

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

ANDERSON NOGUEIRA VIDAL

**ANÁLISE DA VIDA ESTRUTURAL DE TUBOS DE PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO (PRFV)
DESTINADOS AO SANEAMENTO BÁSICO COM
EXPECTATIVA MÍNIMA DE CINQUENTA ANOS**

**Belo Horizonte
Julho de 2014**



ANDERSON NOGUEIRA VIDAL

**ANÁLISE DA VIDA ESTRUTURAL DE TUBOS DE PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO (PRFV)
DESTINADOS AO SANEAMENTO BÁSICO COM
EXPECTATIVA MÍNIMA DE CINQUENTA ANOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro

Belo Horizonte
Julho de 2014

Vidal, Anderson Nogueira.

V648a Análise da vida estrutural de tubos de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) destinados ao saneamento básico com expectativa mínima de cinquenta anos / Anderson Nogueira Vidal. – 2014.

107 f. : il. ; tabs. ; grafs. –

Orientadora: Ivete Peixoto Pinheiro.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2014.

Bibliografia.

1. Tubos. 2. Plástico reforçado com fibra de vidro. 3. Materiais compósitos. 4. Saneamento. 5. Durabilidade (Engenharia). I. Pinheiro, Ivete Peixoto. II. Título.

CDD: 620.118



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***“ANÁLISE DA VIDA ESTRUTURAL DE TUBOS DE
PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO
(P.R.F.V) DESTINADOS AO SANEAMENTO BÁSICO
COM EXPECTATIVA MÍNIMA DE CINQUENTA
ANOS”***

Autor: Anderson Nogueira Vidal

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro (ORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Nilton da Silva Maia
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Alexandre Rangel de Sousa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 25 de Julho de 2014.

À minha esposa Maisa e aos meus filhos
João Anderson e Maria Fernanda, pelo amor,
incentivo, auxílio e compreensão durante os
momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, por décadas de dedicação, amor, incentivo e apoio incondicional.

À prof. Dra. Ivete Peixoto Pinheiro pela disponibilidade, apoio, incentivo e orientação.

Aos professores do curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelo aprendizado proporcionado e pela oportunidade de crescer.

À Associação Latino Americana de Materiais Compósitos pelas informações disponibilizadas.

À Reichhold do Brasil pelo apoio e suporte técnico.

À Presidência da Açoforja pela disponibilidade e oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos Alysson Moreira Alves, Anderson Alexandre da Silva, Antônio Carvalho Filho, Cid Cabeza, Cristiano Lima Netto, Domingos Amaral, Eduardo Lima Netto, Fábio Rocco, Fernando Lima Netto, Gerson Marinucci, Paloma Soares, Reginaldo José Domingues, Rudy Mollo Júnior, Valdir Eduardo e Wander Wandebildes pela ajuda indispensável e a todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para que eu tivesse essa oportunidade.

RESUMO

Um dos maiores problemas existentes no Brasil e demais países do mundo refere-se à falta de saneamento básico, ou seja, falta de água tratada, de coleta e transporte de esgoto sanitário. Para resolver esse problema, faz-se necessário a realização de grandes obras de infraestrutura de saneamento básico, as quais devem ser projetadas contemplando uma vida útil mínima de trinta anos. A existência de grande número de materiais empregados na fabricação de tubulações de saneamento básico (Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), aço, ferro fundido dúctil, concreto, cerâmica e Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV)), seja em redes de adução de água ou de esgotamento sanitário, vem sempre objetivar a melhoria de qualidade de vida do ser humano. Por isso, em função da alta concorrência de diversos tipos de materiais de tubulações no mercado, torna-se vital estudar a vida estrutural de tubos de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV), com expectativa mínima de cinquenta anos, destinados ao saneamento básico, nas obras de infraestrutura de redes de adução de água e de esgotamento sanitário, visando, conseqüentemente, o aperfeiçoamento do conhecimento técnico relativo aos tubos de PRFV e a sua maior utilização nas obras de infraestrutura. Este trabalho verifica a expectativa mínima de cinquenta anos de vida útil ao aplicar metodologias que consistem nas realizações de ensaios mecânicos destrutivos de longa duração em corpos de prova de tubos de PRFV por mais de 10.000 (dez mil) horas, de acordo com as normas ASTM D 2992 06 – Procedimento B e ASTM D 3681 06. Esses ensaios são comumente conhecidos como ensaios de HDB (*Hydrostatic Design Basis*) e *Strain Corrosion Design Basis*. Os pontos de falhas foram registrados e plotados em gráfico de tempo x alongamento circunferencial (log x log), os quais foram ajustados para uma reta de regressão, de modo que o alongamento circunferencial de falha foi extrapolado para 438.000 horas, ou seja, foi extrapolado e definido para cinquenta anos de expectativa mínima de utilização dos tubos de PRFV. Os resultados mostraram que as metodologias utilizadas são adequadas para verificar e prever a vida estrutural dos tubos de PRFV para longo prazo, cinquenta anos, bem como evidenciaram que os valores de HDB e *Strain Corrosion* encontrados são satisfatórios e compatíveis, quando comparados aos outros ensaios de HDB e *Strain Corrosion* realizados no mundo em tubos de PRFV fabricados pelo mesmo processo produtivo de enrolamento contínuo (*Filament Winding – Tecnologia Flowtite*).

Palavras-chave: Plástico Reforçado com Fibra de Vidro, Tubos, HDB, Resistência à pressão hidrostática interna de longa duração em tubos de PRFV, *Strain Corrosion*, expectativa mínima de vida de cinquenta anos de tubos de PRFV.

ABSTRACT

One of the biggest problems in Brazil and other countries around the world refers to the lack of sanitation or the lack of clean water and collection and transport of sewage. In order to solve this problem, it is necessary to carry out major infrastructure projects of sanitation, which should be designed considering the useful life of at least thirty years. There are a large number of materials used in the manufacture of sanitation pipes (Polyvinyl Chloride (PVC), High Density Polyethulene (PEAD), steel, ductile iron, concrete, ceramics and Glass Reinforced Plastic (GRP)), either in piping system of water supply or sewage comes always aim to improve the quality of human life. Therefore, due to the high competition of various types of materials on the piping market, so it is vital the study of the piping structural life of Glass Reinforced Plastic (GRP) with minimum expectation of fifty years for sanitation, infrastructure networks (water supply and sewage), thus aiming at improvement of technical knowledge on the GRP pipes and their increased use in infrastructure projects. This work verifies the minimum expectation of fifty years of service life by applying methodologies comprising the achievements of destructive mechanical testing of long-term specimens of GRP pipes for more than ten thousand (10,000) hours, according to ASTM D 2992 06 - Procedure B and ASTM D 3681 06 Standards. These tests are commonly known as HDB (Hydrostatic Design Basis) and Strain Corrosion Design Basis. The points of failure were recorded and plotted on graph of time of failure versus circumferential elongation (log x log), which were set for the regression line, so that the circumferential elongation of failure was extrapolated to 438,000 hours, or was and extrapolated set to fifty years of expected minimum use of FRP pipes. The results showed that the methods used are appropriate to verify and predict the structural life of GRP pipes for the long term of fifty years, and demonstrated that the values of HDB and Strain Corrosion found are satisfactory and consistent when compared to others tests of HDB and Strain Corrosion performed worldwide in GRP pipes manufactured by the same production process of continuous winding (Filament winding – Flowtite Technology).

Keywords: Glass Reinforced Plastic, Pipes, HDB, Resistance to internal hydrostatic pressure on long-term GRP pipes, Strain Corrosion, minimum life expectancy of fifty years of GRP pipes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matéria prima utilizada nos compósitos por segmento no ano de 2013.	20
Figura 2 – Faturamento com compósitos por segmento no ano de 2013.....	21
Figura 3 – Número de empregados diretamente envolvidos com compósitos por segmento no ano de 2013.	21
Figura 4 – Matéria prima utilizada nos compósitos por processo produtivo no ano de 2013..	22
Figura 5 – Corte longitudinal de forno típico de fusão para fibras de vidro.....	26
Figura 6 – Forno de fusão para fibras de vidro.	26
Figura 7 – Tratamento superficial dos filamentos e enrolamento em tortas.....	27
Figura 8 – Enroladeira para fibras de vidro.....	28
Figura 9 – Fabricação do <i>roving</i> de fibras de vidro para laminação com pistola.....	29
Figura 10 – <i>Roving</i> de fibra de vidro para laminação com pistola.	30
Figura 11 – <i>Roving</i> filamentar ou <i>roving</i> para enrolamento helicoidal de fibra de vidro.....	30
Figura 12 – Processo de Esterificação - Grupos funcionais ácido e álcool geram grupo éster	31
Figura 13 – Estrutura química do etileno glicol.	32
Figura 14 – Estrutura química do ácido fumárico.	32
Figura 15 – Processo de enrolamento contínuo (<i>filament winding</i>) de fabricação de tubos de PRFV	38
Figura 16 – Processo de enrolamento contínuo (<i>filament winding</i>) de fabricação de tubos de PRFV	39
Figura 17 – Junta elástica (JE) para tubos de plástico reforçado com fibra de vidro	40
Figura 18 – Estocagem de tubos de plástico reforçado com fibra de vidro.	41
Figura 19 – Lâminas de tubo comercial de plástico reforçado com fibra de vidro	47
Figura 20 – Corte transversal da parede de tubo comercial <i>Hoop Chop</i>	48
Figura 21 – <i>Ensaio de Strain Corrosion</i> conforme ASTM 3681 06	51
Figura 22 – Ruptura da interfase com descolamento entre as fibras e a resina (aumento de 400X)	54
Figura 23 – Detalhes das lâminas de construções dos corpos de provas de HDB e <i>Strain Corrosion</i>	58
Figura 24 – Laboratório de ensaios de <i>Hydrostatic Design Basis</i> (H.D.B.) para tubos de PRFV na Empresa “A”.....	60
Figura 25 – Laboratório de ensaios de <i>Strain Corrosion</i> para tubos de PRFV na Empresa “A”.	63
Figura 26 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) – Modelo Superscan SSX-550. ...	69
Figura 27 – Manômetro com a pressão de 51,5 kgf/cm ² (5,05 MPa) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 48).....	71
Figura 28 – Falha por exsudação após 2.943,29 horas de ensaio de HDB (CP 48)	72
Figura 29 – Manômetro com a pressão de 50,0 kgf/cm ² (4,90 MPa) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 40).....	72
Figura 30 – Falha por exsudação após 4.958,63 horas de ensaio de HDB (CP 40)	73
Figura 31 – Manômetro com a pressão de 43,0 kgf/cm ² (4,22 MPa) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 9).....	73
Figura 32 – Falha por exsudação após 13.222,39 horas de ensaio de HDB (CP 9)	74
Figura 33 – Gráfico relativo ao cálculo do HDB (<i>Hydrostatic Design Basis</i>) pelo método dos mínimos quadrados.....	75
Figura 34 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB.....	78
Figura 35 – Gráfico sumário: ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB.....	78
Figura 36 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB ..	80

Figura 37– Gráfico sumário: ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB	80
Figura 38 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 01	83
Figura 39 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 02	83
Figura 40 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 03	83
Figura 41 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 01	84
Figura 42 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 02	84
Figura 43 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 03	84
Figura 44 – Falha por ruptura após 114,11 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 18).....	86
Figura 45 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion registrando o aumento da falha (CP 18)...	87
Figura 46 – Falha por ruptura após 284,33 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 38).....	87
Figura 47 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion no momento da falha (CP 38).....	87
Figura 48 – Falha por ruptura após 1270,54 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 20)....	88
Figura 49 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion no momento da falha (CP 20).....	88
Figura 50 – Gráfico relativo ao cálculo do Strain Corrosion pelo método dos mínimos quadrados	89
Figura 51 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion	92
Figura 52 – Gráfico Sumário: Ensaio de tração axial em amostras de tubos de StrainCorrosion	92
Figura 53 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	94
Figura 54 – Gráfico Sumário: Ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	94
Figura 55 – Resultado do ensaio de compressão axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	96
Figura 56 – Gráfico Sumário: Ensaio de compressão axial em amostras de tubos de Strain Corrosion.....	96
Figura 57 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 01	99
Figura 58 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 02.....	100
Figura 59 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 03.....	100
Figura 60 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 01	100
Figura 61 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 02.....	101
Figura 62 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 03.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições típicas do vidro E tradicional e do vidro E sem boro.....	25
Tabela 2 – Dimensões e tipos de construções dos corpos de provas.....	57
Tabela 3 – Detalhes das lâminas de construções dos corpos de provas.....	57
Tabela 4 – Planejamento de experimentos.....	58
Tabela 5 – Alongamentos mínimos e máximos previstos para os corpos de provas.....	59
Tabela 6 – Cálculo de alongamentos e pressões para 24 tempos de falhas para os grupos A, B, C e D.....	62
Tabela 7 – Alongamentos em função de 24 tempos de falhas para os grupos A, B, C e D.....	66
Tabela 8 – Resultado do ensaio de HDB (<i>Hydrostatic Design Basis</i>) para tubos PRFV.....	70
Tabela 9 – Números de experimentos de HDB realizados comparados aos números de experimentos mínimos por tempo de falha em horas.....	74
Tabela 10 – Cálculo do HDB (<i>Hydrostatic Design Basis</i>) pelo método dos mínimos quadrados com 95% de limite inferior de confiança.....	76
Tabela 11 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB.....	77
Tabela 12 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB..	79
Tabela 13 – Resultado do ensaio de perda por ignição em amostras dos tubos de HDB.....	81
Tabela 14 – Resultado do ensaio de Strain Corrosion.....	85
Tabela 15 – Números de experimentos de Strain Corrosion realizados comparados aos números de experimentos mínimos por tempo de falha em horas.....	89
Tabela 16 – Cálculo do Strain Corrosion pelo método dos mínimos quadrados com 95% de limite inferior de confiança.....	90
Tabela 17 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion	91
Tabela 18 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	93
Tabela 19 – Resultado do ensaio de compressão axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	95
Tabela 20 – Resultado dimensional da amostra do tubo de Strain Corrosion.....	97
Tabela 21 – Resultado do ensaio de rigidez da amostra do tubo de Strain Corrosion.....	98
Tabela 22 – Resultado do ensaio de Perda por ignição em amostras dos tubos de Strain Corrosion.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS – Copolímero de Acrilonitrila Butadieno Estireno
ALMACO – Associação Latino Americana de Materiais Compósitos
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM – American Society for Testing and Materials International
AWWA – American Water Works Association
 B_2O_3 – Óxido de Boro
CaO – Óxido de Cálcio
CDB – Corrosion Design Basis
CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
cm – centímetro
 cm^2 – centímetro quadrado
 $^\circ\text{C}$ – graus Celsius
CS – Coeficiente de Segurança
DNV – Det Norske Veritas
FRP – Fiber Reinforced Plastic
g – grama
GRP – Glass Reinforced Plastic
h – hora
HDB – Hydrostatic Design Basis
HDT – temperatura de termo distorção
 H_2SO_4 – ácido sulfúrico
JE – Junta Elástica
Kgf – quilograma força
Km – quilômetro
log – logaritmo
m – metro
MEKP – peróxido de metil etil cetona
MgO – óxido de magnésio
 m^2 – metro quadrado

mm – milímetro

MPa – mega Pascal

NBR – Norma Brasileira

Pa – Pascal

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PEAD – polietileno de alta densidade

PRFV – Plástico Reforçado com Fibras de Vidro

PVA – poli(acetato de vinila)

PVC – poli(cloreto de vinila)

RTM – resin transfer molding

SAE – serviços de água e esgoto

SiO₂ – óxido de silício

SN – *stiffness* (Rigidez)

TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná

TEX – unidade de densidade linear de mechas de fibra de vidro

UD - unidirecional

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	JUSTIFICATIVA	18
3.	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVOS GERAIS.....	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	O MERCADO DE PLÁSTICO REFORÇADO DE FIBRAS DE VIDRO NO BRASIL	20
4.2	MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS E USADAS NA FABRICAÇÃO DE TUBOS	22
4.2.1	Fibras de vidro.....	22
4.2.2	Composição do vidro.....	24
4.2.3	Formação dos filamentos	25
4.2.4	Tex	28
4.2.5	Fabricação das fibras	29
4.3	Resinas	31
4.3.1	Aceleradores e Iniciadores	35
4.3.2	Véu de superfície.....	35
4.3.3	Areia	36
4.4	COMPÓSITOS OU PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO.....	36
4.4.1	Compósitos.....	36
4.4.2	Processo de enrolamento contínuo	37
4.5	Tubos de compósitos ou tubos de PRFV para saneamento	39
4.5.1	Exigências da estocagem	41
4.5.2	Exigências do ambiente de uso	42
4.5.3	Exigências estruturais.....	42
4.5.3.1.1	Exigências de estrutura de longo prazo	42
4.5.3.1.2	Exigências de estrutura de curto prazo.....	44
4.6	Vida estrutural e vida funcional dos tubos de PRFV	44
4.7	Determinação das propriedades do tubo de PRFV.....	46
4.7.1	Critérios de cálculo.....	48
4.8	Ensaio de HDB (Hidrostatic Design Basis).....	48
4.9	Ensaio de Strain Corrosion (<i>Corrosion Design Basis</i>).....	50

4.10	Influência das resinas nas propriedades mecânicas (<i>Hydrostatic Design Basis and Corrosion Design Basis</i>).....	52
4.10.1	Os três eventos	53
4.10.2	A interfase e a interface	54
5.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	56
5.1	ENSAIOS REALIZADOS.....	56
5.2	MATERIAIS E CORPOS DE PROVAS	56
5.3	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS DE LONGA DURAÇÃO	59
5.4	DETALHES DOS ENSAIOS DE <i>HYDROSTATIC DESIGN BASIS</i> (HDB).....	59
5.5	DETALHES DOS ENSAIOS DE STRAIN CORROSION	62
5.6	Determinação da espessura mínima para os corpos de prova dos ensaios de <i>Strain Corrosion</i>	64
5.7	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS DE CURTA DURAÇÃO	66
5.7.1	Tração axial dos corpos de provas	66
5.7.2	Tração circunferencial dos corpos de provas.....	67
5.7.3	Compressão axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion	67
5.7.4	Determinação da Rigidez dos tubos de Strain Corrosion	67
5.7.5	Perda por ignição (teores de fibra contínua, fibra picada e resina) dos corpos de provas.....	68
5.7.6	Determinação de Efeito sobre água - Estireno Residual dos corpos de provas.....	68
5.7.7	Determinação de Efeito sobre água – Migração Específica de estireno e diclorometano dos corpos de provas.....	68
5.7.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas	68
6.	RESULTADOS	70
6.1	ENSAIOS EM CORPOS DE PROVAS DOS TUBOS DE HDB	70
6.1.1	Ensaio de HDB.....	70
6.1.2	Tração axial dos corpos de provas dos tubos de HDB	77
6.1.3	Tração circunferencial dos corpos de provas dos tubos de HDB.....	79
6.1.4	Perda por ignição (teores de fibra contínua, fibra picada e resina) dos corpos de provas dos tubos de HDB.....	81
6.1.5	Determinação de efeito sobre água - estireno residual dos corpos de provas.....	82
6.1.6	Determinação de efeito sobre água – migração específica de estireno e diclorometano dos corpos de provas.....	82

6.1.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas de tubos de HDB82	
6.2	ENSAIOS EM CORPOS DE PROVAS DOS TUBOS DE STRAIN CORROSION	85
6.2.1	Ensaio de Strain Corrosion	85
6.2.2	Tração axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion	91
6.2.3	Tração circunferencial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion	93
6.2.4	Compressão axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion	95
6.2.5	Determinação da Rigidez dos tubos de Strain Corrosion	97
6.2.6	Perda por ignição (teores de fibra, resina e areia) dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion	98
6.2.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas de tubos de Strain Corrosion	99
7.	CONCLUSÕES	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1. INTRODUÇÃO

A existência de grande número de materiais empregados em tubulações de saneamento básico, seja em redes de adução de água ou de esgotamento sanitário, conjugados com o grande número de especificações de clientes que determinam a sua utilização ao redor do mundo, mais especificamente no Brasil, demonstram a importância do tema. O avanço tecnológico desses materiais tem ocorrido nos últimos anos devido à interlocução entre as indústrias fabricantes de tubulações e as companhias de saneamento, bem como, devido às questões técnicas e econômicas, principalmente por tratar-se de grandes obras de infraestrutura com vida útil mínima projetada de 30 (trinta) anos.

A seleção de materiais empregados em tubulações destinadas ao saneamento básico está diretamente relacionada aos diâmetros, pressões de trabalho, características hidráulicas, cargas externas que poderão atuar sobre as tubulações, características do terreno onde serão instaladas as tubulações, custos da instalação, custos da manutenção, custos das tubulações e qualidade da água (potabilidade da água em caso de adução de água).

2. JUSTIFICATIVA

A existência de grande número de materiais empregados em tubulações de saneamento básico, seja em redes de adução de água ou de esgotamento sanitário, vem sempre objetivar a melhoria de qualidade de vida do ser humano. A disponibilização de água é fundamental para o consumo humano e para as atividades da indústria e agricultura. Por outro lado, os sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários para o devido tratamento visam assegurar, também, a melhoria de qualidade de vida do ser humano.

Deste modo as companhias de saneamento do Brasil elaboraram especificações para cada tipo de material empregado em tubulações de adução de água (aço, ferro fundido dúctil, PVC, PEAD e PRFV) e de esgotamento sanitário (concreto, cerâmica, aço, ferro fundido dúctil, PVC, PEAD e PRFV). Estas especificações visam propor materiais alternativos e tecnicamente aceitos durante as fases de licitação pública ou pregões eletrônicos para a compra de projetos, materiais, instalações e operações de obras de infraestrutura focadas em saneamento básico.

Em função da alta concorrência no mercado interno, torna-se vital evidenciar tecnicamente a vida estrutural de tubos de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) com expectativa mínima de cinquenta anos e as respectivas propriedades mecânicas dos tubos em PRFV, principalmente para participar ativamente do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), para fornecimento de tubulações em PRFV destinados às obras de infraestrutura de saneamento básico do Governo Federal, bem como, em obras similares dos Governos Estaduais (Companhias de Saneamento) e Municipais (SAE – Serviços de Água e Esgoto).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Determinar a vida estrutural de tubos de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) destinados ao saneamento básico, com expectativa mínima de cinquenta anos, para as aplicações de redes de adução de água e de esgotamento sanitário, visando, conseqüentemente, o aperfeiçoamento e as melhorias das propriedades mecânicas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar e analisar as principais variáveis no processo de determinação da vida estrutural que atendam às especificações externas de utilização dos tubos de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) destinados ao saneamento básico.

Executar os ensaios mecânicos de longa duração para o PRFV.

Caracterizar o PRFV atualmente adotado em aplicações de saneamento.

Propor a utilização ampla das tubulações de PRFV em novos projetos de redes de adução de água e de esgotamento sanitário.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O MERCADO DE PLÁSTICO REFORÇADO DE FIBRAS DE VIDRO NO BRASIL

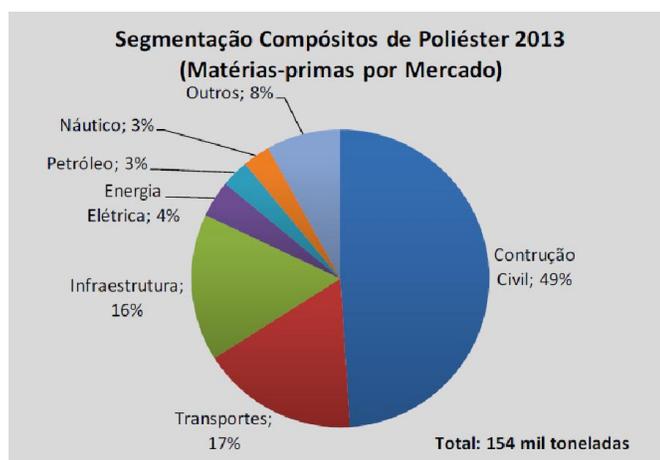
Conforme a Associação Latino Americana de Materiais Compósitos (ALMACO, 2014) que tem como principais objetivos a integração e o desenvolvimento da indústria de compósitos da América Latina e representa toda a cadeia produtiva dos compósitos ou plásticos reforçados com fibras de vidro (PRFV), o setor brasileiro de materiais compósitos faturou R\$3.249 milhões no ano de 2013, alta de 8,9% em comparação ao ano de 2012.

A pesquisa prevê ainda um salto de 11,5% na receita do setor para o ano de 2014, chegando a R\$ 3.623 milhões.

O setor brasileiro específico de materiais compósitos de poliéster faturou R\$2.437 milhões no ano de 2013, alta de 7,3% em comparação ao ano de 2012.

Em 2013, a construção civil liderou o consumo brasileiro de compósitos de poliéster, com 49% do total transformado, à frente de transporte (17%) e infraestrutura (16%), conforme indica a figura 1.

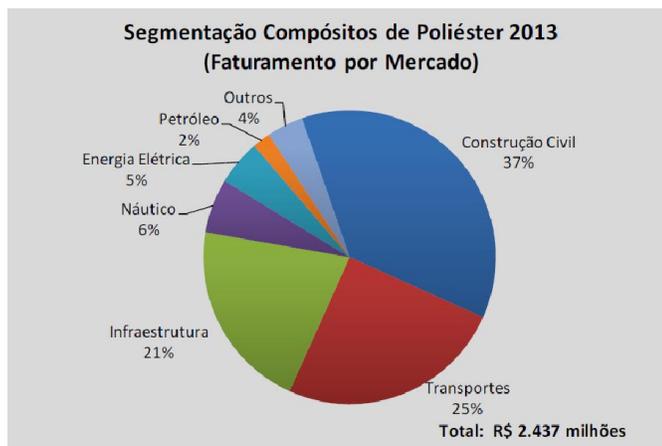
Figura 1 – Matéria prima utilizada nos compósitos por segmento no ano de 2013.



Fonte: ALMACO, 2014.

Em termos de faturamento com compósitos de poliéster, o ano de 2013 apresentou a construção civil liderando com 37% do total faturado, à frente de transporte (25%) e infraestrutura (21%), conforme indica a figura 2.

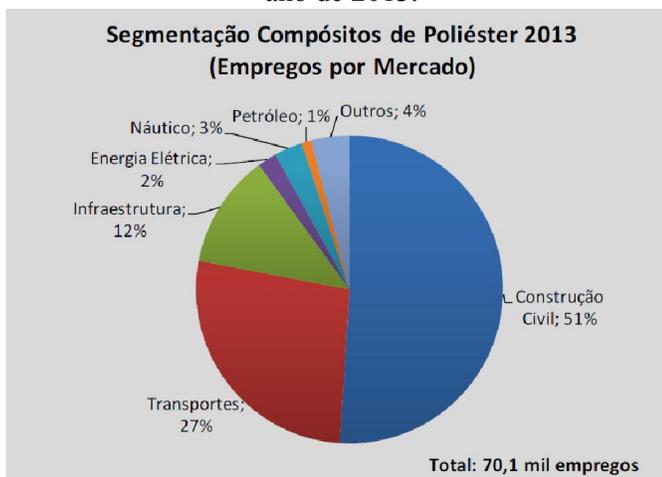
Figura 2 – Faturamento com compósitos por segmento no ano de 2013.



Fonte: ALMACO, 2014.

Abordando o número de empregados diretamente envolvidos no mercado de compósitos de poliéster, o ano de 2013 apresentou a construção civil liderando com 51%, à frente de transporte (27%) e infraestrutura (12%), conforme indica a figura 3.

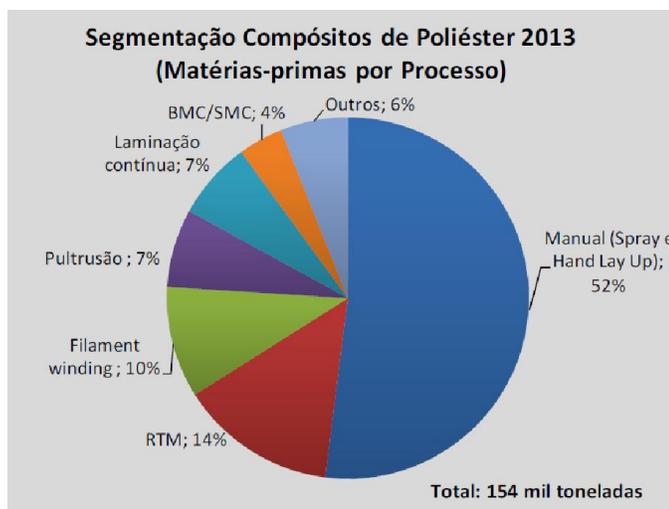
Figura 3 – Número de empregados diretamente envolvidos com compósitos por segmento no ano de 2013.



Fonte: ALMACO, 2014.

Em 2013, o processo produtivo manual (*Spray-up e Hand-lay-up*) liderou a utilização de matéria prima na fabricação de compósitos de poliéster com 52% do total transformado, à frente de RTM (Resin Transfer Molding) com 14% e filament winding com 10%, conforme indica a figura 4.

Figura 4 - Matéria prima utilizada nos compósitos por processo produtivo no ano de 2013.



Fonte: ALMACO, 2014.

Resultantes da combinação entre resinas termofixas e reforços – fibras de vidro, por exemplo, os materiais compósitos de poliéster são conhecidos pelos elevados índices de resistência mecânica e química, bem como pela versatilidade que conta com mais de 40.000 aplicações catalogadas em todo o mundo, desde caixas d'água e tubos a peças de aviões e foguetes.

4.2 MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS E USADAS NA FABRICAÇÃO DE TUBOS

4.2.1 Fibras de vidro

De acordo com Schwartz (1996), Wiebeck (2005) e Carvalho (2014), as fibras de vidro têm grande importância entre os materiais de reforços utilizados pelas indústrias de compósitos. Produzidas industrialmente desde a década de 1940, as fibras de vidro possibilitaram o uso

crescente dos compósitos em aplicações comerciais antes reservadas exclusivamente aos metais e suas ligas. As principais características das fibras de vidro são:

- baixo coeficiente de dilatação térmica, que dá aos compósitos a estabilidade dimensional compatível com a dos metais. Essa propriedade é essencial para os componentes de compósitos que trabalham em conjunto com peças de aço em aplicações eletro eletrônicas e automotivas;
- altas propriedades mecânicas, tal como o alto módulo de elasticidade, quando comparado às resinas, que dá aos compósitos a rigidez necessária para uso em aplicações estruturais. Entretanto, quando comparado com as fibras de carbono, as fibras de vidro têm baixo módulo de elasticidade;
- retenção de propriedades mecânicas em altas temperaturas, tal como a retenção do módulo de elasticidade em altas temperaturas, que permite o uso dos compósitos até os limites impostos pela resina. A temperatura de uso dos compósitos é limitada pela distorção térmica da matriz polimérica.

De acordo com Carvalho (2014), essas propriedades das fibras devem ser comparadas com as das resinas poliéster e viniléster. Por exemplo, o módulo de elasticidade das fibras de vidro (70 GPa) é pelo menos 20 vezes maior que o das resinas poliéster ou viniléster (3 GPa). Da mesma maneira, o coeficiente de dilatação térmica das fibras de vidro ($5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) é pelo menos 10 vezes menor que o dessas resinas ($60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Além dessas propriedades, as fibras de vidro são particularmente atraentes pela facilidade de processamento e pelo baixo custo em relação a outras fibras, como as de carbono.

Os plásticos reforçados retêm todas as propriedades desejáveis dos não reforçados, como resistência à corrosão, baixo custo de processamento, liberdade de projeto e outras. As deficiências dos plásticos, como baixa estabilidade dimensional, baixa rigidez e, para alguns plásticos, baixa tenacidade, são eliminadas pela inclusão de fibras de vidro. Portanto, parece natural que os compósitos sejam feitos com fibras de vidro (HOLMES, 1983).

De acordo com Carvalho (2014), pode-se dizer que as modificações obtidas com a inclusão das fibras transformam os plásticos de baixo custo em materiais de engenharia, dotados de propriedades muito apreciadas, como:

- alta rigidez;
- boa resistência a temperaturas;
- excelente estabilidade dimensional;
- boa resistência ao impacto;
- boa resistência à tração;
- excepcional resistência à fadiga.

De acordo com ASM Handbook (2001), a inclusão das fibras de vidro expande o campo de aplicação dos plásticos, tornando possível seu uso em concorrência direta com os metais.

4.2.2 Composição do vidro

De acordo com ASM Handbook (2001) e Carvalho (2014), as fibras de vidro são obtidas pela fiberização de uma mistura de óxidos metálicos devidamente moídos, dosados e fundidos. A natureza e a proporção dos óxidos definem os tipos de vidro. As composições usadas comercialmente são indicadas na tabela 01 (vidro E tradicional e vidro E sem boro). Os vidros E sem boro têm melhor resistência à hidrólise que os vidros E tradicionais, e por isso são preferidos em obras de infraestrutura. Nas aplicações industriais onde a expectativa de durabilidade é mais curta, esses dois tipos de vidro podem ser usados indistintamente.

De acordo com ASM Handbook (2001) e Carvalho (2014), o vidro comumente usado para fazer garrafas, copos, vidraças, pára-brisas de automóveis e outros produtos sofre forte ataque da água e por isso não é usado para fazer fibras de reforço. As fibras usadas para reforçar plásticos são feitas com vidro tipo E tradicional ou com vidro tipo E sem boro. A exclusão do boro melhora consideravelmente a resistência das fibras à água e aos ácidos. Deste modo as fibras sem boro são altamente desejáveis em aplicações de infraestrutura, que exigem longa vida estrutural para os equipamentos de compósitos, que por sua vez está diretamente relacionado à alta resistência à hidrólise.

Tabela 1 – Composições típicas do vidro E tradicional e do vidro E sem boro

Elementos	Vidro E tradicional	Vidro E sem boro
SiO ₂	55,3%	59,9%
Al ₂ O ₃	14,2%	13,3%
CaO	22,9%	22,3%
MgO	0,5%	2,9%
B ₂ O ₃	5,8%	-----
Outros	1,30%	1,60%

Fonte: Carvalho, 2014.

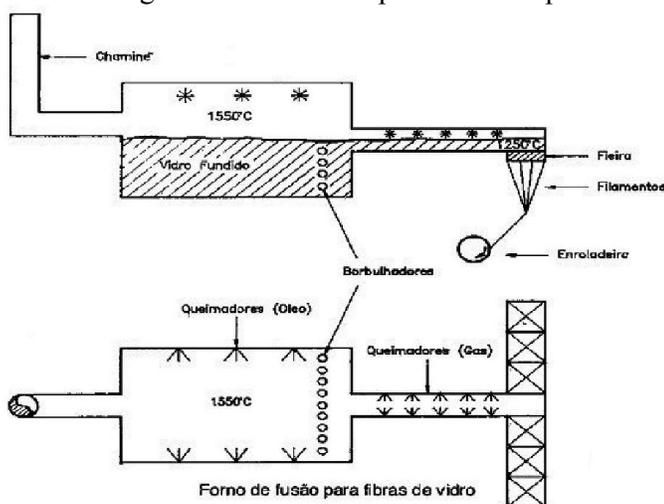
4.2.3 Formação dos filamentos

A figura 5 indica o corte longitudinal de um forno típico usado para fazer fibras de vidro. Os óxidos metálicos devidamente moídos e dosados são alimentados no forno e fundidos em temperatura de aproximadamente 1550⁰C. Estes fornos utilizam queimadores, conforme figura 6, alimentados por gás ou óleo. Antes de passar para o canal de alimentação, a massa fundida é homogeneizada por borbulhadores de ar instalados na zona de fusão. Posteriormente a massa fundida a 1550⁰C escoam para as feiras indicadas na parte direita da figura 5. As feiras são placas metálicas retangulares, com vários orifícios por onde flui a massa fundida que forma os filamentos. A temperatura decresce gradualmente da zona de fusão até as feiras, onde as fibras são formadas. Nas feiras, localizadas embaixo do canal de distribuição, a temperatura é rigorosamente controlada em torno de 1250⁰C. Esse controle é importante para aumentar a eficiência do processo de formação das fibras (CARVALHO, 2014).

De acordo com ASM Handbook (2001) e Carvalho (2014), ao sair das feiras os filamentos são tratados por uma emulsão aquosa que inclui várias substâncias. O tratamento superficial (*sizing*) aplicado às fibras tem três funções:

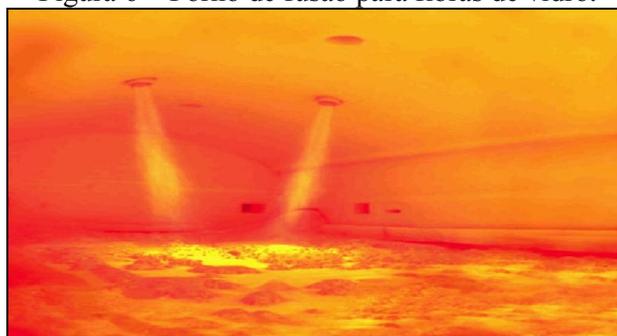
- aglutinar os filamentos em mechas de alta integridade;
- proteger os filamentos contra quebra;
- compatibilizar a superfície do vidro com a matriz plástica.

Figura 5 – Corte longitudinal de forno típico de fusão para fibras de vidro.



Fonte: Carvalho, 2014.

Figura 6 – Forno de fusão para fibras de vidro.



Fonte: Carvalho, 2014.

De acordo com Carvalho (1992 e 2014), geralmente a emulsão aquosa da encimagem (outro nome dado ao *sizing*) que é aplicada às fibras contém os seguintes componentes:

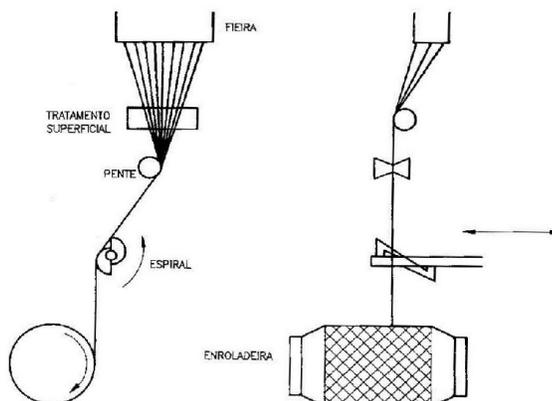
- **água** – a água é usada apenas como veículo não inflamável, sendo eliminada em estufa logo após a formação dos filamentos;
- **emulsificante** – usado para emulsionar em água os ingredientes do tratamento superficial;
- **filmógeno** - polímero formador da película que envolve os filamentos e os mantém unidos em mechas coesas e de alta integridade; é o ingrediente mais importante do tratamento superficial aplicado às fibras, uma vez que determina as propriedades da interface (superfície das fibras) e da interfase (região de transição entre as fibras e a

resina) sendo o controlador de algumas propriedades fundamentais dos compósitos, como a translucidez, o umbral de exudação e a perda de rigidez sob cargas cíclicas, o filmógeno deve ser solúvel na resina de laminação;

- **antiestático** – alguns processos (por exemplo, laminação a pistola) geram muita eletricidade estática nas fibras, os agentes antiestáticos são usados nesses casos para dissipar a eletricidade estática que se acumula nas fibras em ambientes muito secos;
- **lubrificante** – alguns processos submetem as fibras a atritos consideráveis, que quebram os filamentos formando grande quantidade de penugem; os lubrificantes são usados para minimizar isso, ou seja, para lubrificar os filamentos e facilitar seu processamento;
- **silano** – os silanos são substâncias formadas por moléculas bifuncionais muito especiais, capazes de fazer ligação química covalente com as fibras de vidro e com a resina, os silanos aparecem em segundo lugar na lista dos ingredientes mais importantes usados no tratamento superficial (“*sizing*”), juntamente com os filmógenos, eles têm grande importância no controle do descolamento vidro-resina, que inicia o processo de deterioração dos compósitos.

De acordo com Carvalho (1992 ; 2014), os filamentos são formados quando a massa de vidro escoa pelos orifícios da fieira. Cada orifício gera um filamento, que é agrupado com outros para formar mechas. As mechas (*strands*) são enroladas em tortas, como indica a figura 7. O número de filamentos por mecha varia conforme a vontade do fabricante. Os filamentos oriundos da fieira são agrupados em várias mechas, todas enroladas na mesma enroladeira, isto é, na mesma torta. Assim, as tortas são formadas por várias mechas.

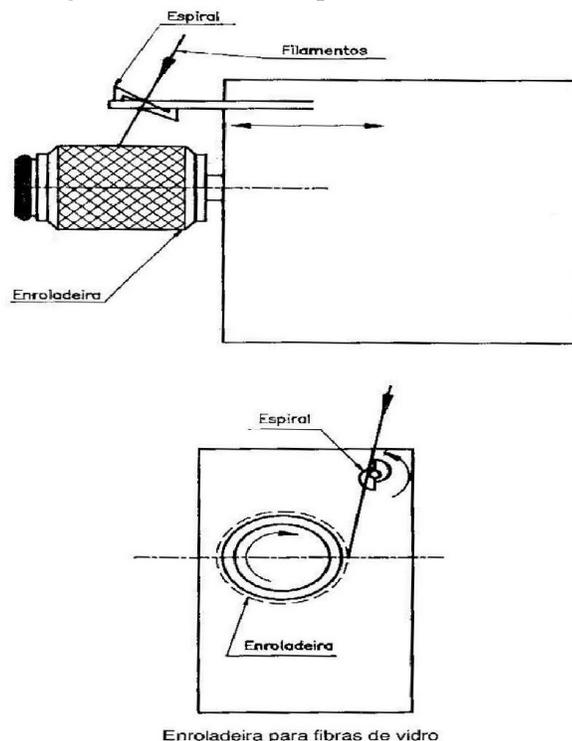
Figura 7 – Tratamento superficial dos filamentos e enrolamento em tortas.



Fonte: Carvalho, 2014.

A figura 8 indica uma enroladeira típica. A espiral indicada na figura tem um movimento de vai-vem paralelo ao eixo da enroladeira. Este movimento de vai-vem é cuidadosamente estudado para facilitar o desenrolamento das tortas na fabricação dos *rovings* e das mantas.

Figura 8 – Enroladeira para fibras de vidro.



Enroladeira para fibras de vidro

Fonte: Carvalho, 2014.

4.2.4 Tex

De acordo com Carvalho (2014), a vazão das feiras pode ser considerada constante nas condições normais de formação dos filamentos. Sendo assim, a densidade linear das mechas é controlada apenas pela velocidade de puxamento das fibras. A densidade linear das mechas é geralmente expressa em uma unidade têxtil conhecida como *tex* e que corresponde ao número de gramas por quilômetro de fio. O *tex* depende do diâmetro e do número de filamentos nas mechas, como indica a equação 1:

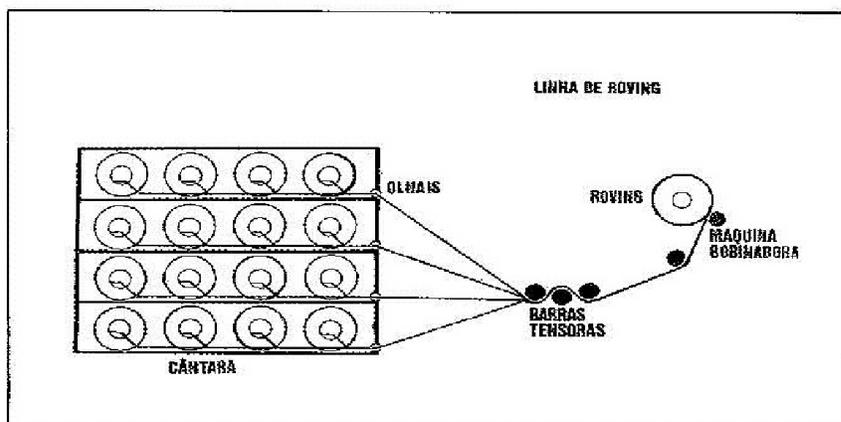
$$tex = (N \times \Phi^2) / 490 \quad (1)$$

Na equação 1, *tex* é a densidade linear da mecha em g/km, N é o número de filamentos, Φ é o diâmetro dos filamentos em microm e o número 490 uniformiza as unidades, pois leva em conta a densidade do vidro de 2,62 g/cm³.

4.2.5 Fabricação das fibras

As figuras 9 e 10 indicam os processos de fabricação das fibras de vidro usadas em compósitos.

Figura 9 – Fabricação do *roving* de fibras de vidro para laminação com pistola.



Fonte: Carvalho, 2014.

De acordo com Carvalho (2014), as bobinas de *roving* são obtidas combinando mechas de várias tortas. As tortas saem das cântaras e são enroladas para formar a bobina. O *tex* do *roving* depende do número de tortas que é enrolado. Portanto o *tex* dos *rovings* é a soma dos *texes* das mechas que o compõem.

De acordo com Carvalho (2014), os *rovings* com várias mechas, conforme a figura 10, são usados para fazer telhas translúcidas ou para fazer peças laminadas com pistola. A diferença essencial entre os produtos usados para laminação com pistola e os usados para fazer telhas está no filmógeno. Os *rovings* para telha são feitos com filmógeno de epóxi, que são mais solúveis nas resinas que os de PVA usado nos *rovings* para pistola.

De acordo com Owens Corning (2013), os *rovings* de laminação com várias mechas distintas (multidirecional) são fornecidos com várias densidades lineares. Ex.: TEX: 2,4g/m, 3,8g/m e 4,4g/m.

Figura 10 – *Roving* de fibra de vidro para laminação com pistola.



Fonte: Owens Corning, 2013.

De acordo com Owens Corning (2013), os *rovings* UD (unidirecional) usados no processo de enrolamento helicoidal (*filament winding*) e para fazer tecidos diferem dos usados para fazer telhas por terem apenas uma mecha. Por terem mecha única, os filamentos dos *rovings* UD são rigorosamente paralelos uns em relação aos outros. Logo, os *rovings* UD (unidirecional) conforme a figura 11, também chamados de filamentos ou *rovings* para enrolamento são fornecidos em várias densidades lineares. Ex.: TEX: 0,74g/m, 1,1g/m e 2,2g/m.

Figura 11 – *Roving* filamentar ou *roving* para enrolamento helicoidal de fibra de vidro



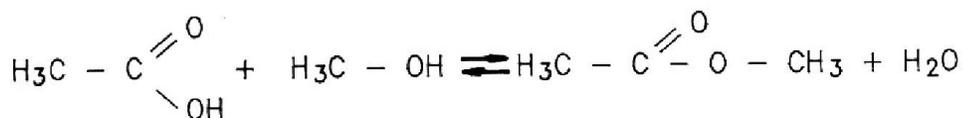
Fonte: Ameron Polyplaster, 2013.

De acordo com ASM Handbook (2001) e TSAI (2003), as fibras de vidro atuam, portanto, como reforço das resinas poliéster ou viniléster, aumentando significativamente as propriedades mecânicas, principalmente a resistência ao impacto e o módulo de elasticidade.

4.3 Resinas

De acordo com Holmes (1983) e Carvalho (2014), os poliésteres são resinas que possuem grupos ésteres como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. O éster por sua vez é formado pela reação entre grupos funcionais álcool e ácido, conforme indica figura 12. Os poliésteres resultam da reação de condensação de um diol (álcool) com um diácido. Dependendo do tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo).

Figura 12 – Processo de Esterificação - Grupos funcionais ácido e álcool geram grupo éster



Fonte: Carvalho, 2014.

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diácido saturado com um diol (álcool), conhecido como glicol, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono. Possuem moléculas longas e lineares, e não são sujeitos às reações de reticulação, podendo ser encontrados em forma de fibras ou filmes (HOLMES, 1983).

Os poliésteres insaturados por sua vez são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico inibido para facilitar sua estocagem e posterior utilização. O monômero mais utilizado é o estireno (HOLMES, 1983).

De acordo com Liba (2004), a resina de poliéster insaturada é um polímero de baixo peso molecular obtido por condensação, o processo inicia-se através da esterificação entre diálcoois e diácidos saturados e insaturados, com o aumento do peso molecular do polímero, a

A utilização de apenas um ácido insaturado produz um grau tão elevado de reticulações (ligações cruzadas) que a resina resultante tende a ser bastante quebradiça, de modo que é habitual para as resinas de poliéster conter, pelo menos, dois componentes de ácido dibásico, um saturado, tais como o anidrido ftálico ou ácido adípico, e o outro insaturado, de modo que adequadamente, sejam proporcionadas as quantidades para cada grau de ductilidade para ser introduzido no produto (HOLMES, 1983).

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), as resinas termofixas apresentam cadeias conectadas entre si por ramificações ou braços compartilhados. Assim, ligações químicas primárias (covalentes) são responsáveis pelas ligações cruzadas entre cadeias, as quais só são rompidas com a introdução de elevadas quantidades de energia. Então, percebe-se que o tipo de ligação entre cadeias, nesse caso, é o responsável pelo comportamento característico dos termorrígidos (termofixos), isto é, de não serem facilmente conformados e reprocessados através apenas da ação conjunta entre pressão e temperatura.

De acordo com Carvalho (2014), as resinas poliésteres insaturadas (termofixas) são fornecidas no estado líquido pelo fabricante e após a adição de substâncias especiais (iniciadores e aceleradores) se transformam em sólido à temperatura ambiente ou podem precisar de temperatura elevada, sem requerer pressões externas. Esta transformação é conhecida como polimerização ou cura. A reação de cura é um processo irreversível, isto é, uma vez transformados de líquidos em sólidos, elas não podem ser reprocessadas de sólidos em líquidos.

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), a cura ou polimerização da resina poliéster é um processo contínuo com mudança de estado físico líquido, estado gelatinoso intermediário e, de forma irreversível, para sólido final. Trata-se de uma reação de adição sem perda de massa e com baixa liberação de voláteis (estireno), particularmente nos processos abertos.

O processo de cura e interligação das duplas ligações (insaturações) do monômero se inicia pela desativação do inibidor e formação de radicais que envolvem mais aberturas das duplas ligações, resultando num polímero termofixo com liberação de calor (reação exotérmica) e formação de um reticulado tridimensional. O mecanismo de cura e interligação das resinas é

obtido fundamentalmente a partir de radicais livres fornecidos pelos iniciadores (peróxidos) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS, 2008).

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), as resinas poliésteres insaturadas (termofixas) podem ser dos tipos: Ortoftálica, Tereftálica, Isoftálica, Diciclopentadieno (DCPD) e Bisfenólica.

Neste trabalho será utilizada a resina poliéster insaturada Tereftálica (termofixa) do tipo pré-acelerada com octoato de cobalto 6%. As fibras de vidro serão incorporadas à resina, enquanto ela ainda permanece líquida, logo após a adição do iniciador, o peróxido orgânico denominado MEKP (Peróxido de metil etil cetona). As fibras devem ser completamente embebidas e molhadas pela resina líquida. O material resultante desta combinação, após a realização da cura é normalmente conhecido como compósito ou plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV).

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008) e Carvalho (2014), as resinas poliésteres são fornecidas dissolvidas em um monômero insaturado, geralmente estireno. Estas resinas têm pontos de insaturação em sua cadeia molecular. Esses pontos de insaturação são duplas ligações covalentes que ligam átomos de carbono adjacentes, que podem ser facilmente rompidas pela ação de radicais livres provenientes de substâncias catalisadoras apropriadas. O estireno tem a função de baixar a viscosidade das resinas poliésteres antes da cura, para ajustar ao processamento, visto que já é adicionado à resina pelo fabricante de resinas, além de participar da reação de cura, interligando as macromoléculas das resinas.

Por razões técnicas e econômicas, o monômero de estireno é o mais utilizado na indústria de resinas poliésteres insaturadas. Em regra, são usadas duas moléculas de monômero de estireno para cada molécula de ácido insaturado presente na cadeia do poliéster. Este excesso assegura a obtenção de um melhor grau de cura com interligação de todas as pontas reativas existentes. Todavia, a concentração do monômero não deve ultrapassar 50% em peso na resina, visto que podem ocorrer reações paralelas estireno-estireno (formando poliestireno, termoplástico de baixo peso molecular), enfraquecendo a resina (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS, 2008).

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), as resinas poliésteres têm contrações volumétricas da ordem de 6 a 8% após cura total. Esta contração é proporcional à quantidade de insaturações na molécula (presentes no maleico ou fumárico e no estireno). Para reduzir este fenômeno, utilizam-se termoplásticos de baixo ponto de fusão, que se expandem durante a cura da resina.

4.3.1 Aceleradores e Iniciadores

De acordo com a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), os iniciadores da reação de polimerização da resina poliéster insaturada, os peróxidos orgânicos são os responsáveis pelo começo e pelo final do processo de “crosslinking”, ou seja, pelo processo de cura. Eles fornecem os radicais livres que irão reagir com a ligação dupla de carbono.

Os iniciadores têm a função de iniciar a reação de cura, ou polimerização das resinas poliésteres. A cura a frio, ou seja, à temperatura ambiente dessas resinas é normalmente executada com MEKP + Cobalto (CARVALHO, 2014).

O peróxido de metil etil cetona (MEKP) é um líquido incolor diluído (50%) em dimetil ftalato. O MEKP é o iniciador. Ele é facilmente miscível nas resinas poliésteres insaturadas, sendo usado em conjunto com aceleradores de cobalto (CARVALHO, 2014).

O naftenato ou octoato de cobalto (Cobalto) é um líquido de cor roxa, com 6% de metal. Esse é o acelerador normalmente utilizado em resinas poliésteres insaturadas e atua em conjunto com o MEKP para curar as resinas poliésteres à temperatura ambiente. A cura é iniciada adicionando pequenas quantidades de cobalto à resina antes da adição do MEKP (CARVALHO, 2014).

4.3.2 Véu de superfície

De acordo com Carvalho (2014), o véu de superfície serve para assegurar uniformidade de espessura (mínimo 0,25 mm) ao laminado interno dos tubos, também conhecido como *liner*, que mantém contato permanente com o ambiente agressivo. Ele também serve para minimizar

o surgimento e propagação de trincas superficiais. Seu uso é absolutamente essencial em tubos ou equipamentos para ambientes agressivos. São comumente usados véus sintéticos de poliéster, sem ligante, com gramaturas de 35 a 40 gramas/m².

4.3.3 Areia

De acordo com a Flowtite (2013) e Carvalho (2014), a areia é usada principalmente para os tubos enterrados de PRFV visando aumentar a rigidez do anel, a qual por sua vez é calculada em função das condições de instalações dos tubos para suportar o peso do solo. Outra característica é que não agrega custos excessivos, visto que é mais barata que a fibra de vidro.

A areia é adicionada na lâmina do núcleo dos tubos de PRFV durante o processo de fabricação de enrolamento contínuo, o qual será posteriormente abordado. O teor de areia padrão adotado na lâmina do núcleo é de 80% em peso, a densidade é de 2,11 g/cm³ e o coeficiente de dilatação térmica é de $13,0 \times 10^{-6}$ l/°C (CARVALHO, 2014).

De acordo com a Flowtite (2013) e Carvalho (2014), a areia deve ser de boa qualidade, com mínimo de 95% de sílica, granulometria predominante de 60 mesh e baixíssima umidade (máximo de 0,50% em peso).

4.4 COMPÓSITOS OU PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

4.4.1 Compósitos

De acordo com Neto Levy e Pardini (2006), as matrizes para compósitos de modo abrangente podem ser do tipo polimérica (termorrígida ou termoplástica), cerâmica, carbono ou metálica.

De acordo com a ABNT NBR 15536-1 (2007), o compósito é a classe de material heterogêneo, multifásico, podendo ou não ser polimérico, em que um dos componentes, descontínuo, é responsável pela principal resistência ao esforço (componente estrutural) e o

outro, contínuo, é o meio de transferência deste esforço (componente matricial). A interface entre estes materiais tem característica dominante sobre suas características individuais.

De acordo com Carvalho (2014), compósito ou plástico reforçado com fibras de vidro é a composição entre Material de Reforço + Matriz Polimérica, é a combinação macroscópica de materiais.

O compósito de resina polimérica com fibra de vidro, é denominado:

- FRP – *Fiber Reinforced Plastic* (USA).
- GRP – *Glass Reinforced Plastic* (Europa).
- PRFV – *Plástico Reforçado com Fibra Vidro* (BR).
- Fiberglass (Popular) = *Fibra de vidro* (BR).

De acordo com Daniel (1994), Tsai (2003) e Ameron Polyplaster (2013), "Materiais Compósitos" se refere aos materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica e são fabricados com o objetivo de se alcançar melhores propriedades de engenharia em relação aos materiais convencionais: rigidez, peso, resistência mecânica, resistência química, propriedades térmicas e elétricas. Deste modo o PRFV é considerado um material compósito de matriz polimérica e pode apresentar todos os tipos de reforço e arranjos, que variam para se obter as propriedades necessárias em cada situação.

4.4.2 Processo de enrolamento contínuo

De acordo com Tsai (2003) e Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2008), o processo de enrolamento contínuo (*filament winding*) é usado para obtenção de peças cilíndricas. Os fios de fibras são dispostos em suportes com várias bobinas e desenrolados através de pentes. A seguir as fibras são impregnadas com resina termofixa e enroladas sobre o cilindro denominado mandril rotatório, conforme indica a figura 15.

Figura 15 – Processo de enrolamento contínuo (*filament winding*) de fabricação de tubos de PRFV



Fonte: Flowtite, 2013.

De acordo com a Flowtite (2013) e Carvalho (2014), o processo de enrolamento contínuo geralmente utiliza equipamento de tecnologia Flowtite para fabricação de tubos destinados ao saneamento, o qual combina enrolamento circunferencial de fibras contínuas com ângulo próximo de 90° conjugado com a adição de fibras picadas na lâmina estrutural e adição de areia na lâmina do núcleo, sendo este último específico para tubos enterrados, o que permite ao fabricante de tubos de PRFV obter o módulo circunferencial, módulo axial e classe de rigidez desejados. Este processo também é conhecido como “*Hoop-Chop*” e é largamente utilizado para a fabricação de tubos e tanques, conforme indicam as figuras 15 e 16. A utilização de fibras picadas (“*Chopped Glass*”) combinadas com as fibras contínuas (“*Hoop Glass*”) possibilita a construção de tubos de alto desempenho mecânico para aplicações de saneamento em diâmetros que variam de 200 a 3600 mm, classes de pressão de até 2,5 MPa (25 kgf/cm^2) e classes de rigidez que variam de 2.500 Pa a 20.000 Pa.

De acordo com Carvalho (2014), as fibras contínuas são enroladas secas, sem resina, na direção circunferencial. A resina, as fibras picadas e a areia caem por gravidade na geratriz superior do mandril, conforme indica a figura 15.

Figura 16 – Processo de enrolamento contínuo (*filament winding*) de fabricação de tubos de PRFV



Fonte: Ameron Polyplaster, 2013.

Após fabricação, os tubos de PRFV são inspecionados quanto aos aspectos visuais (internos e externos) conforme norma ASTM D2563, bem como inspecionados quanto aos aspectos dimensionais (diâmetros, espessuras e comprimento) conforme norma ASTM D3567.

4.5 Tubos de compósitos ou tubos de PRFV para saneamento

De acordo com Bevilacqua (2006), as principais características especificadas pelos principais fabricantes brasileiros de tubos de PRFV são:

- **Baixa densidade:** menor custo de transporte e manuseio.
- **Superfície interior lisa:** menor custo para bombeamento (coeficiente de atrito de *Manning* “n” = 0,010), conforme Freire (2000).
- Junta elástica (conforme figura 17): montagem simples, segura e econômica.
- **Sistema de acoplamento dos tubos,** tipo junta elástica, proporciona deflexões para ajustes do alinhamento e traçado durante a montagem, possibilitando a formação de curva de grande

raio sem utilizar conexões. Além da flexibilidade de montagem, a deflexão angular absorve possíveis movimentos do solo sem comprometer a finalidade de estanqueidade.

- **Intercambiável com tubos de ferro fundido dúctil e PVC**, ou seja, perfeito acoplamento com outros materiais de tubos.

Figura 17 – Junta elástica (JE) para tubos de plástico reforçado com fibra de vidro



Fonte: do próprio autor.

As recomendações gerais dos fabricantes de tubos de PRFV são:

- Fluidos muito agressivos ou a temperatura elevadas requerem a aplicação de resinas especiais.
- Os tubos não devem ser apoiados sobre arestas ou objetos pontiagudos, que gerem concentração de tensões.
- Equipamentos pesados como válvulas e outros, devem ter apoios independentes da tubulação.
- Os tubos devem ser estocados sobre madeiras ou terrenos de superfície plana.
- A ponta lisa do tubo e a junta elástica devem ser limpas antes do processo de acoplamento.

De acordo com Bevilacqua (2006), os principais fabricantes brasileiros de tubos de PRFV são: Amitech Brazil Tubos, Petrofisa, Ameron Polyplaster, Joplas e Edra.

De acordo com a ABNT NBR 15536-1 07, os tubos são fabricados com comprimentos úteis de 3, 6, 9, 12, 14 ou 18 metros de comprimento, junta elástica ou junta rígida e diâmetro nominal de 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500 ou 3600 milímetros.

De acordo com Carvalho (2014), tubos e tanques de compósitos ou PRFV são muito usados para transportar e tratar água e esgoto. No Brasil as tubulações de compósitos têm sido mais usadas em adutoras desde o início de 1970. Porém, apesar das vantagens técnicas, o baixo custo das manilhas de cerâmica ou de concreto tem dificultado o uso dos compósitos no transporte de esgoto.

De acordo com Carvalho (2014), as aplicações de infraestrutura, tanto as estações de tratamento de água como as tubulações para saneamento devem ter vida longa – superior a 50 anos. Para atender essa exigência as resinas devem possuir boa resistência ao ambiente, que pode ser água ou esgoto, contendo ou não os produtos químicos usados nos processos de tratamento.

4.5.1 Exigências da estocagem

De acordo com a Flowtite (2013) e Carvalho (2014), os tubos usados em saneamento são estocados empilhados (máximo 03 patamares) conforme indica a figura 18 e sem proteção contra os raios solares. Não existem evidências de alterações de propriedades mecânicas ou degradações causadas pela exposição direta ao sol, além do fato de que os tubos serão enterrados no solo. A exposição direta ao Sol pode elevar a temperatura dos tubos a 70⁰C durante a estocagem. Para evitar deformação dos tubos empilhados, as resinas devem ter temperatura de termo-distorção (HDT) maior que 80⁰C.

Figura 18 – Estocagem de tubos de plástico reforçado com fibra de vidro.



Fonte: Flowtite, 2013.

4.5.2 Exigências do ambiente de uso

De acordo com a Flowtite (2013) e Carvalho (2014), as tubulações usadas em saneamento têm contato direto com água ou com esgoto doméstico. A água não é agressiva às resinas e não interfere na escolha delas. Em princípio, qualquer resina com boa resistência a osmose serve para conduzir ou armazenar água. O esgoto doméstico exige o uso de resinas de melhor desempenho, porque pode conter ácido sulfúrico (H_2SO_4) gerado pela reação do ácido sulfídrico (H_2S) com água. Portanto, para as tubulações de compósito, o ambiente agressivo a ser considerado na escolha da resina é o ácido sulfúrico presente nas linhas de esgoto.

Deste modo para atender as exigências do ambiente, as resinas de saneamento em aplicações de tubulações devem ter boa resistência à osmose e ao ácido sulfúrico (FLOWTITE, 2013 e CARVALHO, 2014).

4.5.3 Exigências estruturais

De acordo com Carvalho (2014) e com as normas AWWA C950 07 e AWWA M45 05, as exigências estruturais são analisadas para o longo e curto prazo, bem como essas exigências afetam a escolha da resina.

4.5.3.1.1 Exigências de estrutura de longo prazo

De acordo com a norma AWWA C950 07 e Carvalho (2014), a vida estrutural de longo prazo dos compósitos deve ser analisada sob três ângulos. O primeiro trata da falha por ruptura das fibras de vidro. O segundo trata do vazamento (exsudação) causado por trincas na resina. O terceiro e último trata da falha por corrosão sob tensão (*strain corrosion*).

De acordo com a norma AWWA C950 07 e Carvalho (2014), o primeiro é explicado pelo fato que a falha estrutural por ruptura é controlada exclusivamente pelas fibras de vidro e nada tem a ver com a resina.

O segundo indica que o alongamento de ruptura da resina controla a falha por vazamento (exsudação).

O terceiro explica que a resina e as fibras de vidro controlam a falha por corrosão sob tensão (*strain corrosion*) (AWWA C950 07; CARVALHO, 2014).

A única propriedade da resina que afeta a vida estrutural de longo prazo, para exsudação e corrosão sob tensão (*strain corrosion*), é o alongamento de ruptura da resina. A norma AWWA C950 07 cita dois ensaios para avaliar o alongamento de ruptura da resina. O primeiro deles, o ensaio de ovalização, mede a capacidade da resina para suportar deformações dos tubos nos níveis de deflexão A e B. O segundo, o ensaio de regressão, mede a capacidade da resina resistir à propagação de trincas quando submetida aos esforços de tração ou flexão.

O ensaio de ovalização, conforme a norma AWWA C950 07 e ASTM D2412 08, estabelece que os tubos devem suportar ovalização nos níveis A e B sem sofrer danos. O nível de deformação A caracteriza-se por não ocorrer evidências visuais de trinca ou fissuramento ou ruptura na superfície interna e externa da amostra do tubo. O nível de deformação B caracteriza-se por não ocorrer evidências visuais de dano estrutural na parede da amostra do tubo. Esse ensaio verifica se a resina tem o alongamento de ruptura mínimo necessário para a aplicação, mas não determina o valor admissível para o alongamento. O ensaio de ovalização é muito simples e pode ser executado em apenas alguns minutos, conforme procedimento descrito na norma ASTM D2412 08.

Logo o ensaio de ovalização determina o alongamento mínimo da resina, mas nada diz sobre o seu valor admissível. O valor do alongamento admissível é estabelecido pelos ensaios de regressão de 10.000 horas. Os ensaios de regressão são difíceis, demorados e complicados. Os tubos para transportar água são ensaiados cheios de água. Os usados para esgoto são ensaiados em contato com ácido sulfúrico (CARVALHO, 2014).

Segundo Carvalho (2011), o ensaio de regressão para determinar o alongamento admissível para tubos de água é conhecido como “ensaio de HDB”. O correspondente para esgoto é conhecido como “ensaio de Strain Corrosion”. Essas siglas derivam das expressões Inglesas Hydrostatic Design Basis (HDB) e Strain Corrosion, conhecido como Corrosion Design Basis

(CDB). O HDB mede o alongamento que causa vazamento do tubo após 50 anos de uso ininterrupto em ambiente aquoso. O Strain Corrosion mede o alongamento que causa ruptura do tubo após 50 anos em contato com esgoto.

4.5.3.1.2 Exigências de estrutura de curto prazo

De acordo com Carvalho (2011), é fato que quanto maior o alongamento de ruptura da resina, menor será a probabilidade de danos no manuseio e na instalação do equipamento de compósito. As resinas que atendem as exigências estruturais de longo prazo têm alongamento suficiente para atender também as exigências de curto prazo.

Portanto, para atender as exigências estruturais as resinas de saneamento devem ter para os tubos o alongamento de ruptura maior ou igual a 3,0%, alto HDB e alto CDB.

Portanto as resinas usadas em estações de tratamento ou em tubulações para transportar água ou esgoto, devem ter:

- temperatura de termo-distorção (HDT) maior que 80°C;
- boa resistência à osmose (água) e ao ataque de ácido sulfúrico (esgoto);
- alongamento de ruptura maior ou igual a 3,0%;
- altos valores para o HDB e para o CDB, conforme Carvalho (2011).

4.6 Vida estrutural e vida funcional dos tubos de PRFV

Conforme Carvalho (2006), a vida útil dos tubos para condução de soluções químicas em plástico reforçado com fibras de vidro – PRFV deve ser considerada em dois planos de análise, completamente distintos:

- Vida Estrutural.
- Vida Funcional.

A Vida Estrutural subdivide-se em:

- ruptura;
- exsudação;
- *strain corrosion*.

A Vida Funcional é diretamente proporcional à destruição da barreira de corrosão.

De acordo com Carvalho (2006), os ambientes por sua vez são divididos em duas categorias:

- a água que penetra no laminado e ataca o vidro, ou seja, a água determina a vida estrutural;
- os produtos químicos, que não penetram no laminado e atacam apenas a barreira de corrosão, ou seja, os produtos químicos determinam a vida funcional.

De acordo com Carvalho (2006), a vida estrutural depende da camada externa da parede do laminado, após a barreira de corrosão. Somente os solventes, como por exemplo a água, penetram no laminado ao ponto de atingir a camada estrutural. Assim, se a camada de corrosão for bem mantida, a camada estrutural garantirá a vida útil estrutural por período superior a 50 anos para tubulações construídas com critérios normativos.

De acordo com Carvalho (2006), a vida funcional depende da camada interna diretamente em contato com o fluido agressivo (*liner*) e da barreira química de resistência à corrosão. Em alguns ambientes quimicamente agressivos esta camada sofre degeneração ao longo do tempo e necessita ser reparada ou refeita para prolongar a vida útil das tubulações.

A vida funcional é definida como o intervalo de tempo entre o início da operação da tubulação e a incapacitação da barreira de corrosão. O momento de destruição da barreira de corrosão é percebido de maneira diferente por pessoas distintas, dependendo da aversão ao risco de cada uma. Os indivíduos conservadores julgam que a vida funcional é comprometida com a destruição do *liner* e por isso trocam a barreira de corrosão quando percebem que o *liner* foi destruído. Os indivíduos agressivos esperam um pouco mais e fazem a troca quando a espessura residual da barreira de corrosão atinge, por exemplo, 1,0 mm. De qualquer maneira, a vida funcional das tubulações é definida pela destruição da barreira de corrosão, que por sua vez determina o tempo entre as paradas para manutenção. Para tubulações de grandes diâmetros a barreira de corrosão deve ser restaurada antes que o ambiente agressivo atinja as lâminas estruturais e para tubulações de pequenos diâmetros torna-se necessária a substituição, pois não é possível realizar a reparação (CARVALHO, 2006).

A vida funcional dos tubos de compósitos usados em saneamento básico pode ser considerada praticamente infinita, porque a água bruta e o esgoto urbano não atacam a resina da barreira de corrosão. O mesmo não acontece, porém, com os tubos usados para transportar esgotos industriais. Os produtos químicos contidos nos efluentes industriais podem atacar a barreira de corrosão e ter grande efeito na vida funcional (CARVALHO, 2006).

4.7 Determinação das propriedades do tubo de PRFV

De acordo com Carvalho (2014), as tubulações de PRFV usadas em saneamento básico, para transportar água bruta ou esgoto urbano geralmente trabalham enterradas. As tubulações enterradas são usadas também para transportar esgotos industriais carregados com produtos químicos agressivos. Porém, quando usadas em processos industriais elas eventualmente trabalham aéreas.

Do ponto de vista estrutural, os tubos enterrados diferem dos aéreos em aspectos tais como: necessidade de ter alta rigidez de anel para suportar a carga ou peso do solo, para isso geralmente são feitos com núcleo de areia. Outro aspecto é que eles geralmente trabalham enterrados e ancorados, por isso não precisam ter alta resistência axial (CARVALHO, 2014).

De acordo com Carvalho (2014), essas particularidades afetam o projeto e a construção dos tubos enterrados. Por exemplo:

- a alta rigidez de anel é obtida construindo o tubo com núcleo de resina + areia, embutido entre duas cascas de resina + fibras. O núcleo de areia serve apenas para dar a rigidez de anel *Stiffness* (SN) desejada e pouco contribui para aumentar as resistências, axial ou circunferencial;
- as duas cascas externas feitas com resina + fibras são projetadas para resistir aos esforços circunferenciais gerados pela pressão interna;
- como os tubos enterrados não precisam ter alta resistência axial, as cascas podem ser feitas pelo processo *Hoop-Chop* ou por enrolamento helicoidal com ângulo $\theta = \pm 70^\circ$ ou superior;
- os esforços axiais exercidos por momentos fletores e por outras cargas são pequenos e têm pouco efeito no dimensionamento das cascas.

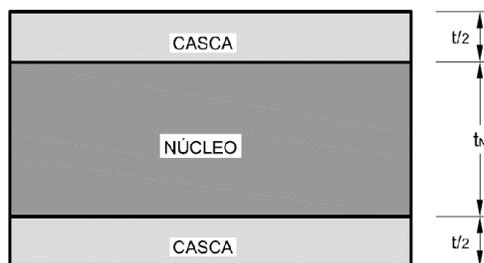
De acordo com Carvalho (2014), seguem os métodos utilizados para analisar os tubos enterrados e que são aplicados no transporte de água ou esgoto urbano. Os cálculos são feitos em quatro etapas:

- a primeira calcula a espessura das cascas para atender os esforços circunferenciais gerados pela pressão interna informada pelo usuário;
- a segunda calcula a espessura do núcleo para dar ao tubo a rigidez de anel especificada SN. A rigidez de anel é especificada levando em conta os detalhes da instalação a qual deve ser informada pelo usuário;
- a terceira etapa combina as cascas com o núcleo e verifica se o tubo completo, com as cascas e com o núcleo de areia, atende as exigências da aplicação;
- se não atender, os cálculos devem ser repetidos aumentando as espessuras das cascas ou do núcleo.

Para fazer os cálculos é necessário conhecer o diâmetro Φ , a rigidez de anel SN e a pressão estática P exercida pelo fluido dentro do tubo. Essas informações devem ser fornecidas pelo usuário. Outras informações, como a altura do solo de recobrimento, a existência de tráfego superficial, a posição do lençol freático e a natureza do solo nativo são relevantes para especificar a instalação, mas não influem no cálculo dos tubos (CARVALHO, 2014).

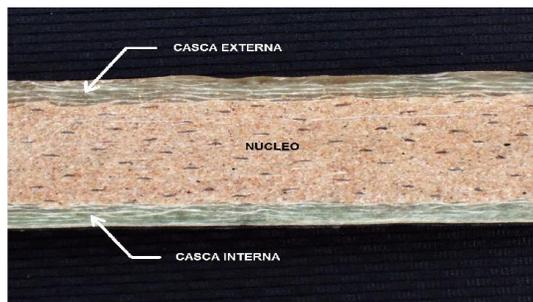
De acordo com Carvalho (2014), os tubos comerciais para saneamento são analisados como se fossem três lâminas, formadas pelas duas cascas e pelo núcleo, como indicam as figuras 19 e 20. Essa construção facilita a análise, porque permite considerar as cascas como lâminas de espessura $t/2$ e considerar os tubos como feitos com 3 lâminas, cujas propriedades e espessuras dessas 3 lâminas são conhecidas.

Figura 19 – Lâminas de tubo comercial de plástico reforçado com fibra de vidro



Fonte: Carvalho, 2014.

Figura 20 – Corte transversal da parede de tubo comercial *Hoop Chop*



Fonte: Carvalho, 2014.

Uma vez calculadas as espessuras das cascas para suportar a pressão interna P , a espessura do núcleo para dar a rigidez de anel SN desejada, o engenheiro é capaz de dimensionar a instalação e calcular o coeficiente de segurança residual para a vida estrutural desejada.

4.7.1 Critérios de cálculo

Conforme Holmes (1983) e Carvalho (2007a e 2014), o critério de cálculo mais adequado para estruturas de compósitos é o que usa alongamentos admissíveis. Os alongamentos admissíveis dependem da agressividade do meio e do tipo de falha analisado.

4.8 Ensaio de HDB (Hidrostatic Design Basis)

O ensaio de HDB (*Hydrostatic Design Basis*) ou também conhecido como “resistência à pressão hidrostática interna de longa duração” obedece o protocolo normatizado pela ASTM D2992 06 – Procedimento B e ASTM D1598 08, em corpos de prova cheios de água e submetidos a diferentes pressões. Os alongamentos de tração circunferencial dos tubos são anotados juntamente com os tempos de falha. A falha ocorre por vazamento ou também conhecido por exsudação. Os corpos de prova mais solicitados falham primeiro. O ensaio dura no mínimo 10.000 (dez mil) horas e deve gerar pelo menos 18 (dezoito) falhas estatisticamente válidas. Os pontos de falha são plotados em gráfico de tempo x alongamento circunferencial, log x log, ajustados por uma reta de regressão que é usada para calcular o HDB, isto é, o alongamento de falha extrapolado para longo prazo. O HDB, portanto, é o alongamento circunferencial que causa falha por exsudação no longo prazo. Segundo a norma AWWA C950 07, o alongamento admissível é obtido dividindo o HDB pelo coeficiente de

segurança (CS) que é de 1,8. As normas aplicáveis tais como AWWA C950 07 e AWWA M45 05, destinadas a utilização de tubos para transporte de água, exigem que os tubos trabalhem pelo menos cinquenta anos sem vazamento.

Conforme Carvalho (2014), a metodologia usualmente utilizada para prevenir as falhas por exsudação é o método de alongamento admissível determinado pelo HDB. Se a resina usada na lâmina de fibras picadas (barreira de corrosão) tiver alongamento de ruptura igual a 3,0%, o HDB extrapolado para cinquenta anos é 0,63% (PEARSON, 1988a e CARVALHO, 2007a). O alongamento admissível é obtido aplicando a esse valor o coeficiente de segurança CS = 1,8 recomendado pela norma AWWA C950 07 (Equação 2).

$$\varepsilon = \frac{HDB}{1,8} = \frac{0,63\%}{1,8} = 0,35\% \quad (2)$$

Onde ε é o alongamento admissível em %, HDB (Hydrostatic Design Basis) é o alongamento circunferencial obtido em % que causa falha por exsudação e extrapolado para o longo prazo de cinquenta anos e 1,8 é o coeficiente de segurança.

Conforme Rosenow (1984) e Carvalho (2007a e 2009), o vazamento ocorre pela passagem do fluido (neste caso água) através de microfissuras formadas na interfase vidro-resina quando o tubo é pressurizado. A quantidade e as dimensões (comprimento e abertura) dessas microfissuras variam com a arquitetura da lâmina (fibras contínuas (Hoop) e fibras picadas (Chopped)) e com o alongamento global aplicado na direção circunferencial do tubo.

Conforme Rosenow (1984), Tarakcioglu (2001), Richard (2001) e Carvalho (2007b e 2009), o tempo para o início do vazamento depende da espessura dos tubos, da abertura e do comprimento das microtrincas. Quanto maior a espessura do tubo e quanto menores as trincas, maior é o tempo que a água leva para atravessar a parede do tubo.

O intervalo entre a aplicação da pressão e o início do vazamento mede o tempo que a água leva para atravessar a parede do tubo através das trincas formadas pelo descolamento entre as fibras e a resina. Este intervalo mede o tempo de viagem da água, que depende da pressão, do tamanho das trincas e da espessura do tubo, esse tempo é conhecido como exsudação. A norma AWWA C950 07 usa esse tempo de falha como base para o dimensionamento de tubos de compósitos (Carvalho, 2007b e Carvalho, 2009).

4.9 Ensaio de Strain Corrosion (*Corrosion Design Basis*)

De acordo com Carvalho (2014), o ensaio de *Strain Corrosion* ou também conhecido como *Corrosion Design Basis* trata do método para realizar a medição e o significado do parâmetro conhecido como CDB (*Corrosion Design Basis*).

De acordo com Hogg (1981 e 1983), Farshad (2004) e Carvalho (2014), quando os ambientes agressivos são combinados com tensões de flexão, o modo de falha muda de simples deterioração do *liner* e da barreira de corrosão, para ruptura da fibra. Além do que, essa ruptura pode acontecer em curto prazo (falha catastrófica). O processo que causa a ruptura dos compósitos sob flexão e em ambientes agressivos é conhecido como *strain corrosion*. O entendimento do mecanismo que governa o processo de *strain corrosion* é muito importante para o desenvolvimento da tecnologia dos compósitos.

De acordo com Hogg (1981 e 1983), Farshad (2004) e Carvalho (2014), existe uma relação entre o alongamento de flexão atuante na fibra extrema da parede do equipamento e o tempo de ruptura, quando o equipamento trabalha imerso em ambientes agressivos. O alongamento de flexão que rompe o compósito num determinado tempo é conhecido como *Corrosion Design Basis*, ou CDB, para o tempo de falha considerado. Existe uma correspondência biunívoca entre os alongamentos de flexão e os tempos de ruptura. O CDB deve ser sempre citado tendo como referência o tempo de falha. Para cargas estáticas, o alongamento de flexão é constante e não muda com o tempo.

De acordo com Hogg (1981), Akdemir (2001), Farshad (2004) e Carvalho (2014), o CDB depende, portanto, do tempo para o produto químico difundir pelo *liner* e atacar as fibras sob tensão de flexão. Ele não tem nada a ver com um “alongamento crítico que é atingido após um determinado tempo”. Aliás, o alongamento de flexão permanece fixo e não cresce durante todo o processo. A prova disso é que a ruptura por *strain corrosion* ocorre ao longo da superfície sob tensão máxima. O resto da estrutura, de cada lado da superfície falhada, permanece praticamente intacto.

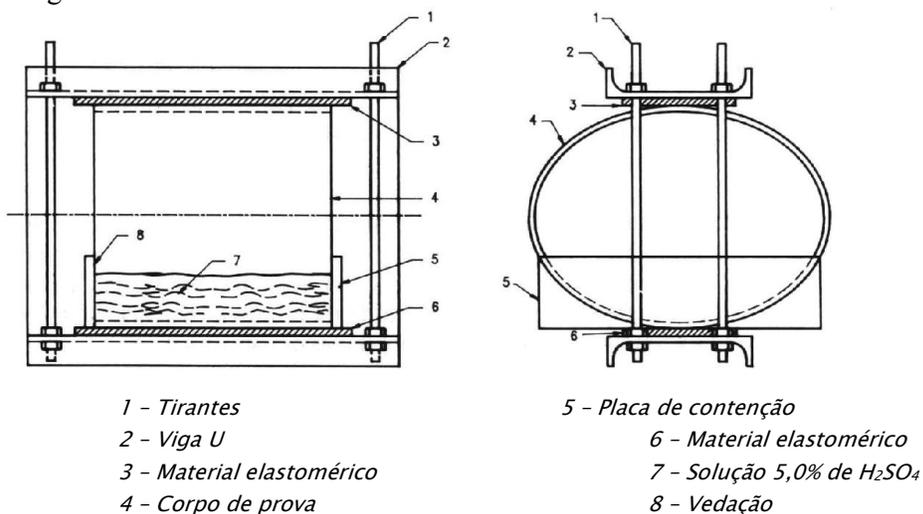
De acordo com Carvalho (2014), o CDB é fundamental para dimensionar a vida estrutural de tubos enterrados que transportam produtos agressivos, como esgoto urbano e despejos industriais. No caso de esgoto urbano, o sulfato presente é decomposto por bactérias e libera

H_2S , que em presença de água e de outras bactérias gera ácido sulfúrico. As bactérias que geram o H_2S são aeróbias e por isso esse gás é liberado apenas nas tubulações que trabalham parcialmente cheias. O ácido sulfúrico é formado na parte vazia do tubo, onde ocorre o ataque. Se a tubulação trabalhar cheia, o ácido sulfúrico não é gerado e o fenômeno de *strain corrosion* não acontece com esgoto urbano.

As tubulações enterradas que transportam esgoto urbano geralmente trabalham parcialmente cheias e ovalizadas pelo peso do solo. Essas tubulações cumprem as duas condições necessárias para ativar o ataque por *strain corrosion*. A ovalização introduz as tensões de flexão e o ácido sulfúrico provê o ambiente agressivo (CARVALHO, 2014).

De acordo com Farshad (2004) e Carvalho (2014), as tubulações usadas para transportar esgoto urbano oferecem um exemplo perfeito de aplicação sujeita ao ataque por *strain corrosion*. O ensaio para medir o CDB de tubos para esgoto urbano é realizado conforme a norma ASTM D3681 06, usando corpos de prova (pequenos segmentos de tubos) ovalizados e em contato com solução 5% de ácido sulfúrico, conforme a figura 21. Os corpos de prova são submetidos a vários níveis de ovalização para gerar vários pontos de falhas compreendidos no intervalo de duração do ensaio, que deve ser maior que 10.000 (dez mil) horas.

Figura 21 – Ensaio de *Strain Corrosion* conforme ASTM 3681 06



Fonte: Carvalho, 2014.

De acordo com Farshad (2004) e Carvalho (2014), a ovalização do corpo de prova simula o achatamento do tubo enterrado e submetido ao peso do solo. E a solução com 5% de ácido

sulfúrico simula o esgoto urbano. Os corpos de provas mais ovalizados falham antes dos menos ovalizados. A falha, nesse caso, ocorre por ruptura e não por exsudação. Os tempos e os alongamentos de ruptura são anotados. Os pontos de falha são plotados em gráfico de tempo x alongamento de flexão, log x log, ajustados por uma reta de regressão que é usada para extrapolar e calcular o CDB, isto é, o alongamento de falha extrapolado para o longo prazo. O alongamento de flexão admissível é obtido dividindo o valor extrapolado (CDB) por um coeficiente de segurança, que conforme a AWWA C950 07 é de 1,8 (Equação 3).

$$\varepsilon_{\text{adm CDB}} = \text{CDB} / 1,8 \quad (3)$$

Onde $\varepsilon_{\text{adm CDB}}$ é o alongamento admissível em %, CDB (Corrosion Design Basis) é o alongamento de flexão obtido em % que causa falha por ruptura e extrapolado para o longo prazo de cinquenta anos e 1,8 é o coeficiente de segurança.

As especificações de tubos usados para transportar esgoto urbano exigem vida estrutural maior ou no mínimo igual a cinquenta anos. Assim, o alongamento admissível calculado usa o valor do CDB extrapolado para cinquenta anos (CARVALHO, 2014).

4.10 Influência das resinas nas propriedades mecânicas (*Hydrostatic Design Basis and Corrosion Design Basis*)

De acordo com Carvalho (2014), a resina descola das fibras sempre que as lâminas são solicitadas e sofrem deformações. Se as deformações forem pequenas, os descolamentos passam despercebidos e as tensões são proporcionais às deformações. As lâminas solicitadas dessa maneira, com pequenas deformações, trabalham dentro de suas faixas elásticas e obedecem à lei de Hooke. Aumentando os esforços, as deformações também aumentam e três eventos começam:

- o descolamento entre as fibras e a resina fica mais intenso. As trincas ficam mais longas, mais abertas e o número delas cresce;
- a resina desenvolve trincas;
- as fibras rompem nos pontos mais fracos.

4.10.1 Os três eventos

De acordo com Carvalho (2014), a ruptura das fibras não é causa de preocupação, porque as tensões que deixam de ser carregadas nos pontos de ruptura são transferidas para as fibras adjacentes. A transferência de tensões das fibras rompidas para as adjacentes é conhecida na literatura como “efeito compósito”. O “efeito compósito” explica dois fenômenos de extrema importância. São eles:

- os compósitos não são enfraquecidos pelas inúmeras rupturas que acontecem nas fibras, e mantém sua resistência até o final da vida estrutural, quando rompe em um processo conhecido como “morte súbita”.
- os compósitos têm grande resistência ao impacto e à fadiga, apesar de serem feitos combinando resinas e fibras de baixa tenacidade.

O “efeito compósito” explica porque os laminados mantêm a resistência mesmo quando as fibras sofrem múltiplas rupturas. O número de pontos de ruptura das fibras aumenta com o incremento dos esforços, mas sem enfraquecer o laminado. A ruptura do laminado ocorre subitamente, quando os pontos de ruptura aglutinam. Deste modo, a ruptura das fibras não deve ser a causa raiz (CARVALHO, 2014).

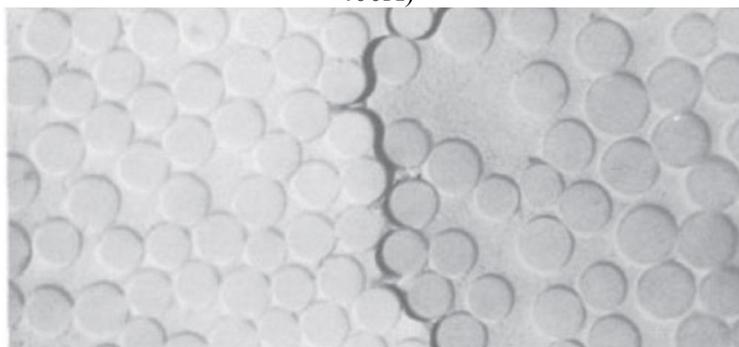
O descolamento entre as fibras e a resina é um evento rotineiro, que ocorre sempre que o compósito é deformado. As deformações causadas por variações de temperatura ou por cargas mecânicas, por menores que sejam, sempre separam a interface vidro-resina. Para pequenas deformações, isso não é importante. Porém, à medida que as deformações aumentam, aumentam também o comprimento, a densidade e a abertura de microtrincas até que, eventualmente, elas aglutinam e permitem a passagem de fluidos. A aglutinação dessas microtrincas é muito importante no estudo das falhas de tubos que trabalham sob pressão. O vazamento incipiente, que é observado nos tubos quando as microfissuras aglutinam, é conhecido como “exsudação” (CARVALHO, 2014).

De acordo com Carvalho (2014), as trincas que aparecem na resina, ao contrário das que ocorrem por descolamento entre resina e as fibras, são contidas pelas fibras e não aglutinam para permitir a exsudação de fluidos. O trincamento da resina é controlado pela sua tenacidade, que por sua vez depende do seu alongamento de ruptura. As resinas de alta

tenacidade (alto alongamento de ruptura) certamente têm maior resistência às trincas e às delaminações, quando comparadas às resinas rígidas. Entretanto, apesar disto, elas são usadas em aplicações estruturais para minimizar o descolamento da interfase vidro-resina, e não para minimizar o risco de trincas e de delaminações.

O descolamento entre as fibras e a resina abre microtrincas nos laminados, conforme verifica-se na figura 22. Essas microtrincas aumentam com a sollicitação de tração e dependem fundamentalmente da aderência vidro/resina e da tenacidade da resina da interfase (CARVALHO, 2014).

Figura 22 – Ruptura da interfase com descolamento entre as fibras e a resina (aumento de 400X)



Fonte: Carvalho, 2014.

4.10.2 A interfase e a interface

De acordo com Rezende et al (2011), o comportamento de um compósito não é explicado somente pelas propriedades específicas de seus componentes principais, reforço e matriz. A interface entre o reforço e a matriz também é importante, sendo considerada o terceiro componente de um compósito.

Em caso de compósitos, uma boa adesão reforço-matriz é essencial para que ocorra a transferência de esforços no laminado, principalmente as tensões de cisalhamento, de modo a garantir adequadas propriedades fora do plano do laminado. A boa transferência das tensões de cisalhamento tem influência na rigidez, tenacidade e comportamento de falha do compósito (REZENDE et al, 2011).

De acordo com Neto Levy e Pardini (2006), Rezende et al (2011) e Carvalho (2014), os conceitos de interfase e de interface são de extrema importância no estudo da vida estrutural dos compósitos. A falha por exsudação e a perda de rigidez sob cargas cíclicas são controladas pela dupla interfase-interface. O termo interface é aplicado para designar a superfície que separa as fibras da resina. Deste modo, uma interface forte aumenta a integridade do compósito e transfere a carga eficientemente às fibras, através da matriz, resultando em compósitos mais resistentes sob carregamentos mecânicos, como por exemplo tração ou flexão. Logo a interface pode ser alterada por meio de modificações físico-químicas da matriz e das características do reforço. O termo interfase designa a fina camada polimérica formada pela blenda da resina de laminação (matriz) e pelos ingredientes do tratamento superficial das fibras. Essa blenda forma uma fina camada que envolve as fibras. Essa fina camada, aparentemente insignificante, tem papel fundamental no descolamento vidro-resina. Obter uma adequada interfase / interface entre o reforço e a matriz em compósitos de elevado desempenho é o principal desafio da tecnologia de materiais compósitos.

5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

5.1 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios foram realizados de forma sistemática e em sequência com as amostragens de todas as condições necessárias, determinadas pelas normas nacionais (ABNT-NBR-15536-1 07 a ABNT-NBR-15536-4 07) ou normas internacionais (AWWA C950 07).

Foram realizados dois ensaios de longa duração contemplados neste estudo conforme abaixo:

- HDB (*Hydrostatic Design Basis*) conforme norma ASTM D2992 06.
- *Strain Corrosion* conforme norma ASTM D3681 06.

Foram também executados 8 (oito) ensaios de curta duração para caracterização dos tubos de HDB e / ou Strain Corrosion contemplados neste estudo conforme abaixo:

- tração axial;
- tração circunferencial;
- compressão axial;
- determinação da classe de rigidez;
- perda por ignição;
- determinação de efeito sobre água - Estireno residual;
- determinação de efeito sobre água - Migração específica de estireno e diclorometano;
- microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.2 MATERIAIS E CORPOS DE PROVAS

Os corpos de provas de tubos de PRFV utilizados nos ensaios têm as seguintes dimensões e construções, conforme tabela 2:

Tabela 2 – Dimensões e tipos de construções dos corpos de provas

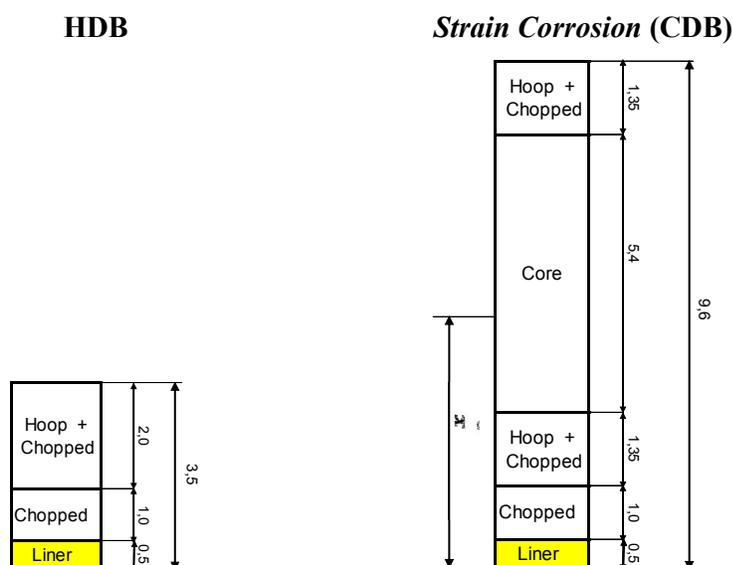
Corpos de provas (Tubos de PRFV)	<i>Hydrostatic Design Basis (HDB)</i>	<i>Strain Corrosion (CDB)</i>
Diâmetro (mm)	300	600
Espessura total (mm)	3,5	9,6
Espessura do <i>liner</i> (mm)	0,5	0,5
Espessura da barreira de exsudação (mm)	1,0	1,0
Espessura do <i>hoop-chop</i> (mm)	2,0	2,7 (2x 1,35)
Espessura do núcleo (mm)	-	5,4
Tipo de resina poliéster	PD 3535 (Reichhold)	PD 3535 (Reichhold)
Alongamento da resina poliéster	4,1%	4,1%
Tipo de fibra de vidro <i>Hoop</i>	ECR (Owens Corning)	ECR (Owens Corning)
Tipo de fibra de vidro <i>Chop</i>	ECR (Owens Corning)	ECR (Owens Corning)
Catalisador	Mekp DM 50	Mekp DM 50
Acelerador	6% Octoato de Cobalto	6% Octoato de Cobalto
Comprimento (mm)	1000	300
Ambiente do fluido	Água	5% H ₂ SO ₄
Temperatura de teste	23°C ± 3°C	23°C ± 2°C
Máximo alongamento (Curto prazo)	1,15%	1,4%
Mínimo alongamento (Longo prazo)	0,79%	0,8%
Tipo de extremidades	Restritas	Não aplicável
Nº de Amostras testadas (mínimo)	24	24

Os detalhes das lâminas de construções dos corpos de prova dos ensaios de HDB e *Strain Corrosion* estão descritos na tabela 3 e ilustrados na figura 23.

Tabela 3 – Detalhes das lâminas de construções dos corpos de provas

Lâmina	Espessura	% Fibra de vidro
Fibra contínua (<i>Hoop</i>)	$2 \times t_{chop}$	70 %
Fibra picada (<i>Chop</i>)	t_{chop}	45%
Núcleo de areia (<i>Core</i>)	$t_{núcleo}$ (cálculo)	10%
Barreira de exsudação (Fibra picada ou <i>chop</i>)	1,0 mm	45 %
<i>Liner</i>	0,5 mm	10%

Figura 23 – Detalhes das lâminas de construções dos corpos de provas de HDB e *Strain Corrosion*



Fonte: do próprio autor.

Nota: as dimensões estão em mm.

A espessura individual da lâmina estrutural de “Hoop + Chopped” não é relevante para este estudo e será tratada apenas como uma lâmina simples denominada “Hoop + Chopped”. O módulo desta lâmina é $E_{Hoop-Chop} = 30$ GPa.

Os métodos de ensaios ASTM para determinar o HDB e o *Strain Corrosion* exigem o mínimo de 18 (dezoito) pontos de falhas distribuídos ao longo do tempo conforme tabela 4.

Tabela 4 – Planejamento de experimentos

<i>Tempo de falha (horas)</i>	<i>Número mínimo de falhas exigidas</i>	<i>Nº de corpos de prova a serem testados</i>	<i>Identificação dos grupos</i>
10 a 1.000 h	04	09	A
1.000 a 6.000 h	03	06	B
Após 6.000 h	03	05	C
Após 10.000 h	01	04	D

Com o objetivo de obter o mínimo de 18 (dezoito) pontos de falhas é necessário ensaiar mais de 18 (dezoito) corpos de prova. O planejamento de experimentos contempla 24 (vinte e quatro) corpos de prova conforme descrito na tabela 4.

Os laboratórios da Empresa “A” têm 12 posições de ensaios disponíveis para as realizações dos ensaios de HDB e *Strain Corrosion*. Os ensaios iniciaram com os corpos de prova dos grupos A e B. Assim que os mesmos falharam, verificaram-se posições de ensaios livres para os corpos de prova dos grupos C e D. Deste modo foi possível ensaiar 24 corpos de provas utilizando apenas 12 dispositivos. Esta metodologia é aplicável ao laboratório de HDB e de *Strain Corrosion*.

5.3 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS DE LONGA DURAÇÃO

Os alongamentos mínimos e máximos previstos para os corpos de prova a serem submetidos aos ensaios de HDB e de *Strain Corrosion* estão descritos na tabela 5.

Tabela 5 – Alongamentos mínimos e máximos previstos para os corpos de provas

Tipo de ensaio	Alongamento mínimo (Falha no longo prazo)	Alongamento máximo (Falha no curto prazo)
HDB	0,79 %	1,15 %
<i>Strain Corrosion</i>	0,80 %	1,40 %

Nota: Os valores dos alongamentos da tabela 5 foram extraídos dos resultados dos ensaios de HDB publicados por Pearson (1997) e dos resultados dos ensaios de *Strain Corrosion* publicados por Pearson (1999).

5.4 DETALHES DOS ENSAIOS DE *HYDROSTATIC DESIGN BASIS* (HDB)

HDB (*Hydrostatic Design Basis*) ou também conhecido como “resistência à pressão hidrostática interna de longa duração” foi realizado conforme as normas ASTM D-2992 06, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07.

A determinação do HDB pode ser realizada na base de tensão circunferencial por tempo de falha ou na base de alongamento circunferencial por tempo de falha. Nesta dissertação foi adotada a base de alongamento circunferencial por tempo de falha.

Equipamentos e recursos:

- a) água.

- b) sistema de pressurização capaz de aplicar uma pressão hidrostática interna constante e uniforme no corpo de prova. O sistema deve ser capaz de atingir a pressão de ensaio sem excedê-la e mantê-la na tolerância especificada durante a duração do ensaio.
- c) equipamento de leitura de pressão com exatidão de $\pm 1\%$.
- d) cronômetro integrado ao sistema de pressurização, capaz de medir o tempo de falha com exatidão de $\pm 2\%$.
- e) dispositivo de fechamento das extremidades dos corpos de provas, capazes de permitir ou impedir a movimentação longitudinal durante o ensaio e que suportem as pressões atingidas. Os dispositivos não devem transmitir esforços aos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados em 24 (vinte e quatro) corpos de provas em laboratório na Empresa “A” especificamente montado para os ensaios de HDB, conforme figura 24, devidamente climatizado com 2 (dois) equipamentos de ar condicionado (12 (doze) horas de funcionamento contínuo cada) e com todos os equipamentos necessários e devidamente calibrados (manômetros e cronômetros). É importante salientar que os ensaios foram acompanhados por organismo independente DNV (Det Norske Veritas), a fim de verificar e testemunhar a conformidade do ensaio com as normas supracitadas.

Figura 24 – Laboratório de ensaios de *Hydrostatic Design Basis* (H.D.B.) para tubos de PRFV na Empresa “A”.



Fonte: do próprio autor.

Os ensaios de HDB foram realizados conforme as seguintes lâminas de construções dos corpos de prova ilustrados na figura 23.

Cálculo do módulo de elasticidade circunferencial (E) do tubo de HDB conforme equação 4:

$$E = \frac{(E_{Hoop} \times t_{Hoop-Chop} \times 2/3) + (E_{Chop} \times t_{Hoop-Chop} \times 1/3) + (E_{Chop} \times t_{Chop}) + (E_{Liner} \times t_{Liner})}{(t_{Hoop-Chop} + t_{Chop} + t_{Liner})} \quad (4)$$

Onde:

E_{Hoop} = Módulo de elasticidade da fibra de vidro contínua (Hoop) (MPa);

E_{Chop} = Módulo de elasticidade da fibra de vidro picada (Chop) (MPa);

E_{Liner} = Módulo de elasticidade da resina presente no Liner (MPa);

$t_{Hoop-Chop}$ = Espessura da lâmina estrutural de fibra de vidro contínua (Hoop) e picada (Chop) (mm);

t_{Chop} = Espessura da lâmina barreira de exsudação com fibra de vidro picada (Chop) (mm);

t_{Liner} = Espessura da lâmina liner (Liner) (mm);

$$E = \frac{(39.000 \times 2 \times 2/3) + (9.807 \times 2 \times 1/3) + (9.807 \times 1) + (3.236 \times 0,5)}{(2 + 1 + 0,5)}$$

$$\boxed{E = 20.000 MPa}$$

Cálculo das pressões necessárias:

Conforme Pearson (1997), a reta de regressão publicada pela Flowtite é a seguinte:

$$\boxed{\log \varepsilon = 0,124 - 0,055 \times \log(\text{tempo})} \quad (5)$$

$$P = \frac{2 \cdot E \cdot t \cdot \varepsilon}{\phi} \quad (6)$$

Onde:

ε = Alongamento circunferencial do tubo de HDB (%);

tempo = Tempo (horas);

P = Pressão (MPa);

E = Módulo de elasticidade circunferencial do tubo de HDB (MPa);

t = Espessura total do tubo de HDB (mm);

ϕ = Diâmetro interno do tubo de HDB (mm).

Utilizando as equações 4, 5 e 6, podem-se calcular os alongamentos e as pressões necessárias em função dos tempos de falhas, conforme resultado na tabela 6:

Tabela 6 – Cálculo de alongamentos e pressões para 24 tempos de falhas para os grupos A, B, C e D.

Nº do corpo de prova	Tempo (Horas)	Log (Tempo)	Quantidade de corpos de provas	Log (Alongam.)	Alongam. (%)	Pressão (kgf/cm ²)	Intervalo de tempo adotado entre as medições (Horas)
1	25	1,3979	9	0,047	1,115	53,00	1 h
2	50	1,6990		0,031	1,073	51,00	2 h
3	105	2,0212		0,013	1,030	49,00	4 h
4	225	2,3522		-0,005	0,988	47,00	8 h
5	335	2,5250		-0,015	0,966	46,00	12 h
6	500	2,6990		-0,024	0,945	45,00	20 h
7	615	2,7889		-0,029	0,935	44,50	24 h
8	750	2,8751		-0,034	0,924	44,00	24 h
9	925	2,9661		-0,039	0,914	43,50	24 h
10	1140	3,0569	6	-0,044	0,903	43,00	40 h
11	1750	3,2430		-0,054	0,882	42,00	40 h
12	2175	3,3375		-0,060	0,872	41,50	40 h
13	2700	3,4314		-0,065	0,862	41,00	40 h
14	3390	3,5302		-0,070	0,851	40,50	40 h
15	5350	3,7284		-0,081	0,830	39,50	40 h
16	6000	3,7782	5	-0,084	0,825	39,25	40 h
17	6700	3,8261		-0,086	0,820	39,00	40 h
18	7550	3,8779		-0,089	0,814	38,75	40 h
19	8500	3,9294		-0,092	0,809	38,50	40 h
20	9600	3,9823		-0,095	0,803	38,25	40 h
21	10200	4,0086	4	-0,096	0,801	38,12	40 h
22	10800	4,0334		-0,098	0,798	38,00	40 h
23	11475	4,0598		-0,099	0,796	37,87	40 h
24	12150	4,0846		-0,101	0,793	37,75	40 h

Nº total de corpos de provas	24
-------------------------------------	----

Fonte: do próprio autor.

5.5 DETALHES DOS ENSAIOS DE STRAIN CORROSION

O ensaio de *Strain Corrosion* ou também conhecido como *Corrosion Design Basis* (CDB) é um ensaio de longa duração destinado aos tubos de PRFV em condições de deflexão constante e submetidos ao ataque de produtos químicos, especificamente o H₂SO₄ em concentração de 5% em peso. Este ensaio foi realizado conforme as normas ASTM D-3681 06 e AWWA C-950 07.

A determinação do parâmetro CDB foi realizada na base de alongamento de flexão por tempo de falha, ou seja, por tempo de ruptura, conforme adotado nesta dissertação.

Portanto foi determinado o CDB, que é o alongamento de flexão que causará falha por ruptura no longo prazo, por meio deste ensaio estático embasado na avaliação da reta de regressão.

Equipamentos e recursos:

- a) solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) em concentração de 5% em peso;
- b) placas paralelas capazes de aplicar um carregamento constante ao corpo de prova com uso de 4 tirantes roscados;
- c) borracha elastomérica de 6 mm entre a superfície de contato e o segmento do anel a fim de alcançar um alongamento constante ao longo do corpo de prova;
- d) placas de vedação lateral em PVC;
- e) tanque com tamanho suficiente para imergir inteiramente os corpos de provas no meio líquido utilizado no ensaio. O tanque não deve reagir quimicamente com o líquido de ensaio e deverá servir de bacia de contenção;
- f) cronômetro aderido ao dispositivo de carregamento, capaz de medir o tempo de ruptura com exatidão de $\pm 2\%$;
- g) dispositivo de aplicação de carga.

Os ensaios foram realizados em 24 (vinte e quatro) corpos de provas em laboratório na Empresa “A” especificamente montado para os ensaios de *Strain Corrosion*, conforme figura 25, devidamente climatizado com 2 (dois) equipamentos de ar condicionado (12 (doze) horas de funcionamento contínuo cada) e com todos os equipamentos necessários e devidamente calibrados (cronômetros e termômetro). É importante salientar que os ensaios foram acompanhados por organismo independente DNV (Det Norske Veritas), a fim de verificar e testemunhar a conformidade do ensaio com as normas supracitadas.

Figura 25 – Laboratório de ensaios de *Strain Corrosion* para tubos de PRFV na Empresa “A”.



Fonte: do próprio autor.

As seguintes fórmulas foram necessárias para calcular a espessura para os corpos de provas ensaiados.

$$\varepsilon = \frac{428 \left(\frac{\Delta Y}{\phi} \right) \left(\frac{t}{\phi} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta Y}{2\phi} \right)^2} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\Delta Y}{\phi} < 0,25 \right) \quad (8)$$

Onde:

ε = Alongamento de flexão do tubo de Strain Corrosion (%);

ΔY = Deflexão do tubo de Strain Corrosion quando submetido ao carregamento (força) (mm);

ϕ = Diâmetro interno do tubo de Strain Corrosion (mm);

t = Espessura total do tubo de Strain Corrosion (mm).

A condição $\left(\frac{\Delta Y}{\phi} < 0,25 \right)$ é imposta para permitir o uso da equação (8) para calcular o alongamento de flexão. A equação (7), conforme a ASTM D 3681 06, é válida somente para deflexões inferiores a 25%.

5.6 Determinação da espessura mínima para os corpos de prova dos ensaios de *Strain Corrosion*

Analisando a equação (7) verifica-se:

$$\left(\frac{t}{\phi} \right) = \frac{\left(1 + \frac{\Delta Y}{2\phi} \right)^2}{428 \left(\frac{\Delta Y}{\phi} \right)} \varepsilon \quad (9)$$

Assumindo os seguintes valores na equação (9) acima:

$\varepsilon = 1,40$ % (alongamento máximo);

$\frac{\Delta Y}{\phi} = 0,25$ (condição de validade da equação 7);

$\phi = 600$ mm;

$$\left(\frac{t}{\phi}\right) = \frac{\left(1 + \frac{0,25}{2}\right)^2}{428(0,25)} \times 1,40 =$$

$$\left(\frac{t}{\phi}\right) = 0,017$$

$$t = 0,017 \times 600 \therefore t = 9,9 \text{ mm}$$

A espessura $t = 9,6$ mm será usada para a confecção dos corpos de prova destinados aos ensaios de *Strain Corrosion*, conforme figura 23.

Cálculo do alongamento de flexão para o ensaio de *Strain Corrosion*

Conforme Pearson (1999), a reta de regressão publicada pela Flowtite é a seguinte:

$$\boxed{\log \varepsilon = 0,220 - 0,071 \times \log(\text{tempo})} \quad (10)$$

Onde:

ε = Alongamento de flexão do tubo de *Strain Corrosion* (%);

tempo = Tempo (horas).

Utilizando a equação 10, podem-se calcular os alongamentos em função dos tempos de falhas, conforme resultado na tabela 7:

Tabela 7 – Alongamentos em função de 24 tempos de falhas para os grupos A, B, C e D

Nº do corpo de prova	Tempo (Horas)	Log (Tempo)	Quant. de corpos de provas	Log (Alongam.)	Alongam. (%)	Deflexão $\Delta Y / \sigma$	Intervalo de tempo adotado entre as medições (h)
1	10	1,0000	8	0,149	1,409	27,34%	1
2	30	1,4771		0,115	1,304	24,71%	2
3	100	2,0000		0,078	1,197	22,17%	8
4	150	2,1761		0,065	1,163	21,39%	24
5	250	2,3979		0,050	1,121	20,46%	24
6	500	2,6990		0,028	1,068	19,27%	24
7	700	2,8451		0,018	1,042	18,72%	48
8	900	2,9542		0,010	1,024	18,32%	48
9	1000	3,0000	6	0,007	1,016	18,15%	48
10	1400	3,1461		-0,003	0,992	17,64%	48
11	2000	3,3010		-0,014	0,967	17,12%	48
12	2800	3,4472		-0,025	0,945	16,64%	48
13	3500	3,5441		-0,032	0,930	16,33%	48
14	5600	3,7482		-0,046	0,899	15,71%	48
15	6000	3,7782	6	-0,048	0,895	15,62%	48
16	7000	3,8451		-0,053	0,885	15,42%	168
17	7600	3,8808		-0,056	0,880	15,31%	168
18	8200	3,9138		-0,058	0,875	15,22%	168
19	8800	3,9445		-0,060	0,871	15,13%	168
20	9400	3,9731		-0,062	0,867	15,05%	168
21	10000	4,0000	4	-0,064	0,863	14,97%	168
22	10500	4,0212		-0,066	0,860	14,91%	168
23	11000	4,0414		-0,067	0,857	14,85%	168
24	11500	4,0607		-0,068	0,854	14,80%	168

Nº total de corpos de provas 24

Fonte: do próprio autor.

5.7 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS DE CURTA DURAÇÃO

Foram realizados 8 (oito) ensaios de curta duração para a caracterização dos tubos de HDB e/ou *Strain Corrosion* contemplados neste estudo.

5.7.1 Tração axial dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas ASTM D-638 08, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07 e os resultados encontrados foram analisados

estatisticamente por meio do software Minitab – versão 16. A força de ruptura na tração axial e a resistência à tração axial foram determinadas em 05 (cinco) corpos de provas em máquina universal de ensaios (CETEC-MG), tipo eletromecânica, marca INSTRON, modelo 5869, com transdutor de força STF 100.02, marca INSTRON, modelo 2525-802, capacidade 50 KN.

5.7.2 Tração circunferencial dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas ASTM D-2290 04, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07 e os resultados encontrados foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab – versão 16. A força de ruptura na tração circunferencial e a resistência à tração circunferencial foram determinadas em 05 (cinco) corpos de provas em máquina de tração circunferencial (Empresa “A”), tipo hidráulica, com célula de carga de 500 KN, marca MK, modelo CL-001.

5.7.3 Compressão axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion

Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas ASTM D-695 08, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07 e os resultados encontrados foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab – versão 16. A força de ruptura na compressão axial e a resistência à compressão axial foram determinadas em 05 (cinco) corpos de provas em máquina universal de ensaios STF 109.00 (CETEC-MG), tipo hidráulica, marca MFL, modelo UPD20, capacidade 40 KN.

5.7.4 Determinação da Rigidez dos tubos de Strain Corrosion

O ensaio foi realizado em conformidade com as normas ASTM D-2412 08, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07. A classe de rigidez dos tubos de PRFV foi definida a partir do cálculo da rigidez na deformação diametral de 5%, bem como a avaliação do comportamento do tubo em outros níveis de deformação foi determinado em corpo de prova em prensa de pratos paralelos - marca EMIC (Empresa “A”), com célula de carga de 50 KN, marca MK, modelo MK-2030.

5.7.5 Perda por ignição (teores de fibra contínua, fibra picada e resina) dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas ASTM D-2584 08, AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07 e os resultados encontrados foram analisados estatisticamente. Os teores de fibra contínua, fibra picada e resina foram determinados em 05 (cinco) corpos de provas em balança digital de 3600 g (Empresa “A”), com resolução de 0,01g.

5.7.6 Determinação de Efeito sobre água - Estireno Residual dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR 15.536-01 07. A concentração de estireno residual na matéria plástica do tubo de PRFV foi determinada em 0,3 gramas de amostra de pedaços pequenos de área menor que 10 mm por 2 mm e espessura de aproximadamente 2 mm, por meio de análise cromatográfica em fase gasosa realizada pelo Laboratório de Química Industrial da TECPAR. Posteriormente foi avaliado o resultado e verificado a sua conformidade em relação à resolução nº 105 da ANVISA.

5.7.7 Determinação de Efeito sobre água – Migração Específica de estireno e diclorometano dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR 15.536-01 07. As concentrações de estireno e diclorometano que migram para a água em contato desta com corpos de prova do tubo de PRFV, por 24 h em temperatura de 40°C foram determinadas em 06 (seis) corpos de provas por meio de análise cromatográfica realizada pelo Laboratório de Química Industrial da TECPAR. Posteriormente foi avaliado o resultado e verificado a sua conformidade com a Portaria nº 518 da ANVISA.

5.7.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em 03 (três) amostras de tubos de HDB e 03 (três) amostras de tubos de Strain Corrosion recobertos com ouro de modo a caracterizar qualitativamente a microestrutura presente ao longo da espessura da parede do tubo com as suas diversas lâminas e obtidas imagens com as ampliações de 50X e de 100X. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado com uma espectrometria

de energia dispersiva de raios X (EDS) marca Shimadzu, modelo Superscan SSX-550 do Laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Campus I, conforme indica a figura 26.

Figura 26 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) – Modelo Superscan SSX-550.



Fonte: do próprio autor.

6. RESULTADOS

6.1 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVAS DOS TUBOS DE HDB

6.1.1 Ensaio de HDB

O ensaio de HDB foi realizado conforme a ASTM D-2992 06 – Procedimento B, o qual se obteve 24 (vinte e quatro) corpos de provas com falhas que variaram o tempo de falha entre 2,96 (dois vírgula noventa e seis) horas e mais de 13.000 (treze mil) horas, conforme resultados dos testes de HDB (*Hydrostatic Design Basis*) descritos na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado do ensaio de HDB (*Hydrostatic Design Basis*) para tubos PRFV

Nº do corpo de prova	Tempo previsto (Horas)	Log (Tempo)	Log (Alongam.)	Alongam. (%)	Pressão (kgf/cm ²)	Pressão (MPa)	Tempo real da falha (Horas)
1	25	1,3979	0,047	1,115	53,00	5,20	2,96
46	25	1,3979	0,047	1,115	53,00	5,20	2.739,11
45	25	1,3979	0,047	1,115	53,00	5,20	2.498,85
51	25	1,3979	0,047	1,115	53,00	5,20	3.427,49
15	30	1,4771	0,043	1,103	52,50	5,15	1.166,68
47	30	1,4771	0,043	1,103	52,50	5,15	478,26
17	35	1,5441	0,039	1,094	52,00	5,10	555,06
48	35	1,5441	0,039	1,094	52,00	5,10	2.943,29
49	35	1,5441	0,039	1,094	52,00	5,10	2.567,50
31	42	1,6232	0,035	1,083	51,50	5,05	49,50
30	42	1,6232	0,035	1,083	51,50	5,05	71,18
2	50	1,6990	0,031	1,073	51,00	5,00	963,88
42	50	1,6990	0,031	1,073	51,00	5,00	4.788,40
44	60	1,7782	0,026	1,062	50,50	4,95	22,84
40	60	1,7782	0,026	1,062	50,50	4,95	4.958,63
3	105	2,0212	0,013	1,030	49,00	4,81	5.997,48
4	225	2,3522	-0,005	0,988	47,00	4,61	7.871,61
5	335	2,5250	-0,015	0,966	46,00	4,51	8.802,20
6	500	2,6990	-0,024	0,945	45,00	4,41	11.193,03
8	750	2,8751	-0,034	0,924	44,00	4,31	13.127,46
9	925	2,9661	-0,039	0,914	43,50	4,27	13.222,39
10	1.140	3,0569	-0,044	0,903	43,00	4,22	6.998,47
11	1.750	3,2430	-0,054	0,882	42,00	4,12	10.195,11
12	2.175	3,3375	-0,060	0,872	41,50	4,07	13.396,35

Fonte: do próprio autor.

O tempo para a exsudação é caracterizado como o tempo para a água atravessar a parede do tubo através de microtrincas. Essas microtrincas são muito irregulares, com comprimentos e aberturas diferentes para igual alongamento.

As falhas dos corpos de provas de HDB foram caracterizadas como exsudação, ou seja, vazamentos ocorridos pelas passagens de água através das microtrincas formadas na interfase vidro-resina quando os tubos estavam pressurizados, conforme indicam as figuras 27 a 32.

A figura 27 indica o manômetro com a pressão de 51,5 kgf/cm² (5,05 MPa) após a ocorrência da falha por exsudação do CP 48 identificada com 2.943,29 horas de ensaio de HDB. A pressão inicialmente especificada para o ensaio do CP 48 foi 52,0 Kgf/cm² (5,10 MPa), conforme tabela 8. A figura 28 caracteriza a falha por exsudação na região central do CP 48 conforme assinalado com as setas indicativas.

Figura 27 – Manômetro com a pressão de 51,5 kgf/cm² (5,05 MPa) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 48)



Fonte: do próprio autor.

Figura 28 – Falha por exsudação após 2.943,29 horas de ensaio de HDB (CP 48)



Fonte: do próprio autor.

A figura 29 indica o manômetro com a pressão de $50,0 \text{ kgf/cm}^2$ ($4,90 \text{ MPa}$) após a ocorrência da falha por exsudação do CP 40 identificada com 4.958,63 horas de ensaio de HDB. A pressão inicialmente especificada para o ensaio do CP 40 foi $50,5 \text{ Kgf/cm}^2$ ($4,95 \text{ MPa}$), conforme tabela 8. A figura 30 caracteriza a falha por exsudação do CP 40 conforme assinalado com as setas indicativas.

Figura 29 – Manômetro com a pressão de $50,0 \text{ kgf/cm}^2$ ($4,90 \text{ MPa}$) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 40)



Fonte: do próprio autor.

Figura 30 – Falha por exsudação após 4.958,63 horas de ensaio de HDB (CP 40)



Fonte: do próprio autor.

A figura 31 indica o manômetro com a pressão de $43,0 \text{ kgf/cm}^2$ ($4,22 \text{ MPa}$) após a ocorrência da falha por exsudação do CP 9 identificada com 13.222,39 horas de ensaio de HDB. A pressão inicialmente especificada para o ensaio do CP 9 foi $43,5 \text{ Kgf/cm}^2$ ($4,27 \text{ MPa}$), conforme tabela 8. A figura 32 caracteriza a falha por exsudação na região central do CP 9 conforme assinalado com as setas indicativas.

Figura 31 – Manômetro com a pressão de $43,0 \text{ kgf/cm}^2$ ($4,22 \text{ MPa}$) após falha por exsudação no ensaio de HDB (CP 9)



Fonte: do próprio autor.

Figura 32 – Falha por exsudação após 13.222,39 horas de ensaio de HDB (CP 9)



Fonte: do próprio autor.

O mínimo de 18 (dezoito) corpos de prova com falhas é o requerido pela referida norma ASTM D-2992 06 – Procedimento B e distribuídos em intervalos de tempos determinados conforme Tabela 9. Este requisito foi cumprido de modo satisfatório com 24 (vinte e quatro) corpos de prova com falhas, conforme descrito na tabela 8 e 9.

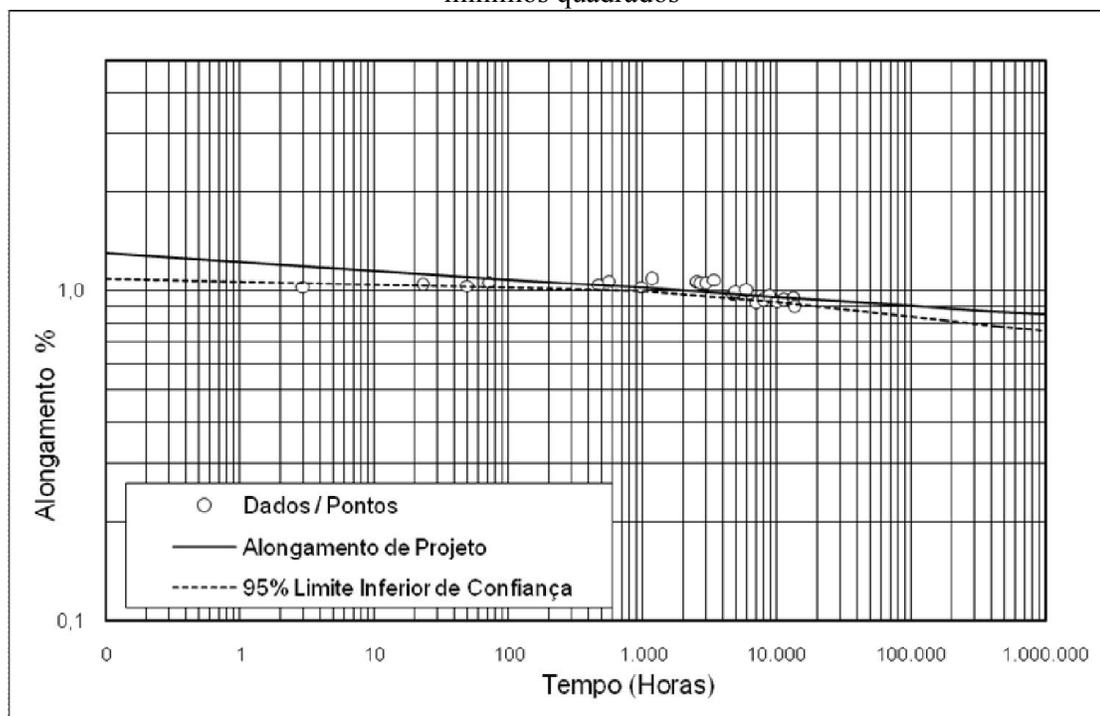
Tabela 9 – Números de experimentos de HDB realizados comparados aos números de experimentos mínimos por tempo de falha em horas

<i>Tempo de falha (horas)</i>	<i>Número mínimo de falhas exigidas no ensaio de HDB</i>	<i>Número de falhas obtidas no ensaio de HDB</i>	<i>Resultado</i>
10 a 1.000 h	04	07	Satisfatório
1.000 a 6.000 h	03	09	Satisfatório
Após 6.000 h	03	08	Satisfatório
Após 10.000 h	01	05	Satisfatório
Ensaio completo	18	24	Satisfatório

Fonte: do próprio autor.

A figura 33 e a tabela 10 indicam que a análise dos dados de HDB foi realizada pelo método dos mínimos quadrados para o alongamento circunferencial, utilizando-se o tempo como variável dependente e estabeleceu para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança o valor de HDB de 0,784% para alongamento. Os requisitos da norma ASTM D-2992 06- Procedimento B foram cumpridos integralmente, assegurando a validade dos dados. O coeficiente de correlação (r) obtido foi 0,561. Este valor de correlação quando comparado ao valor mínimo permitido de 0,514 foi satisfatório, conforme previsto na norma ASTM D-2992 06.

Figura 33 – Gráfico relativo ao cálculo do HDB (*Hydrostatic Design Basis*) pelo método dos mínimos quadrados



Fonte: do próprio autor.

Tabela 10 – Cálculo do HDB (*Hydrostatic Design Basis*) pelo método dos mínimos quadrados com 95% de limite inferior de confiança

Alongamento Projetado (%)	Tempo (Horas)	95% Limite inferior de Confiança (Alongamento Projetado (%))
1,297	0,1	1,093
1,081	100	1,024
1,018	1.000	0,992
0,958	10.000	0,921
0,901	100.000	0,836
0,888	175.200	0,816
0,867	438.000	0,784
0,848	1.000.000	0,757
HDB: Alongamento de Projeto (50 anos) / Coeficiente de segurança AWWA C-950		
Alongamento projetado de HDB (%) (Admissível)	Tempo (Horas)	95% Limite inferior de Confiança
HDB = 0,867 / 1,8	438.000	HDB (95% LCL) = 0,784 / 1,8
HDB = 0,482		HDB (95% LCL) = 0,436

Fonte: do próprio autor.

Foi desenvolvida e obtida a equação de regressão linear de HDB em função de alongamento, conforme a equação (11), pelo método dos mínimos quadrados.

$$\log(\text{Alongam.}) = 0,0866 - 0,0263 \times \log(\text{Tempo}) \quad (11)$$

Analogamente foi desenvolvida e obtida a equação de regressão linear de HDB em função de tempo, conforme a equação (12), pelo método dos mínimos quadrados.

$$\log(\text{Tempo}) = 3,287 - 37,951 \times \log(\text{Alongam.}) \quad (12)$$

O resultado alcançado no ensaio de HDB de 0,784% de alongamento para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança é compatível e está ligeiramente superior aos resultados encontrados na literatura, quando comparado aos valores obtidos por outras pesquisas no mundo. PEARSON (1988a) obteve o resultado no ensaio de HDB de 0,63% de alongamento para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança por meio de ensaios realizados na empresa Owens Corning, em 1988, na Bélgica, conforme a norma ASTM D 2992 – Procedimento B, utilizando-se o total de 27 corpos de

provas com comprimento de 2 metros e diâmetro de 600 mm. Posteriormente Pearson (1997) obteve novo resultado no ensaio de HDB de 0,65% por meio de ensaios realizados na empresa Flowtite, em 1997, na Noruega, utilizando-se o total de 44 corpos de provas com comprimento de 1 metro para diâmetro de 150 mm e comprimento de 2 metros para diâmetro de 600 mm. As referências e as publicações de resultados são escassas, pois se tratam de ensaios caros em função da montagem do laboratório, aquisição de equipamentos e instrumentação, números de corpos de provas e acompanhamento permanente por funcionários por mais de 10.000 (dez mil) horas ininterruptas, os quais são normalmente realizados pelos fabricantes de tubos de PRFV e não publicados na literatura.

6.1.2 Tração axial dos corpos de provas dos tubos de HDB

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. O limite mínimo especificado de resistência à tração axial é de 31,3 MPa, conforme AWWA C-950 07 e evidenciado nas figuras 34 e 35. O valor médio encontrado de resistência à tração axial foi 125,41 MPa, conforme indicado na tabela 11 e na figura 35. O valor mínimo encontrado de resistência à tração axial foi 103,32 MPa, conforme indicado na tabela 11 e nas figuras 34 e 35.

Tabela 11 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB

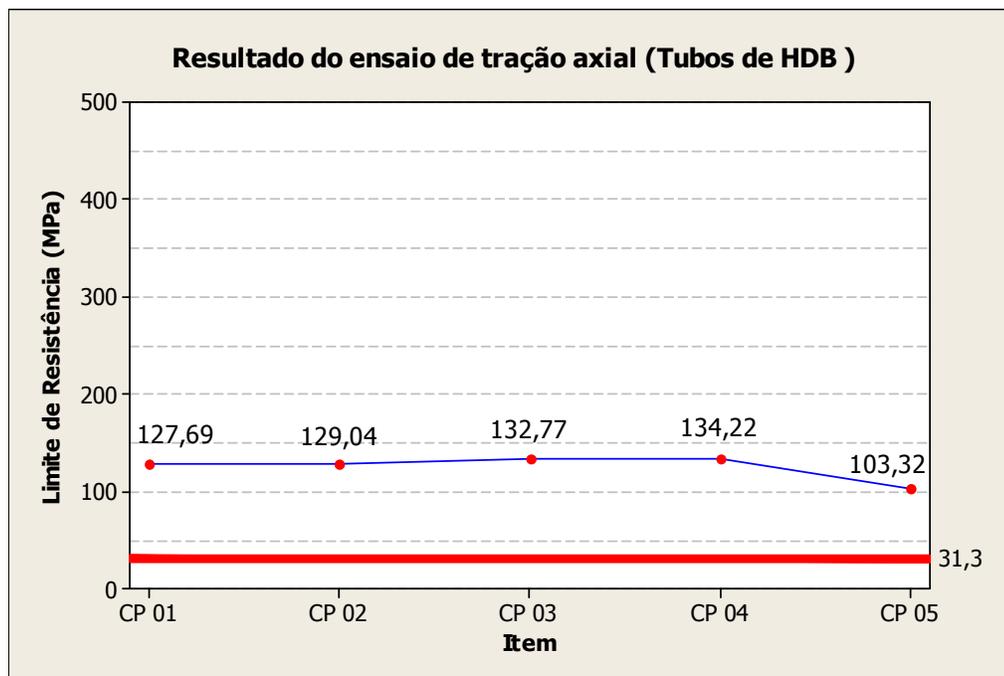
Item	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão
CP 01	13,36	3,57	6090	127,69	12,78
CP 02	13,13	3,70	6269	129,04	12,78
CP 03	13,16	3,62	6325	132,77	12,78
CP 04	13,20	3,54	6272	134,22	12,78
CP 05	13,05	3,60	4854	103,32	12,78
Média:	13,18	3,61	5962	125,41	-

Fonte: do próprio autor.

Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados são satisfatórios. Foi verificado que a média do limite de resistência (125,41 MPa) ficou aproximadamente 04 (quatro) vezes superior ao valor mínimo especificado (31,3 MPa). Foi constatado que o ensaio apresentou 04 resultados homogêneos e que o valor mínimo encontrado de tração axial (103,32 MPa) não é considerado um resultado anômalo, visto que reflete as possíveis

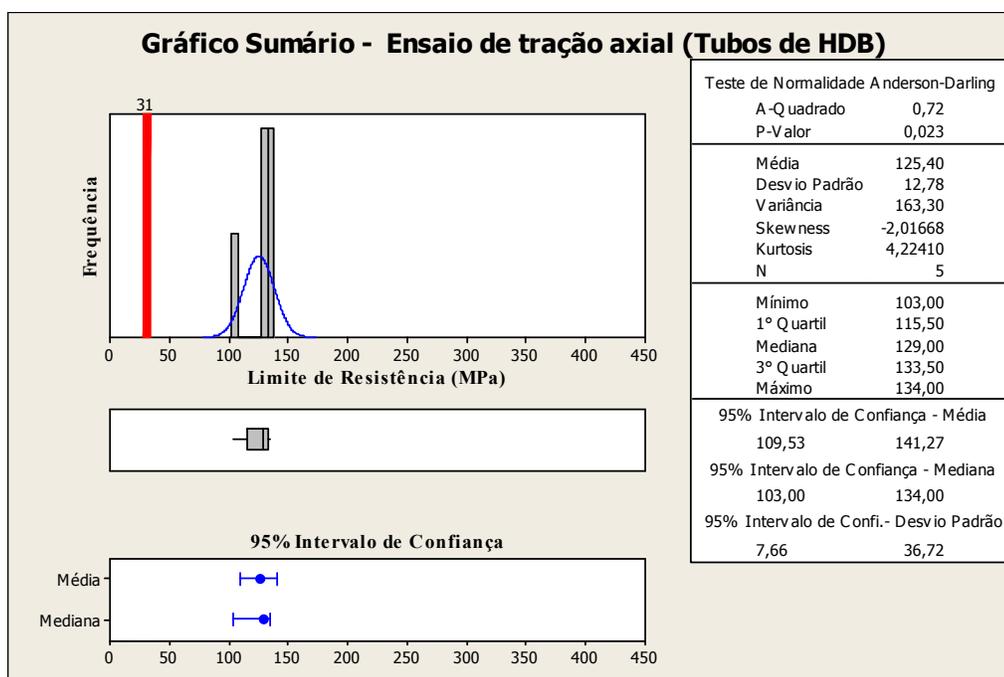
variações no processo produtivo de compósitos e no respectivo processo de confecção de corpos de provas de tração axial.

Figura 34 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB



Fonte: do próprio autor.

Figura 35 – Gráfico sumário: ensaio de tração axial em amostras dos tubos de HDB



Fonte: do próprio autor.

6.1.3 Tração circunferencial dos corpos de provas dos tubos de HDB

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. O limite mínimo especificado de resistência à tração circunferencial é de 300 MPa, conforme AWWA C-950 07 e evidenciado nas figuras 36 e 37. O valor médio encontrado de resistência à tração circunferencial foi 400,53 MPa, conforme indicado na tabela 12 e na figura 37. O valor mínimo encontrado de resistência à tração circunferencial foi de 351,28 MPa, conforme indicado na tabela 12 e nas figuras 36 e 37.

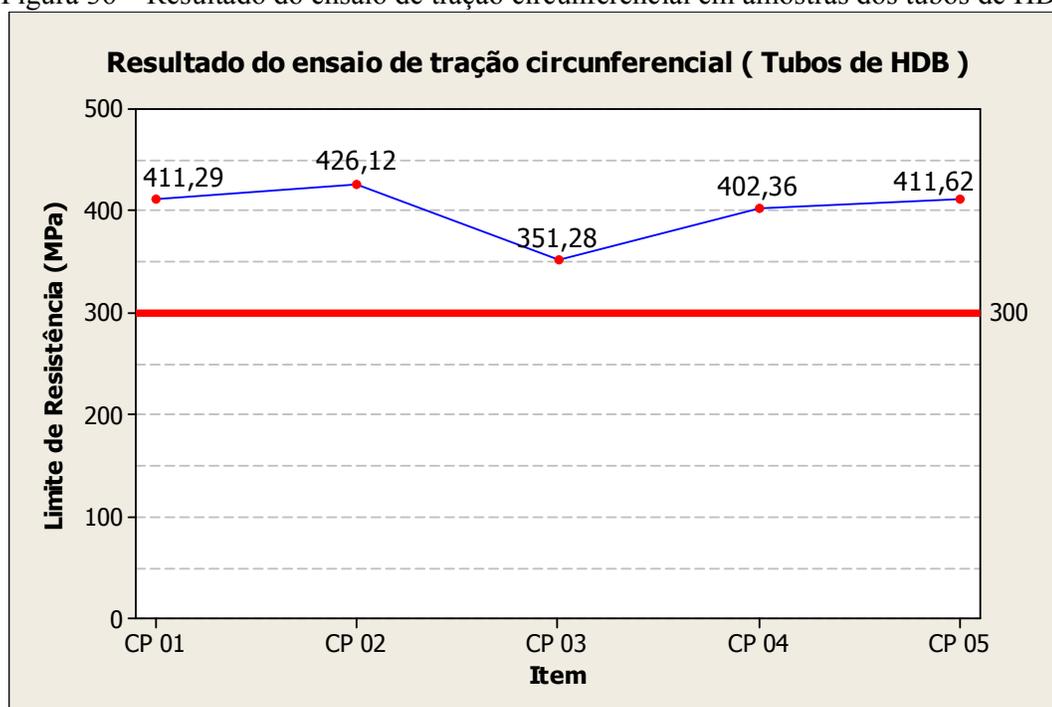
Tabela 12 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB

Item	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão
CP 01	25,24	3,78	39240	411,29	28,82
CP 02	25,15	3,57	38259	426,12	28,82
CP 03	25,32	3,75	33354	351,28	28,82
CP 04	25,34	3,56	36297	402,36	28,82
CP 05	25,22	3,78	39240	411,62	28,82
Média:	25,25	3,69	37278	400,53	-

Fonte: do próprio autor.

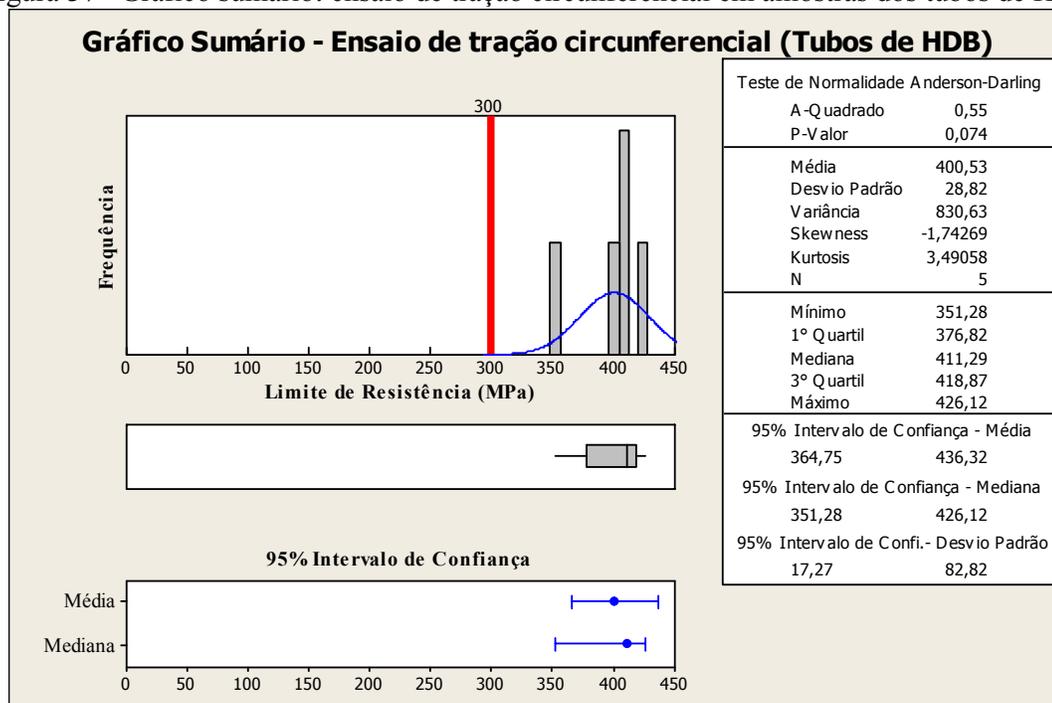
Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados são satisfatórios. Foi verificado que a média do limite de resistência (400,53 MPa) ficou aproximadamente 34% superior ao valor mínimo especificado (300,00 MPa). Foi constatado que o ensaio apresentou 04 resultados homogêneos e que o valor mínimo encontrado de tração circunferencial (351,28 MPa) não é considerado um resultado anômalo, visto que reflete as possíveis variações no processo produtivo de compósitos e no respectivo processo de confecção de corpos de provas de tração circunferencial.

Figura 36 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB



Fonte: do próprio autor.

Figura 37– Gráfico sumário: ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de HDB



Fonte: do próprio autor.

6.1.4 Perda por ignição (teores de fibra contínua, fibra picada e resina) dos corpos de provas dos tubos de HDB

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. A composição especificada é de 48,0 % para resina, 26,5 % para fibra contínua e 25,5% para fibra picada, com tolerâncias de 5% estabelecidas pela AWWA C-950 07. Os valores médios encontrados foram 45,96 % para resina, 27,68 % para fibra contínua e 26,36% para fibra picada, conforme indicado na tabela 13.

Tabela 13 – Resultado do ensaio de perda por ignição em amostras dos tubos de HDB

Ítem	Resina (%)	Fibra contínua (%) (Hoop)	Fibra picada (%) (Chop)
CP 01	45,82	28,60	25,58
CP 02	44,65	27,68	27,67
CP 03	45,22	28,77	26,01
CP 04	44,82	26,78	28,40
CP 05	49,29	26,55	24,16
Média:	45,96	27,68	26,36
Especificado por ítem (%)	48,0 ± 5	26,5 ± 5	25,5 ± 5
Mediana:	45,22	27,68	26,01
Desvio Padrão:	1,915	1,015	1,692
Variância:	3,668	1,030	2,862

Fonte: do próprio autor.

Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados da composição (resina, fibra contínua e fibra picada) são satisfatórios e refletem as possíveis variações no processo produtivo de compósitos.

6.1.5 Determinação de efeito sobre água - estireno residual dos corpos de provas

Os ensaios foram realizados em 0,3 gramas de amostra de pedaços pequenos de área menor que 10 mm por 2 mm e espessura de aproximadamente 2 mm. O limite máximo especificado de estireno residual é de 2500mg/Kg, conforme ABNT NBR 15.536-01 07 e resolução nº 105 da ANVISA. O valor médio encontrado de estireno residual é de 32mg/Kg.

6.1.6 Determinação de efeito sobre água – migração específica de estireno e diclorometano dos corpos de provas

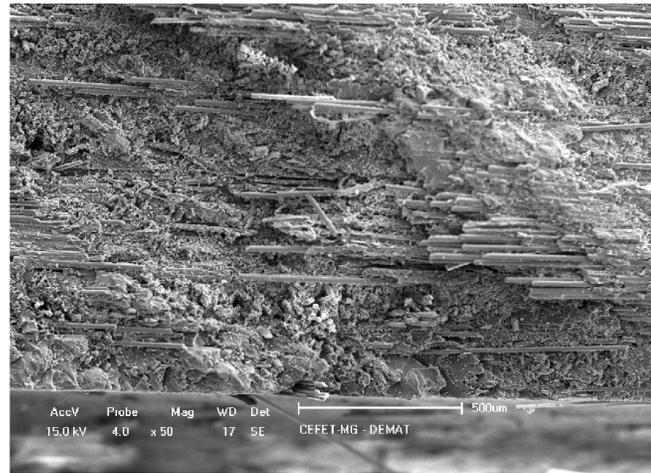
Os ensaios foram realizados em 06 (seis) corpos de provas. O limite máximo especificado para a migração específica de estireno e diclorometano é de 20µg/L, conforme ABNT NBR 15.536-01 07 e resolução nº 518 da ANVISA. O valor médio encontrado de migração específica de estireno e diclorometano é de 2,1µg/L.

6.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas de tubos de HDB

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em 03 (três) amostras de tubos de HDB ao longo da espessura da parede do tubo com as suas diversas lâminas e obtidas imagens com ampliações de 50 vezes e de 100 vezes, conforme indicam as figuras 38 a 43. Não foram fornecidas para a análise do MEV as amostras dos tubos após a realização do ensaio de HDB contemplando as falhas por exsudação, entretanto a empresa “A” disponibilizou amostras de tubos não ensaiados no HDB, os quais foram produzidos dentro da mesma corrida de fabricação dos tubos de HDB.

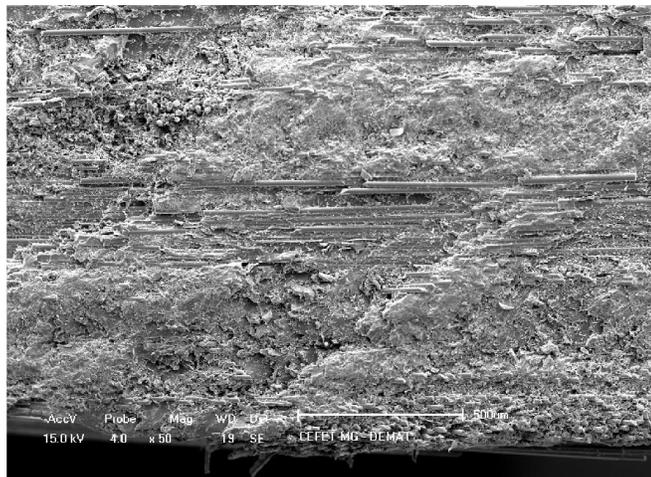
Foi observada e caracterizada qualitativamente a microestrutura composta de resina e fibras de vidro, conforme indicado nas imagens de MEV com ampliações de 50 vezes no CP 01, CP 02 e CP 03. Foi evidenciada a homogeneidade do material compósito e a adesão da resina poliéster insaturada com a fibra de vidro, conforme indicado nas imagens de MEV com ampliações de 100 vezes no CP 01, CP 02 e CP 03. O ensaio foi considerado satisfatório.

Figura 38 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 01



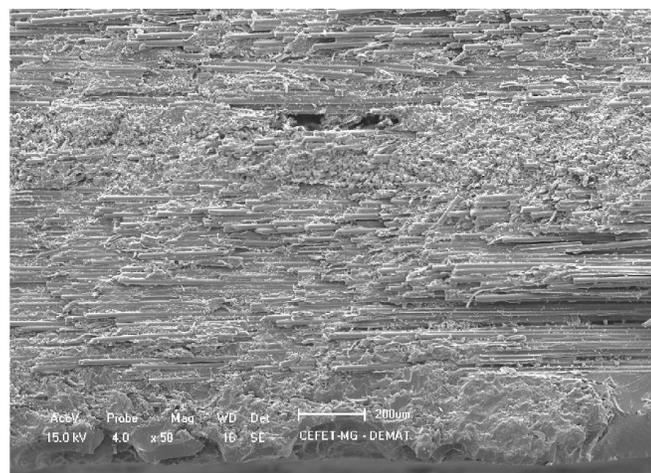
Fonte: do próprio autor.

Figura 39 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 02



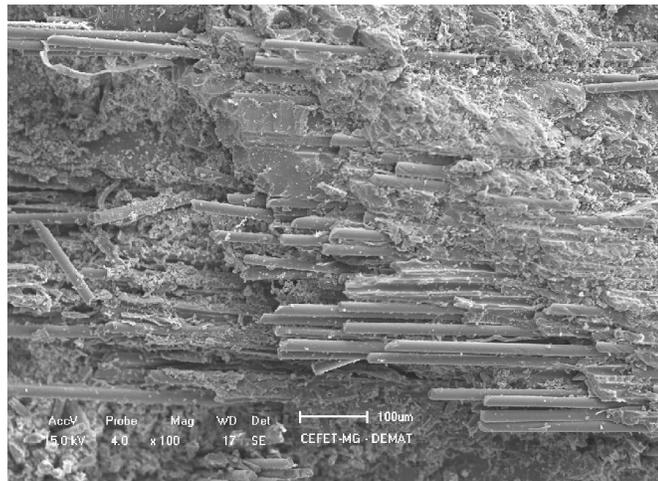
Fonte: do próprio autor.

Figura 40 – Imagem MEV com ampliação de 50X – Tubo HDB – CP 03



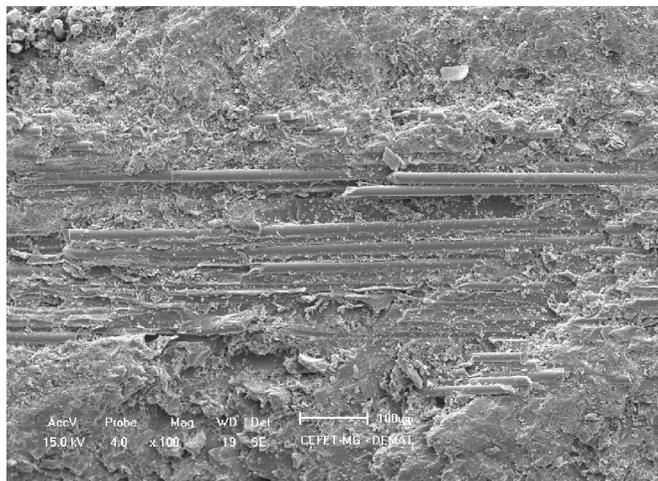
Fonte: do próprio autor.

Figura 41 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 01



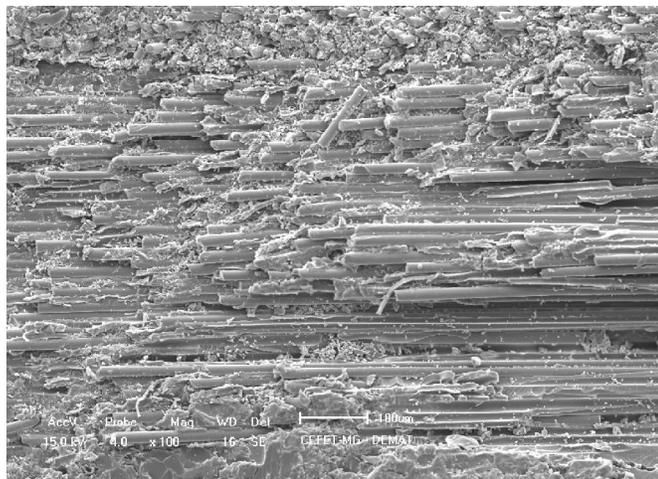
Fonte: do próprio autor.

Figura 42 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 02



Fonte: do próprio autor.

Figura 43 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo HDB – CP 03



Fonte: do próprio autor.

6.2 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVAS DOS TUBOS DE STRAIN CORROSION

6.2.1 Ensaio de Strain Corrosion

O ensaio de Strain Corrosion foi realizado conforme a ASTM D-3681 06, o qual obtiveram-se 24 (vinte e quatro) corpos de provas com falhas que variaram o tempo de falha entre 13,84 (treze vírgula oitenta e quatro) horas e mais de 13.000 (treze mil) horas, conforme resultados dos testes de Strain Corrosion descritos na tabela 14. As falhas dos corpos de provas de Strain Corrosion foram caracterizadas como vazamento do fluido de teste (ácido sulfúrico em concentração de 5%) através da parede do tubo para a bandeja de contenção, quando submetido à deformação circunferencial constante.

Tabela 14 – Resultado do ensaio de Strain Corrosion

Nº do corpo de prova	Tempo previsto (Horas)	Log (Tempo)	Log (Alongam.)	Alongamento (%)	Deflexão $\Delta Y / \sigma$	Tempo real da falha (Horas)
13	1	0,0000	0,220	1,660	34,16%	13,84
15	1,5	0,1761	0,207	1,612	32,81%	21,09
16	2	0,3010	0,199	1,580	31,89%	53,42
17	3	0,4771	0,186	1,535	30,66%	42,62
39	4	0,6021	0,177	1,504	29,82%	66,34
18	4	0,6021	0,177	1,504	29,82%	114,11
38	6	0,7782	0,165	1,461	28,69%	284,33
37	6	0,7782	0,165	1,461	28,69%	92,95
19	6	0,7782	0,165	1,461	28,69%	547,27
20	8	0,9031	0,156	1,432	27,92%	1.270,54
21	9	0,9542	0,152	1,420	27,61%	477,73
1	10	1,0000	0,149	1,409	27,34%	2.221,69
22	12	1,0792	0,143	1,391	26,88%	665,50
24	17	1,2304	0,133	1,357	26,03%	2.153,38
30	20	1,3010	0,128	1,342	25,64%	1.845,08
33	26	1,4150	0,120	1,317	25,03%	6.336,57
34	30	1,4771	0,115	1,304	24,71%	2.762,87
35	34	1,5315	0,111	1,292	24,43%	4.032,89
36	38	1,5798	0,108	1,282	24,18%	3.816,69
3	100	2,0000	0,078	1,197	22,17%	13.897,52
4	150	2,1761	0,065	1,163	21,39%	9.645,74
5	250	2,3979	0,050	1,121	20,46%	10.001,73
6	500	2,6990	0,028	1,068	19,27%	13.910,85
7	700	2,8451	0,018	1,042	18,72%	13.918,51

Fonte: do próprio autor.

As falhas dos corpos de provas de Strain Corrosion foram caracterizadas como degradação do liner e ruptura das fibras de vidro sob tensão de flexão quando os tubos estavam submetidos aos alongamentos de flexão constantes, conforme indicam as figuras 44 a 49. Simultaneamente às rupturas das fibras de vidro dos corpos de provas, foram observados vazamentos de ácido sulfúrico para as bandejas de contenções.

A figura 44 caracteriza a falha por ruptura na região inferior do CP 18, conforme assinalado com a seta indicativa, a qual foi identificada com 114,11 horas de ensaio de Strain Corrosion. A deflexão inicialmente especificada para o ensaio do CP 18 foi 29,82% conforme definido na tabela 14. A figura 45 indica o cronômetro com o tempo de 119,18 horas, a qual caracteriza o aumento da falha por ruptura ao longo de toda a região inferior do CP 18.

Figura 44 – Falha por ruptura após 114,11 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 18)



Fonte: do próprio autor.

Figura 45 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion registrando o aumento da falha (CP 18)



Fonte: do próprio autor.

A figura 46 caracteriza a falha por ruptura na região inferior do CP 38, conforme assinalado com a seta indicativa. A falha foi identificada com 284,33 horas de ensaio de Strain Corrosion, conforme registrado no cronômetro indicado na figura 47. A deflexão inicialmente especificada para o ensaio do CP 38 foi 28,69% conforme definido na tabela 14.

Figura 46 – Falha por ruptura após 284,33 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 38)



Fonte: do próprio autor.

Figura 47 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion no momento da falha (CP 38)



Fonte: do próprio autor.

A figura 48 caracteriza a falha por ruptura na região inferior do CP 20, conforme assinalado com a seta indicativa. A falha foi identificada com 1270,54 horas de ensaio de Strain Corrosion, conforme registrado no cronômetro indicado na figura 49. A deflexão inicialmente especificada para o ensaio do CP 20 foi 27,92% conforme definido na tabela 14.

Figura 48 – Falha por ruptura após 1270,54 horas de ensaio de Strain Corrosion (CP 20)



Fonte: do próprio autor.

Figura 49 – Tempo de ensaio de Strain Corrosion no momento da falha (CP 20)



Fonte: do próprio autor.

O mínimo de 18 (dezoito) corpos de prova com falhas é o requerido pela referida norma ASTM D-3681 06 e distribuídos em intervalos de tempos determinados conforme Tabela 15. Este requisito foi cumprido de modo satisfatório com 24 (vinte e quatro) corpos de prova com falhas, conforme descrito na Tabela 14 e Tabela 15.

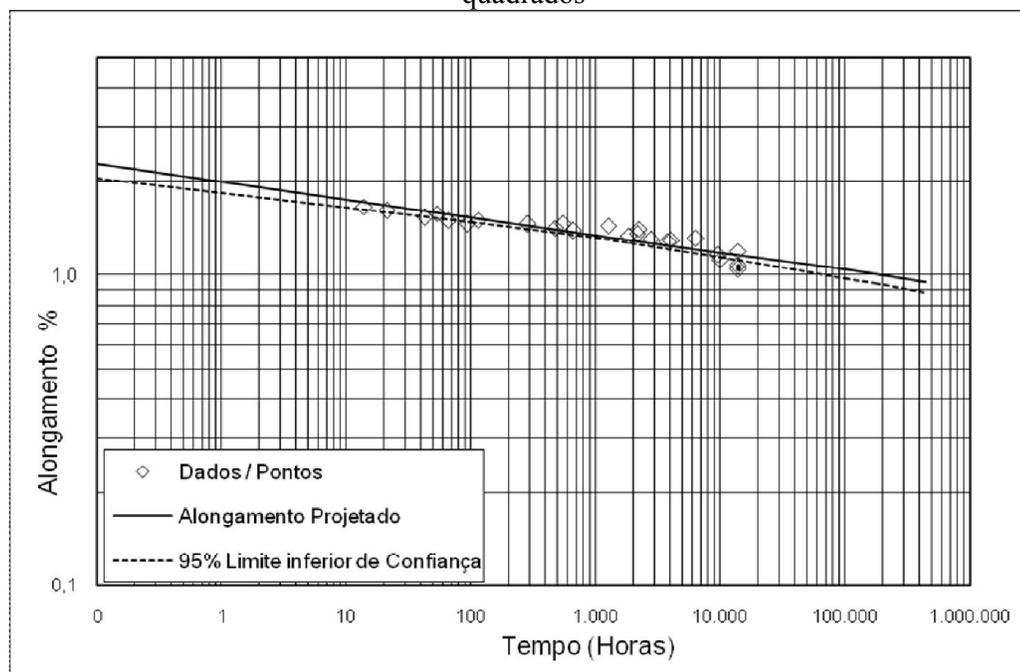
Tabela 15 – Números de experimentos de Strain Corrosion realizados comparados aos números de experimentos mínimos por tempo de falha em horas

<i>Tempo de falha (horas)</i>	<i>Número mínimo de falhas exigidas no ensaio de Strain Corrosion</i>	<i>Número de falhas obtidas no ensaio de Strain Corrosion</i>	<i>Resultado</i>
10 a 1.000 h	04	11	Satisfatório
1.000 a 6.000 h	03	07	Satisfatório
Após 6.000 h	03	06	Satisfatório
Após 10.000 h	01	04	Satisfatório
Ensaio completo	18	24	Satisfatório

Fonte: do próprio autor.

A figura 50 e a tabela 16 indicam que a análise dos dados de Strain Corrosion foi realizada pelo método dos mínimos quadrados para o alongamento circunferencial, utilizando-se o tempo como variável dependente e estabeleceu para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança o valor de Strain Corrosion de **0,886%** para alongamento. Os requisitos da norma ASTM D-3681 06 foram cumpridos integralmente, assegurando a validade dos dados. O coeficiente de correlação (r) obtido foi 0,913. Este valor de correlação quando comparado ao valor mínimo permitido de 0,514 foi satisfatório, conforme previsto na norma ASTM D-3681 06.

Figura 50 – Gráfico relativo ao cálculo do Strain Corrosion pelo método dos mínimos quadrados



Fonte: do próprio autor.

Tabela 16 – Cálculo do Strain Corrosion pelo método dos mínimos quadrados com 95% de limite inferior de confiança

Alongamento Projetado (%)	Tempo (Horas)	95% Limite inferior de Confiança (Alongamento Projetado (%))
2,280	0,1	2,054
1,538	100	1,488
1,349	1.000	1,319
1,183	10.000	1,141
1,038	100.000	0,979
1,005	175.200	0,942
0,954	438.000	0,886

Fonte: do próprio autor.

Foi desenvolvida e obtida a equação de regressão linear de Strain Corrosion em função de alongamento, conforme a equação (13), pelo método dos mínimos quadrados.

$$\log(\text{Alongam.}) = 0,3009 - 0,0570 \times \log(\text{Tempo}) \quad (13)$$

Analogamente foi desenvolvida e obtida a equação de regressão linear de Strain Corrosion em função de tempo, conforme a equação (14), pelo método dos mínimos quadrados.

$$\log(\text{Tempo}) = 5,282 - 17,551 \times \log(\text{Alongam.}) \quad (14)$$

O resultado alcançado no ensaio de Strain Corrosion de 0,886% de alongamento para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança é compatível e está ligeiramente superior aos resultados encontrados na literatura, quando comparado aos valores obtidos por outras pesquisas no mundo. PEARSON (1988b) obteve o resultado no ensaio de Strain Corrosion de 0,83% de alongamento para 438.000 horas (cinquenta anos) com 95% de limite inferior de confiança por meio de ensaios realizados na empresa Owens Corning, em 1988, na Bélgica, conforme a norma ASTM D 3681, utilizando-se o total de 23 corpos de provas com comprimento de 300 mm e diâmetro de 600 mm. Posteriormente PEARSON (1999) obteve novo resultado no ensaio de Strain Corrosion de 0,66% por meio de ensaios realizados na empresa Flowtite, em 1999, na Noruega, utilizando-se o total de 25 corpos de provas com comprimento de 300 mm e diâmetro de 600 mm. As referências e as publicações de resultados são escassas, pois se tratam de ensaios caros em função da montagem do laboratório, aquisição de equipamentos e instrumentação, números de corpos de provas e

acompanhamento permanente por funcionários por mais de 10.000 (dez mil) horas ininterruptas, os quais são normalmente realizados pelos fabricantes de tubos de PRFV e não publicados na literatura.

6.2.2 Tração axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. O limite mínimo especificado de resistência à tração axial é de 12,7 MPa, conforme AWWA C-950 07 e evidenciado nas figuras 51 e 52. O valor médio encontrado de resistência à tração axial foi 62,50 MPa, conforme indicado na tabela 17 e na figura 52. O valor mínimo encontrado de resistência à tração axial foi 57,60 MPa, conforme indicado na tabela 17 e nas figuras 51 e 52.

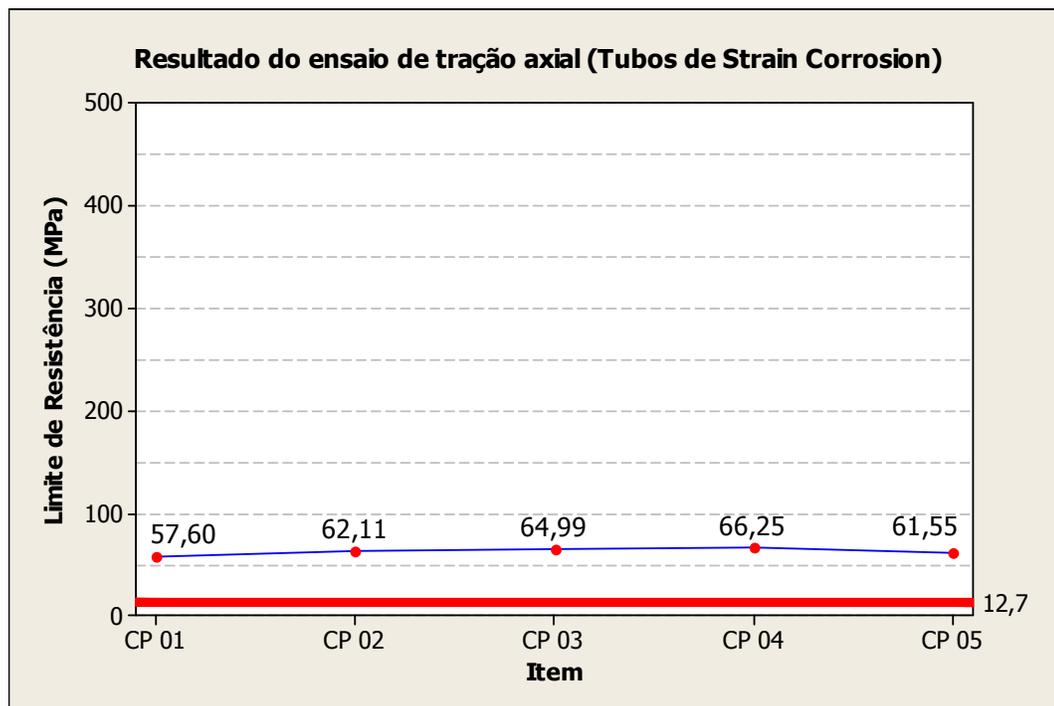
Tabela 17 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion

Item	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão
CP 01	25,28	9,89	14400	57,60	3,37
CP 02	25,29	9,74	15300	62,11	3,37
CP 03	25,20	9,83	16100	64,99	3,37
CP 04	25,39	9,75	16400	66,25	3,37
CP 05	25,37	9,99	15600	61,55	3,37
Média:	25,31	9,84	15560	62,50	-

Fonte: do próprio autor.

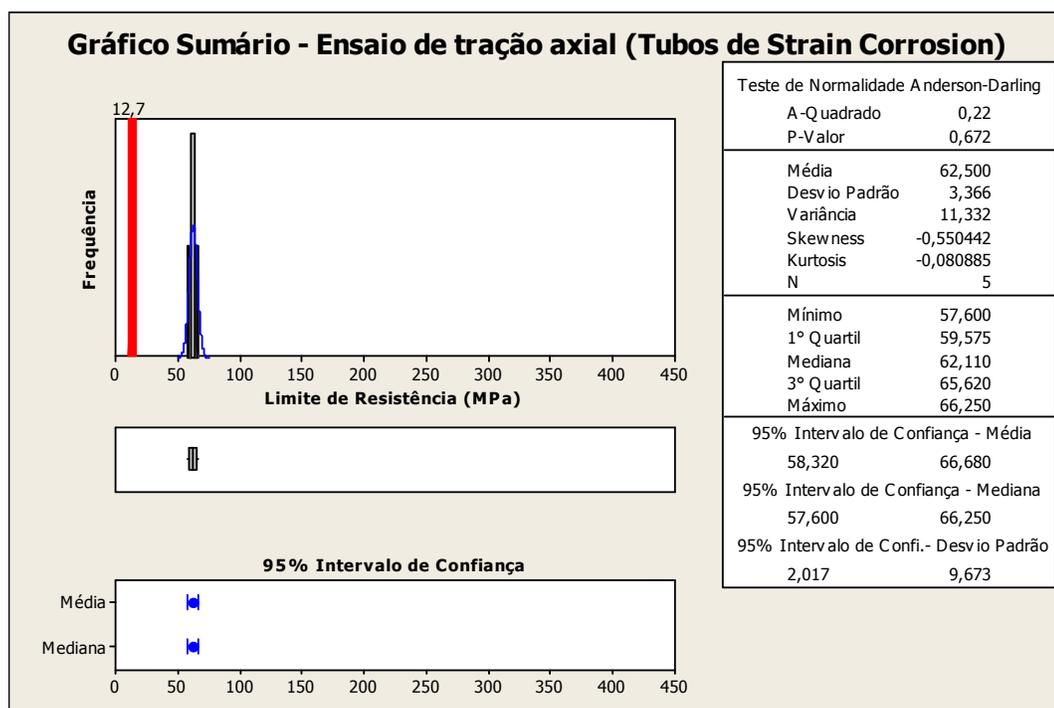
Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados são satisfatórios. Foi verificado que a média do limite de resistência (62,50 MPa) ficou aproximadamente 05 (cinco) vezes superior ao valor mínimo especificado (12,7 MPa) e foi constatado que o ensaio apresentou os 05 resultados homogêneos. O valor mínimo encontrado de tração axial (57,60 MPa) não é considerado um resultado anômalo, visto que reflete as possíveis variações no processo produtivo de compósitos e no respectivo processo de confecção de corpos de provas de tração axial.

Figura 51 – Resultado do ensaio de tração axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion



Fonte: do próprio autor.

Figura 52 – Gráfico Sumário: Ensaio de tração axial em amostras de tubos de StrainCorrosion



Fonte: do próprio autor.

6.2.3 Tração circunferencial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. O limite mínimo especificado de resistência à tração circunferencial é de 87,7 MPa, conforme AWWA C-950 07 e evidenciado nas figuras 53 e 54. O valor médio encontrado de resistência à tração circunferencial foi 302,47 MPa, conforme indicado na tabela 18 e na figura 54. O valor mínimo encontrado de resistência à tração circunferencial foi 279,04 MPa, conforme indicado na tabela 18 e nas figuras 53 e 54.

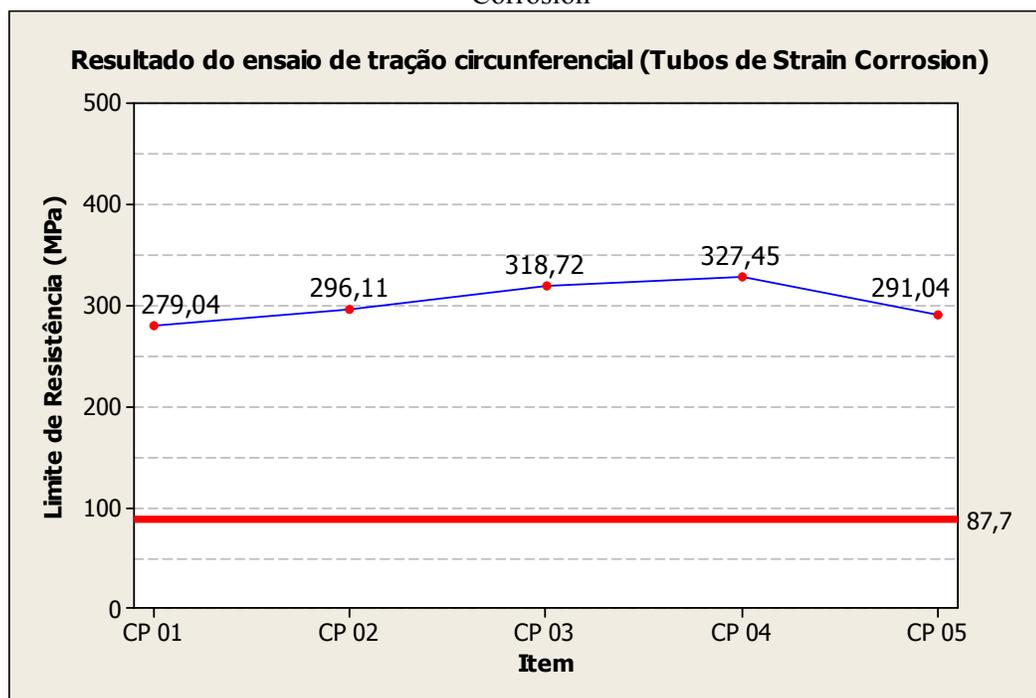
Tabela 18 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion

Item	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão
CP 01	25,00	9,70	67666	279,04	20,05
CP 02	25,10	9,50	70608	296,11	20,05
CP 03	25,00	9,60	76492	318,72	20,05
CP 04	24,70	9,70	78453	327,45	20,05
CP 05	25,10	9,80	71589	291,04	20,05
Média:	24,98	9,66	72962	302,47	-

Fonte: do próprio autor.

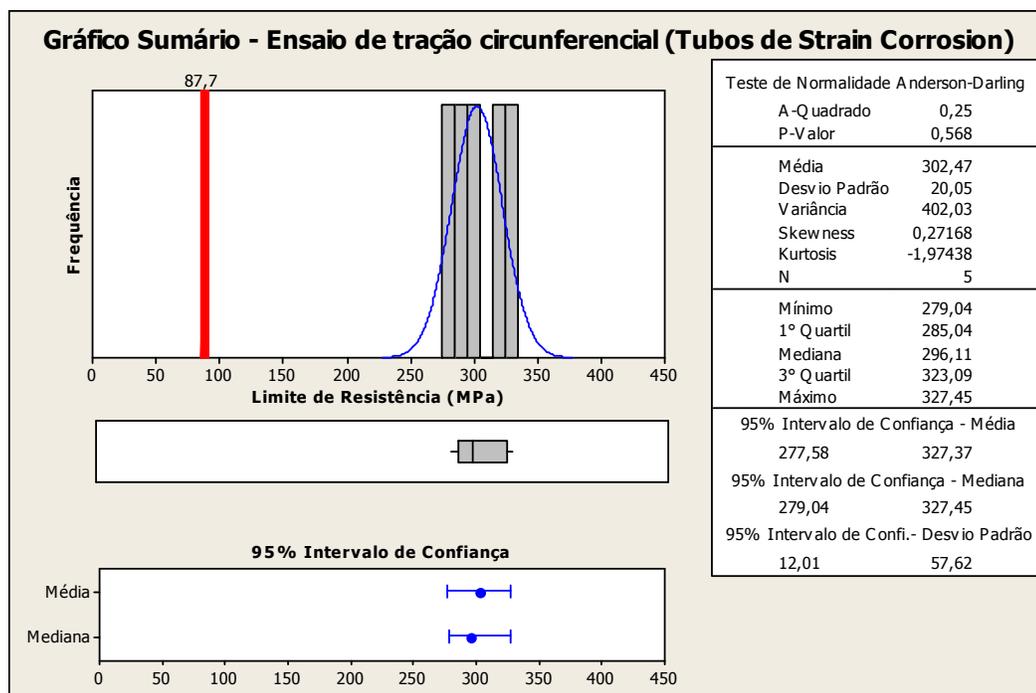
Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados são satisfatórios. Foi verificado que a média do limite de resistência (302,47 MPa) ficou aproximadamente 03 (três) vezes superior ao valor mínimo especificado (87,7 MPa). Foi constatado que o ensaio apresentou resultados homogêneos e que o valor mínimo encontrado de tração circunferencial (279,04 MPa) não é considerado um resultado anômalo, visto que reflete as possíveis variações no processo produtivo de compósitos e no respectivo processo de confecção de corpos de provas de tração circunferencial.

Figura 53 – Resultado do ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion



Fonte: do próprio autor.

Figura 54 – Gráfico Sumário: Ensaio de tração circunferencial em amostras dos tubos de Strain Corrosion



Fonte: do próprio autor.

6.2.4 Compressão axial dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. O limite mínimo de resistência à compressão axial especificado é de 10,6 MPa, conforme AWWA C-950 07 e evidenciado nas figuras 55 e 56. O valor médio encontrado de resistência à compressão axial foi 92,94 MPa, conforme indicado na tabela 19 e na figura 56. O valor mínimo encontrado de resistência à compressão axial foi 69,74 MPa, conforme indicado na tabela 19 e nas figuras 55 e 56.

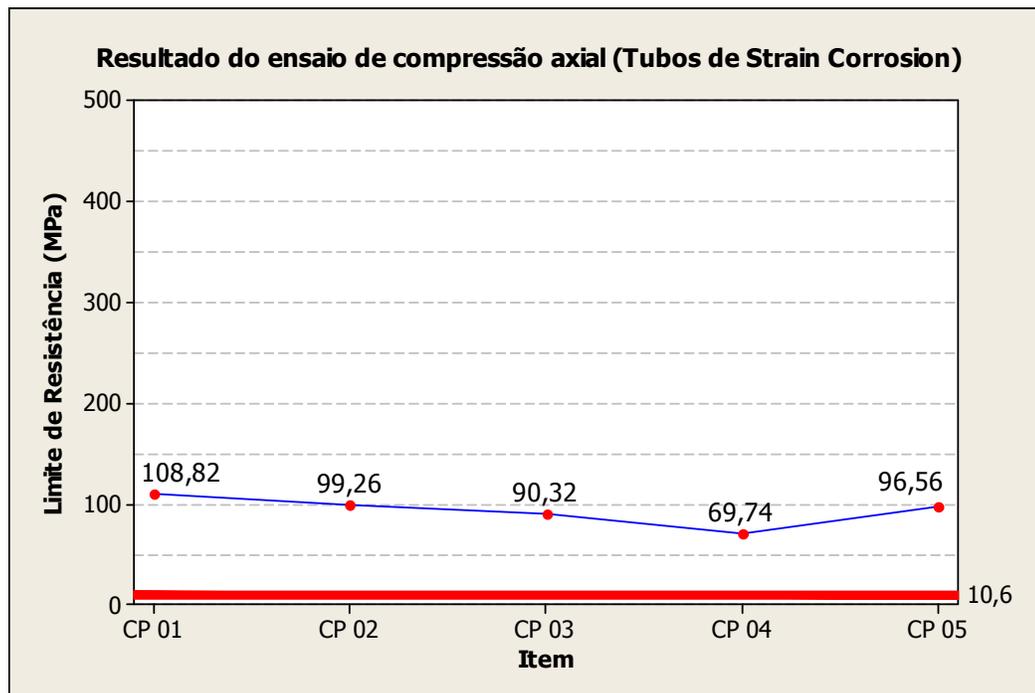
Tabela 19 – Resultado do ensaio de compressão axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion

Item	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Desvio Padrão
CP 01	12,88	9,76	111,00	13680	108,82	14,58
CP 02	12,98	9,78	110,00	12601	99,26	14,58
CP 03	12,77	9,65	111,00	11130	90,32	14,58
CP 04	13,01	9,51	111,00	8629	69,74	14,58
CP 05	12,98	9,78	110,00	12258	96,56	14,58
Média:	12,92	9,70	110,60	11660	92,94	-

Fonte: do próprio autor.

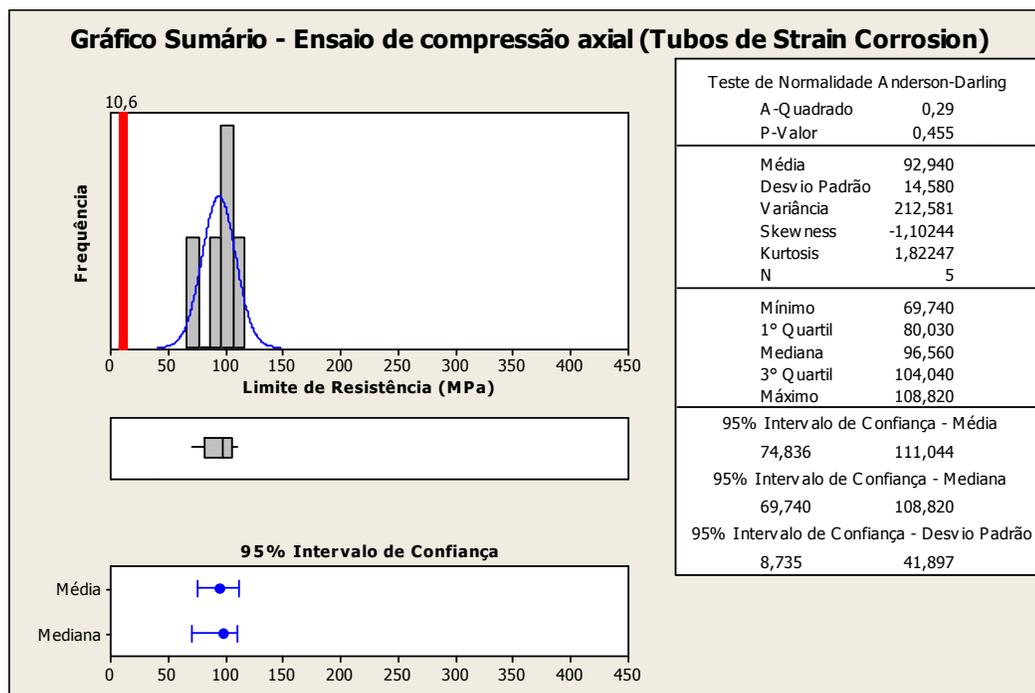
Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados são satisfatórios. Foi verificado que a média do limite de resistência (92,94 MPa) ficou aproximadamente 09 (nove) vezes superior ao valor mínimo especificado (10,6 MPa). Foi constatado que o ensaio apresentou 04 resultados homogêneos e que o valor mínimo encontrado de compressão axial (69,74 MPa) não é considerado um resultado anômalo, visto que reflete as possíveis variações no processo produtivo de compósitos e no respectivo processo de confecção de corpos de provas de compressão axial.

Figura 55 – Resultado do ensaio de compressão axial em amostras dos tubos de Strain Corrosion



Fonte: do próprio autor.

Figura 56 – Gráfico Sumário: Ensaio de compressão axial em amostras de tubos de Strain Corrosion



Fonte: do próprio autor.

6.2.5 Determinação da Rigidez dos tubos de Strain Corrosion

O ensaio foi realizado para a determinação da classe de rigidez dos tubos de Strain Corrosion. Os dimensionais de espessuras, comprimentos, diâmetros internos, diâmetros externos e diâmetros médios foram realizados e descritos na tabela 20.

O limite mínimo de rigidez especificado para o tubo de Strain Corrosion é de 5000 Pa na deformação diametral de 5%, conforme AWWA C-950 07 e ABNT NBR 15.536-01 07 para a composição projetada para o referido tubo. O valor encontrado da classe de rigidez foi satisfatório e foi de 5078 Pa obtido na deformação diametral de 5% com valor de carga de 2500,7 N, conforme indicado na tabela 21.

Quanto à avaliação do comportamento do tubo em outros níveis de deformação (A e B), o resultado foi satisfatório para ambos os níveis de deformação (A e B), visto que não ocorreram evidências visuais de trinca ou fissuramento ou ruptura na superfície interna e externa da amostra do tubo com a deflexão diametral de 11,3% e valor de carga de 5276 N, conforme indicado na tabela 21 e caracterizado como nível de deformação A. No nível de deformação B também não ocorreram sinais visuais de dano estrutural na parede do tubo evidenciado por separação interlaminar ou ruptura do reforço de fibra de vidro ou fratura ou colapso da parede do tubo quando o mesmo é submetido à deflexão diametral de 18,9% e valor de carga de 8159 N, conforme indicado na tabela 21.

Tabela 20 – Resultado dimensional da amostra do tubo de Strain Corrosion

Medidas	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro médio (mm)	Desvio Padrão
Defasagem 0°	9,6	313,0	636,7	617,5	627,1	0,14
Defasagem 45°	9,8	315,0	637,1	617,5	627,3	0,14
Defasagem 90°	9,9	315,0	637,3	617,5	627,4	0,14
Defasagem 135°	9,9	315,0	637,3	617,5	627,4	0,14
Defasagem 180°	10,0	315,0	637,5	617,5	627,5	0,14
Defasagem 225°	10,0	312,0	637,5	617,5	627,5	0,14
Defasagem 270°	10,0	314,0	637,5	617,5	627,5	0,14
Defasagem 315°	9,9	313,0	637,3	617,5	627,4	0,14
Média:	9,9	314,0	637,3	617,5	627,4	-

Fonte: do próprio autor.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de rigidez da amostra do tubo de Strain Corrosion

Deflexão (%)	Deflexão (mm)	Valor da Carga (N)	Rigidez (Pa)
3,0	18,8	1471,0	-
5,0	31,4	2500,7	5078,0
11,3	70,9	5276,0	-
15,0	94,1	6737,2	-
18,9	118,6	8159,1	-

Fonte: do próprio autor.

6.2.6 Perda por ignição (teores de fibra, resina e areia) dos corpos de provas dos tubos de Strain Corrosion

Os ensaios foram realizados em 05 (cinco) corpos de provas. A composição especificada é de 36,50 % para resina, 16,20 % para fibra contínua, 13,10% para fibra picada e 34,20% para areia, com tolerâncias de 5% estabelecidas pela AWWA C-950 07. Os valores médios encontrados foram 35,87 % para resina, 17,47 % para fibra contínua, 13,56% para fibra picada e 33,10% para areia, conforme indicado na tabela 22.

Tabela 22 – Resultado do ensaio de Perda por ignição em amostras dos tubos de Strain Corrosion

Ítem	Resina (%)	Fibra contínua (%) (Hoop)	Fibra picada (%) (Chop)	Areia (%)
CP 01	35,78	17,21	12,76	34,25
CP 02	35,77	18,64	13,53	32,06
CP 03	36,10	17,24	13,89	32,76
CP 04	35,57	17,23	13,84	33,36
CP 05	36,12	17,01	13,79	33,08
Média:	35,87	17,47	13,56	33,10
Especificado por ítem (%)	36,5 ± 5	16,2 ± 5	13,1 ± 5	34,2 ± 5
Mediana:	35,78	17,23	13,79	33,08
Desvio Padrão:	0,236	0,659	0,469	0,804
Variância:	0,056	0,434	0,220	0,647

Fonte: do próprio autor.

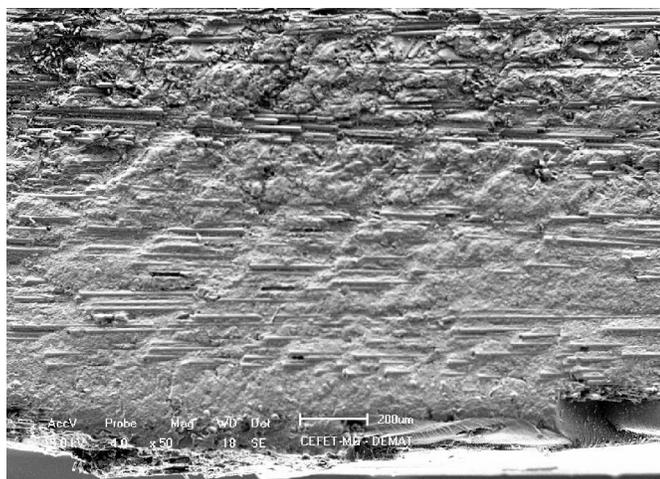
Foi observado que os valores médios e os valores individuais encontrados da composição (resina, fibra contínua, fibra picada e areia) são satisfatórios e refletem as possíveis variações no processo produtivo de compósitos.

6.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos corpos de provas de tubos de Strain Corrosion

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em 03 (três) amostras de tubos de Strain Corrosion ao longo da espessura da parede do tubo com as suas diversas lâminas e obtidas imagens com ampliações de 50 vezes e de 100 vezes, conforme indicam as figuras 57 a 62. Não foram fornecidas para a análise do MEV as amostras dos tubos após a realização do ensaio de Strain Corrosion contemplando as falhas por ruptura, entretanto a empresa “A” disponibilizou amostras de tubos não ensaiados no Strain Corrosion, os quais foram produzidos dentro da mesma corrida de fabricação dos tubos de Strain Corrosion.

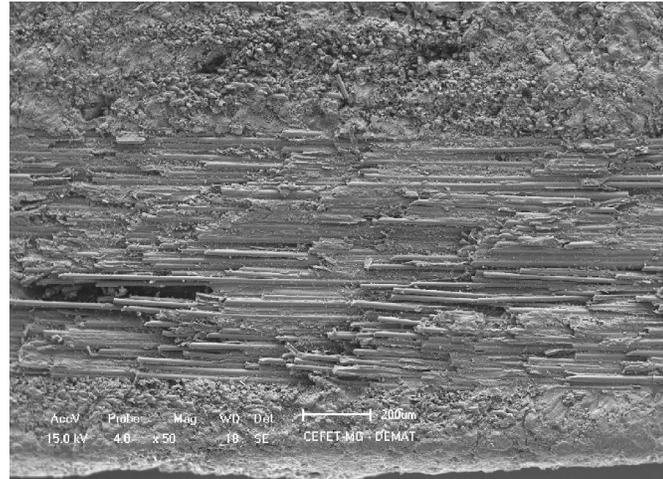
Foi observada e caracterizada qualitativamente a microestrutura composta de resina, fibras de vidro e areia, conforme indicado nas imagens de MEV com ampliações de 50 vezes no CP 01, CP 02 e CP 03. Foi evidenciada a homogeneidade do material compósito e a adesão da resina poliéster insaturada com a fibra de vidro e com a areia, conforme indicado nas imagens de MEV com ampliações de 100 vezes no CP 01, CP 02 e CP 03. O ensaio foi considerado satisfatório.

Figura 57 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 01



Fonte: do próprio autor.

Figura 58 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 02



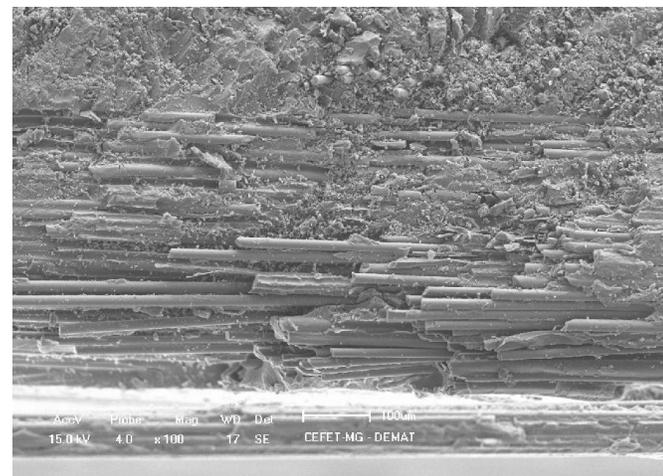
Fonte: do próprio autor.

Figura 59 – Imagem MEV com ampliação de 50X - Tubo Strain Corrosion – CP 03



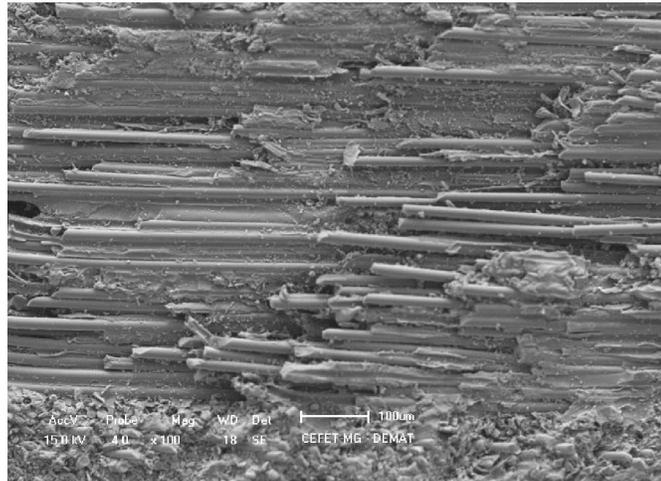
Fonte: do próprio autor.

Figura 60 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 01



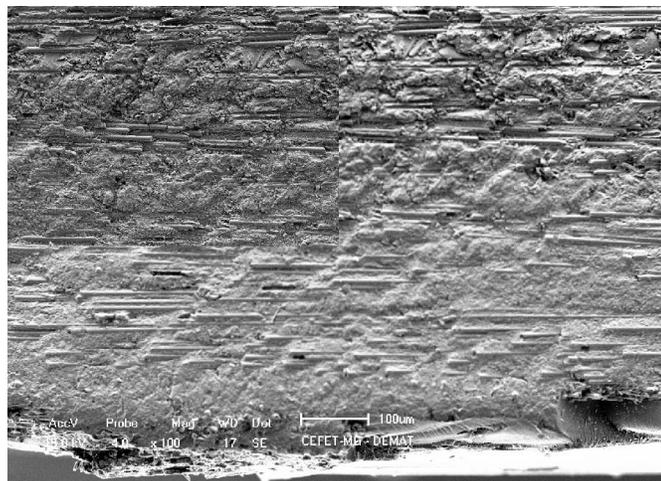
Fonte: do próprio autor.

Figura 61 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 02



Fonte: do próprio autor.

Figura 62 – Imagem MEV com ampliação de 100X - Tubo Strain Corrosion – CP 03



Fonte: do próprio autor.

7. CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica realizada e no grande número de materiais empregados na fabricação de tubulações de saneamento básico (PVC, PEAD, aço, ferro fundido dúctil, concreto, cerâmica e PRFV) promoveu-se o entendimento técnico da vida estrutural de tubos de PRFV com expectativa mínima de cinquenta anos, visando propiciar principalmente a sua ampla utilização em obras de infraestrutura no Brasil, tais como as redes de adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais.

Foram evidenciados que os requisitos das normas internacionais ASTM D-2992 06 – procedimento B e norma ASTM D-3681 06 foram cumpridos e as validações dos dados foram satisfatórias, bem como as metodologias utilizadas para desenvolver os ensaios de HDB (*Hydrostatic Design Basis*) e Strain Corrosion com o rigor das referidas normas ASTM D-2992 06 – procedimento B e ASTM D-3681 06 respectivamente, indicaram-se adequadas, pois resultaram em valores com características satisfatórias e compatíveis para o HDB e para o Strain Corrosion, quando comparados aos outros ensaios de HDB e Strain Corrosion realizados no mundo em tubos de PRFV fabricados pelo mesmo processo produtivo.

Foi possível evidenciar que os corpos de prova, laboratórios e instrumentações para os ensaios de HDB e Strain Corrosion garantiram as condições ideais provendo confiabilidade para a execução dos mesmos, além da conformidade com os requisitos normativos. Salienta-se que o acompanhamento das etapas iniciais, intermediárias e finais ocorreram de formas satisfatórias, conforme verificação do organismo Certificador Internacional (DNV – Det Norske Veritas).

De uma maneira geral os oito diferentes ensaios realizados de curta duração consolidaram a caracterização dos tubos de HDB e de Strain Corrosion por meio das análises e dos tratamentos estatísticos utilizados, os quais validam tecnicamente o processo produtivo de fabricação de tubos de PRFV destinados às aplicações para saneamento básico.

A viabilidade técnica dos tubos de PRFV e o entendimento técnico da vida estrutural dos mesmos com a expectativa mínima de cinquenta anos, possibilitará maior utilização dos tubos de PRFV em obras de infraestrutura no Brasil, tais como as redes de adução de água e de esgotamento sanitário em substituição aos demais materiais empregados na fabricação de tubulações de saneamento básico (PVC, PEAD, aço e ferro fundido dúctil).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKDEMIR, A. et al. Stress corrosion crack growth in glass/polyester composites with surface crack. *Composites: Part B* 32 (2001): 123-129.

ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. Boletim mercadológico: indicadores de desempenho da indústria de compósitos. Fechamento 2013. ALMACO, São Paulo. 2014. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Compósitos I**: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências. São Paulo: Abmaco Editora, 2008. 623p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 638 08**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 2008. 16p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 695 08**: standard test method for compressive properties of rigid plastics. West Conshohocken, 2008. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 1598 08**: standard test method for time-to-failure of plastic pipe under constant internal pressure. West Conshohocken, 2008. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 2290 04**: standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe by split disk method. West Conshohocken, 2004. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 2412 08**: standard test method for determination of external loading characteristics of plastic pipe by parallel-plate loading. West Conshohocken, 2008. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 2563 08**: standard practice for classifying visual defects in glass-reinforced plastic laminate parts. West Conshohocken, 2008. 24p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 2584 08**: standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. west conshohocken, 2008. 3p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 2992 06**: standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings. West Conshohocken, 2006. 11p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 3567 06**: standard practice for determining dimensions of “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings. West Conshohocken, 2006. 04p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **D 3681 06**: standard test method for chemical resistance of “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe in a deflected condition. West Conshohocken, 2006. 8p.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS INTERNATIONAL - USA. **ASM Handbook**: composites, v.21. Ohio, 2001. 2605p.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - USA. **C 950 07 AWWA**: standard fiberglass pressure pipe. Denver, 2007. 28p.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - USA. **M45 05 AWWA**: manual of water supply practices - fiberglass pipe design. Denver, 2005. 159p.

AMERON POLYPLASTER - Ameron Polyplaster Indústria e Comércio Ltda. Disponível em: <<http://www.ameronpolyplaster.com.br>>. Acesso em: 23 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15536-1 07**: sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais: tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) – Parte 1: tubos e juntas para adução de água. Rio de Janeiro, 2007. 96p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15536-2 07**: sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais: tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) – Parte 2: tubos e juntas para coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais. Rio de Janeiro, 2007. 22p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15536-3 07**: sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais: tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) – Parte 3: conexões. Rio de Janeiro, RJ, 2007. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15536-4 07**: sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais: tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) – Parte 4: anéis de borracha. Rio de Janeiro, 2007. 6p.

BEVILACQUA, Nelson. **Materiais de tubulações utilizadas em sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários**: estudo de caso da área norte de São Paulo. 2006. 169f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo: Artileber Editora Ltda, 2006, 280p.

CARVALHO, A. **Fiberglass x corrosão**. São Paulo: Asplar, 1992, 441p.

CARVALHO, A. **Cura e pós cura de resinas poliéster e viniléster**. São Paulo: Reichhold, 2002, 289p.

CARVALHO, A.; Carlos Marques. Durability of composites: service life and the corrosion parameters. In: ACMA INFRASTRUCTURE CONFERENCE, Saint Louis, 2006. **Proceedings...** Saint Louis, 2006. 10p.

CARVALHO, A. TOSFAC. **Total strain failure criterion**. São Paulo: Reichhold, 2007a, 510p.

CARVALHO, A e Carlos Marques. Durability of composites: burst failure. In: ACMA INFRASTRUCTURE CONFERENCE, Las Vegas, 2007. **Proceedings...** Las Vegas, 2007b. 16p

CARVALHO, A. Durability of composites: weep failure. In: ACMA INFRASTRUCTURE CONFERENCE, LAS VEGAS, 2009. **Proceedings...** Las Vegas, 2009, 17p.

CARVALHO, A. Durability of composites: strain corrosion failure. In: ACMA INFRASTRUCTURE CONFERENCE, Las Vegas, 2011. **Proceedings...** Las Vegas, 2011, 17p.

CARVALHO, A. **Compósitos para uso industrial**. São Paulo: Almaco, 2014, 573p.

DANIEL, Isaac M. and Ori Ishai. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994, 395p.

FARSHAD, M.; NECOLA, A. Strain corrosion of glass fibre-reinforced plastics pipes. *Polymer Testing*: 23 (2004): 517-521.

FLOWTITE - flowtite technology AS. Disponível em: <<http://www.flowtite.com>>. Acesso em: 21 jul. 2013.

FREIRE, Paula K. C. **Estudo comparativo entre metodologias de dimensionamento econômico de adutoras**. 2000. 120. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

HOGG, P. J. et al. Stress and strain corrosion of glass-reinforced plastics. *Composites*: July (1981): 7p.

HOGG. Factors affecting the stress corrosion of GRP in acid environments. *Composites*: July (1983): 8p.

HOLMES, M. **GRP in structural engineering**. London: Applied Science Publishers, 1983, 298p.

LIBA, Ademir D. **Controle da finalização da reação de resina de poliéster insaturado via NIR**. 2004. 120. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NETO LEVY, Flaminio e PARDINI Luiz C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2006, 313p.

OWENS CORNING – Owens Corning Fiberglass AS Ltda. Disponível em: <<http://www.owenscorning.com.br>>. Acesso em: 22 jul. 2013.

PEARSON, L. E. **Hydrostatic design basis (HDB): flowtite pressure pipe – report number T-95-101-R.** Flowtite Test Report – Flowtite Technology AS, Sandefjord. 1997. 4p

PEARSON, L. E. **Hydrostatic Design Basis (HDB): Owens-Corning pressure pipe – report number T-88-103-V.** Owens-Corning Test Report – Owens-Corning, Bruxelles. 1988a. 4p

PEARSON, L. E. **Strain corrosion performance: flowtite pipe – report number T-99-107.** Flowtite Test Report – Flowtite Technology AS, Sandefjord, 1999. 4p.

PEARSON, L. E. **Strain corrosion performance – Owens-Corning sewer pipe – report number T-88-102-V.** Owens-Corning Test Report – Owens-Corning, Bruxelles. 1988b. 2p

REZENDE, Mirabel C. e et al. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011, 396p.

RICHARD, F. and D. Perreux. The safety-factor calibration of laminates for long-term applications: behavior model and reliability method. *Composites Science and Technology*: 61 (2001): 2087-2094.

ROSENOW, M.W.K. Wind angle effects in glass fibre-reinforced polyester filament wound pipes. *Composites*: Volume 15. N° 2. (1984): 144-152.

SCHWARTZ, Mel M. **Composite materials**: tecnologia e prática. London: Prentice-Hall Editora, 1996, 364p.

TARAKCIOGLU, N. et al. Strength of filament wound GRP pipes with surface crack. *Composites: Part B* 32 (2001): 131-138.

TSAI, Stephen W. et al. **Composite materials**: design and applications. Florida: CRC Press LLC, 2003, 524p.

WIEBECK, Hélio e Júlio Harada. **Plásticos de engenharia**: tecnologia e aplicações. São Paulo: Artileber Editora Ltda, 2005, 349p.