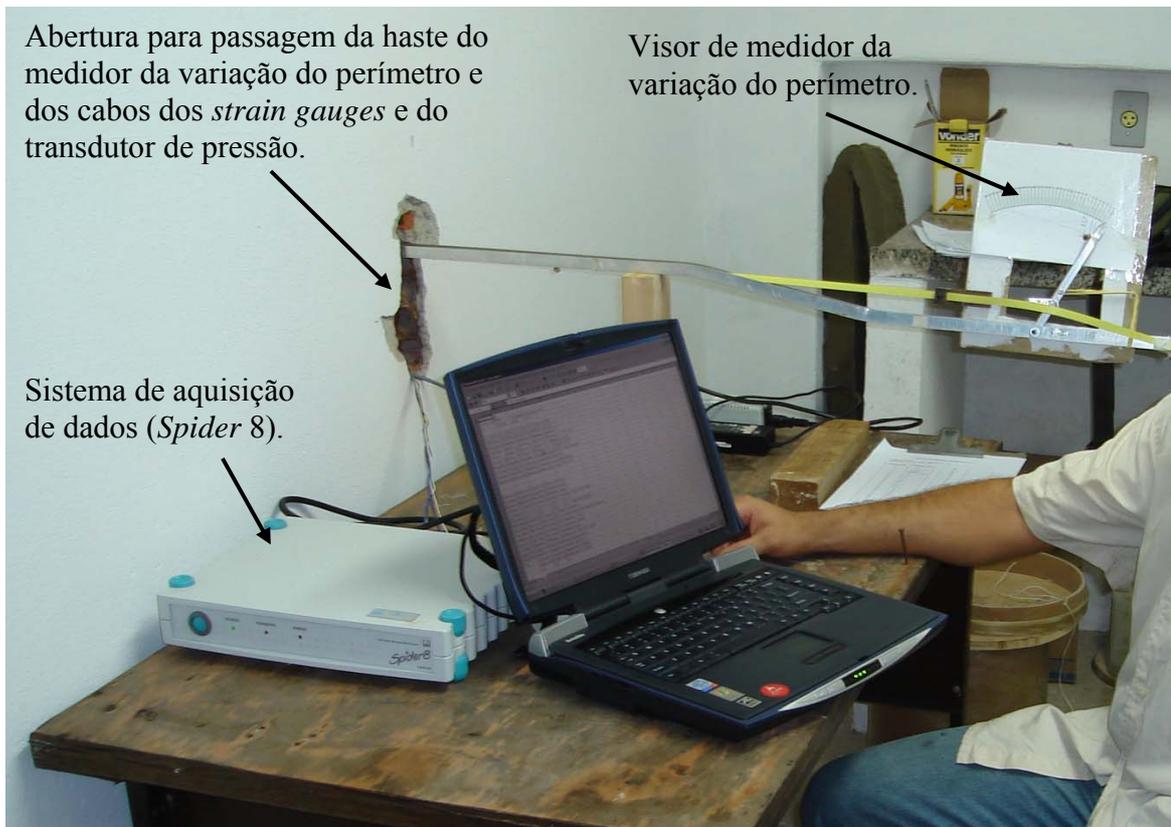


Figura 24: Dispositivos utilizados nos ensaios de pressão hidrostática.

Para este ensaio foi desenvolvido um medidor da variação do perímetro, já mencionado anteriormente. Sua eficiência foi comparada com o consagrado método dos *strain gauges* para avaliação desse dispositivo como uma alternativa muito mais simples e de menor custo, principalmente para medições em campo. O sistema de medição desenvolvido está ilustrado na figura 25 e os detalhes de funcionamento podem ser vistos nas Figuras 26 (a) e (b). Neste processo, os dados de deslocamento e pressão são computados manualmente e inseridos em uma planilha eletrônica para tratamento e processamento dos dados. O sistema também possui um marcador que registra a maior deformação, no momento da ruptura.

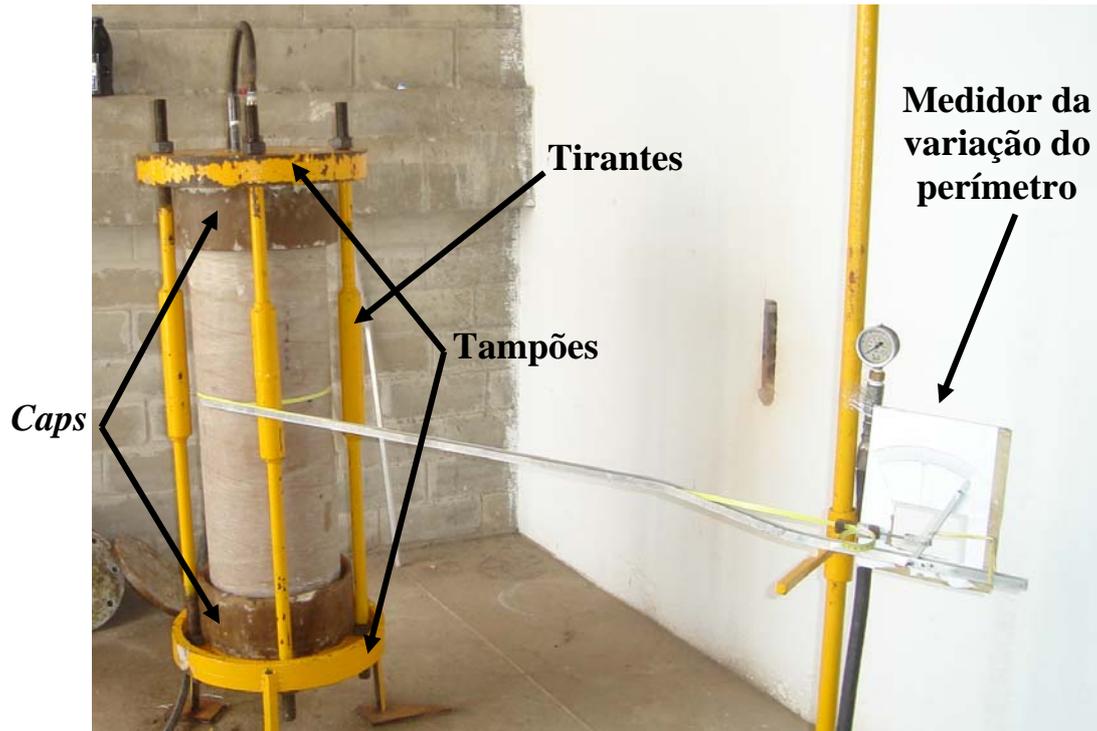


Figura 25: Dispositivo de ensaios hidrostáticos.

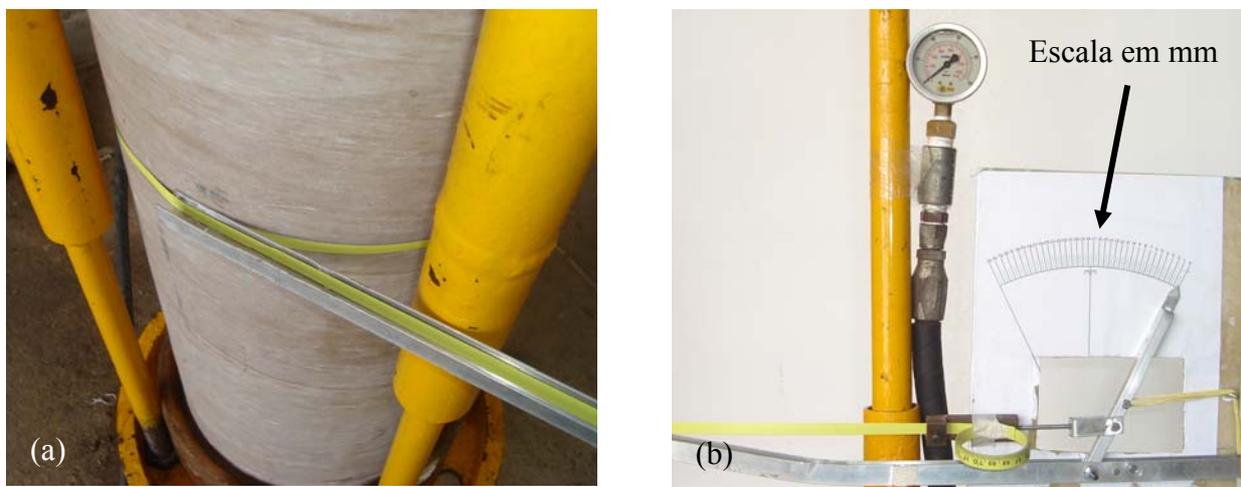


Figura 26: Medidor da variação do perímetro.

O dispositivo foi construído utilizando-se uma fita de aço, um perfil “U” em alumínio, um ponteiro que funciona como uma alavanca para amplificar o sinal e a escala calibrada. Com a dilatação do tubo em função do acréscimo da pressão, a fita de aço movimentava o ponteiro. Esta ferramenta permite a obtenção de valores de deformação, inclusive na ruptura, e do módulo de elasticidade do laminado.

Os resultados obtidos de pressão e deformação foram utilizados para calcular a resultante de tensão e o módulo de elasticidade circunferencial da parede do tubo (equações 5 e 6).

$$F_r = \frac{P(d_i + t)}{2} \quad (6)$$

$$E_c = \frac{F_r}{e} \quad (7)$$

Onde,

F_r = Resultante de tensão (kN/m);

P = Pressão (kPa);

d_i = Diâmetro interno do tubo (m);

t = espessura da parede do tubo (m);

E_c = Módulo de elasticidade circunferencial (kN/m);

e = Deformação circunferencial (variação do perímetro / perímetro inicial).

3.3.5 Análises Microscópicas e Química

Durante o processo de fabricação, a areia é adicionada ao tubo junto com as fibras de vidro, ocorrendo o contato entre estes dois elementos. Torna-se imprescindível, portanto, a verificação da presença ou não de danos causados às fibras, oriundos deste contato fibra-areia no processo de fabricação. Os grãos de areia podem conter arestas cortantes e quinas, o que possibilita a ocorrência de danos nas fibras de vidro. Faz-se necessário uma análise para a caracterização da areia com ensaios de fluorescência (realizado com EDX), granulometria (realizado com um granulômetro a laser), além da análise com MEV (microscópio eletrônico de varredura) para verificação da morfologia. O MEV e o EDX utilizados foram da marca Shimadzu e o granulômetro utilizado foi da marca Cilas, modelo 920L.

Para avaliar a presença de danos foram preparadas amostras da parede do tubo cortadas a 0° e 90° em relação ao eixo longitudinal da tubulação, utilizando o dispositivo mostrado na figura 13 (pág. 44). As amostras foram embutidas em resina (a mesma utilizada na fabricação dos tubos) e submetidas ao processo de lixamento e polimento para análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura). Após os ensaios de pressão hidrostática (item 3.3.4), foram preparadas novas amostras, retiradas destes corpos-de-prova, para verificar o aparecimento de trincas no laminado oriundas deste tipo de carregamento.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, bem como a análise comparativa dos mesmos. As tensões serão denominadas de resultante de tensão, sendo expressa em força por unidade de comprimento linear de parede do tubo (kN/m) e não em carga por área. O valor da resultante de tensão é obtido dividindo-se o valor de tensão pela espessura do corpo-de-prova. Esta é uma prática comum para tubulações de compósitos, além de ser utilizada por todas as normas pesquisadas. Com este recurso, as tubulações são analisadas sem levar em consideração a espessura da parede do tubo. Os valores de módulo de elasticidade circunferencial também serão expressos em kN/m.

4.1 Ensaio de Tração Axial

Os resultados dos ensaios de tração axial realizados nos corpos-de-prova cortados dos tubos estão apresentados na Tabela 6. Os valores de tensão foram obtidos com a média das cinco amostras testadas de cada tubo.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de tração axial.

Corpo-de-prova	F_r média (kN/m)	Desvio Padrão (kN/m)
Tubo A; Com areia; Rigidez 248kPa.	167,9	9,5 (5,6 %)
Tubo B; Sem areia; Rigidez 248kPa.	236,2	10,4 (4,4 %)
Tubo C; Sem areia; Sem atender a Rigidez.	164,4	14,0 (8,5 %)
Barreira Química	176,1	27,8 (15,4 %)

Os valores entre parênteses mostram os desvios padrões em termos percentuais.

Durante os ensaios de tração axial dos corpos-de-prova cortados a partir dos tubos, foram verificadas algumas quedas abruptas de carga, representadas por descontinuidades nas curvas de força-deslocamento (Figura 27). Estas descontinuidades, verificadas em todos os corpos-de-prova, ocorreram devido a fraturas parciais na estrutura (parte externa do tubo, descrita no item 3.2), como pode ser visto na Figura 28. Observou-se que a ruptura total das amostras só ocorre quando a barreira química falha. Os corpos-de-prova do tubo B (sem adição de areia e atendendo ao requisito de rigidez) apresentaram quedas de carga com maior

intensidade, porém foram os que apresentaram a maior carga de ruptura. Os corpos-de-prova do tubo C (sem adição de areia e sem atender ao requisito de rigidez) apresentaram descontinuidades muito discretas nas curvas força-deslocamento, mas também relacionadas a fraturas parciais na estrutura.

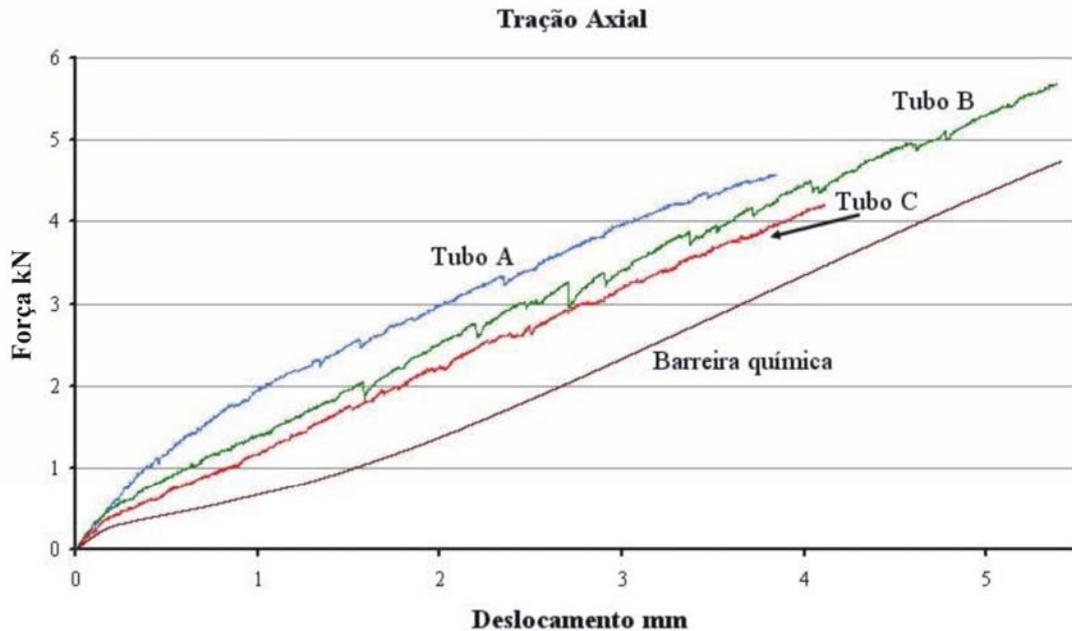


Figura 27: Curvas típicas de força-deslocamento – tração axial.

(Os dados de deslocamento deste gráfico não servem para determinar a deformação do corpo-de-prova, pois estão embutidos o escorregamento nas garras e as deformações da máquina).

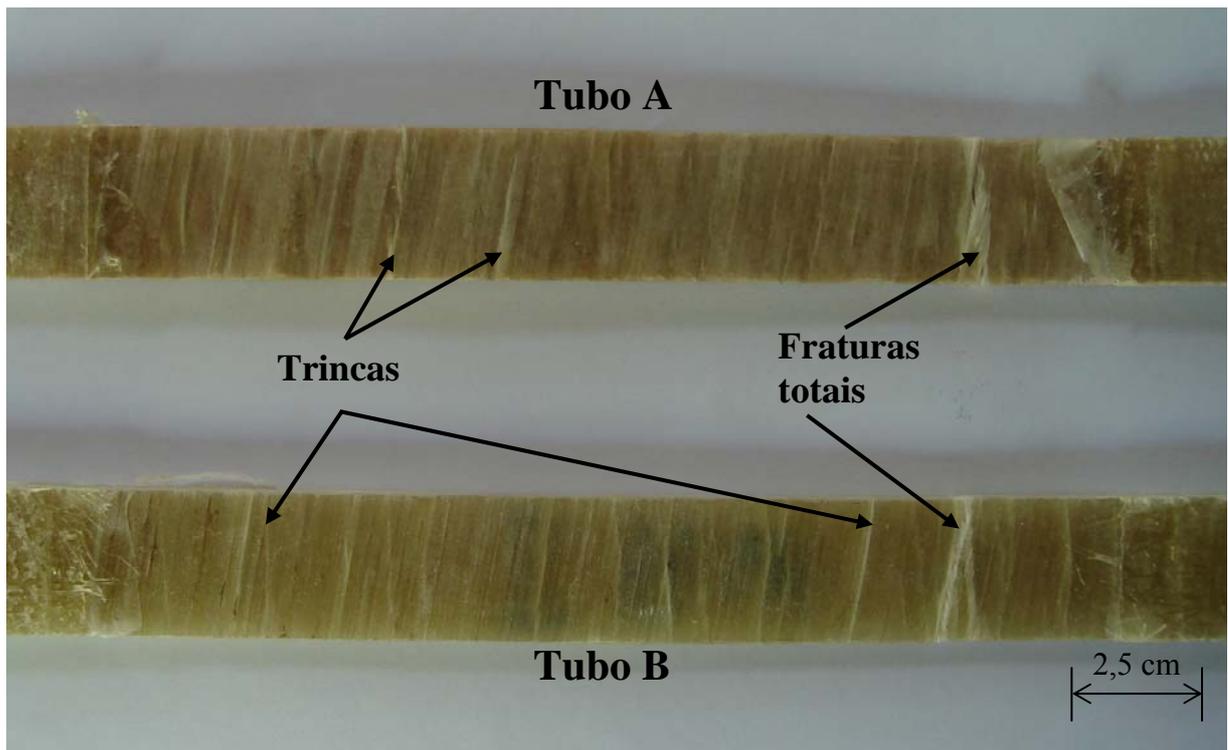


Figura 28: Trincas na estrutura da parede do tubo.

A norma AWWA C950 especifica uma resultante de tensão axial mínima de 101,57 kN/m para tubos com diâmetro nominal de 300 mm e classe de pressão 1034 kPa. Como pode ser visto na tabela 6, todos os corpos-de-prova atenderam a este requisito com folga. O tubo B (sem areia, classe de rigidez 248 kPa) apresentou um valor 41% maior em relação ao tubo A (com areia). Portanto, este tubo está superdimensionado para os esforços axiais. O tubo A (com areia) apresentou um valor médio similar ao do Tubo C (sem areia, com a mesma configuração de fibras), o que mostra a aplicabilidade da areia, segundo o teste de tração axial.

Um outro ponto a ser observado é que a resistência a carregamentos axiais da barreira química foi similar a dos tubos A e C (tabela 6). Já o tubo B apresentou um valor de resultante de tensão média 34 % maior. Os resultados mostram que a barreira química é um importante componente para a resistência axial dos tubos.

4.2 Ensaio de Tração Circunferencial

Os resultados dos ensaios de tração circunferencial estão apresentados na Tabela 7. Durante os ensaios foi verificado que a barreira química falha antes da ruptura total do corpo-de-prova, como pode ser visto na figura 29. Isso comprova que a estrutura é o componente que tem a maior participação neste carregamento, justamente porque as fibras contínuas da estrutura estão orientadas praticamente nesta direção (com $\pm 10^\circ$ de inclinação). A fratura total do corpo-de-prova ocorre quando os fios de fibras contínuas rompem, como ilustrado na figura 30.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de tração circunferencial.

Corpo-de-prova	F_r média (kN/m)	Desvio Padrão (kN/m)
Tubo A; Com areia; Rigidez 248 kPa.	807,8	22,7 (2,8 %)
Tubo B; Sem areia; Rigidez 248 kPa.	1898,2	209,1(11 %)
Tubo C; Sem areia; Sem atender a Rigidez.	859,5	30,9 (3,5 %)

Os valores entre parênteses mostram os desvios padrões em termos percentuais.

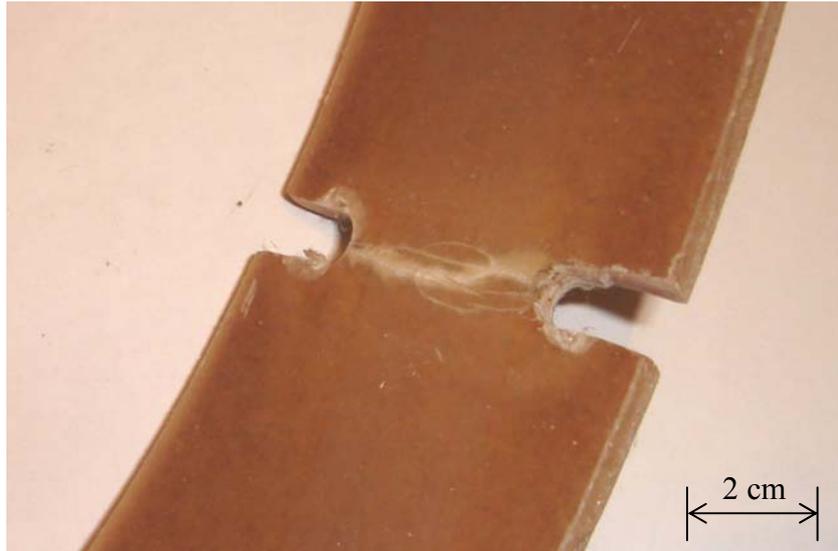


Figura 29: Ruptura da barreira química antes do rompimento total do corpo-de-prova.

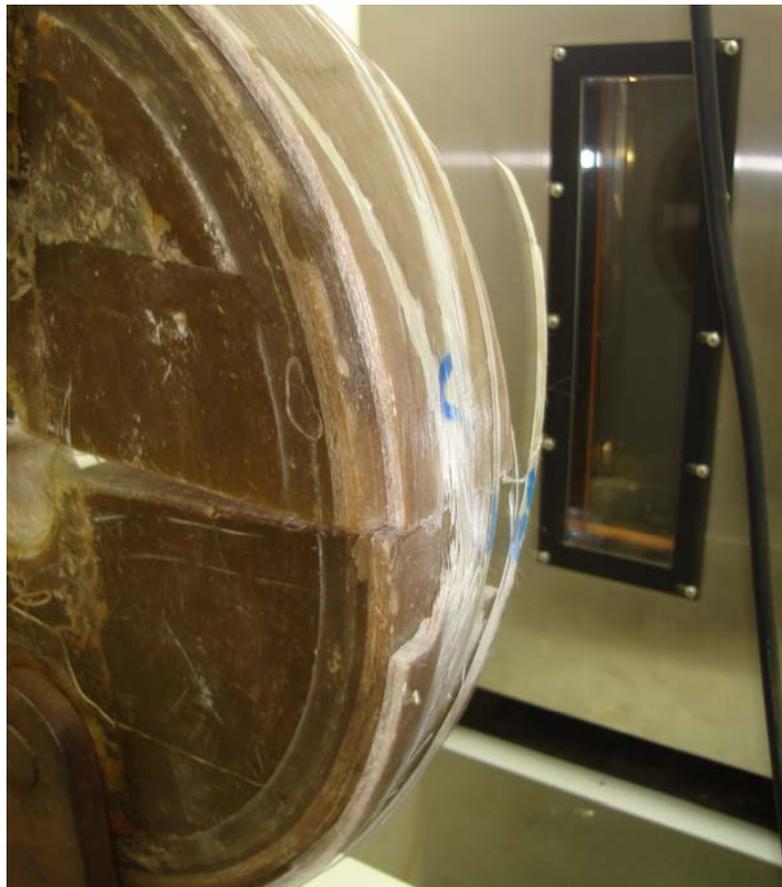


Figura 30: Ruptura total do corpo-de-prova.

A norma AWWA C 950 especifica uma resistência mínima de 420 kN/m para resultante de tensão circunferencial de tubos com diâmetro nominal de 300 mm e classe de

pressão 1034 kPa. Como pode ser visto, todos os tubos testados apresentaram valores bem maiores que o mínimo exigido por norma. O tubo B, no entanto, apresentou valor médio cerca de 140% maior que os demais, mostrando que o mesmo está superdimensionado para o carregamento circunferencial. O tubo A apresentou uma pequena perda, em relação ao tubo C (6,4 %), o que mostra que a areia pode estar prejudicando, ainda que de forma discreta, as propriedades do tubo. No entanto, em um outro trabalho [59], foi verificado um pequeno ganho na tensão circunferencial (801,91 kN/m para os corpos-de-prova sem areia e 831,02 kN/m para as amostras com areia, que significa uma diferença de 3,5 %) com a adição da areia, em testes realizados dentro dos mesmos padrões. Com isso, pode-se concluir que a areia não tem um impacto significativo na resistência à tração circunferencial, o que comprova sua aplicabilidade com relação a este tipo de carregamento.

4.3 Ensaio de Rigidez

Os resultados dos ensaios de rigidez apontam o potencial da areia como carga de adição. Como pode ser visto na tabela 8, a rigidez dos tubos A e B foram praticamente as mesmas, com diferença inferior a 1%, mesmo o tubo B tendo uma fração de fibras de vidro muito maior. Como mencionado anteriormente, isso se deve ao fato da rigidez apresentar grande dependência da espessura da parede do tubo.

Tabela 9. Resultados dos ensaios de rigidez.

Corpo-de-prova	Rigidez média (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
Tubo A; Com areia; Rigidez 248kPa.	303,2	22,7 (7,5 %)
Tubo B; Sem areia; Rigidez 248kPa.	300,2	5,4 (1,8 %)
Tubo C; Sem areia; Sem atender a Rigidez.	80,0	7,4 (9,3 %)

Os valores entre parênteses mostram os desvios padrões em termos percentuais.

A classe de rigidez especificada para os tubos foi de 248 kPa. Neste caso, pode-se verificar que o tubo C não atende a este requisito. Mesmo tendo as mesmas quantidades e orientação das fibras de vidro do tubo A, a rigidez é tão baixa que não representa sequer 1/3 do valor exigido pela norma. Foi necessário adicionar oito camadas de fios paralelos (diferença entre os tubos B e C) para atingir a rigidez solicitada, o que encarece bastante a

tubulação. No entanto, com a adição de areia, que causa apenas um discreto aumento no custo da tubulação, chega-se facilmente à rigidez especificada. As curvas de carregamento apresentaram o mesmo comportamento entre os tubos A e B, mesmo com configurações de laminados diferentes (Figura 31).

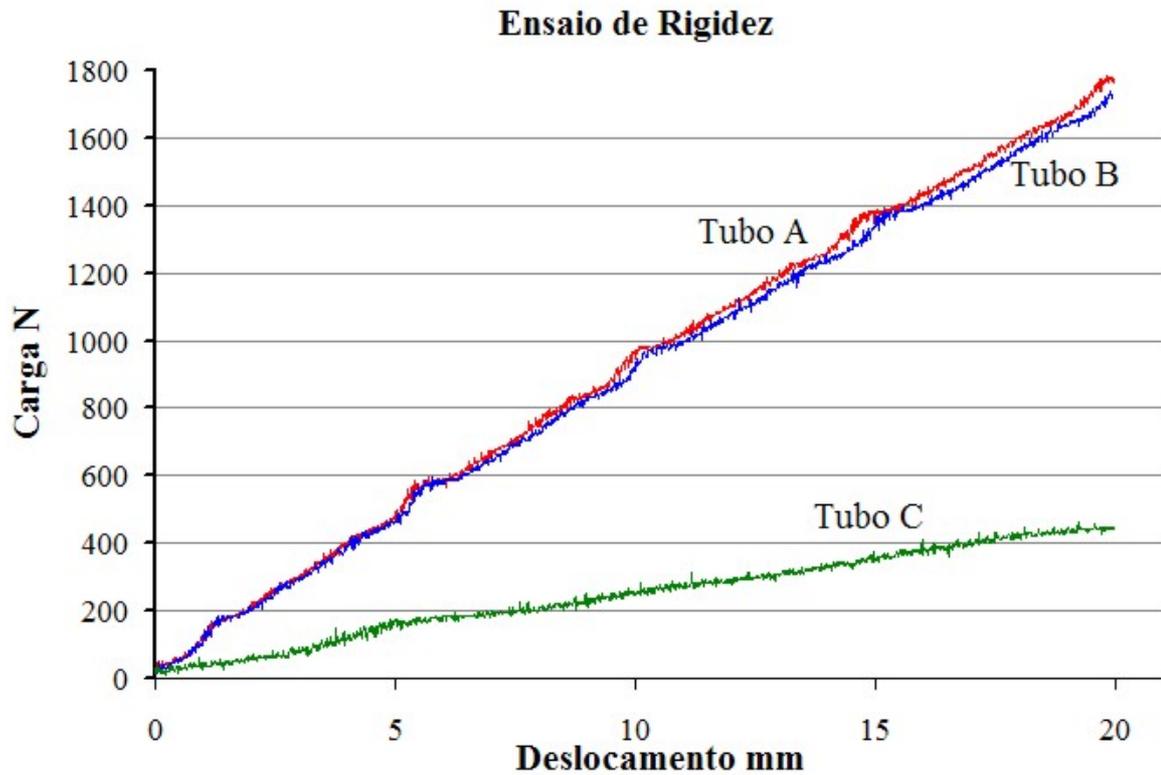


Figura 31: Curvas características dos ensaios de rigidez.

Como pode ser visto, a areia cumpre sua função (aumentar a rigidez do tubo) com eficiência. O tubo B necessita de 8 camadas a mais de fios de fibras de vidro contínuas para atender ao requisito de rigidez. A adição de areia substitui o equivalente a 2,43 kg de fios de fibras por metro de tubo. Outro fato que também interfere no custo final do produto é a velocidade de produção. As camadas de areia são adicionadas simultaneamente com o filamento contínuo, ou seja, não causam influência na velocidade de produção. Desta forma, o tubo B, composto por 13 camadas de filamento contínuo, demanda mais tempo que o tubo A, que contém apenas 5 camadas. Em relação ao tubo C, a adição de areia representou um aumento na rigidez da ordem de 380 %.

4.4 Ensaio de Pressão Hidrostática

A pressão interna é o principal tipo de carregamento que as tubulações para transporte de fluidos sob pressão são submetidas. Os tubos em questão foram fabricados para classe de pressão de 1034 kPa. Segundo a norma AWWA C 950, os tubos devem ser projetados com fator de segurança de 1,8, quando existem os dados do ensaio de HDB (ensaio hidrostático de longa duração extrapolado para 50 anos, executado de acordo com a norma ASTM D2992). Quando o HDB não está disponível, o tubo deve ser projetado com fator de segurança 4, em relação à pressão de ruptura. No caso, os tubos utilizados neste trabalho foram projetados com fator de segurança 4, portanto, a pressão de ruptura não deve ser inferior a 4136 kPa. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de pressão hidrostática.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de pressão hidrostática.

Corpo-de-prova		Pressão de ruptura média (kPa)	F_r (kN/m)	E_c médio (kN/m)
Tubo A; Com areia; Rigidez 248kPa.	Valor	4550	727,7	66609
	Desvio padrão	260 (5,7 %)	41,7 (5,7 %)	2123,9 (3,2 %)
Tubo C; Sem areia; Sem atender a Rigidez.	Valor	5321,4	843,4	60769
	Desvio padrão	172,9 (3,25 %)	27,4 (3,3 %)	684,7 (1,1 %)
Diferença percentual do tubo C em relação ao tubo A		17 %	15,9 %	-8,7 %

Como pode ser observado, a adição de areia causou mudanças significativas no comportamento do material. A pressão de ruptura foi reduzida em 17 %, em relação ao tubo C que possui a mesma quantidade e configuração de fibras de vidro. Na força resultante por largura de circunferência, que depende do diâmetro (diâmetro interno + espessura da parede) a redução da resistência foi de 15,9 %. Entretanto, com relação ao módulo de elasticidade circunferencial o tubo A apresentou um ganho de 8,7 %.

As curvas de carregamento apresentaram as mesmas características para o tubo A e C. Foi verificado um comportamento parabólico, porém bastante discreto e bem próximo de um comportamento linear, como pode ser visto na figura 32 (este comportamento parabólico pode ser observado comparando a curva com a sua respectiva linha de tendência). Este comportamento pode estar relacionado às características visco-elásticas dos materiais

plásticos, à carga de compressão inserida ao corpo-de-prova nas suas extremidades em função da pressão (que pode chegar a 8000 kgf nas pressões de ruptura), ou os dois. Foi verificada também uma deformação residual média de 0,03 % para o tubo A e 0,034 % para o tubo C, após a retirada da pressão. As deformações apresentadas na figura 32 foram medidas através dos *strain gauges*, enquanto que a resultante de tensão foi calculada pela equação (6) (página 54).

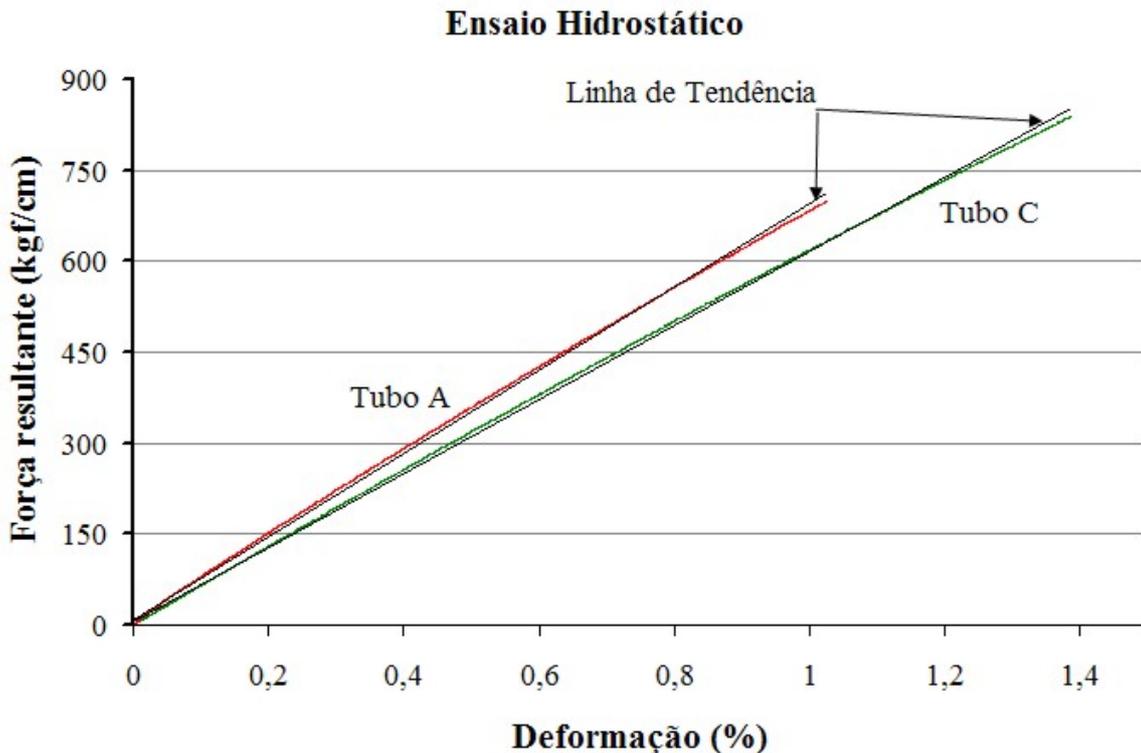


Figura 32: Curvas características dos ensaios de pressão hidrostática.

As rupturas dos corpos-de-prova apresentaram as mesmas características para os dois grupos testados, tubo A e C. A falha ocorre na camada interna (barreira química) com uma trinca orientada na direção longitudinal do tubo, como pode ser visto nas figuras 33 (a) e 34 (a). A água penetra na estrutura do tubo gerando uma região com diferente tonalidade (figuras 33 (b) e 34 (b)). Fica claro que o fluido migra pela estrutura, nas direções circunferencial e axial, até alcançar a superfície e vaziar por entre as mechas de fios do laminado (figura 35). Portanto, o tubo não estoura, nem desprende pedaços no momento da falha, mas apenas exuda na forma de um esguicho de água.

Todas as amostras apresentaram pressão de ruptura acima do valor especificado em norma. O tubo A apresentou fator de segurança médio de 4,4 e o tubo C apresentou um fator de segurança de 5,1. A areia, neste tipo de carregamento, causou uma redução na capacidade

do tubo. No entanto, a areia é fundamental para que a tubulação atinja a rigidez necessária (item 4.3), o que torna viável sua utilização. Pode-se afirmar que a redução na pressão de ruptura com a adição de areia é compensada pelo aumento significativo da rigidez do tubo.

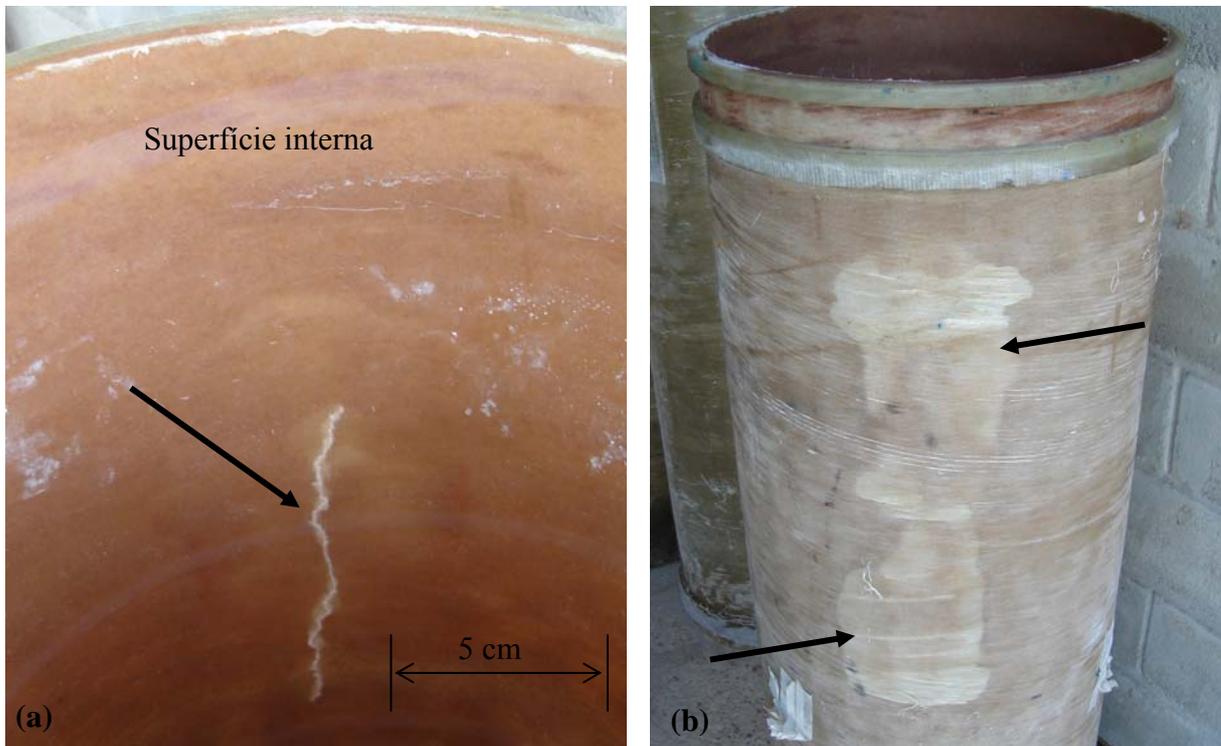


Figura 33: Tubo A - Trinca na camada interna (a); local do vazamento (b).

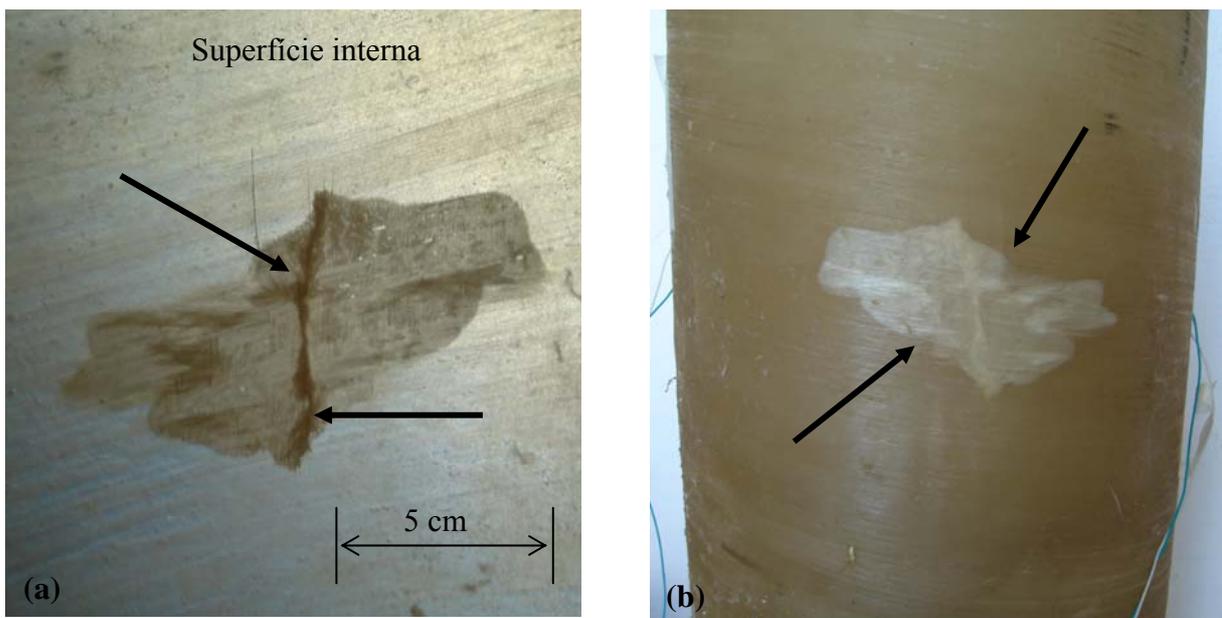


Figura 34: Tubo C – Trinca na camada interna (a); local do vazamento (b).

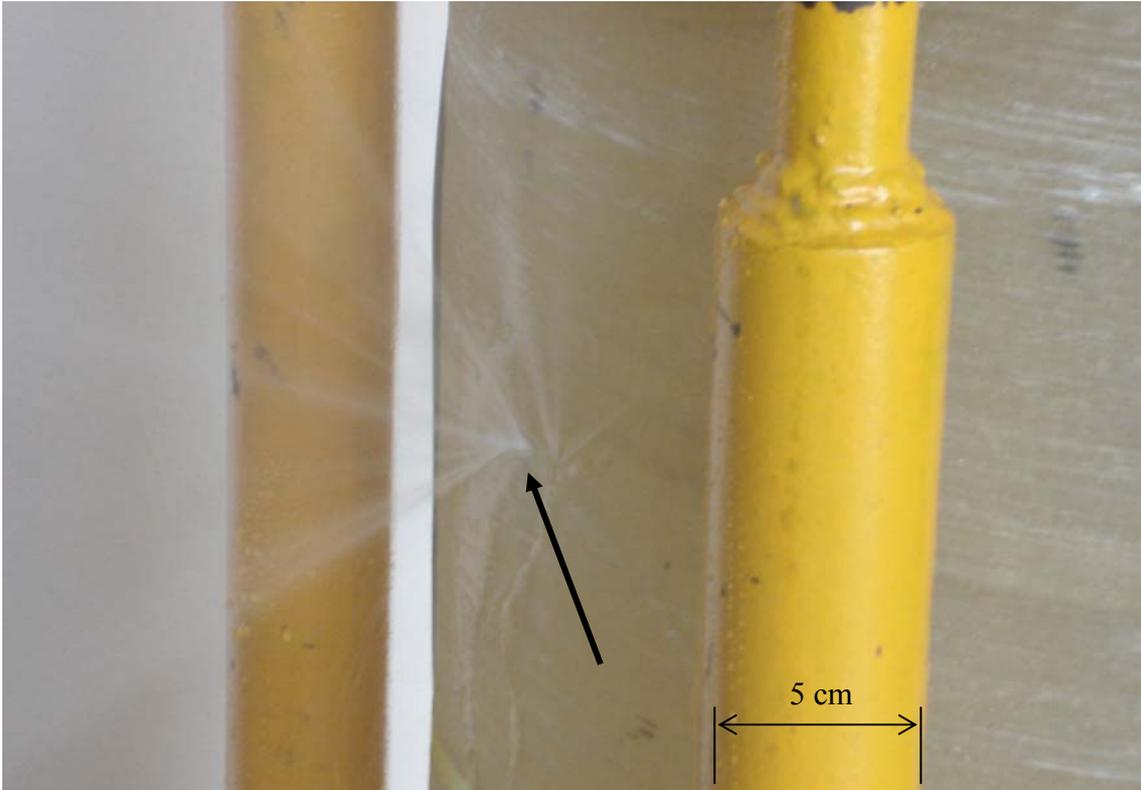


Figura 35: Característica da falha nos ensaios hidrostáticos.

4.4.1 Resultados com o Medidor da Variação do Perímetro

O dispositivo desenvolvido para medição da variação do perímetro apresentou resultados bastante satisfatórios. Um dos pontos positivos deste sistema é que ele mede a deformação de toda a circunferência, fornecendo um valor médio. Já os *strain gauges* fazem uma medição pontual, o que obriga a utilização de mais de uma unidade para se obter um valor médio e confiável. Foi verificado, por exemplo, uma diferença de 20 % entre os dois *strain gauges* de um mesmo corpo-de-prova, em função de variações na espessura da parede do tubo. Na tabela 10 são apresentados os resultados obtidos com o dispositivo desenvolvido, que são confrontados com os resultados obtidos através dos *strain gauges*. Os valores de módulo de elasticidade circunferencial foram obtidos a partir das linhas de tendência (linear) das curvas originais, em ambos os casos.

Tabela 11: Resultados obtidos com o medidor de variação do perímetro.

Corpo-de-prova	E_c strain gauges (kN/m)	E_c com o dispositivo (kN/m)	Diferença percentual	
Tubo A	1	69474	65482	5,7 %
	2	65021	64436	0,9 %
	3	64429	66054	-2,5 %
	4	68097	61785	9,3 %
	5	66023	65602	0,6 %
	Média	66609	64672	2,9 %
	Desvio Padrão	2124 (3,2 %)	1719 (2,7 %)	-----
Tubo C	1	59778	56749	5,1 %
	2	61042	60256	1,3 %
	3	60473	55420	8,4 %
	4	61605	59095	4,1 %
	5	60948	59280	2,7 %
	Média	60769	58160	4,3 %
	Desvio Padrão	685 (1,1 %)	2001 (3,4 %)	-----

A fita do dispositivo de medição da variação do perímetro foi posicionada sempre próxima dos *strain gauges*. Como pode ser observado, a diferença média dos sistemas de medição foi de apenas 2,91 % para o tubo A e 4,29 % para o tubo C, o que mostra que o dispositivo é funcional. Em termos de deformação residual, o dispositivo registrou uma histerese média de aproximadamente 0,05 % para os dois tubos. Este valor foi superior aos 0,03 % registrados com os *strain gauges*, provavelmente em função do atrito da fita de aço com o tubo.

Um outro ponto a ser observado é que no corpo-de-prova número 5 do tubo A foram instalados três *strain gauges* para verificar se o resultado médio seria mais próximo do resultado obtido com o dispositivo desenvolvido. Neste caso, a diferença na determinação dos

módulos de elasticidade circunferencial foi de apenas 0,64%. As curvas de pressão versus deformação, deste corpo-de-prova, obtidas com os dois sistemas de medição podem ser vistas nas figuras 36 e 37. Na figura 36 estão apresentadas as curvas dos três *strain gauges* utilizados no corpo-de-prova e a curva do medidor da variação do perímetro. Já a figura 37 apresenta a curva média dos três *strain gauges* e a curva do dispositivo desenvolvido. Esta é mais uma evidência da eficiência deste sistema de medição.

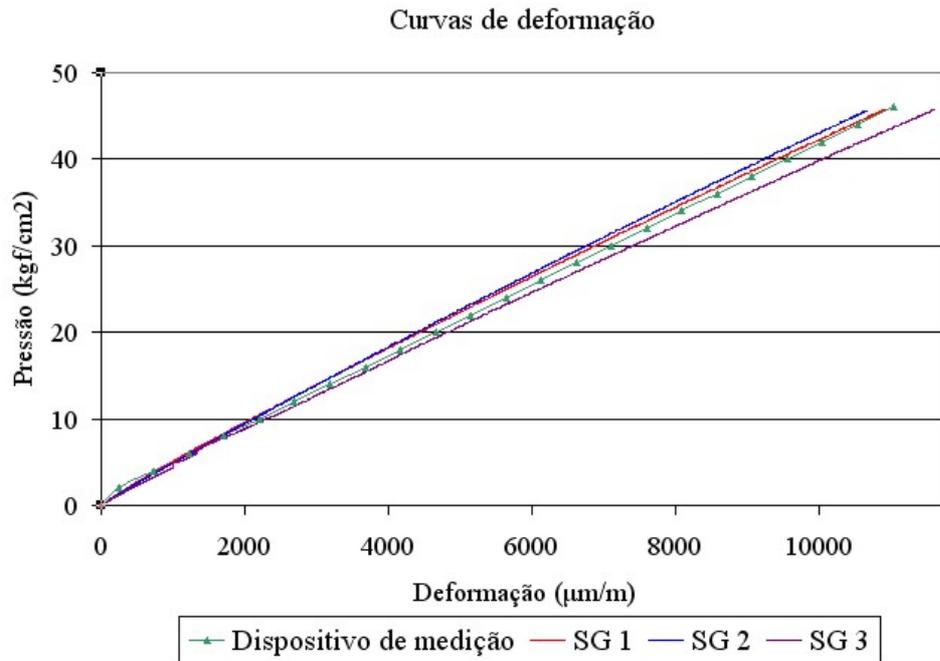


Figura 36: Curvas dos três *strain gauges* da amostra N° 5 e do dispositivo de medição.

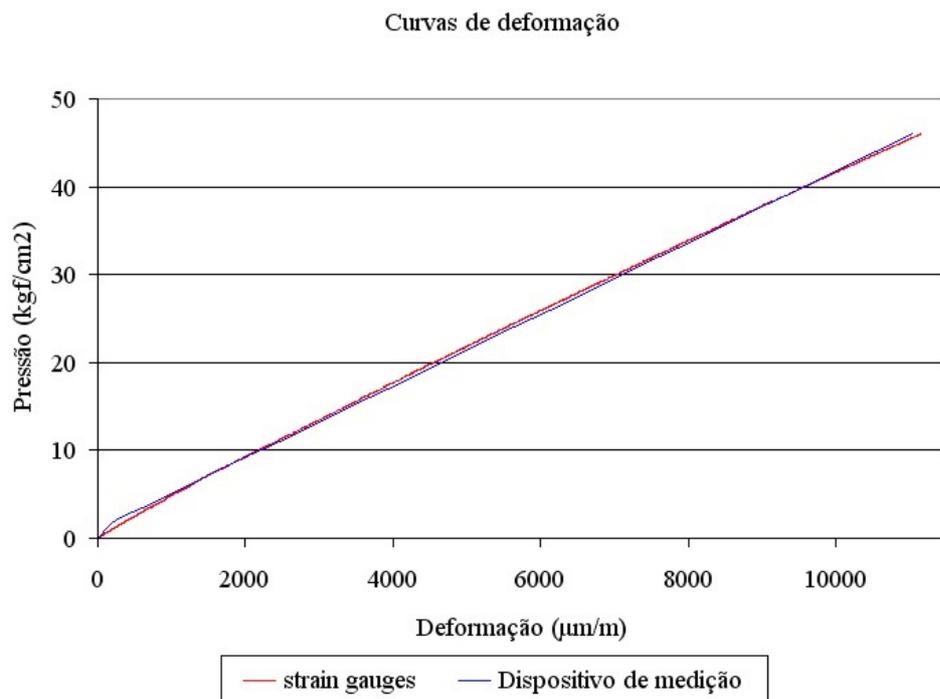


Figura 37: Curvas de deformação obtidas com *strain gauges* e com o dispositivo de medição.

4.5 Análises Microscópicas e Químicas

4.5.1 Caracterização da Areia

A areia foi submetida a ensaios de fluorescência (para verificação da composição química), análise granulométrica e análise com MEV para obtenção da morfologia. Com relação à composição química, foi verificado que a maior parte da areia é composta por quartzo, representando 96,4 %. O restante é composto por outros óxidos, como pode ser visto na tabela 11. A análise granulométrica apontou um diâmetro médio de 254,3 μm . Os resultados podem ser vistos na tabela 12 e as concentrações estão apresentadas no histograma da figura 38. É importante salientar que o equipamento disponível para a determinação da granulometria tem sua escala restrita a 400 μm . Isso significa que o valor médio para o diâmetro das partículas é apenas um indicativo, já que uma pequena quantidade dos grãos de areia ultrapassaram este valor e não entraram no cálculo da média.

Tabela 12: Composição química da areia.

Composição química da areia	
SiO ₂	96,385 %
Al ₂ O ₃	2,546 %
SO ₃	0,294 %
Fe ₂ O ₃	0,287 %
K ₂ O	0,175 %
TiO ₂	0,131 %
CaO	0,105 %
ZrO ₂	0,034 %
CuO	0,024 %
ZnO	0,021 %

Tabela 13: Granulometria da areia.

Granulometria da areia – valores cumulativos	
Diâmetro de até 152,25 μm	10 % das partículas
Diâmetro de até 250,48 μm	50 % das partículas
Diâmetro de até 363,84 μm	90% das partículas
Diâmetro médio	254,3 μm

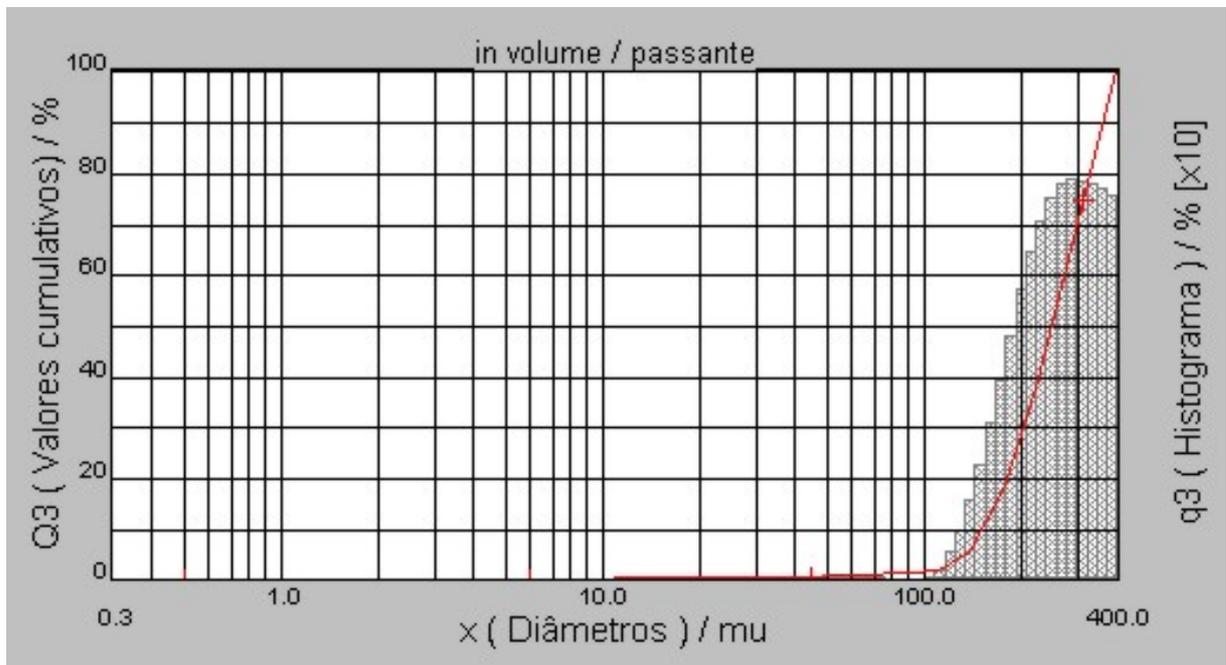


Figura 38: Histograma da areia.

A morfologia da areia está apresentada nas figuras 39 e 40. De modo geral, as partículas não apresentam arestas cortantes ou quinas vivas e seu diâmetro médio é cerca de 25 vezes maior que os das fibras de vidro. Essas características reduzem a expectativa de se encontrar danos nas fibras, oriundos do contato entre estes dois elementos, durante a fabricação. Um ponto a ser observado é a presença de trincas nas partículas, como pode ser observado na figura 40. Os grãos de areia apresentam rugosidade e reentrâncias que podem favorecer a aderência com a matriz.

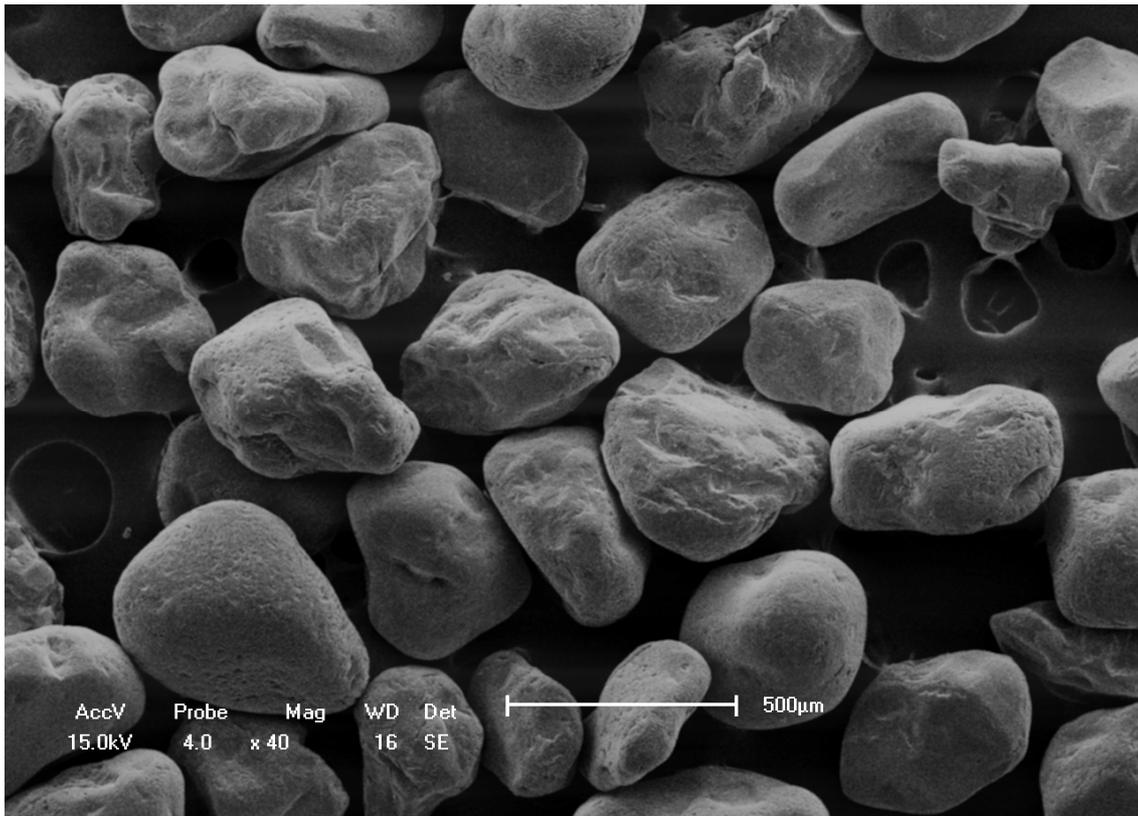


Figura 39: Morfologia da areia.

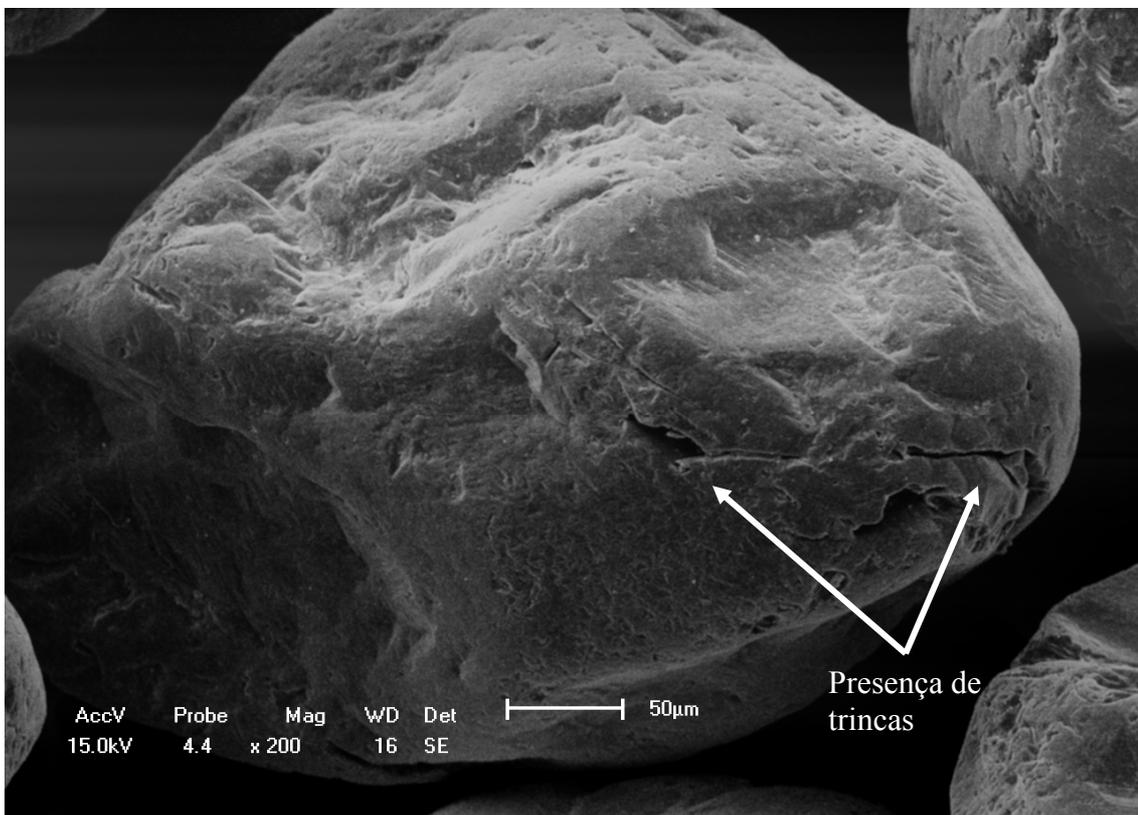


Figura 40: Detalhes do grão de areia.

4.5.2 Análise Microscópica do Laminado

As análises microscópicas foram conduzidas em amostras cortadas a partir do tubo A, com a finalidade de observar as características da microestrutura do laminado e a interface do mesmo com a areia. Foram analisados os planos longitudinal (amostras cortadas na direção do eixo longitudinal do tubo) e transversal (amostras cortadas na direção circunferencial). Na figura 12 (página 43) é apresentada a microestrutura de toda a parede do tubo, no plano transversal.

Inicialmente as análises foram conduzidas no sentido de verificar a presença de danos causados às fibras de vidro, durante a fabricação, oriundos dos contatos com as partículas de areia. Como pode ser visto na figura 41, realmente ocorre o contato da areia com as fibras resultando em dano. No entanto, este tipo de situação foi muito raro dentre as amostras analisadas. A forma mais comum do contato está apresentada na figura 42, onde não há indícios de danos nas fibras.

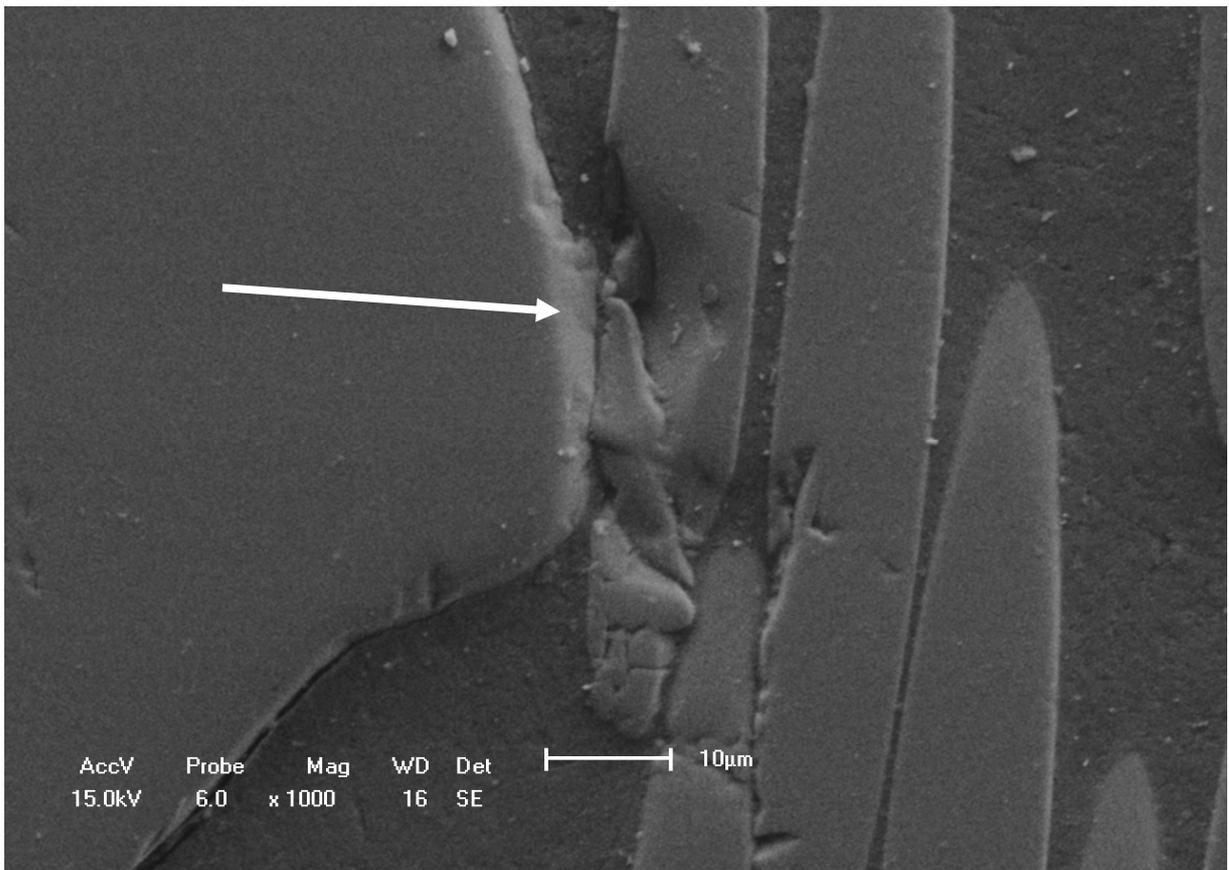


Figura 41: Dano na fibra causado pelo contato com a areia (plano transversal).

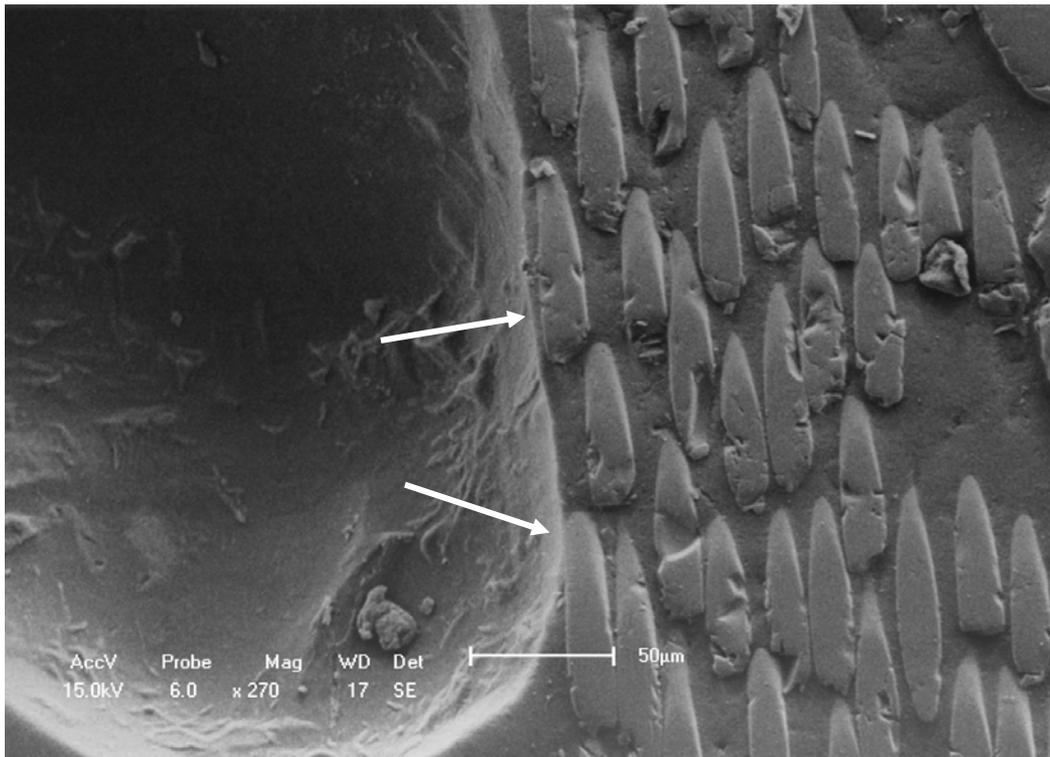


Figura 42: Tipo de contato mais comum entre as fibras e a areia, sem indícios de danos (plano transversal).

Nas amostras cortadas a 0° com o eixo longitudinal do tubo também foram verificados locais de contato entre as fibras e a areia (figura 43), porém sem evidências de danos.

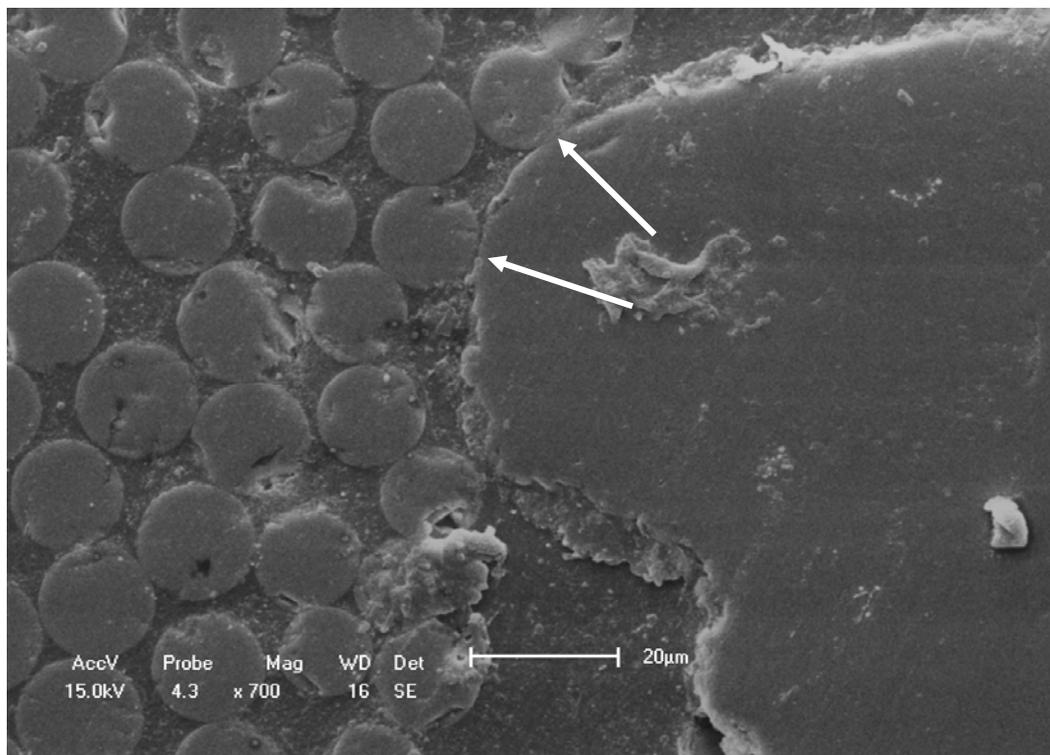


Figura 43: Contato entre fibras e areia (plano longitudinal)

Nas figuras 44 e 45 são apresentadas as camadas que contêm areia, separadas por camadas com fibras. A figura 44 corresponde a uma amostra cortada de um segmento de tubo antes de sofrer qualquer carregamento. A figura 45 representa uma amostra cortada a partir de um corpo-de-prova para ensaio hidrostático (item 4.4), após a sua ruptura. Como pode ser observado, não existem diferenças significativas entre as amostras antes e depois do carregamento, o que aponta uma boa harmonia do laminado.

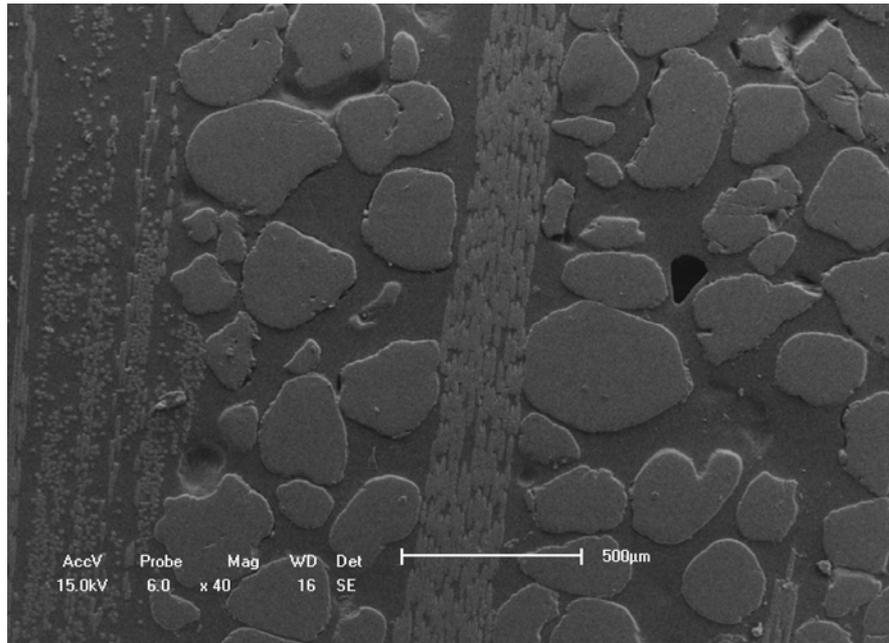


Figura 44: Laminado antes do carregamento (plano transversal).

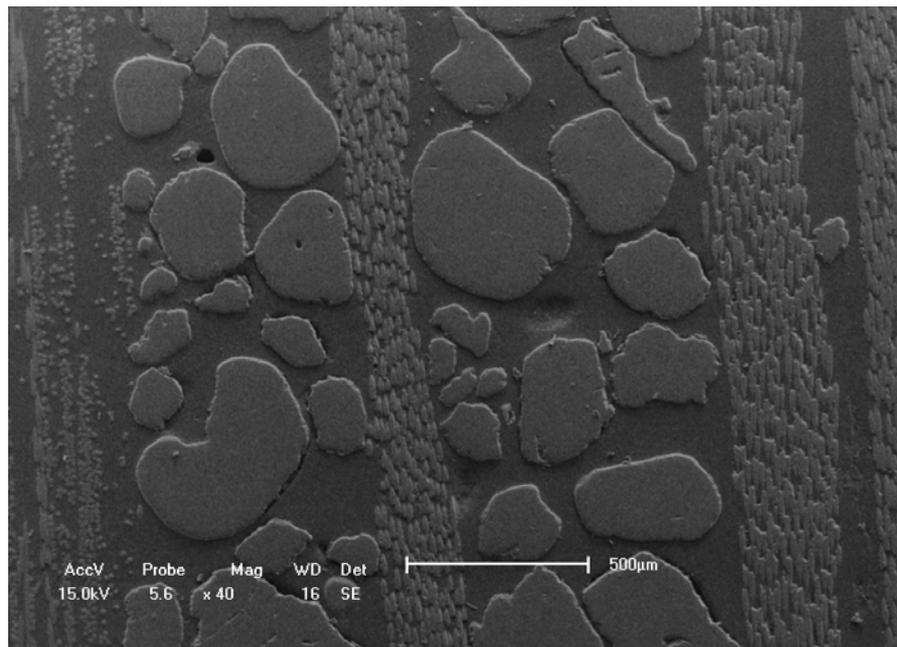


Figura 45: Laminado após o carregamento hidrostático (plano transversal).

As amostras no plano longitudinal também não apresentaram grandes diferenças antes e depois do carregamento, como pode ser visto nas figuras 46 e 47.

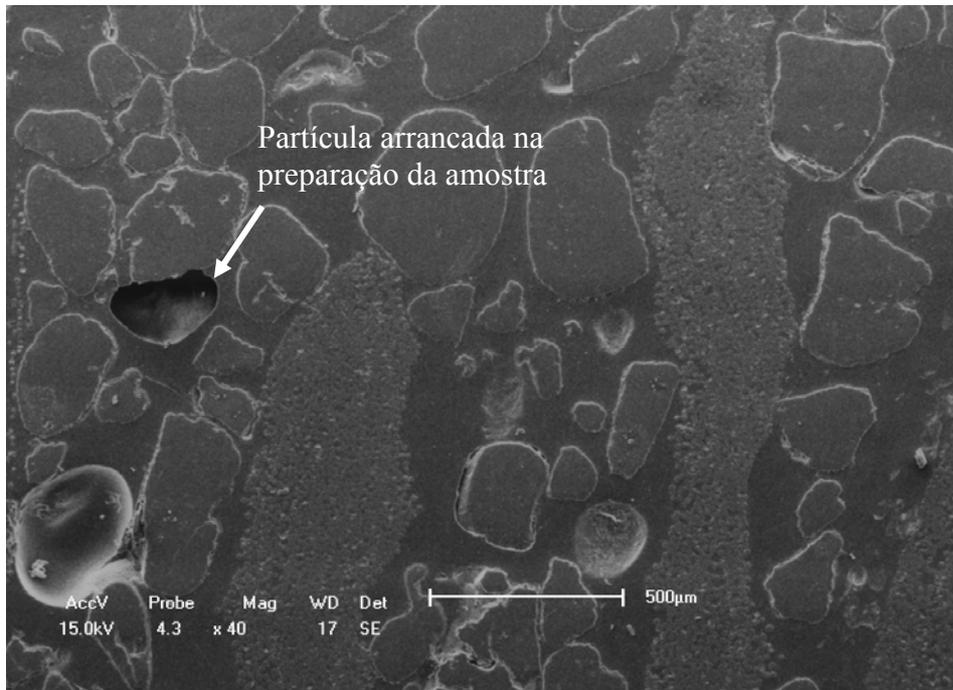


Figura 46: Laminado antes do carregamento (plano longitudinal).

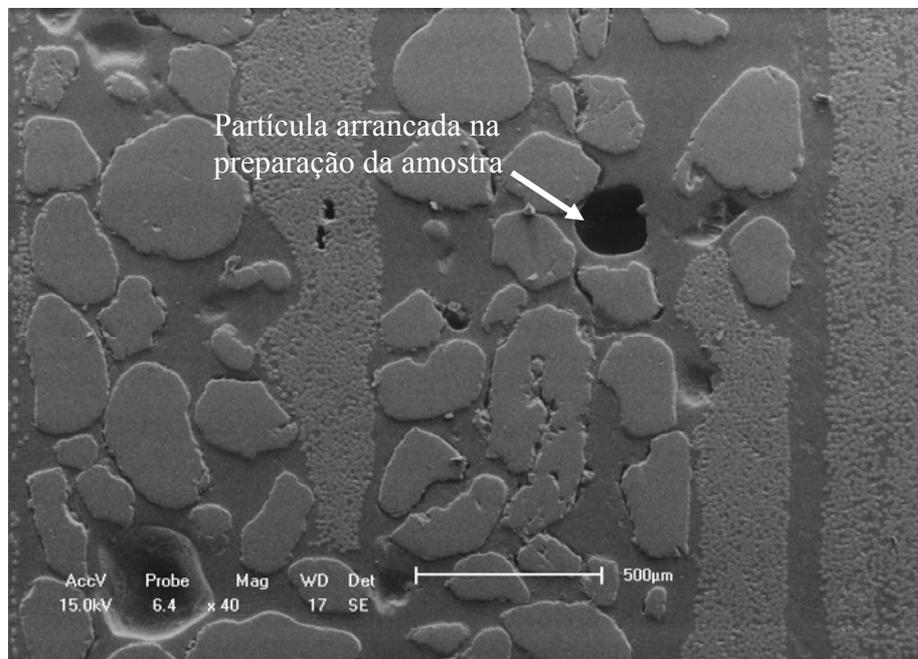


Figura 47: Laminado após o carregamento hidrostático (plano longitudinal).

Em uma análise mais aprofundada foi verificada a presença de falhas na interface areia-matriz nas amostras preparadas após o carregamento hidrostático. Na figura 48 é

apresentado um exemplo destas situações e a figura 49 mostra uma ampliação da trinca para observação de detalhes.

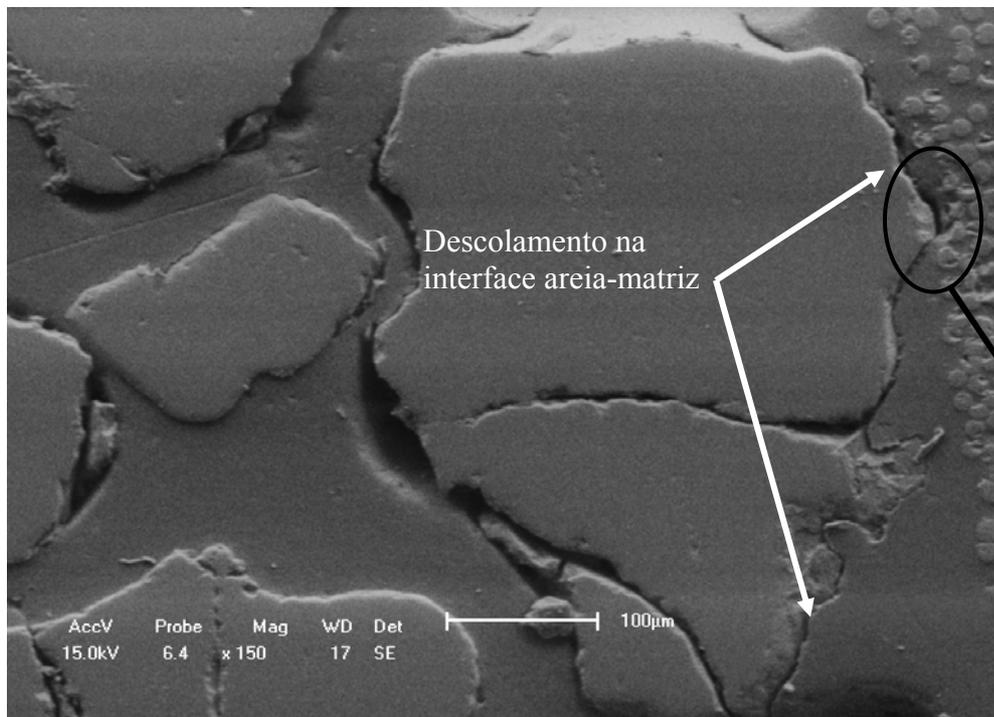


Figura 48: Descolamento na interface areia-matriz (plano longitudinal).

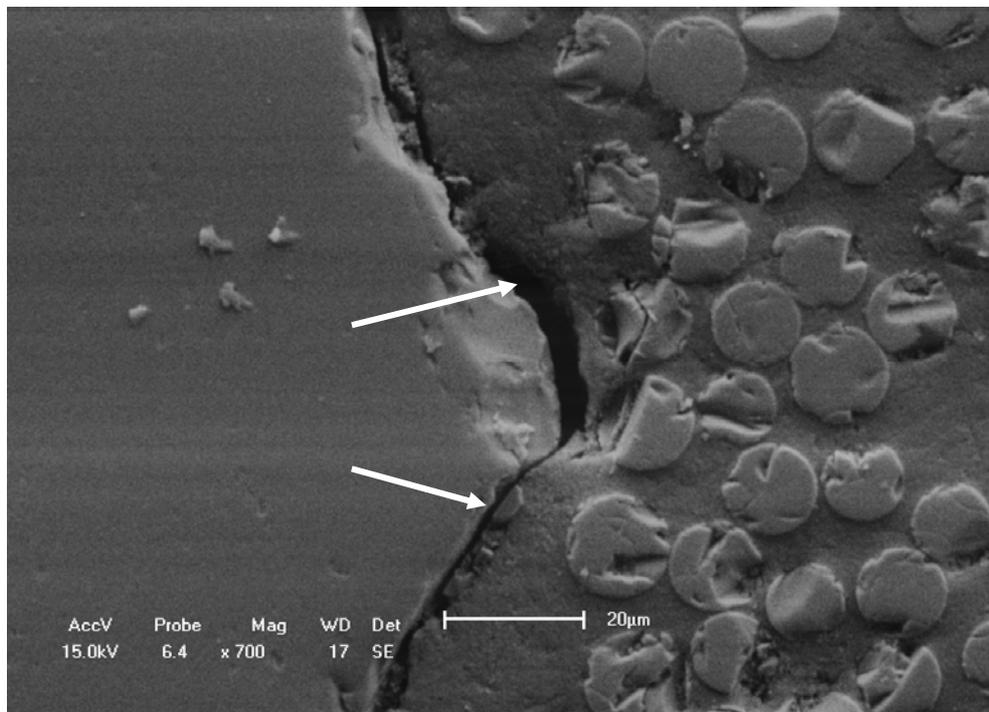


Figura 49: Detalhe da trinca na interface areia-matriz (plano longitudinal).

As amostras preparadas a partir de corpos-de-prova já ensaiados apresentaram, também, uma tendência maior de arrancamento de grãos durante as etapas de lixamento e polimento. Isso pode ser um resultado do descolamento das partículas, em relação à matriz, em função do carregamento durante o ensaio de pressão hidrostática. No entanto, de modo geral, as amostras dos tubos antes e após o carregamento apresentaram basicamente as mesmas características, mostrando uma boa interface entre a areia e a matriz polimérica.

4.6 Análise Comparativa de Custos

A adição de areia tem como objetivo principal reduzir o custo da tubulação. Como já foi mencionado no item 4.3, a areia substitui o equivalente a 2,43 kg de fio para cada metro de tubo, considerando a tubulação estudada. Outro ponto que causa grande impacto no custo é a velocidade de produção. A areia é adicionada simultaneamente com as camadas de filamento, portanto, o tubo com areia que possui 8 camadas a menos que o tubo sem areia é fabricado em um tempo menor, reduzindo o impacto da MOD (mão de obra direta) no custo final do produto. A tabela 13 apresenta a contribuição percentual de cada componente no custo final do tubo, segundo informações do fabricante. Como a barreira química é semelhante para os dois tubos, os seus constituintes estão apresentados como um único item. Pelo fato de as barreiras químicas terem a mesma composição, independente do tubo, sua representatividade percentual é maior no tubo de menor custo.

Tabela 14: Contribuição percentual de cada componente no custo final dos tubos.

	Tubo A	Tubo B
Componente	Representação percentual no custo final do tubo	Representação percentual no custo final do tubo
Barreira química	35,48 %	25,2 %
Fibras contínuas	12,40 %	22,86 %
Resina	17,55 %	10,66 %
Areia	1,74 %	--
MOD e custos secundários	32,83 %	41,28 %
O tubo A, com areia, tem um custo final 27,8 % menor que o tubo B		

Como pode ser observada na tabela 5 (página 43), a quantidade de resina é praticamente a mesma para os tubos A e B. A diferença é que 2,43 kg de fibra de vidro

contínua é substituído por 2, 72 kg de areia, com o detalhe de que a areia, devidamente limpa e seca, custa menos de 5 % em relação a fibra de vidro. Além do impacto na redução do custo, a utilização de areia é ecologicamente correta, pois substitui uma matéria prima que demanda muita energia para ser produzida (a fibra de vidro). Considerando a redução no consumo de fibra a o aumento na velocidade de produção, o tubo A custa 27,8 % a menos que o tubo B, o que representa uma economia bastante significativa quando se fala em obras de milhões de dólares.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência da areia, como carga de adição, nas propriedades mecânicas de tubulações de plástico reforçado com fibras de vidro. A adição de areia tem a finalidade de aumentar a espessura da parede do tubo para aumentar a rigidez circunferencial, atingindo os requisitos mínimos propostos pelas normas técnicas. Foram realizados ensaios de tração axial e circunferencial, pressão hidrostática e rigidez, análises microscópicas para verificação de possíveis danos causados às fibras durante o processo de fabricação no contato fibra-areia, além de uma análise de custos para demonstrar a vantagem da utilização da areia como carga.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios e das demais análises conduzidas neste trabalho, fica claro que a areia é um material viável para compor a estrutura de tubos de plástico reforçado com fibras de vidro.

Com base nos resultados experimentais pode-se concluir que:

- A resultante de tensão axial foi elevada, ainda que de forma discreta, com a adição de areia;
- A resultante de tensão circunferencial apresentou uma pequena perda com a adição de areia, porém sem comprometer o desempenho do laminado;
- A rigidez foi bastante elevada com a adição de areia, mostrando todo o potencial desta carga para este tipo de estrutura;
- A adição de areia causou uma redução de 17 % na pressão de ruptura, mas todas as amostras apresentaram fator de segurança superior a 4, que é o mínimo exigido por norma. O dispositivo mecânico desenvolvido para medição da variação do perímetro mostrou-se uma ferramenta adequada para medições de deformação em tubulações;
- A análise microscópica mostrou que há ocorrência de danos causados às fibras durante a fabricação, porém em quantidades aparentemente muito pequenas, podendo ser desprezada. Os laminados apresentaram basicamente as mesmas características antes e depois de serem submetidos a carregamento hidrostático;

- A adição de areia representa uma redução de 2,45 kg de fibras de vidro para cada metro de tubo (considerando a configuração do tubo estudado que tem 300 mm de diâmetro nominal e foi projetado para classes de pressão e rigidez de 248 kPa e 1034 kPa respectivamente). Em comparação com outro tubo composto apenas por fibras de vidro e resina e atendendo aos requisitos de norma, a utilização de areia representa uma economia de 27,8 % no preço final do produto, segundo orçamento do fabricante.

Sugestões de Trabalhos Futuros

- Analisar a influência da areia na resistência à fadiga de tubulações de PRFV;
- Testar segmentos de tubos de PRFV com adição de areia no transporte de gás e em outras aplicações na indústria do petróleo;
- Pesquisar novas cargas de adição para compor a estrutura de tubulações em PRFV;
- Analisar o comportamento de tubulações de PRFV com adição de areia na resistência à chama, que é uma grande exigência da indústria do petróleo;
- Realizar análise de tensões numéricas, por exemplo utilizando-se um programa de elementos finitos.

Referências Bibliográficas

- [1] MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos e Estruturas-sanduíche**. Barueri / SP, Ed. Manole, 2005.
- [2] GIBSON, A. G. **Comprehensive Composite Materials: Design and Applications**. 1.ed. Inglaterra: Elsevier, v.6, 2000. Cap. 6.23: Composite materials in the offshore industry.
- [3] AWWA, **Fiberglass Pipe Design Manual – M45**. USA, American Water Works Association, 1999.
- [4] ASTM D2517, **Standard Specification for Reinforced Epoxy Resin Gas Pressure Pipe and Fittings**. American Society for Testing and Materials, 1994.
- [5] ASTM D2310, **Standard Classification for Machine-Made “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1997.
- [6] ASTM D2996, **Standard Specification for Filament-Wound “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1995.
- [7] ASTM D2997, **Standard Specification for Centrifugally Cast “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1995.
- [8] ASTM D3517, **Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pressure Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1996.
- [9] ASTM D3754, **Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Sewer and Industrial Pressure Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1996.
- [10] ASTM D3262, **Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Sewer Pressure Pipe**. American Society for Testing and Materials, 1996.

- [11] Revista **O Empreiteiro**, nº 445, agosto 2006.
- [12] Site **GasNet**, http://www.gasnet.com.br/novo_artigos.asp?cod=1047, acessado em 29 de novembro de 2006.
- [13] Revista **Plástico Reforçado**, n.16, novembro/dezembro 2000.
- [14] NETO, F. L., Pardini, L. C., **Compósitos Estruturais : Ciência e Tecnologia**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.
- [15] MOHITPOUR, M., GLOVER, A., TREFANENKO, B., **Technology Advances Key Worldwide Gas Pipeline Developments**. Oil and Gas Journal, v.26, novembro 2001.
- [16] SILVA, C. D., **Influência da Presença de Fibras Naturais em Compósitos Híbridos Tipo Sanduíche**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, outubro 2003.
- [17] HAGE, E. Jr., **Compósitos e Blendas Poliméricas**. Campinas, Instituto Latino Americano e IBM Brasil, 1989.
- [18] HULL, D., **Introduction to Composite Material**. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [19] MANO, E. B., **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1991.
- [20] FONSECA, V. M., **Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas em compósitos Poliéster/sisal Quimicamente Tratados**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1998.

- [21] KELLY, A. Mileiko, S. T., **Fabrication of Composites**. Handbook of Composites, Vol. 4, Nort Holland, 1893.
- [22] TAVARES, R. N., Aquino, E. M. F., **Controle da Moldagem à Vácuo Melhora a Qualidade das Peças de Plástico Reforçado**. Plástico Industrial, Vol. 04/dezembro, 1999.
- [23] AQUINO, E. M. F., **Strength/Stiffness Study in Composite Laminated Tubes**. International Congress on Metallurgy and Materials Technology, São Paulo, 1997.
- [24] FREIRE Jr, R. C. S., **Estudo da Prevenção de Falha por Fadiga em Laminados de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.
- [25] AQUINO, E. M. F., **Estudo do Impacto de Baixa Velocidade em Placas Sanduíche de Plástico Reforçado**. V CEM/NNE - Congresso de Engenharia Mecânica, Ceará, 1998.
- [26] AQUINO, E. M. F., **Identificação do Modo de Fratura de Compósitos Poliéster – Vidro-E**. 13º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Paraná, 1998.
- [27] AQUINO, E. M. F., Andrade, R. J. B. G., **Propriedades Mecânicas e Mecanismos de Dano em Compósitos Fibrosos Tipo Sanduíche**. XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. São Paulo, 1999.
- [28] MARGARIA, G., Aquino, E. M. F., **Influence of Moisture on the Mechanical Properties of Polyester/Fiber glass-E Composite**. Second International Congress on Metallurgy and Materials, São Paulo, 1997.
- [29] NASCIMENTO, R. M., Aquino, E. M. F., **Estudo da Umidade na Resistência e Fratura de Compósitos Tubulares**. IV Congresso Norte –Nordeste de Engenharia Mecânica N/NE, Recife, 1996.
- [30] POMIÈS, F., Carlsson, L. A., Gillespie J. W., **Marine Environmental Effects on Polymer Matriz Composites**. Composite Material: Fatigue and Fracture, Vol. 5, 1995.

- [31] SREEKALA, M. S., Kumaran, M. G., Thomas, S., **Water Absorption in Oil Palm Fiber Reinforced Phenol Formaldehyde Composites**. Composites Part A, Vol. 33, 2002.
- [32] HERAKOVICH, C. T., **Mechanics of Fibrous Composites**, 1997.
- [33] NAKAMURA, T., Wu, L. C., **Effects of Ply Arrangement on Compressive Failure of Layered Structures**. Engineering Fracture Mechanics, 2000.
- [34] REIFSNIDER, K. L., **Damage in Composite Materials**. 1982.
- [35] LIN, T. L., Jang, B. Z., **Fracture Behavior of Hybrid Composites Containing Both Short and Continuous Fibers**. Polymer Composites. V. 11, 1990.
- [36] ROSENOW, M. W. K., **Wind Angle Effects in Glass Fiber-Reinforced Polyester Filament wound pipes**. Composites, 1984.
- [37] XIA, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., **Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure**. Elsevier, Japan, 2001.
- [38] XIA, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., **Analysis of Filament-Wound Fiber-Reinforced Sandwich Pipe Under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading**. Elsevier, Japan, 2001.
- [39] PERREUX, D., Thiebaud, F., Farines, L., Uskokovic P. S., **Investigation on the Static and Fatigue Failure of Bi-directional Composite Pipes**. Advanced Materials and Processes Materials Science Forum, 2005.
- [40] CHEKALKING, A. A., Babushkin, A. V., Kotov, A. G., Shakleina, S. E., **Long-term Durability of Glass-Fiber-Reinforced Composites Under Operation in Pulp and Reactant Pipelines**. Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 3, 2003.
- [41] FARSHAD, M., **Determination of the Long-Term Hydrostatic Strength of Multilayer Pipes**. Elsevier, Switzerland, 2005.

- [42] NATSUKI, T., Takayanagi H., Tsuda, H., **Prediction of Bending Strength for Filament-Wound Composite Pipes**. JOURNAL OF REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Japão, 2003.
- [43] SALIBI, Z., **Performance of Reinforced Thermosetting Resin Pipe Systems in Desalination Applications: a Long-term Solution to Corrosion - The Arabian Gulf Example**. Elsevier, Lebanon, 2001.
- [44] ANSI/AWWA C950., **Standard for Fiberglass Pressure Pipe**. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 2001.
- [45] LEE, D. G., Chin, W. S., Kwon, J. W., Yoo, A. K., **Repair of Underground buried Pipes with Resin Transfer Molding**. Elsevier, Korea, 2002.
- [46] CARVALHO, A. **Fiberglass x Corrosão**. SP, 1992.
- [47] CONTANT, S., Lona, L. M. F., Calados, V. M. A., **Desenvolvimento de Tubos por Filament Winding: Um Estudo Através de Redes Neurais**. Bol. téc. Petrobras, Rio de Janeiro, jan./ mar., 2004.
- [48] TARNOPOL'SKII, Y. M., KULAKOV, V. L., MUNGALOV, D. D., **Composites in Offshore Technology in the Next Century**. Mechanics of Composite Materials, v.35, n.5, 1999.
- [49] BOOTHBY, P. J., JOHNSTONE, C. D., **Fiber-reinforced Caissons for Offshore Applications**. Composite Structure, v.38, n.1-4, 2003.
- [50] KITCHING, R., TANG, W. M., **Comparasion of Glass Reinforced Plastic T-junction/straight Pipe Combinations for Offshore Use**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v.71, p.263-283, 1997.

- [51] SOUTHAM, D., **Filamet Wound Pipe, an Economic Solution**. Reinforced Plastics, julho/agosto 2000.
- [52] BANNISTER, M., **Challenges for Composites in the Next Millennium - a Reinforcement Perspective**. Composites: Part A, v. 2, 2002.
- [53] Revista **High-Performance Composites**, Março, 2006.
- [54] Site **Clube do Petróleo e do Gás**, <http://www.feippetro.com.br/feippetro/anteriores/feippetro2003/edra.html>, acessado em 25 de junho de 2006.
- [55] TAHERI, F., Cheraghi, N., Zou, G. P., **Fluid-Induced Vibration of Composite Natural Gas Pipelines**. Elsevier, Canada, 2004.
- [56] ASHBY, M. F., **Materials Selection in Mechanical Design**. Great Britain, Ed. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [57] Site **Transpetro**, <http://www.transpetro.com.br/negocios/dutosTerminais/gasodutosManual.shtml>, acessado em 23 de novembro de 2006.
- [58] ASTM D2412, **Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading**. American Society for Testing and Materials, 1996.
- [59] BARROS, G. A., Ferreira, E. P. C., Melo, J. D. D., **Mechanical Properties of Fiberglass Pressure Pipes with Siliceous Sand Filler**. 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, 2005.
- [60] REBEIZ, K. S., Fowler, D. W., **Flexural Strength Reinforced Polymer Concrete Made with Recycled Plastic Waste**. ACI Structural Journal, 1996.
- [61] Site **Fabricação de Cimento**, <http://www.cienciaquimica.hpg.ig.com.br/interessante/cimento/cimento.htm>, acessado em 4 de agosto de 2006.

- [62] NIELSEN, L. E., **Mechanical Properties of Polymers and Composites**. Marcel Dekker Inc., Vol. 2, New York, 1974.
- [63] REIS, J. M. L., **Mechanical Characterization of Fiber Reinforced Polymer Concrete**. Materials Research, Vol. 8, RJ, Brasil, 2005.
- [64] ANISKEVICH, K., Hristova, J., Jansons, J., **Sorption Characteristics of Polymer Concrete During Long-Term Exposure to Water**. Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 4, 2003.
- [65] MAKSIMOV R. D., Jirgens, L. A., Plume, E. Z., Jansons, J. O., **Water Resistance of Polyester Polymer Concrete**. Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 2, 2003.
- [66] REIS, J. M. L., Ferreira, A. J. M., **Fracture Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer Concrete**. Elsevier, Portugal, 2002.
- [67] REIS, J. M. L., Ferreira, A. J. M., **Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced with Short Carbon and Glass Fibers**. Elsevier, Portugal, 2004.
- [68] SOUSA, L. M., Reis, J. M. L., Ferreira, A. J. M., **The Effects of Atmospheric Exposure on the Fracture Properties of Polymer Concrete**. Elsevier, Portugal, 2004.
- [69] MUTHUKUMAR, M., Mohan, D., Rajendran, M., **Optimization of Mix Proportions of Mineral Aggregates Using Box Behnken Design of Experiments**. Elsevier, India, 2002.
- [70] SOUSA, L. M., Reis, J. M. L., Ferreira, A. J. M., **Characterization of Polymer Concrete made with Recycled Aggregate**. DEMEGI, Portugal.

- [71] GORNINSKI, J. P., Molin, D. C. D., Kazmierczak, C. S., **Study of the Modulus of Elasticity of Polymer Concrete Compounds and Comparative Assessment of Polymer Concrete and Portland Cement Concrete.** Pergamon, Brasil, 2004.
- [72] RIBEIRO, M. C. S., Reis, J. M. L., Ferreira, A. J. M., **Thermal Expansion of Epoxy and Polyester Polymer Mortars—Plain Mortars and Fibre-Reinforced Mortars.** Elsevier, Portugal, 2003.
- [73] HOFFMAN, K., **Applying the Wheatstone Bridge Circuit.** Hottinger Baldwin Messtechnik, 1986.

Apêndice 1

Principais normas para dimensionamento de tubulações em PRFV:

- **ASTM D2310:** *Standard Classification for Machine-Made “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe* – Especifica a fabricação de tubos em PRFV para aplicações com pressão.
- **ASTM D2996:** *Standard Specification for Filament-Wound “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe* – Especificações para Tubos em PRFV fabricados pelo processo de filamento.
- **ASTM D2997:** *Standard Specification for Centrifugally Cast “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe* – Especificações para Tubos em PRFV fabricados pelo processo de centrifugação.
- **ASTM D3517:** *Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pressure Pipe* – Especificações para Tubos em PRFV, com diâmetro variando de 200 a 3600 mm, com ou sem adição de areia e fabricados com resinas poliéster ou epóxi, para sistemas de distribuição de água.
- **ASTM D3754:** *Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Sewer and Industrial Pressure Pipe* – Especificações para Tubos em PRFV, com diâmetro variando de 200 a 3600 mm, com ou sem adição de areia e fabricados com resinas poliéster ou epóxi, para sistemas de esgoto e transportes de resíduos e produtos industriais.
- **ASTM D3262:** *Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Sewer Pressure Pipe* – Especificações para Tubos em PRFV, com diâmetro variando de 200 a 3600 mm, com ou sem adição de areia e fabricados com resinas poliéster ou epóxi, para sistemas de esgoto.
- **ASTM D2517:** *Standard Specification for Reinforced Epoxy Resin Gas Pressure Pipe and Fittings* – Especificações para fabricação de tubos em PRFV com resina epóxi, para aplicações na distribuição de gás natural e outros combustíveis gasosos derivados do petróleo.
- **API 15LR:** *Specification for Low Pressure Fiberglass Line Pipe* – Especificações para tubos com diâmetros de 50 a 300 mm fabricados com resinas epóxi ou poliéster, para serem utilizados na indústria do petróleo com pressões cíclicas de até 6,895 kPa.

- **API 15HR:** *Specification for High Pressure Fiberglass Line Pipe* – Especificações para tubos com diâmetros de 50 a 300 mm fabricados com resinas epóxi ou poliéster, para serem utilizados na indústria do petróleo com pressões maiores que 6,895 kPa.
- **API 15AR:** *Specification for Fiberglass Tubing*. Especificações para tubos com 115 mm de diâmetro, utilizados na indústria do petróleo.
- **AWWA C950:** *Standard for Fiberglass Pressure Pipe* – Especifica a fabricação e testes para tubos e conexões em PRFV para sistemas de transmissão de água, com diâmetro variando de 25 a 3600 mm e para instalações aéreas e enterradas.
- **BS 6464:** *British Standard Specification for Reinforced Plastics Pipes, Fittings and Joints for Process Plants*.
- **BS 7159:** *Design and Construction of Glass Reinforced Plastics (GRP) Piping Systems for Individual Plants or Sites*. Especificações para tubos aplicáveis a indústria química.

Apêndice 2



Dehnungsmeßstreifen
Strain Gauges
Jauges d'extensométrie

Typ
US-Type **6/120LY13**

Stückzahl
Quantity
Quantité **10** mit ohne

mit ohne Applikationshilfe
avec sans Application aid
Support d'aide à l'application

Widerstand Resistance Résistance	120 [Ω]	+ 0.35 [%]	- 0.35 [%]	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor Coefficient de température du facteur k	126 ± 10 [10 ⁻⁶ /°C]
k-Faktor Gauge factor Facteur k	2,10	± 1	[%]	Artikel Nr. Part No. No. de Réf.	1-LY13-6/120
Querempfindlichkeit Transverse Sensitivity Sensibilité transverse			-0.1 [%]	Folienlos Lot Lot de la feuille	A249/10/01
			- [%]	Herstellungslot Batch Lot de fabrication	812007259

Temperaturkompensation: Angepaßt für
Temperature Compensation: Compensated for
Compensation de température: Compensation pour

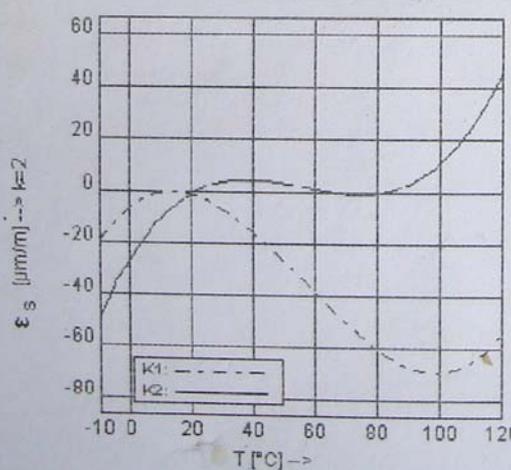
α = 23 [10⁻⁶/°C]

Stahl
Steel
Acier

Alumi-
nium

Sonstige
Other
Autre

Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an.
All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number.
Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.



$\epsilon_s(T) = -6.3 + 0.94 T - 3.82 \cdot 10^{-2} T^2 + 2.25 \cdot 10^{-4} T^3 + 0.0333 \cdot L \cdot (T-20) \mu\text{m/m} \pm 0.3 (\mu\text{m/m}) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Temperaturgang der Dehnungsmeßstreifen bei Applikation auf Werkstoffen mit umseitig angebenem Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.
Kennlinie 1: DMS ohne Anschlußbändchen
Kennlinie 2: DMS mit Anschlußbändchen (30 mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm

The **Thermal output** refers to strain gauges when bonded to materials with the coefficient of thermal expansion α given overleaf. Values are measured at a continuous temperature progression.
Curve 1: Gauges without connecting leads
Curve 2: Gauges with connecting leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, then the thermal output lies between curve 1 and 2. The numeric approximation allows the calculation of the thermal output for any lead length.
T = temperature in °C L = simple lead length in mm

Comportement en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont les coefficients de dilatation thermique α sont indiqués au verso. Mesuré au cours d'une variation continue de la température.
Courbe 1: Jauges sans fils de sortie
Courbe 2: Jauges avec fils de sortie (longueur unitaire du fil de 30 mm). Lorsque les fils sont plus courts, le comportement en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. Le dernier terme de l'équation détermine avec exactitude l'influence des fils de sortie.
T = température en °C L = longueur unitaire des fils en mm

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK
HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH
Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt
Tel.: +49-18 05-22 32 49; Telefax: +49/61 51/80 35 86
<http://www.hbm.com>

wt 09.01 - 30.0 poch

Apêndice 3

Specifications

Type	P8AP						
Accuracy class	0,3						
Mechanical input quantities							
Measuring span	bar	10	20	50	100	200	500
Lower range value (abs.)	bar	0					
Natural frequency of the diaphragms	kHz	12	16	29	60	86	134
Attenuation of the diaphragms	1	0,01					
Operating range at 23 °C	%	0...150					
Overload limit at 23 °C	%	175					
Test pressure	%	175					
Destructive range	%	>200					
During dynamic loading	%	100					
maximum pressure	%	100					
permissible vibration bandwidth (as per DIN 50 100)	%	70	70	85	95	95	60
Material for parts which come into contact with the measurement medium: inner surface pressure connection		stainless steel 1.4542 stainless steel 1.4301					
Materials for parts which come into contact with the environment		stainless steel 1.4301, polyethylene					
Dead volume with tube *) without pressure connection	mm ³	1110	1100	1090	1060	1100	1020
	mm ³	(410)	(400)	(390)	(360)	(400)	(320)
Control volume	mm ³	2		1.5		0.5	0.3
Output characteristics							
Nominal (rated) sensitivity	mV/V	2 ± 2%					
Input resistance at 23°C	Ω	420 (+180/-120)				370 (+130/-70)	
Output resistance at 23°C	Ω	330 (+90/-30)					
Nominal (rated) range of the excitation voltage (rms value)	V	0.5...5		0.5...12			
Characteristic curve deviation (starting point setting)	%	0,3					
Repeatability as per DIN 1319	%	± 0,1					
Temperature effect on the zero signal relative to the measuring span, per 10 K, in the nominal (rated) temperature rang	%	± 0,3			< ± 0,2		
Temperature effect on the sensitivity relative to the actual value, per 10 K, in the nominal (rated) temp. rang	%	± 0,3					
Ambient conditions		Option A5		Option T2	Option T9	Option TH	
Nominal (rated) temperature range	°C	-10...+70			-10...+70		
Operating temperature range	°C	-40...+80			-40...+140		
Storage temperature range	°C	-50...+85			-50...+140		
Impact resistance (type-tested to DIN IEC 68)	m/s ²	800					
Degree of protection (as per DIN 40050, IEC 68)		IP 67					
Connection cable length, free end **)	m	5					
Weight, approx. (incl. cable)	g	250					

*) For the other pressure connections, see options; take the dead volume and the material from the "Connector elements" section on page 3.

***) For Option 3, Code T2: 1.5 m