



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



**CENTRO DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**USO DE COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA)
PARA CONSTRUÇÃO DE SILOS CILÍNDRICOS VERTICAIS**

REJANE RAMOS DANTAS

**CAMPINA GRANDE
PARAÍBA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

**USO DE COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA) PARA
CONSTRUÇÃO DE SILOS CILÍNDRICOS VERTICAIS**

REJANE RAMOS DANTAS

Campina Grande - Paraíba
Dezembro - 2004



D 192 d
2004

Dantas, Rejane Ramos

Uso de compósitos (poliéster/tecido de juta)
para construção de silos cilíndricos verticais /

Rejane Ramos Dantas.-Campina Grande:
UFCEG, 2004..

100p.: il.

Inclui bibliografia

Dissertação (mestrado em engenharia
agrícola) UFCEG/CCT

1. Construções rurais – Eng. Agrícola

CDU: 631.24



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

REJANE RAMOS DANTAS

**USO DE COMPÓSITOS POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA PARA A
CONSTRUÇÃO DE SILOS CILÍNDRICOS VERTICAIS**

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Dra. Laura Hecher de Carvalho-Orientadora

Aprovado

Dr. José Wallace B. do Nascimento-Examinador

APROVADO

Suédina M. de L. Silva

Dra. Suédina Maria de Lima Silva - Examinadora

Aprovado

Dra. Viviane Muniz Fonseca-Examinadora

Aprovado

DEZEMBRO - 2004

*“Somos o que fazemos, mas somos
principalmente, o que fazemos para
mudar o que somos”*

Eduardo Galeano

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Inácio Ramos e Maria do Carmo (*in
memorian*).

Ao meu amado esposo, Antonio Dantas.

Aos meus filhos, Wallysson, Thyago, Igor e Rafaela.

Aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Prof^ª. Dr^ª. Laura Hecker de Carvalho e ao Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento, pela orientação, revisão, sugestões, discussões e dedicação durante a realização deste trabalho.

Aos Professores do LaCRA, Marluce, Dêrmeval e Antonio Leal que contribuíram auxiliando direto e indiretamente.

Aos Professores do DEMa.

Aos meus pais (*in memoriam*), por terem me ensinado como viver.

Aos colegas Marcilene, Felipe, Marineide, Ana Karla, Valneide, Ianglio, Marília, Danilo, Ibirenaldo, Miguel, Neto e Jair pelo o apoio e amizade.

À coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial às secretárias, Rivaniida, Aparecida e Aldanisia pela atenção e dedicação.

Aos funcionários do LaCRA, Neide, Geraldo, Nilson, Edil, Marcos Valério.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

À CANDE e DOLOMIL pela a oportunidade na fase experimental.

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

À Companhia Têxtil de Castanhal – PA, VI FIBER e RESANA S/A, pela doação dos insumos que permitiram a realização desta pesquisa.

RESUMO

Neste trabalho, foi estudada a viabilidade do uso de compósitos poliméricos, resina de poliéster reforçada com tecido de juta, para construção de silos cilíndricos verticais. Para tanto foram confeccionados compósitos planos e tubulares, tendo como parâmetros de avaliação o efeito da pré-secagem das fibras e da inserção em cimento Portland nas propriedades mecânicas, tração e impacto, e abrasão (planos) bem como a determinação da resistência ao impacto, compressão e pressão hidrostática (tubulares). Os resultados obtidos indicam que o procedimento de pré-secagem nos tecidos de juta possuiu uma grande influencia nas propriedades mecânicas dos compósitos planos, enquanto que a inserção no cimento não apresentou influencia nas propriedades destes compósitos. Para os compósitos tubulares os dados mecânicos obtidos foram utilizados para calcular as pressões e tensões de tração atuantes na parede do silo. Este cálculo foi realizado tomando-se como base silos de dois e três metros de diâmetro e alturas de três, seis e nove metros. Os resultados das análises teóricas e experimentais realizadas indicam que o compósito investigado apresenta propriedades compatíveis para construção de silos cilíndricos verticais para armazenamento de produtos agressivos.

PALAVRAS-CHAVE: compósitos, fibras vegetais, silos, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This work is concerned with the feasibility of using a polymeric composite (polyester resin reinforced with jute fabric) as a structural material for the construction of vertical cylindrical silos. Tubular and plane composites were made, and the following parameters were used to evaluate them: effect of pre-drying of the fibers and of insertion in Portland cement on the mechanical properties (plane samples), and impact resistance, compressive strength, and hydrostatic pressure (tubular samples). Results show that pre-drying of jute fabric has a major effect on the mechanical properties of plane composites, whereas insertion in cement has a negligible effect. Mechanical property measurements on tubular samples were used to estimate pressure and stresses on silo walls. Computations for 2 and 3-m diameter, and 3, 6 and 9-m high silos are presented. Theoretical and experimental results show that polyester-jute fabric composite is a suitable material for the construction of vertical cylindrical silos for the storage of aggressive materials.

KEY-WORDS: composites, vegetable fibers, silos, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de silos fabricados com diferentes materiais.....	5
Figura 2 - Silos e cargas nas paredes	9
Figura 3 - Distribuição da pressão horizontal no silo e o efeito da força de tração	10
Figura 4 - Ilustração de compósito particulado.....	14
Figura 5 - Ilustração de compósito fibroso	14
Figura 6 - Ilustração de compósito laminado.....	14
Figura 7 - Classificação dos materiais compostos quanto à natureza de seus componentes.....	15
Figura 8 - Estrutura do poliéster curado	18
Figura 9 - Classificação das fibras.....	21
Figura 10 - Compósito laminado de poliéster/juta com quatro camadas para ensaio de resistência à tração, impacto e abrasão	35
Figura 11 - Fluxograma da preparação e ensaios mecânicos dos compósitos planos.....	35
Figura 12 - Compósito tubular com quatro camadas de tecido de juta para ensaio de pressão hidrostática e resistência ao impacto).....	36
Figura 13 - Fluxograma da preparação e ensaios mecânicos dos compósitos tubulares.....	37
Figura 14 - Ilustração do corpo de prova segundo a norma ASTM D-3039	39
Figura 15 - Ilustração do corpo de prova segundo a norma D-256.....	39
Figura 16 -(a) corpo de prova para ensaio de resistência à abrasão (b) corpo de prova colado em duas partes	40
Figura 17 - Sistema de aquisição de dados	43
Figura 18 - Resistência à tração dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem pré-secagem)	44
Figura 19 - Módulo de Young dos compósitos com quatro camadas de reforço	

(com e sem pré-secagem)	46
Figura 20 - Deformação dos compósitos com quatro camadas de reforços (com e sem pré-secagem).....	47
Figura 21 - Resistência à tração dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias	48
Figura 22 - Módulo deYoung dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias	49
Figura 23 - Deformação do compósito após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias.....	50
Figura 24 - Pressão atuante na parede do silo, $D = 2$ m e $D = 3$ m.....	51
Figura 25 - Força de atrito com dados teóricos para silo com $D = 2$ e $D = 3$ m.....	51
Figura 26 - Tensão de tração no silo com $H = 3; 6, 9$ m e $D = 2$ m ($e = 0,003; 0,004$ e $0,006$ m).....	52
Figura 27 - Tensão de tração no silo com $H = 3; 6, 9$ m e $D = 3$ m ($e = 0,003; 0,004$ e $0,006$ m).....	53
Figura 28 - Resistência ao impacto dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem secagem prévia).....	54
Figura 29 - Resistência ao impacto dos compósitos após serem inseridos no cimento POR 60 e 100 dias (com e sem pré-secagem).....	55
Figura 30 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 500 gramas.....	56
Figura 31 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 1000 gramas.....	56
Figura 32 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 1500 gramas.....	56
Figura 33 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 2000 gramas.....	57
Figura 34 - Compósito tubular após ensaio de pressão hidrostática	58
Figura 35 - Resistência à compressão dos compósitos tubulares	59
Figura 36 - Dados teóricos da resistência à compressão do silo.....	61
Figura 37 - Resistência à compressão dos compósitos (com e sem pré-secagem) com quatro camadas de reforço no percurso de 10 e 20 metros	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais vegetais	20
Tabela 2 - Composição química com base nas diferentes fibras vegetais	22
Tabela 3 - Dados de previsão de safra da juta /setembro de 2004	23
Tabela 4 - Propriedades e características da resina de poliéster ortoftálica	34
Tabela 5 – Dados utilizados nos testes de resistência ao impacto.....	42
Tabela 6 – Ensaio de resistência à compressão no compósito tubular (P/TJ).....	59

TABELAS EM ANEXO

Anexo B – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Propriedades mecânicas sob tração

Tabela B1 - Compósitos (poliéster/tecido de juta) com pré-secagem (CS).....	89
Tabela B2 - Compósitos (poliéster/tecido de juta) sem pré-secagem (SS).....	89

Propriedades mecânicas após inserção no cimento

Tabela B3 - Compósitos (poliéster/tecido de juta) após inserção no cimento por 60 e 100 dias.....	90
--	----

Propriedades mecânicas sob impacto (Izod)

Tabela B4 - Resistência ao impacto de (poliéster/tecido de juta)- (J/m).....	91
--	----

Propriedades mecânicas de resistência à abrasão

Tabela B5 - Determinação da abrasão dos compósitos (poliéster/tecido de juta) com percurso de 10 e 20 metros – mm ³	91
---	----

Propriedades mecânicas de compressão simples

Tabela B6 - Calibração da célula de carga de 5 toneladas.....	92
Tabela B7 - Características mecânicas dos compósitos tubulares (poliéster/tecido de juta) - médias	93

Tabela B8 - Dados experimentais do ensaio de resistência à compressão de compósitos tubulares (poliéster/tecido de juta).....	94
--	----

Anexo C

Tabela C1 - Pressões atuantes no corpo do silo - $D = 2\text{m}$	96
Tabela C2 - Pressões atuantes no corpo do silo - $D = 3\text{m}$	97
Tabela C3 - Força de atrito sobre a parede	98
Tabela C4 - Dados da tensão de tração (teóricos) – relação $H/D = 1,5; 2,5$ e 3	99
Tabela C5 - Dados da tensão de compressão experimental e teóricos para silos com $H = 3; 6$ e 9m e $D = 2$ e 3m	100

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	-	coeficiente de atrito do produto com a parede;
ε	-	deformação;
γ	-	densidade do produto armazenado;
σ	-	tensão;
σ_{adm}	-	tensão admissível.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

A	-	área da seção transversal horizontal do silo;
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASA.B.31	-	American Standard Code for Pressure Piping;
ASTM	-	American Standards for Testing and Materials;
C	-	coeficiente de sobrepressão;
CS	-	compósitos poliéster/tecido de juta com pré-secagem;
D	-	diâmetro do silo;
D _e	-	diâmetro externo do compósito tubular;
D _i	-	diâmetro interno do compósito tubular;
DN	-	diâmetro nominal;
e	-	espessura;
E	-	módulo de elasticidade;
g	-	grama;
HDPE		Poli(etileno de alta densidade);
GPa	-	Giga Pascal;
H/D	-	relação altura/diâmetro do silo;
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico;
K	-	relação entre as pressões horizontais e verticais;
LDPE		Poli(etileno de baixa densidade);
m	-	metro;
MEK	-	Metil Etil Cetona;
mm	-	milímetro;
MPa	-	Mega Pascal;
N	-	Newton;
NBR	-	Norma Brasileira;
P_T	-	carga crítica de Euler;

P_{hc}	-	pressão horizontal de carregamento;
P_{hd}	-	pressão horizontal de descarregamento;
PN	-	pressão nominal;
P_{vc}	-	pressão vertical de carregamento;
P_{vd}	-	pressão vertical de descarregamento;
P_{wc}	-	pressão de atrito por 1 metro de superfície de parede;
P_{wd}	-	pressão de atrito nas paredes;
R	-	raio hidráulico;
SS	-	compósitos poliéster/tecido de juta sem pré-secagem;
T_f	-	teor de fibra;
Z	-	profundidade abaixo da superfície efetiva.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	3
2.1	SILOS	4
2.2	COMPÓSITOS	13
2.3	MATRIZ POLIMÉRICA	16
2.3.1	RESINA DE POLIÉSTER	17
2.4	REFORÇOS	18
2.5	FIBRAS	20
2.5.1	FIBRAS VEGETAIS	22
2.5.1.1	FIBRAS DE JUTA	23
2.6	INTERFACE FIBRA-MATRIZ	24
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	MATERIAIS	33
4.2	PREPARAÇÃO DOS LAMINADOS	34
4.3	TEOR DE FIBRAS	37
4.4	ENSAIOS MECÂNICOS	38
4.4.1	COMPÓSITOS PLANOS	38
4.4.1.1	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	39
4.4.1.2	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (IZOD)	39
4.4.1.3	RESISTÊNCIA À ABRASÃO	40
4.4.2	COMPÓSITOS TUBULARES	40
4.4.2.1	RESISTÊNCIA À PRESSÃO HIDROSTÁTICA	41
4.4.2.2	RESISTÊNCIA AO IMPACTO POR QUEDA DE DARDO	42
4.4.2.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	42

4.3	ESFORÇO DE TRAÇÃO NA PAREDE DO SILO	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS SOB TRAÇÃO	44
5.1.1	EFEITO DA INCLUSÃO E PRÉ-SECAGEM DAS FIBRAS	44
5.1.2	EFEITO DE INSERÇÃO EM CIMENTO DOS COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA) POR 60 E 100 DIAS	47
5.2	ESFORÇO DE TRAÇÃO NAS PAREDES DO SILO	50
5.3	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (IZOD) NOS COMPÓSITOS PLANOS....	53
5.3.1	EFEITO DA INCLUSÃO DAS FIBRAS	53
5.3.2	EFEITO DA INSERÇÃO DOS COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA) POR 60 E 100 DIAS	54
5.3.3	RESISTÊNCIA AO IMPACTO POR QUEDA DE DARDO NOS COMPÓSITOS TUBULARES	55
5.3.4	RESISTÊNCIA À PRESSÃO HIDROSTÁTICA	57
5.3.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	58
5.3.6	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO	61
6.	CONCLUSÕES	63
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
8.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	78
9.	ANEXOS	
	ANEXO A = DETALHAMENTO EXPERIMENTAL E EÓRICO	79
	ANEXO B – PROPRIEDADE MECÂNICAS	89
	ANEXO C – DADOS HIPOTÉTICOS PARA SILO CONSTRUÍDO COM O COMPÓSITO POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA	95

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Silos são instalações rurais ou industriais, com a finalidade básica de armazenar, a granel, produtos sólidos, granulares ou pulverulentos, possibilitando o mínimo de influência do meio externo com o ambiente de estocagem. Este tipo de estrutura possui como objetivo manter inalteradas as características físicas químicas e biológicas do produto, durante o período de armazenagem (SILVA *et. al.*, 1998). As estruturas para armazenamento têm conquistado espaço de destaque dentro dos processos de diversos setores da economia mundial, seja industrial ou rural. No Brasil, em sua grande maioria, os silos construídos são metálicos e de grande porte, o que não condiz com a realidade agrícola brasileira, basicamente, formada por pequenos e médios produtores (CALIL *et. al.*, 1997).

A utilização do aço como material de construção de silos onera muito o custo de fabricação dos mesmos, tendo como consequência o aumento do custo do produto a ser armazenado. De acordo com Ravenet (1997) a espessura de chapa metálica para confecção de silo está diretamente relacionada com a pressão horizontal de descarga, ou seja, quanto maior essa pressão maior a espessura tornando o valor final do silo mais elevado. Esta situação tem conduzido ao desenvolvimento de materiais alternativos. Desta forma torna-se importante a avaliação e estudo de novos materiais para a construção destas estruturas de forma que as características físicas sejam semelhantes.

Com o avanço da tecnologia moderna, materiais com combinações incomuns de propriedades não encontrados em materiais convencionais têm encontrado destaque. Estes são aplicados principalmente nas áreas das indústrias aeroespacial e subaquática, como também nos meios de transporte modernos, fazendo com que sejam pesquisados novos materiais que possuam uma combinação de propriedades, ou seja: baixas densidades, resistência à abrasão, ao impacto e à corrosão (LEE, 1991).

Durante as últimas décadas, um substancial desenvolvimento de compósitos para aplicações estruturais foi observado. A principal motivação desta grande evolução tem sido a possibilidade de produzir materiais com altas propriedades mecânicas e baixas densidades, o

que potencialmente poderiam substituir materiais usualmente utilizados como o aço e madeira. A combinação de polímeros de alto desempenho com fibras cerâmicas ou poliméricas de alto módulo elástico e resistência mecânica, permitiu a produção de novos compósitos com um grupo de propriedades específicas (por unidade de peso) superiores ao aço, alumínio e outros. Esses compósitos apresentam em geral, razões módulo/peso elevadas, e resistência/peso superiores à de materiais convencionais (cerâmicas e metais).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização de compósitos poliméricos de resina de poliéster reforçados com tecido de juta, para a finalidade de construir silos cilíndricos verticais, para o armazenamento de produtos sólidos agressivos. Para tanto foram avaliadas as propriedades mecânicas: a resistência à tração, à compressão, ao impacto, pressão hidrostática e resistência à abrasão.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

O primeiro material de engenharia utilizado pelo homem, foi a madeira, seguindo-se a pedra, depois os metais, a cerâmica, o vidro e, finalmente, os polímeros. Atualmente, dentre estes materiais estão incluídos diversos polímeros. Plásticos, borrachas, fibras, adesivos, são materiais poliméricos bem conhecidos e indispensáveis à vida moderna (MANO 1991).

A criação de materiais artificiais está associada ao crescimento populacional e ao surgimento de novas demandas tecnológicas que, por sua vez, levam ao aumento da geração de lixo e resíduos que são decorrentes dos padrões de consumo da atualidade, e à criação de novos materiais com estruturas complexas, normalmente não-biodegradáveis, que apresentam um alto potencial de agressão ao homem e ao meio ambiente. Em resposta a essas necessidades, a sociedade tem que se preocupar seriamente com o descarte dos detritos gerados e da preservação do meio ambiente no próximo milênio. Nesse sentido, a utilização de materiais oriundos de fontes renováveis e ambientalmente seguros terá substancial importância para a proteção do ar, da água, do solo e das florestas (MORAES, 1995).

A utilização de tecnologias ecologicamente corretas tem se tornado uma grande preocupação nos últimos anos de forma que, um novo paradigma do desenvolvimento econômico está voltado para propiciar a melhoria da qualidade de vida das futuras gerações, incorporando na sua concepção modos de produção menos poluentes e impactantes (RAI & JAISINGH, 1986). O desenvolvimento econômico sustentável requer uma transição gradual para uma economia de ciclo de vida em que a produção, o uso e a disposição de bens e serviços sejam gerenciados de modo a terem um impacto mínimo nos ecossistemas (BERLIM, 1996).

Em meio à constante evolução dos materiais, as fibras sintéticas ganham mais espaço em produção e tecnologia, deixando em significativa estagnação a indústria de fibras celulósicas, principalmente a de fibras duras, cuja aplicação tradicional está na fabricação de artigos agrícolas e artesanais (JOSEPH & CARVALHO 2000; FONSECA *et. al.*, 2004).

As fibras sintéticas, apesar de possuírem excelentes propriedades mecânicas, têm a desvantagem de serem caras e provirem de fontes não renováveis de matéria-prima. Neste sentido, é importante que se busque alternativas e se utilize melhor as nossas reservas naturais e renováveis de fibras. Deste modo, as fibras vegetais têm atraído a atenção de cientistas e tecnólogos para aplicação em compósitos poliméricos, no sentido de reduzir os custos e gerar produtos com propriedades adequadas ou equivalentes para uma ampla gama de aplicações (FONSECA *et. al*, 2002).

O estudo sobre plásticos reforçados com fibras naturais tem sido fonte principal de várias pesquisas, devido às pressões ambientais para o desenvolvimento de produtos e tecnologias considerados ecologicamente corretos. Novas tecnologias e a adaptação das técnicas de moldagem que se aplicam a estas fibras, são de grande interesse para o Brasil, visto que o país possui grande potencial agrícola. (KURUVILLA *et. al.*, 1999; FONSECA *et al* 2004)

2.1 SILOS

O termo silo é utilizado para designar construções ou estruturas destinadas ao armazenamento a granel de produtos não fluidos, granulares ou pulverulentos. Por definição, Silos são unidades ou conjuntos de armazenagem que englobam os depósitos propriamente ditos, onde fica o material armazenado. Estas estruturas são encontradas em fazendas, indústrias químicas, da construção civil, de alimentação, de mineração, siderúrgicas, postos, etc., para o armazenamento de sementes, forragens, cereais, farinhas, compostos químicos, fertilizantes, cimento, cal, minérios, carvão, etc. A Figura 1 ilustra tipos de silos com diferentes materiais com os quais podem ser construídos, ou seja, concreto armado, fibra de vidro, chapas metálicas lisas ou onduladas, madeira, alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto (FREITAS, 2001).

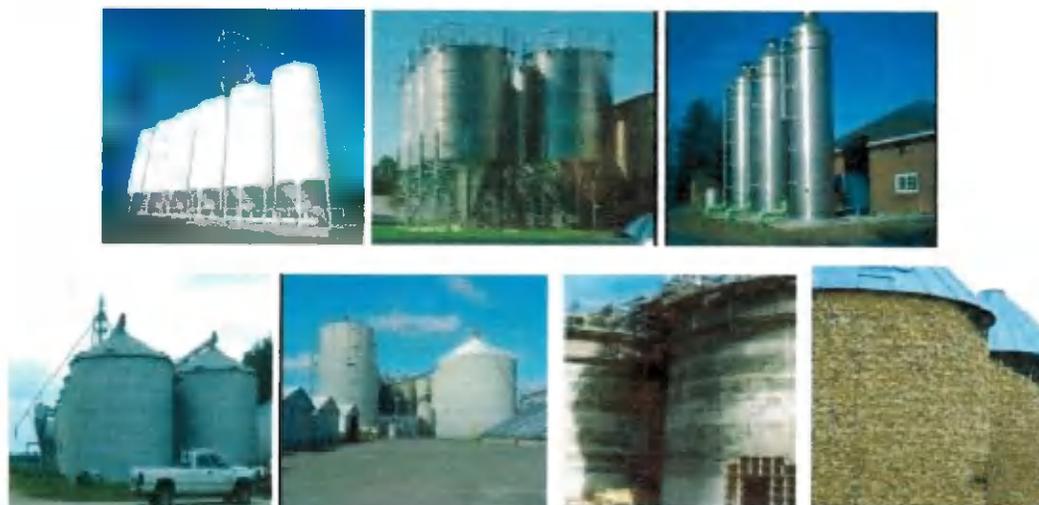


Figura 1 – Tipos de silos fabricados com diferentes materiais

O principal aspecto do projeto de uma unidade armazenadora é apresentar seguras recomendações que permitam a sua utilização racional isenta de obstruções e perturbações no que diz respeito à recepção, armazenamento e expedição de produtos agrícolas. O manuseio de grãos alimentícios a granel e o seu armazenamento em silos adequados contribuem de maneira eficaz para o abastecimento de um país, pois apresentam as seguintes vantagens:

- a) permitem armazenar diferentes espécies de grãos, podendo ser ocupado várias vezes ao ano;
- b) reduzem ao máximo as perdas do material ensilado, ao mesmo tempo em que propiciam produtos limpos, livres do ataque de insetos, roedores, microorganismos, e com qualidades alimentícias preservadas;
- c) reduzem apreciavelmente, os custos de comercialização do produto com a eliminação da sacaria e redução do custo de manuseio;
- d) permitem o armazenamento por diversos anos, sem alterações substanciais do material ensilado, evitando assim as flutuações de oferta no mercado interno e externo;
- e) propiciam a regularização dos transportes principalmente por ocasião de uma safra abundante;
- f) possibilitam um controle efetivo dos estoques.

Os silos podem ser classificados de diversos modos, sendo a seguir são apresentadas as duas mais importantes:

1. Quanto à construção em relação ao solo:

- Silos elevados ou aéreos - são caracterizados por serem construídos acima do nível do solo (a maioria dos grandes silos com células de muitos metros de altura é deste tipo);
- Silos subterrâneos - são aqueles em que os compartimentos para a estocagem localizam-se abaixo do nível do solo, estas construções são mais simples que os silos elevados, porém estão sujeitos à infiltração de água e têm descarga mais lenta;
- Silos semi-subterrâneos - são unidades intermediárias entre os dois tipos anteriores, pois parte de sua construção fica acima do solo e parte abaixo.

2. Quanto ao material de construção:

- Silos de madeira - possuem capacidade relativamente pequena, apresentando algumas desvantagens como o perigo de incêndio e pouca durabilidade. Nas regiões onde a madeira é um material de construção disponível e barato, tais silos devem ser vistos com interesse;
- Silos de alvenaria - são construídos com tijolos ou blocos de concreto e argamassa de cimento, no Brasil este tipo de silo é pouco utilizado devido à predominância do tipo de produto armazenado (ração);
- Silos de concreto - são geralmente multicelulares com células cilíndricas interligadas com grande altura, sendo mais utilizado no armazenamento de grandes volumes;
- Silos metálicos - são geralmente pré-fabricados de pequena e média capacidade cujas paredes das células são de chapas lisas ou onduladas de aço, alumínio ou ferro galvanizado, montados sobre um piso de concreto. Estes silos são muitas vezes constituídos de várias células cilíndricas isoladas, conseguindo-se atingir então uma grande capacidade de armazenamento.

Os silos verticais são caracterizados pela predominância da altura nas dimensões da célula de armazenamento, sendo típicos em instalações industriais de grande porte. Estão sujeitos a tensões verticais em suas paredes como conseqüências do atrito entre o produto armazenado e a parede, e também como resultado das pressões assimétricas nas paredes (ROTTER, 1983, 1986). Devido ao alto custo das instalações em escala real, devem ser projetados corretamente antes de serem construídos, uma vez que as correções de ensaios e

erros após a construção são muito dispendiosas, principalmente quando a perda de produção é considerada (JOHANSON, 1969). Durante o projeto é condição fundamental o conhecimento perfeito das ações atuantes sobre sua estrutura, bem como outras que possam surgir em casos especiais (NBR 8681, 1984), sendo necessária a consideração de alguns fatores durante o cálculo estrutural das unidades de armazenamento conforme discriminadas a seguir (CALIL JR. *et. al.*, 1997):

Ações Permanentes - são decorrentes do peso próprio da estrutura e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e/ou tremonha.

Ações Variáveis - Estas são representadas pelas cargas derivadas do carregamento do produto no silo; podendo também ser induzida pelo fluxo do produto armazenado durante o descarregamento; sobrecargas de serviço de pisos e cobertura; forças das correias transportadoras presas à estrutura do silo; pressão ou sucção interna dos gases; forças de contenção lateral; força de fixação de elementos externos na estrutura; ação do vento; ação da temperatura (efeitos climáticos e armazenamento de produtos quentes); efeitos de recalques diferenciais da fundação; expansão do produto no descarregamento, vibração de equipamentos.

Ações Excepcionais - são decorrentes de impacto de veículos e pressões devidas à explosões de pós.

Uma unidade armazenadora, tecnicamente projetada e bem conduzida, apresenta vantagens como:

- Obtenção de um produto melhor conservado, longe do ataque de insetos e ratos;
- Estocagem racional segura e principalmente econômica tendo em vista que o produtor que armazena a granel comercializa também a granel, economizando, com isso, gastos significantes com sacaria e mão-de-obra ocupada para o ensacamento;
- Economia do transporte, uma vez que os preços dos fretes aumentam durante o período da safra;
- Diminuição do custo do transporte, pela eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem.

Em geral, os silos utilizados para a armazenagem em fazenda apresentam baixa relação entre a altura do silo e o seu diâmetro ou lado (0,75 a 1,5) e fundo plano. Isto se

justifica pelo grande aumento da capacidade do silo com o aumento do seu diâmetro e também porque a manipulação de silos baixos é mais fácil e de menor custo (CALIL JR., 1987).

Uma unidade armazenadora, independente de seu material de construção, deve satisfazer as condições técnicas e econômicas para a facilidade fundamental de armazenar o produto por um período de tempo, mantendo as qualidades desejáveis para a futura destinação (HARA, 1983).

De acordo com o produto a ser armazenado, existem alguns materiais que são restritos quando se destinam à construção de silos. Como por exemplo, a ração não se armazena em silos de concreto devido a alguns fatores como: teor de umidade, tempo de armazenamento e temperatura. Como a ração é um produto pulverulento com teor de umidade elevado, aumenta o atrito do produto com a parede do silo que por sua vez dificulta o fluxo no descarregamento. Então, é necessário que um silo para armazenar este tipo de produto, seja de um material que tenha a superfície lisa. Já os produtos agressivos geralmente são armazenados em silos de aço inoxidável, que por sua vez, é resistente ao desgaste levando-se em consideração a corrosão deste tipo de produto, o que induz a um custo altíssimo. E como solução para tais problemas, existe a possibilidade de se utilizar compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais para construir silos, pois, compósitos terão leveza, durabilidade, resistência, baixo custo e fácil processamento.

Silos construídos com espessura de paredes insuficientes e destinados ao armazenamento de produtos granulares podem apresentar deformações ao longo da parede. Se forem armazenados produtos pulverulentos coesivos, a deformação da parede é pontual e devida à queda de abóbodas. As quedas de abóbodas em silos com altura superior à 15 metros podem originar deformações na parte baixa, para fora, e deformações por depressões na parte alta do silo, para dentro (CALIL JR., 1984).

Os silos de aço são usados amplamente em aplicações agrícolas em toda parte do mundo. São normalmente usados para o armazenamento de sólidos. Estas estruturas são geralmente em forma cilíndrica e alta, fabricados por um número de placas de aço inoxidável sempre unido. Embora grandes cuidados devam ser tomados com a fabricação, estas estruturas invariavelmente contêm pequenas imperfeições na geometria. Sua construção consiste em diversas formas, como numa pré-fabricação de painéis para as paredes na indústria, que mediante a conformação horizontal, ofereça a resistência suficiente às pressões

exercidas pelos produtos armazenados (RAVENET, 1990).

Segundo Haynal (1989), o silo fabricado em concreto armado torna-se muito oneroso para o agricultor, principalmente para o de porte médio. Segundo ele, o concreto armado é mais apropriado para armazéns graneleiros e só é viável economicamente a partir de uma capacidade de cinco mil toneladas. Com esse tamanho ou mais, seu custo passa a ser equivalente ao do silo metálico, que serve a qualquer tipo de grão e tem como vantagem mais destacada a possibilidade de se conseguir uma armazenagem livre de ratos e pragas, o que não ocorre com os armazéns convencionais que precisam de desinfecção tanto do ambiente quanto da sacaria.

A importância da classificação das estruturas de armazenamento de produtos a granel, segundo as suas dimensões, está no fato que, de um modo geral, a previsão das pressões estáticas ou dinâmicas está baseada segundo essa classificação. Embora algumas normas não façam essa classificação, estas prevêm pressões diferenciadas em função da relação altura/ diâmetro (GOMES, 2000).

Os produtos armazenados exercem uma carga friccional nas paredes do silo, induzindo tensões compressivas axiais que aumenta com a profundidade (Figura 2). A resistência de um silo metálico é usualmente controlada por considerações de deformações em compressão axial (ROTTER, 1985).

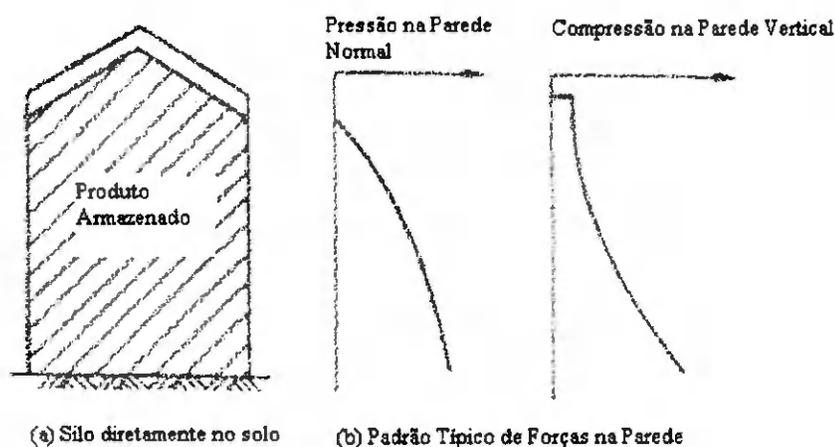


Figura 2 - Silos e cargas nas paredes

O efeito da força de tração é proveniente das pressões horizontais obtidas através do carregamento e descarregamento do produto nas paredes do silo. Segundo Almeida & Godoy

(1986), existem dois problemas que ocorrem em silos carregados de grãos ou algum outro produto com o mesmo tamanho que são: distribuição das pressões em silos verticais com imperfeição nas suas paredes e a distribuição de pressões na zona das imperfeições.

A distribuição da pressão horizontal em uma seção do silo é observada na Figura 3, a qual mostra a força de tração nas paredes do silo provocada pela pressão horizontal.

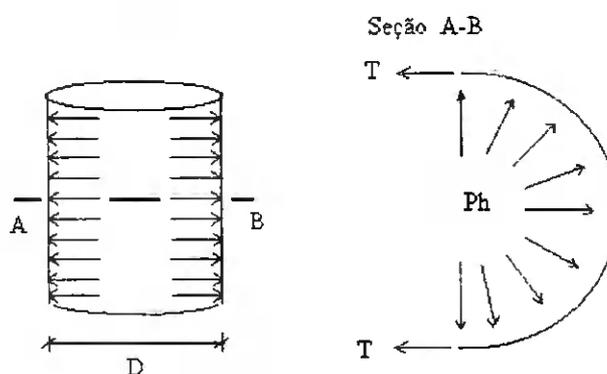


Figura 3 – Distribuição da pressão horizontal no silo e o efeito da força de tração

Segundo Ravenet (1976), esta força de tração pode ser calculada por:

$$T = \frac{P_h \times D}{2}, \quad (01)$$

Onde:

P_h → pressão horizontal de descarregamento (Pa);

D → diâmetro do silo (m);

T → esforço de tração (N/m).

Segundo Calil Jr. (1990), a pressão nas paredes em um silo, depende de três parâmetros, tais como: propriedade de fluxo do produto armazenado; propriedades geométricas e estruturais do silo e modo de operação.

As mudanças desses parâmetros a serem considerados poderão provocar variações no espaço no decorrer do tempo em que o produto estiver armazenado, e a interação destes parâmetros produz um tipo de tensão no produto armazenado durante o carregamento e o

descarregamento, fator este que afeta a grandeza e a distribuição das paredes do silo e na massa do produto.

Diversos autores vêm estudando o comportamento dessas propriedades nas fases de operação de um silo (carregamento, armazenamento e descarga) e, também, procedimentos para a sua determinação que traduzam, de forma realística, esse comportamento. Os produtos armazenados nos silos possuem propriedades físicas que têm um importante papel no comportamento de pressões que o produto exerce sobre a parede vertical e fundo do silo.

Em 1964, Jenike em busca de uma forma adequada de medir tais propriedades, analisou inicialmente a aplicabilidade de equipamentos de teste utilizados em solos. Diante de resultados considerados não satisfatórios, decidiu desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos a serem armazenados.

Segundo Nascimento (1996), as propriedades físicas dos produtos armazenados são essenciais para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e descarregamento e através dos parâmetros conhecidos, torna-se possível determinar e prever as pressões que ocorrerão na estrutura. Para o cálculo destas pressões em silos altos deve-se adotar a norma DIN 1055 (1987) e aplicar a teoria de Jansen (JANSEN, 1985 *apud* RAVENET; RAVENET, 1977), devido às experiências práticas, baseadas em acidentes com silos reais.

Para o cálculo das pressões no corpo do silo, temos:

a) Cálculo do raio hidráulico (R):

Para o silo circular, temos:

$$R = 0,25 d_c \quad (02)$$

b) Cálculo das Pressões sobre as Paredes

b.1 - Pressões de carregamento

• Pressão Horizontal:

$$P_{hc} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (03)$$

- Pressão vertical:

$$P_{vc} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (04)$$

- Pressão de atrito por um metro de superfície de parede

$$P_{wc} = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (05)$$

b.2 - Pressões de Descarregamento

- Pressão horizontal

$$P_{hd} = C \times P_{hc} \quad (06)$$

Onde:

C: Coeficiente de sobrepressão de descarregamento central é dado pela norma DIN 1055 (1987).

- Pressão vertical

$$P_{vd} > P_{vc} \quad (07)$$

- Pressão de atrito nas paredes

$$P_{wd} = 1,1 \times P_{wc} \quad (08)$$

O produto quando é descarregado causa atrito nas paredes do silo. Segundo Ravenet (1977), o cálculo da força de atrito se dá pelas seguintes fórmulas:

$$F_{TOTAL} = \frac{\pi D^2}{4} (h\gamma - P_v) \quad (09)$$

Onde:

F_{TOTAL} → força de atrito sobre a parede a uma altura h , em N;

h → altura da borda superior do silo, em metros;

D → diâmetro do silo, em metros;

γ → densidade do produto armazenado, em N/m^3 ;

P_v → pressão sobre o fundo (vertical), em N/m^2 .

$$F_{ATRITO} = \frac{F_{TOTAL}}{\pi D} \quad (10)$$

De acordo com Teles (1968), o cálculo dos tubos sujeitos à pressão externa é bem mais difícil do que o caso da pressão interna, isto porque devem ser levados em conta os efeitos de colapso devidos à compressão que se exerce nas paredes dos tubos, considerando-se um cilindro de paredes delgadas sujeitas a uma pressão interna. Diversas foram as teorias desenvolvidas para relacionar a ruptura do material com a ação combinada de várias tensões simultâneas no estudo da Resistência dos Materiais. Estas tensões referem-se aos esforços de tração, compressão, flexão, e combinações desses esforços. Nos cálculos para os esforços resultantes de cargas eventuais, terremoto, peso da água de teste hidrostático. Segundo a norma ASA.B.31, a tensão máxima devido à pressão interna ou externa não deve ultrapassar a tensão admissível do material na temperatura considerada. Esta tensão é a tensão circunferencial.

2.2 COMPÓSITOS

Os compósitos são materiais multifásicos constituídos por um ou dois materiais sendo: uma fase contínua, também chamada matriz, e outra fase dispersa, chamada de carga ou reforço, podendo ser esta apresentada na forma de fibras ou partículas. Nos compósitos, os reforços são impregnados pela matriz permanecendo seus constituintes conservados de suas características individuais (FLINN & TROJAN, 1981; CALLISTER JR, 1997). A fase contínua tem por função proteger e separar os elementos de reforço e transferir tensões, além de ser responsável pelas características superficiais do compósito, isto é, acabamento, resistência a solventes e umidade, entre outros (BRYDSON, 1982; CALLISTER JR. 1997),

podendo ter natureza metálica, cerâmica ou polimérica. Os compósitos de matriz polimérica são os que apresentam menor densidade e melhor relação propriedades/peso e podem ser classificados de várias maneiras e uma destas classificações define compósitos em função da morfologia de seus agentes de reforço (HAZIM, 1984), podendo ser descritos como:

- Compósitos particulados - consistem de partículas dispersas em uma matriz, nas formas esféricas, planas, elipsoidais, maciças, ocas e etc. (Figura 4).

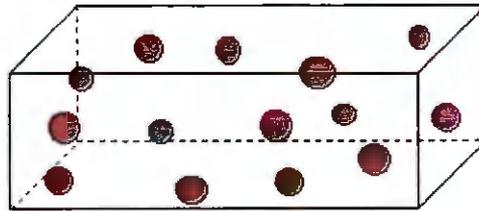


Figura 4 – Ilustração de compósito particulado

- Compósitos fibrosos - consistem de fibras aderidas à uma matriz, podendo ser longas ($l > 15 \text{ cm}$), ou curtas ($l < 15 \text{ cm}$) e possuindo disposição orientada ou aleatória (Figura 5).

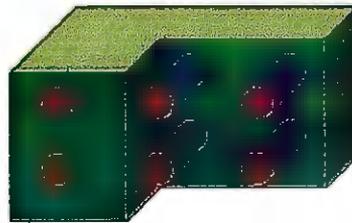


Figura 5 – Ilustração de compósito fibroso

- Compósitos laminados - consistem na combinação de materiais em várias camadas, podendo ser de três tipos: camadas em várias direções, sanduíche, esqueletos ou colméias (Figura 6).



Figura 6 – Ilustração de compósito laminado.

- Compósitos fibrosos híbridos – fazem parte de uma classe que envolve compósitos fibrosos e laminados, estando inclusos os vários tipos de reforços como: fibras/partículas; e/ou vários tipos de fibras ou partículas.

Os materiais compostos também são classificados quanto à natureza de seus componentes, tendo em vista o tipo de reforço em que são compostos, conforme a Figura 7.

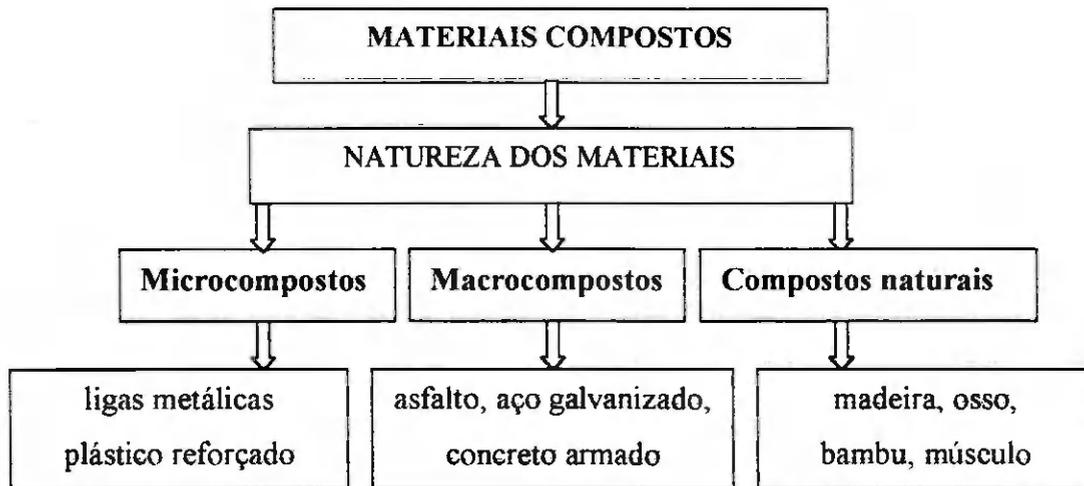


Figura 7 - Classificação dos materiais compostos quanto à natureza de seus componentes

Segundo HULL (1986), a mais relevante classificação dos materiais microcompostos dá-se através das formas, tamanho, e distribuição dos componentes, principalmente dos reforços.

Nos últimos anos, o processo de fabricação destes materiais tem sofrido uma substancial evolução, onde tecnologias têm sido desenvolvidas e otimizadas, levando a indústria a um alto nível de sofisticação, principalmente em áreas de alta tecnologia, como a indústria aeroespacial. O uso de compósitos reforçados por fibras naturais, além das boas propriedades mecânicas com baixa massa específica, oferece-se um material alternativo aos plásticos reforçados com fibras de vidro em algumas aplicações técnicas. Todavia, a elevada absorção de umidade, pobre molhabilidade por resinas não-polares, e adesão insuficiente entre fibras vegetais não tratadas e a matriz polimérica, podem fazer com que as suas propriedades se deteriorem ou promovam a delaminação (CARVALHO & colaboradores, 1997).

Este trabalho trata da obtenção, caracterização mecânica e envelhecimento dos compósitos de matriz polimérica (poliéster insaturado) reforçados por tecido de juta.

2.3 - MATRIZ POLIMÉRICA

A matriz polimérica, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e de proteger o reforço contra ataques químicos e físicos tem como principal função dispersar ou aglomerar o reforço, e, quando submetida a uma tensão deve ser capaz de distribuir e transferir as tensões para o componente de reforço. A escolha de uma matriz para uma aplicação estrutural deve ser limitada, inicialmente ao nível de deformação que ela sofre em relação ao reforço, quando submetida a uma solicitação (UTRACKI, 1987; RABELLO, 1989). A matriz é um componente importante do compósito, já que é ela que transfere as tensões, protege as cargas e/ou reforços, melhora as propriedades de resistência ao impacto e fissuramento sob pressões ambientais, como também, contribui para facilitar a usinagem e modelagem (KELLY & MILEIKO, 1986).

As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas, termofixas e elastoméricas. Para os compósitos avançados a maior parte das matrizes poliméricas é à base de resinas termofixas, destacando-se as resinas epóxi, fenólicas e poliéster. (HULL & CLYNE, 1996).

Termoplásticas

As matrizes termoplásticas apresentam de forma sólida à temperatura ambiente, podendo modificar seu estado físico através de aquecimento, voltando ao normal com o resfriamento. São polímeros de cadeias longas sem ligações cruzadas.

O uso de termoplásticos reforçados em materiais estruturais possui vantagens como rapidez no processo de produção, fácil reaproveitamento da matéria-prima (diversas vezes). Em contrapartida a complexidade dos equipamentos utilizados no processo de moldagem restringe um pouco o seu campo de aplicação. Embora o uso de matrizes termoplásticas, devido à elevada produtividade na produção, reduza significativamente o custo de fabricação de seus compósitos, estas não têm sido empregadas em compósitos avançados, pois tem como limite, a temperatura de uso (HULL & CLYNE, 1996; CAVALCANTI, 2000). As principais resinas desta classe são: polipropileno, poliamidas, e policarbonatos.

Termofixas

As matrizes termofixas em geral, são líquidas à temperatura ambiente. Por efeito de luz, calor, radiação ou catalisadores químicos, transformam-se por uma reação denominada de cura, em sólidos infusíveis e solúveis. O processo de cura ou polimerização da resina tem início imediatamente após a adição de catalisadores e aceleradores especiais. Quando curadas estas resinas têm as suas cadeias interligadas numa única estrutura dita reticulada.

As resinas termofixas mais utilizadas em aplicações industriais são: epóxi, poliéster e fenólicas. A escolha da resina apropriada permite muitas vezes que o projetista possa adequar às características finais de um compósito, tais como: temperatura de uso, resistência química, propriedades elétricas etc.

2.3.1 RESINA DE POLIÉSTER

Constituem uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular.

As resinas poliéster podem ser utilizadas com ou sem reforço, se bem que uma vez reforçadas se transformam em um plástico de engenharia com ótimas propriedades mecânicas, substituindo muitas vezes materiais como ferro, aço e concreto. Tendo como principais características: cura rápida a temperatura ambiente, por meio de catalisador; pequena contração durante a polimerização; boa resistência aos agentes atmosféricos; qualidades mecânicas finais excelentes; cor clara nos corpos de prova, permitindo a visualização de bolhas (caso ocorra). A velocidade de cura do poliéster depende de sua reatividade, do teor de catalisador e acelerador, e das condições ambientais. Os poliésteres mais reativos curam mais rapidamente que os menos reativos. Os teores de acelerador e catalisador possuem influência marcante na velocidade de cura.

O poliéster saturado pode ser utilizado com ou sem reforço, e seu emprego é bem diversificado: filmes, fibras sintéticas, plastificantes (poliméricos) e até produtos de engenharia como tampa de tanque de combustível etc.

O poliéster insaturado produz o polímero alquídico que possui massa molar pouco elevada e é diluído em um monômero reativo, normalmente o estireno, sendo iniciado através

da adição de um agente de cura, normalmente peróxidos orgânicos. Após a adição do catalisador, ocorre a polimerização do estireno que une as cadeias poliésteres insaturados entre si, gerando uma resina poliéster termofixa, ou seja, polímero reticulado, rígido, insolúvel e infusível (Figura 8) (MANO, 1985).

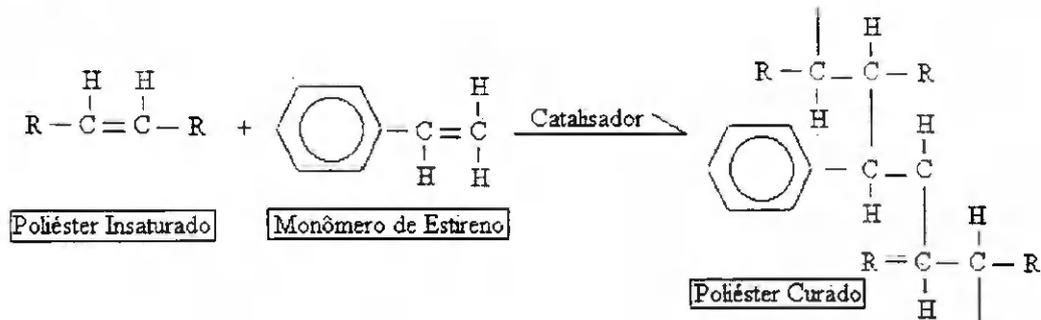


Figura 8 - Estrutura do poliéster curado

O tempo de gelificação, ou seja, o tempo para que passe de líquido a sólido flexível, é o tempo de moldagem e impregnação da resina nas cargas. Esse tempo é de suma importância, pois deve ser controlado mediante o grau de dificuldade de impregnação da resina na carga, tendo como determinante a quantidade de catalisador a ser adicionado à resina, podendo na insuficiência do mesmo ser necessário um processo de pós-cura (FONSECA, 1998). Os catalisadores têm como função acelerar o processo de cura ou polimerização das resinas poliméricas (CARVALHO, 1992). Os mais comuns são: MEKP- peróxido de metiletilcetona (líquido), e o BPO- peróxido de benzoila (sólido ou pasta). Como os aceleradores de cura são usados sais de cobalto (naftalato ou octoato de cobalto) para a cura de poliésteres catalisados com MEKP. Caso a catálise seja feita com BPO, devem-se usar aminas terciárias (DEA- dietilanilina ou DMA- dimetilanilina). Esses catalisadores e aceleradores permitem a cura dos poliésteres à frio, sem requerer fonte externa de calor (OWENS, 1992).

2.4 REFORÇOS

São denominados reforços aqueles constituintes que, de uma maneira ou de outra, aumentam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz polimérica. Podem ser considerados reforços, desde simples cargas minerais muitas vezes incorporadas aos polímeros com o intuito de reduzir custos, até fibras de ultra-alta resistência (SHAH & LAKKAD, 1981)

As cargas minerais proporcionam aumentos na rigidez, dureza e, algumas vezes, na resistência e temperatura de distorção térmica dos produtos. Os elastômeros proporcionam aumento na resistência ao impacto de matrizes poliméricas frágeis, enquanto as fibras, pelas suas características unidirecionais, incrementam acentuadamente a maior parte das propriedades mecânicas na direção longitudinal ao reforço (CORAN *et al.*, 1974).

Os elementos de reforço são definidos em função da aplicação do moldado, possuindo como principais requisitos: a melhoria das qualidades desejadas, baixa absorção de umidade, boa impregnação da resina, baixo custo, e disponibilidade. A escolha do reforço a ser empregado é complexa, devido às diversas variedades de formas, tipos, pesos, e tratamentos superficiais aos quais são submetidos, podendo ser usada mais de um tipo de reforço em combinação (FONSECA, 1998). Os reforços são responsáveis pela resistência mecânica do material, enquanto a matriz conserva a disposição geométrica das cargas, bem como as protege do ambiente exterior. As propriedades mecânicas teóricas de um composto dependem principalmente propriedades dos materiais constituintes (fibras e matriz); concentração das fibras e orientação e distribuição do reforço e adesão entre as fases.

Teoricamente, quanto maior a quantidade de reforço, maior será a resistência. Em alguns casos, as fibras de vidro são combinadas com outras fibras, como as de carbono ou aramidas, criando um composto "híbrido" que combina as propriedades de mais de um material de reforço. Além disso, freqüentemente, podem ser formulados com cargas e aditivos que mudam os seus parâmetros de processo e desempenho (CALLISTER JR, 1997).

A utilização de reforços fibrosos em matrizes poliméricas propicia melhora nas propriedades básicas dos materiais, tais como: tenacidade na fratura, resistência à flexão e ao impacto etc., e substitui parcialmente ou totalmente as fibras sintéticas, extensamente usadas, visando a obtenção de material mais biodegradável, além da obtenção de vantagens do ponto de vista de peso, custo e adesão fibra-matriz, especificamente com materiais de matriz polar (WOLLERDORFER & BADER, 1998; WANBUA *et al.*, 2003).

Exemplos de materiais compostos incluem concreto armado, cascos de barco à base de fibra de vidro e matriz poliéster, quadros de bicicleta (epóxi ou alumínio/ fibra de carbono etc.).

2.5 FIBRAS

Fibra é todo elemento natural ou químico de elevada razão l/d, cujas características de flexibilidade, suavidade, capacidade de isolamento térmico e de absorção, elasticidade, resistência e alongamento levam à aplicações têxteis. As fibras vegetais, do modo como denominadas usualmente, na verdade são feixes constituídos por células individuais que, por sua vez, compõem-se de microfibrilas, ricas em celulose e polímero vegetal (GOULARTI FILHO & GENOVEVA NETO, 1997).

As características macroscópicas de maior interesse, no estudo das fibras, são aquelas inter-relacionadas com o comportamento dos compósitos resultantes, sendo de interesse as propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais (SOSA GRIFFIN, 1994, VAN DAM, 1994). Vários estudos têm sido realizados sobre as aplicações destas fibras em compósitos reforçados, com a finalidade de analisar em especial a melhoria destas propriedades (JOSEPH *et al.*, 1992; TOLEDO FILHO, 1997; ROWEL, 1996; YAN LI, 2000; WANBUA, 2003; PAIVA JR, 2004), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais vegetais(*)

Fibras	Diâm. (mm)	Comp. (cm)	Peso específico (KN/m ³)	Absorção de água (%)	Resist. à tração (MPa)	Def. na ruptura (%)	Mód. elasticidade (GPa)
Sisal	0,05-0,5	38-94	12-14,5	123-250	227-1002	3-7	9-27
Coco	0,1-0,6	5-35	6,7-14	67-180	60-200	10-51	2-6
Juta	0,1-0,4	18-80	10	25-214,1	240-550	1,2-3	17,4-32
Piaçava	0,1-0,9	17-218	8-11	34-108	50-143	4-6	5,6-21,8
Bambu	0,35	22-27	-	-	270-575	3,2	28,8-270
Bagaço-de-cana	0,2-0,4	5-30	-	70-75	170-290	-	15-19
linho	-	-	-	-	1000	1,8-2,2	100

(*) TOLEDO FILHO, (1997).

As fibras sintéticas possuem várias vantagens em aplicação como reforços em compósitos, quando comparadas com as fibras naturais, tais como: propriedades mecânicas elevadas e bem definidas, estabilidade dimensional e custo moderado (SHAH, & LAKKAD, 1981; CARVALHO *et al.*, 1997). No entanto, as fibras vegetais, devido a sua disponibilidade; baixo custo; leveza; não serem tóxicas; baixo consumo de energia gasto na sua produção e

bom conjunto de propriedades mecânicas, são consideradas potencialmente atrativas para serem utilizadas como reforço em matrizes poliméricas (CARVALHO *et al.*, 1997). As desvantagens no uso destes reforços incluem: estabilidade dimensional insuficiente; baixa resistência biológica; não apresentarem termoplasticidade; terem baixa temperatura de processamento; serem incompatíveis a grande maioria dos polímeros e absorverem umidade.

As fibras classificam-se em dois grupos: naturais e artificiais. As fibras naturais dividem-se em três subgrupos, de acordo com sua natureza: vegetais, animais e minerais (YOUNG, 1997). Quando se trata das formas em que podem tomar as fibras naturais vegetais podem ser classificadas em quatro classes: fibras oriundas de caules, das folhas, do lenho dos frutos e das sementes. A Figura. 9 ilustra, esquematicamente as principais fibras de cada classe (NOTHEMBERG, 1996).

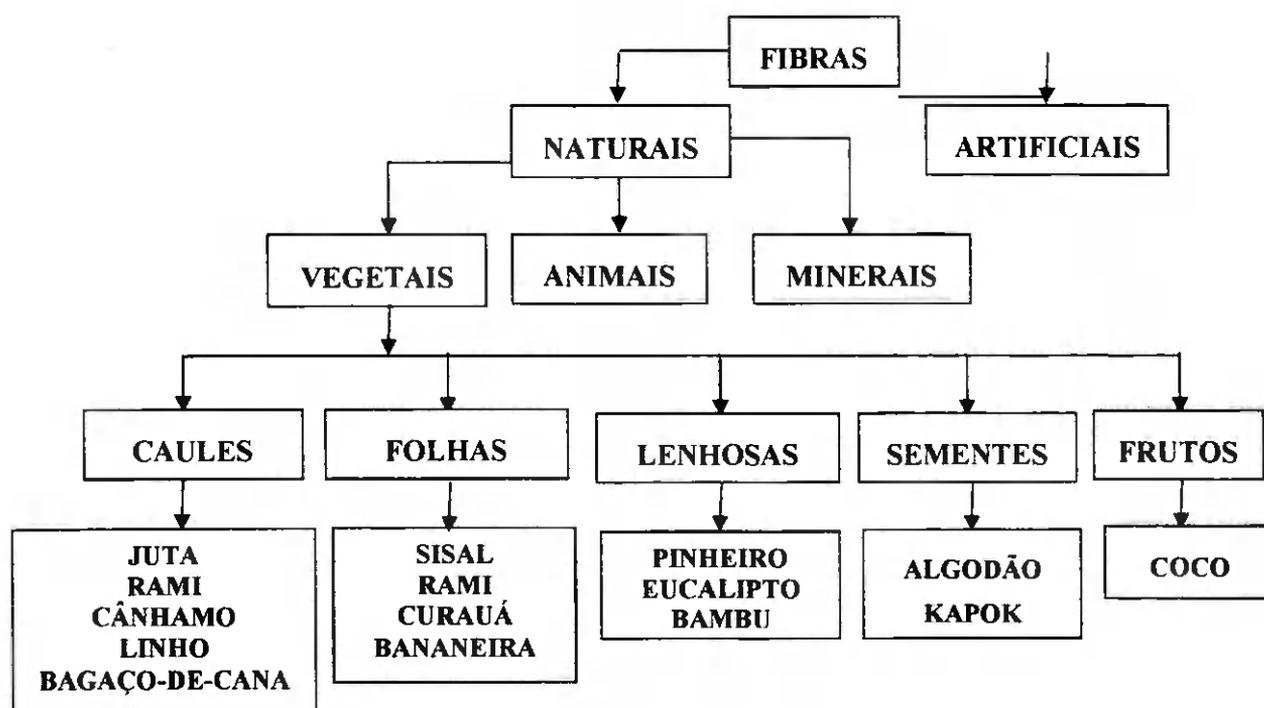


Figura 9 – Classificação das fibras

As fibras obtidas das folhas têm origem nas plantas monocotiledôneas, são ligadas umas às outras por lignina e sua função é conferir resistência à folha e dar suporte aos vasos de condução de água do vegetal, enquanto que as fibras obtidas de caules têm origem em plantas dicotiledôneas. Essas fibras ocorrem no floema, que fica na entrecasca do talo,

podendo ser obtidas através da imersão dos caules em tanques de água quente ou deixando-os espalhados no chão para permitir que a ação das bactérias dissolva o material que envolve as fibras. Estas são usadas essencialmente usadas na indústria têxtil. Quando obtidas do lenho ou de madeiras são relativamente curtas, grossas e inflexíveis. Pedacos de madeiras são processados em várias soluções e sujeitos a tratamentos mecânicos para extrair fibras de celulose de boa qualidade na forma de polpa. Já as fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas (COOK, 1980; YOUNG 1997; TOLEDO FILHO, 1997).

2.5.1 FIBRAS VEGETAIS

Condições climáticas, idade, tipo de solo e processo de extração influenciam a estrutura da fibra e a composição química das fibras vegetais (CARVALHO, 1997; GOWDA, *et. al.*, 1999). Valores médios da composição química são apresentados na Tabela 2, onde se pode observar que quimicamente, elas são constituídas essencialmente por celulose associada a outros materiais em pequenas quantidades como: a hemicelulose a pectina e a lignina, descritas abaixo.

Tabela 2 - Composição química com base nas diferentes fibras vegetais (*)

	algodão	juta	linho	rami	sisal
Celulose	82.7	64.4	64.1	68.6	65.8
Hemicelulose	5.7	12.0	16.7	13.1	12.0
Pectina	5.7	0.2	1.8	1.9	0.8
Lignina	-	11.8	2.0	0.6	9.9
Água solúvel	1.0	1.1	3.9	5.5	1.2
Cera	0.6	0.5	1.5	0.3	0.3
Água	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

(*) Gassan J., Bledzki A. K. Die Angew Makromol Chem 1996.

A celulose é a mais abundante substância polimérica natural, existindo em maior proporção nas plantas, e tendo como estrutura elementar a anidro-d-glicose. Hemi-celulose é um termo genérico dado aos polissacarídeos das fibras vegetais. São polímeros de glicose, maltose, xilose, galactose e outras hexoses e pentoses, cujo grau de polimerização é inferior ao da celulose. A pectina é encontrada em todos os vegetais superiores, sendo um termo genérico usado para grupos de polissacarídeos, caracterizado pelo alto conteúdo de ácido

úrico e presença de grupos éster-metil. Por fim, a lignina é uma substância polimérica amorfa, encontrada nos tecidos de todas as plantas, com exceção do algodão. É quase impossível separar a lignina das fibras detendo a alteração ou degradação de sua estrutura (MENDES, 1992).

2.5.1.1 FIBRAS DE JUTA

A fibra de juta é uma das fibras têxteis cujo cultivo possui grande importância {VAN DAM, 1994}. Esta planta é proveniente das regiões tropicais, onde a média climática anualmente mantém a umidade relativa com altas temperaturas constantes entre 20 e 25°C. São extraídas da “*Corechorus Capsularis*”, espécie vegetal cultivada em áreas de inundações, e da “*Corchorus Olitorios*”, cultivada principalmente em zonas mais altas (ERHARDT *et. al.*, 1975). No Brasil, esta fibra é encontrada nos estados da região norte, principalmente no Pará, com aproximadamente 30% da produção nacional como se observa na Tabela 3, sendo utilizada basicamente na confecção de telas e tecidos de aniagem (sacaria), cordas e barbantes, bem como fabricação de tapetes e capachos. Sua resistência e módulo de elasticidade são relativamente elevados, o que permite a sua aplicação como elemento de reforço em compósitos.

Tabela 3 – Dados de previsão de safra da juta / setembro de 2004

Fibra vegetal - juta		Pará	Brasil
Produção (toneladas)	Ano anterior	410	1485
	Ano atual	1095	2170
	Variação(%)	+167,07	+46,13
Área Plantada (hectare)	Ano anterior	310	1047
	Ano atual	669	1046
	Variação(%)	+115,81	+34,29
Rendimento Médio kg/ha	Ano anterior	1323	1418
	Ano atual	1637	1543
	Variação(%)	+23,73	+8,82

Fonte: Levantamento Sistemático de Produção Agrícola (LSPA)

Dentre as fibras naturais, a juta apresenta maior rigidez sendo esta característica de grande importância, uma vez que este é um dos critérios fundamentais ao se projetar

estruturas em virtude destas apresentarem deflexão mínima sob tensão (JOSEPH & CARVALHO, 1999; ZADORECKI & MICHEIL 1964).

A umidade das fibras vegetais afeta negativamente as propriedades dos compósitos, portanto é uma característica muito importante a ser levada em conta ao se utilizar como reforço em compósitos. Por este motivo, muitos trabalhos de pesquisa têm reportado o efeito da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais a curtos e longos prazos (MOHANTY & MISRA, 1995).

2.6 INTERFACE FIBRA – MATRIZ

A qualidade da interface fibra-matriz é importante para a aplicação das fibras como reforço em compósitos, sendo que um dos fatores que a favorece, é o fenômeno de contração que a matriz polimérica sofre durante a sua cura ou a sua solidificação. Para que ocorra uma melhor distribuição de tensão sobre a superfície do reforço, durante o processo de cura, é necessário que ocorra um molhamento perfeito pela resina, uma vez que as propriedades finais dos compósitos dependem da qualidade da interface.

Devido aos problemas de compatibilização interfacial de compósitos, foram desenvolvidos mecanismos na superfície dos reforços ou das matrizes, como por exemplo, os agentes de acoplamento e modificações, para melhorar a qualidade da interface em compósitos de matriz polimérica. Se a interface for forte o compósito será forte. Por isso que há a necessidade de compatibilizar os componentes do compósito na interface, com o intuito de aumentar a interação química e física entre as superfícies e também para compatibilizar as tensões superficiais para que ocorra um melhor molhamento. Sendo assim, quase todos os componentes em matrizes poliméricas devem sofrer um tratamento superficial para melhorar sua acoplagem à matriz (HAGE, 1989).

A grande diferença entre as propriedades elásticas da matriz e da fibra deve ser transmitida através da interface, ou seja, as tensões que atuam na matriz são transmitidas às fibras através da interface. Para que haja transferência efetiva de tensões é necessário que a interface seja forte, ou seja, que haja boa adesão entre os componentes. A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas, na interface, comprometendo o desempenho global do compósito.

Diversos estudos sobre compósitos reforçados com fibras naturais apresentam a importância da interação fibra/matriz e relatam diversos tratamentos realizados nas fibras para melhoria de sua compatibilidade. Enfoques como as condições de processamento, resistência a intempéries, interface matriz/fibra, dispersão das fibras na matriz e propriedades finais do compósito, sugerem aplicação das fibras naturais como reforço em plásticos (CHAUD *et. al.*, 1986; PAIVA JR, 2004; FONSECA, 2004; WANBUA, 2003).

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

Desde o início do século passado, o uso de plásticos tem se tornado cada vez mais freqüente na sociedade. Basta olhar ao redor para se perceber a incrível quantidade de artefatos produzidos pelo homem que utiliza polímeros como matéria-prima (FILHO *et al.*, 2001). Infelizmente, estas mesmas qualidades os transformam em um grande problema ambiental. Alternativamente, os polímeros biodegradáveis vêm sendo pesquisados despertando grandes interesses, pois possuem propriedades similares à dos plásticos convencionais (de origem petroquímica), e têm a vantagem de serem degradados no solo pela ação de microrganismos em questão de poucos meses, sendo totalmente transformados em água e gás carbônico (FORMOLO *et al.*, 2003).

A busca de materiais ecologicamente corretos tem sido uma necessidade para a proteção ambiental em todo o mundo. As fibras vegetais têm sido pesquisadas nos últimos anos visando sua utilização em aplicações avançadas, como nos compósitos. A crescente demanda de fibras vegetais apresenta-se como uma grande oportunidade para o Brasil, devido à sua potencialidade neste setor (DE PAULA, 1996).

Há vários estudos que mostram que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais aumentam significativamente a elevados teores de fibras (CHAWLA & BOSTOS, 1979; D'ALMEIDA, 1987; MOHANTY & MISRA, 1995; CARVALHO, 1996; DASH *et al.*, 1999; CAVALCANTI, 2000).

Fibras vegetais como as de juta, sisal, rami, algodão, coco e bananeira, dentre outras, têm sido bastante empregadas como reforços em matrizes termoplásticas, termorrígidas e borrachosas. Há vários estudos que demonstram a viabilidade e o interesse em se utilizar a juta como reforço em matrizes poliméricas, especialmente com resinas poliéster, epóxi e fenólicas (ALEXANDRE & DUBOIS, 2000).

Pal (1984) estudou as possibilidades do emprego da juta como reforço na produção de compósitos de baixo custo, empregando resinas poliéster, epóxi e fenólica como matrizes.

Concluiu que as fibras de juta podem substituir as fibras de vidro em aplicações onde as propriedades mecânicas e resistência às intempéries não são muito exigidas, sendo necessários estudos no sentido de melhorar a adesão fibra-matriz.

Cavalcanti (2000), reportou que a introdução do tecido de juta na matriz poliéster provocou um decréscimo de 25% na resistência à tração dos compósitos com até duas camadas (26% em peso) de tecido de juta enquanto os compósitos com teores de tecido de juta de 51% de peso exibiram um acréscimo de 20 e 56% na resistência à tração em relação a matriz e ao compósito com duas camadas respectivamente. Segundo Cavalcanti (2000) o Módulo de Young (módulo de elasticidade em tração) aumentou em cerca de 30% em relação a matriz, com a incorporação de duas camadas de tecido de juta bruta (26% em peso). Com o aumento do teor de fibras para quatro camadas (51% em peso) houve um aumento de 56 e 108% em relação ao compósito com duas camadas e à matriz respectivamente, o que mostra que a inclusão das fibras eleva a rigidez do compósito.

Medeiros & Carvalho (1999) estudaram as propriedades mecânicas em tração de compósitos unidirecionais poliéster/fibra de juta (30% em peso), produzidos por pultrusão, em função do tempo de envelhecimento. Os resultados indicaram que as condições de envelhecimento térmico empregados (5, 10, 15 e 20 dias de exposição em estufa a 110 °C), não foram suficientes para provocar a degradação acentuada do compósito poliéster/juta pultrusado. A tendência à redução na resistência à tração do compósito com o tempo de envelhecimento foi atribuída à deterioração da interface fibra/matriz acentuada pela higroscopicidade das fibras de juta.

Roe & Ansell, (1985), incorporaram fibras de juta unidirecionalmente em resina de poliéster, para determinação de suas propriedades mecânicas. Observaram que as fibras formam íntima ligação com a matriz até 60 % de volume, acima da qual torna-se difícil a impregnação. Nesta fração de volume, obtiveram uma resistência à tração de 250 MPa e uma resistência ao impacto de 22 kJm⁻². Valores estes, inferiores aos previstos teoricamente. Concluíram que quando relacionados ao custo por unidade de peso, os compósitos obtidos são comparáveis ao reforço com fibras de vidro.

Com relação à aplicação de fibras naturais em compósitos, a rugosidade superficial, característica inerente à essas fibras, favorece a sua adesão em resinas poliméricas. Porém, a sua impregnação continua difícil, o que reduz a sua utilização em ambientes úmidos (D'ARSIE, 1986). Suas propriedades de resistência e baixa densidade, aliadas à necessidade

de maiores aplicações de recursos naturais, abundantes em nosso país têm atraído a atenção de pesquisadores de diversas áreas para o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais, se levado em consideração o baixo custo de aquisição das fibras.

Segundo Rowell *et al.* (1996), a modificação química de fibras vegetais pode ser utilizada para melhorar a compatibilidade fibra-plástico, a estabilidade dimensional, a baixa temperatura de degradação, a temperatura de processamento e a resistência à degradação biológica.

Sydenstricker *et al.* (2002) trataram fibras de sisal com NaOH por 1 hora a uma temperatura de 25 °C, variando a concentração da solução de 0,25 a 10%. O tratamento com 2% de NaOH foi o mais eficaz com relação à resistência à tração. Foram observados uma redução na densidade e um aumento da cristalinidade das fibras com o aumento da concentração do tratamento alcalino. Não houve alteração na sorção de umidade com o tratamento.

As fibras de juta quando comparadas às fibras de vidro, exibem menor resistência à tração e módulo, porém, seu módulo específico é maior do que o da fibra de vidro e, numa relação módulo/custo, a vantagem da utilização da juta é ainda maior. A relação entre a resistência específica por unidade de custo também é semelhante à das fibras de vidro. Tais considerações mostram que, mesmo apresentando propriedades nominais inferiores às das fibras de vidro, quando as propriedades específicas e o custo são levados em consideração, o uso de fibras de juta como reforço em compósitos de matriz polimérica torna-se bastante interessante (PHILIP, 1964; ROE & ANSELL, 1985).

Araújo *et al.*, (2004), estudaram as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados por resíduos de fibra de vidro. A incorporação destes resíduos melhora consideravelmente as propriedades mecânicas tais como: resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação e resistência ao impacto, evidenciando que são alternativa eficiente para a reciclagem e que podem ser usados como reforços para compósitos com resinas de poliéster.

Satyanarayama *et al.*, (1986), pesquisaram as propriedades de resistência à tração, impacto e elétrica de compósitos de poliéster/coco a 9%, e de poliéster/banana/algodão a 15% em peso. Verificaram as variações das propriedades após a exposição em água por um período de 242 dias nos compósitos poliéster/banana/algodão, obtendo como resultado a delaminação após 180 dias de imersão, tendo em condições normais um comportamento satisfatório por

um período superior a 4 anos. Os autores propuseram a utilização destes compósitos na fabricação de coberturas para equipamentos, molduras de espelhos e revestimentos em geral.

Clark e Ansell, (1986), produziram laminados híbridos pelo método hand-lay-up, empregando reforços de fibra de vidro e juta com matriz de poliéster. Nos laminados, utilizaram diversas formas de construção e avaliaram suas propriedades mecânicas, resistência à intempéries e custo final do produto. Concluíram que os laminados híbridos possuem boa resistência ao impacto e a resistência à fratura máxima foi alcançada com a juta entre duas camadas de fibra de vidro.

Carvalho & Cavalcanti (2004), estudaram a influência do teor de fibras nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster reforçados com tecidos híbridos juta/algodão. Neste trabalho concluíram que o teor de reforço fibroso possui grande influência nas propriedades, bem como a direção do teste mecânico apresentando melhores resultados quando os compósitos foram ensaiados na direção da fibra de juta.

Shah & Lakkad, (1981), pesquisaram as propriedades mecânicas das resinas poliéster e epóxi reforçadas com fibras de juta dispostas unidirecionalmente, e fibra de vidro em uma composição híbrida com a juta. Obtiveram resultados positivos com a incorporação de 32.9 e 21.8 % em peso de fibras de juta às resinas epóxi e poliéster respectivamente, concluindo que, estas proporções aumentam a resistência tênsil em 76 e 127%. Todavia, estes resultados quando comparados com o reforço de fibra de vidro são inferiores. O estudo indica o emprego adequado para as fibras de juta em substituição à fibra de vidro em produtos onde não seja requerida alta resistência mecânica.

Carvalho *et. al.*, (2004), avaliaram as propriedades tênsis de compósitos de poliuretano reforçado por tecido de juta como uma função do teor de fibras e da rigidez da matriz. Os resultados indicam que o tecido de juta reforça efetivamente a matriz de poliuretano em investigação e foi atribuído aos tecidos de juta atuarem efetivamente como elemento reforçante para a matriz de poliuretano. Concluíram também que o teor de hidroxilas contido na formulação da matriz possui influência na resistência dos compósitos estudados.

Phani & Bose (1987), pesquisaram a degradação de fibras de juta e vidro em resinas de poliéster, concluindo que as fibras de juta conduzem a uma degradação do compósito e o seu tratamento com agentes acoplantes à base de silanos reduz essa degradação, e melhora as propriedades de resistência à flexão.

Fonseca *et. al.*, (2003), reportaram um estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal tratadas

quimicamente, e concluíram que a interface fibra/matriz é muito importante no comportamento da resistência ao impacto; o uso da resina modificada com grupos silanos promove uma interface fibra/matriz superior e melhora a resistência ao impacto; o tratamento químico melhora a molhabilidade mas, em compensação promove degradação parcial das fibras. Compósitos reforçados com fibras de sisal com teor de fibras de 7 e 10% v/v mostram valores similares da resistência ao impacto e que estes resultados indicam que para este percentual de reforço, a matriz e a interface são fatores dominantes.

Rabello *et al.* (1991), estudaram compósitos poliéster/sisal, fazendo tratamentos superficiais nas fibras com poliestireno, peróxido de benzoila, poli(álcool vinílico) e agente silano. Observaram neste trabalho, um discreto aumento nas propriedades mecânicas de tração e impacto com os tratamentos, e determinaram que esta melhora foi limitada pela adesão na interface matriz/fibra. Foram produzidas mantas com fibras de vidro e sisal picotadas e prensadas juntas, utilizadas na fabricação dos compósitos híbridos poliéster/sisal/fibra de vidro, nos quais as propriedades mecânicas sofreram melhoras significativas, o que foi atribuído à boa adesão entre a matriz e a fibra de vidro.

Nóbrega (2000) investigou o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster, reforçados por um tecido híbrido juta/vidro. O tecido híbrido era composto por 44% em peso de fibras de juta no urdume e 56% em peso de fibras de vidro na trama. As propriedades mecânicas foram determinadas em função do teor de fibras e da direção de solicitação do ensaio como também dos compósitos com 2,4 e 6 camadas de reforço híbrido disposto em seqüência de empilhamento de 0/90°. As propriedades de compósitos reforçados por um tecido tramado de fibras de vidro contendo 1 e 6 camadas de reforço também foram determinadas. De acordo com os resultados verificou-se que houve aumento nas propriedades mecânicas de todos os compósitos com o aumento do teor de reforço. Quando os testes foram realizados na direção das fibras de vidro, as propriedades apresentaram valores superiores àqueles verificados na direção das fibras de juta, o que foi atribuído às propriedades dos componentes individuais do tecido e ao fato das fibras de juta estarem dispostas em urdume. Os compósitos reforçados por tecidos híbridos com seqüência de empilhamento 0/90° apresentaram propriedades intermediárias às obtidas para compósitos equivalentes no sentido longitudinal às fibras de vidro.

Pavithran *et al.*, (1987; 1988), observaram experimentalmente em seus trabalhos, a correlação entre os comportamentos de resistência ao impacto *charppy* de compósitos de poliéster reforçados unidirecionalmente com fibras de sisal, abacaxi, banana e coco.

Concluíram que, a resistência é máxima para os compósitos reforçados com sisal, seguidos pelos de abacaxi, banana e coco, estando em parte de acordo com as propriedades de resistência à tração. Observaram também que existe uma relação linear entre a resistência ao impacto e a fração em volume de até 60% para os compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal.

Laranjeira (2004), concluiu que o teor e orientação das fibras tiveram uma influência considerável nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta. Para os compósitos testados na direção longitudinal às fibras, essas propriedades aumentaram significativamente com o teor de fibras, sendo muito superiores às dos testados com fibras dispostas transversalmente ao esforço e àqueles contendo fibras aleatórias.

Karmarker & Hinrichsen, (1991), estudaram a utilização de fibras de juta como reforço em termoplásticos, com o emprego de filmes de polietileno de alta e baixa densidade, polipropileno e de um copolímero de polietileno. Observaram que as fibras de juta podem ser utilizadas como reforço em termoplásticos com baixo ponto de fusão como o LDPE, HDPE, copolímero de polietileno e PP. As propriedades mecânicas obtidas mostraram que as fibras de juta podem ser utilizadas como alternativa para substituir as fibras sintéticas em algumas aplicações, tendo como principal desvantagem a sua alta capacidade de absorção de água.

Félix & Gatenholm (1991), relataram em seu trabalho, o estudo por espectroscopia, microscopia e resistência à tração, a natureza de adesão das fibras celulósicas tratadas com copolímero de polipropileno - anidrido maleico, como agente acoplante, quando incorporadas ao polipropileno. Observaram que a aderência é radicalmente melhorada em relação às fibras tratadas, julgando que a interação interfacial é formada por ligações covalentes ou de hidrogênio.

Mendes, (1992), pesquisou as propriedades de resistência à tração e ao impacto de compósitos poliéster/sisal e poliéster/vidro em um estudo comparativo. Concluiu que o processo de moldagem influi diretamente na composição e nas propriedades mecânicas dos compósitos. No ensaio de tração, verificou que as fibras de sisal quando dispostas aleatoriamente, diminuíram a resistência à tração, e que nos ensaios de impacto aumentaram a resistência. Sugeriu que estudos posteriores fossem realizados para minimizar a deficiência da interface fibra/matriz com fibras de sisal.

Joseph *et. al.*, (1993), pesquisaram as propriedades tênsis do polietileno de baixa densidade (LDPE), reforçado com fibra de sisal. Consideraram os efeitos do método de processamento, da concentração, comprimento e orientação das fibras sobre as propriedades

do compósito. As fibras foram misturadas ao polietileno empregando-se os métodos de mistura no estado fundido e mistura em solução. Os compósitos feitos a partir da mistura em solução apresentaram os melhores resultados para as propriedades tênses, o que foi atribuído à manutenção das características originais das fibras, ao passo que, durante o processo de mistura no estado fundido, as fibras são danificadas. As melhores propriedades tênses foram alcançadas com o comprimento de fibra entre 6 e 9 mm e os compósitos alinhados unidirecionalmente mostraram elevados valores no módulo e tensão ao longo do eixo das fibras.

Kishore *et. al.*, (1993), verificaram as propriedades de compressão em compósitos de resina epóxi com fibras unidirecionais de juta, vidro e uma combinação híbrida destas. Observaram que, ao sofrer tensão máxima, as fibras de juta tendem a se libertar da matriz polimérica revelando assim a sua fraca aderência.

Karmarker & Clemons, (1995), estudaram o efeito da absorção de água na interface e nas propriedades mecânicas e físicas do polipropileno reforçado com fibras celulósicas como : juta, e fibras lignocelulósicas obtidas através de jornais velhos reciclados. Os autores mostraram que a adesão entre as fases é fraca e que fendas entre as fibras lignocelulósicas e o polipropileno, causadas pela contração térmica diferencial dos componentes do sistema, podem ser preenchidas pelo aumento dimensional das fibras, quando elas são inchadas pela água. O preenchimento desses espaços provoca elevado cisalhamento entre a fibra e o polímero, aumentando as propriedades mecânicas dos compósitos. Em contrapartida, a grande absorção de água observada pelos compósitos PP/fibras lignocelulósicas causa um exagerado inchamento das fibras, levando à deterioração destas propriedades. O PP modificado com anidrido maleico, usado como agente de acoplamento, promoveu uma melhor ligação entre as fibras e o polipropileno, reduzindo a absorção de água e o inchamento das fibras.

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

TECIDO DE JUTA

A juta utilizada foi o tecido com classificação 2J, fornecido pela Cia Têxtil Castanhal, PA. Trata-se de um tecido empregado em sacaria, pela urdidura e trama de fios de 1,5 mm de diâmetro em média, malha relativamente estreita e peso teórico 340 g/m². Para a utilização como reforço nos compósitos os tecidos de juta foram cortados nas dimensões do molde e previamente secos em estufa a uma temperatura de 80 °C por 30 minutos para a eliminação da umidade superficial dos mesmos.

POLIÉSTER

Utilizou-se como matriz a resina de poliéster insaturado ortoftálico pré-acelerado, fabricada e fornecida pela RESANA S/A sob o código RESAPOL 10-116, possuindo as propriedades e características descritas pelo fabricante conforme a Tabela 4. Foi adicionado o catalisador (utilizou-se o peróxido de metil, etil cetona na proporção de 1% (V/V) MEK-P) para aceleração do processo de polimerização, fornecido pela VI FIBER LTDA, com o nome comercial de "SUPERBUTANOX". As características da resina utilizada estão explicitadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades e características da resina de poliéster ortoftálica

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Aparência visual	Levemente castanho
Viscosidade Brookfield, a 25°C (30 rpm, sp2)	250-350
Peso específico a 20°C g/cm ³	1,10
Índice de Acidez, mgKOH/g	30 máximo
Índice de Tixotropia	1,20-1,40
Tempo de Gel-Curva Exotérmica ⁽¹⁾	22-26 min.
Temperatura Máxima – Curva Exotérmica	130-150°C
Curva Exotérmica	40-50 minutos

⁽¹⁾ 100 g de Resina a 25°C. com 1% de peróxido de MEK (METIL ETIL CETONA)

Fonte: RESANA S/A

4.2 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Compósitos planos

O processo de moldagem dos compósitos foi desenvolvido pelo método de compressão em uma prensa hidráulica sob uma carga de 8 toneladas. Para a conformação das placas foi utilizado um molde de aço de 150x200x3mm (vide Figura 1, Anexo - A1) contendo “*venting holes*” para a expulsão do ar encapsulado. O molde foi previamente encerado com uma cera a base de carnaúba visando o desmolde da peça final. A resina foi distribuída no molde com o auxílio de um pincel e as fibras foram subsequentemente aplicadas de forma homogênea, intercaladas com camadas de resina. O molde foi fechado e sujeito a uma carga de oito toneladas. Após o período de 8 horas, as placas confeccionadas foram desmoldadas e estocadas à temperatura ambiente durante 48 horas para o corte dos corpos de prova.

O teor de fibras contido em todos os compósitos foi determinado por gravimetria, sendo confeccionadas placas com teores de 0%, 29 % e 34 % de fibras. Foi utilizado nos reforços o processo de pré-secagem das fibras resultando em compósitos com 29% em peso - CS. As condições de secagem: 30 minutos à 80°C.

A Figura 10 apresenta um compósito após a retirada do molde.



Figura 10 - Compósito laminado de poliéster/juta com quatro camadas para ensaio de resistência à tração, impacto e abrasão

A Figura 12 ilustra todo o procedimento da preparação dos compósitos planos,

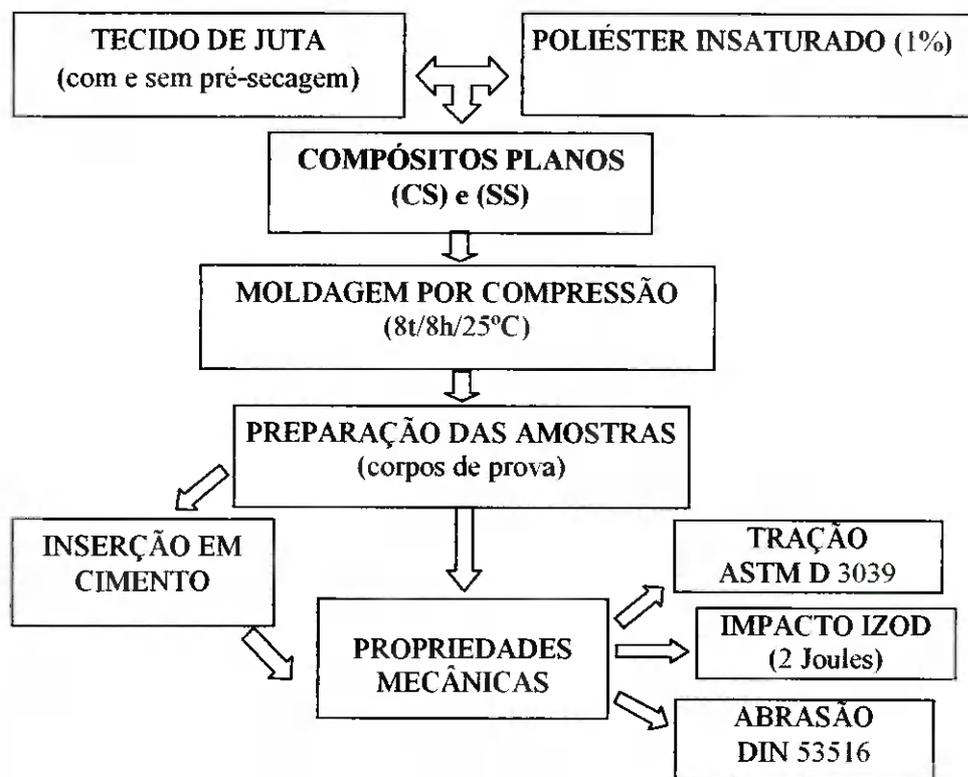


Figura 11 – Fluxograma da preparação e ensaios mecânicos dos compósitos planos

Compósitos tubulares

Foi projetado e confeccionado um molde em madeira, composto de duas partes iguais (as quais foram revestidas internamente com fórmica flexível) e como parte interna utilizou-se um tubo de PVC (o qual foi partido ao meio, para facilitar a desmoldagem). Quatro bases de madeira foram parafusadas ao tubo, conforme as Figuras 2 a 4 – Anexo A3, para evitar colapso das paredes do molde interno durante o enrolamento e a moldagem.

A Figura 12 ilustra o compósito tubular após a desmoldagem.



Figura 12 – Compósito tubular com quatro camadas de tecido de juta para ensaio de pressão hidrostática, resistência à compressão e ao impacto

Este procedimento permite a confecção de tubos com distintos teores de fibras. O tecido de juta, tal como recebido da indústria (i.e., sem secagem prévia) foi cortado na largura equivalente ao molde e com o comprimento necessário para produzir compósitos com duas, quatro e seis camadas de reforço. Compósitos com teores de fibra de 22, 29 e 31 % respectivamente foram obtidos. Os tecidos foram previamente pesados e enrolados ao redor da parte central do molde, sendo a seguir impregnados pela a resina. O molde então foi fechado e o sistema deixado curar à temperatura ambiente. Os compósitos tubulares foram desmoldados após o período de oito horas após a sua confecção. Em seguida, os corpos de prova foram preparados e ensaiados mecanicamente.

A Figura 13 ilustra todo o procedimento da preparação dos compostos tabulares.

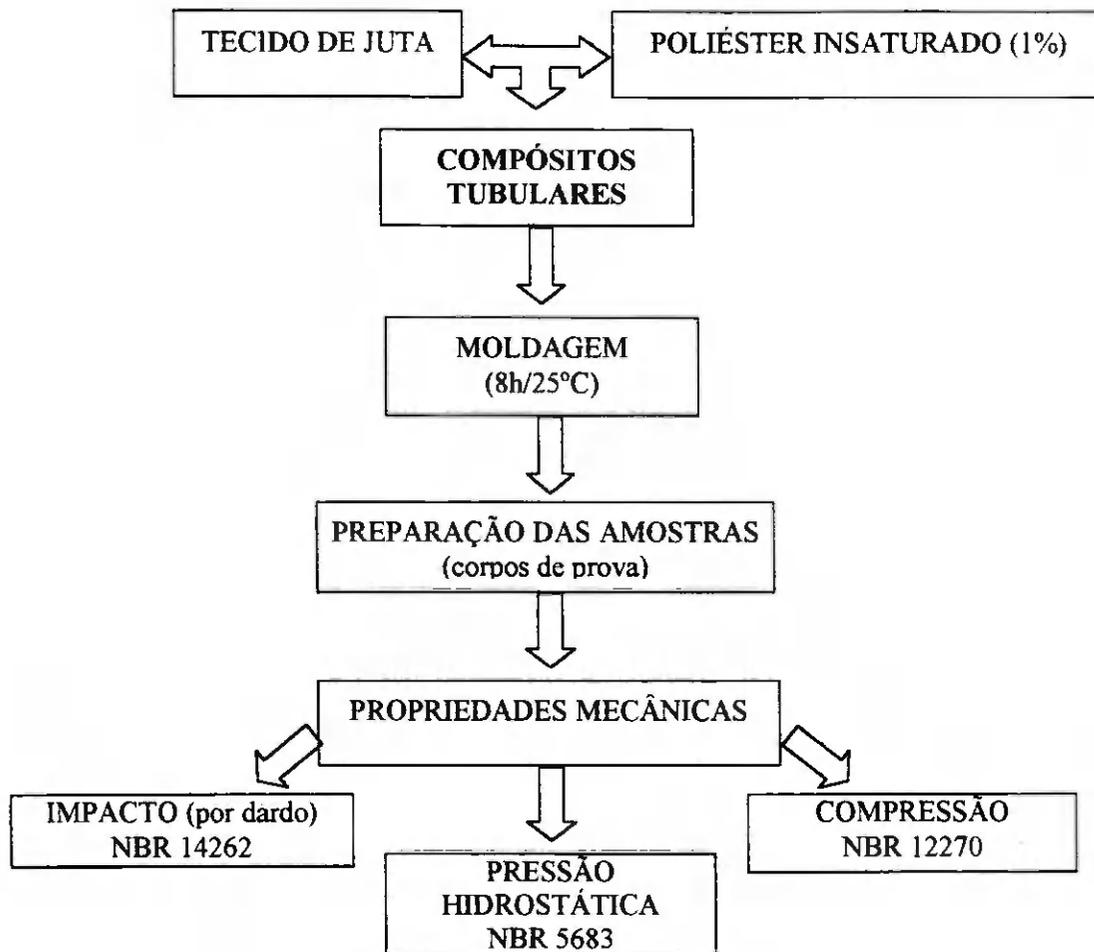


Figura 13 – Fluxograma da preparação e ensaios mecânicos dos compostos tubulares

4.3 TEOR DE FIBRAS

O teor de fibras foi determinado por gravimetria. O tecido de juta após ter sido cortado nas dimensões do molde, foi pesado antes e após o laminado ser produzido. O teor de fibras foi calculado como: peso entre o reforço e o laminado produzido.

$$T_f(\%) = \frac{P_{TJ}}{P_L} \times 100 \quad (11)$$

Onde,

T_f → é o teor de fibras,

P_{TJ} → é o peso em gramas do tecido de juta e o

P_L → é o peso do laminado (já que $P_L = \text{tecido} + \text{matriz}$).

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Compósitos planos e tubulares foram testados visando a determinação das suas resistências mecânicas. As propriedades mecânicas de um material definem a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados.

Para a determinação destas propriedades nos corpos de prova de compósitos planos, são aplicadas cargas sobre os corpos de prova, expressas em Kgf ou N, as quais resultam em uma distribuição interna de forças ou componentes de força que podem resultar em uma mudança na sua forma. A intensidade destas forças aplicadas é definida como tensão e corresponde à carga dividida pela secção transversal do corpo de prova, podendo ser expressa em Kgf/mm² ou MPa (CALLISTER JR, 1997; SHAKELFORD, 1995; GAY, 1991).

Os ensaios aplicados aos compósitos foram os de tração (ASTM 3039), impacto (ASTM D 256) e abrasão (DIN 53516), enquanto que os compósitos tubulares foram realizados os seguintes ensaios: pressão hidrostática (NBR 5683), resistência à compressão (NBR 12770) e impacto por queda de dardo (NBR 14262). A normatização dos corpos de prova é de suma importância, pois confere confiabilidade aos resultados, uma vez que os mesmos obedecem a formas e dimensões especificadas.

4.4.1 COMPÓSITOS PLANOS

Para estes compósitos foram avaliadas a influência da secagem dos tecidos de juta e do tempo de inserção dos corpos de prova em cimento em recipiente cheio de cimento Portland. Os corpos de prova foram introduzidos dentro do cimento, mantendo contato por 60 e 100 dias. As propriedades mecânicas em tração, impacto - Izod e abrasão foram determinadas. Os corpos de prova planos foram cortados manualmente com auxílio de uma serra e posteriormente lixados. Os resultados obtidos consistem na média aritmética de 5 determinações.

4.4.1.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio em tração foi realizado com base na norma ASTM 3039, em uma máquina de ensaios mecânicos de marca *Lloyd*, modelo LR 10K com velocidade de carregamento de 5 mm min⁻¹ e pré-tensão de 1 Kgf, tendo como objetivo a determinação da resistência máxima e o módulo de elasticidade em tração dos compósitos. A resistência de ruptura foi definida como sendo a tensão necessária para a fratura do corpo de prova.

A Figura 14 ilustra os corpos de prova que foram produzidos a partir dos compósitos planos de acordo com a Norma ASTM D 3039.

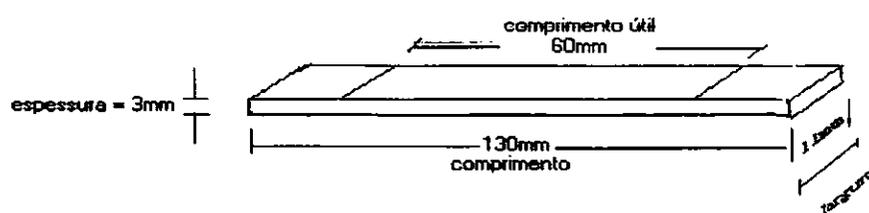


Figura 14 – Ilustração do corpo de prova segundo a norma ASTM D-3039

4.4.1.2 RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD

O impacto em um determinado material representa um esforço de natureza dinâmica, onde a carga é aplicada no corpo de prova repentina e bruscamente. Os testes de resistência ao impacto são testes realizados em alta velocidade, em que a quantidade de energia absorvida por uma amostra é medida, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido (HAZIM, 1984). Neste trabalho utilizou-se o ensaio Izod, método E sem entalhe, ensaiado em um aparelho de impacto Resil modelo 5,5, com martelo de 2 J e temperatura teste de 22 °C, conforme a norma ASTM D 256. A Figura 15 apresenta a ilustração do corpo de prova utilizado neste ensaio.

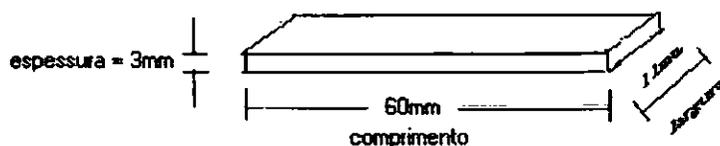


Figura 15 – Ilustração do corpo de prova segundo a norma D-256

4.4.1.3 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à abrasão foram preparados manualmente a partir dos laminados planos descritos anteriormente no item 4.2. (preparação dos compósitos planos) que foram cortados e lixados até atingirem a forma como é mostrado na Figura 16(a). Os corpos de prova têm forma circular com diâmetro de $(16 \pm 0,2 \text{ mm})$ e espessura de no mínimo 6mm. Como a espessura dos compósitos planos confeccionados é de 3mm, colaram-se duas partes do compósito para atender a norma, como se observa na Figura 16 (b).

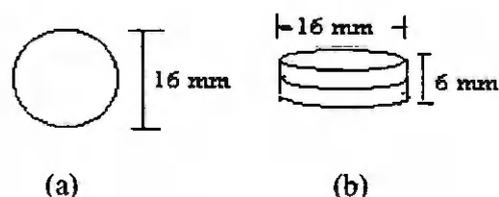


Figura 16 – (a) Corpo-de-prova para ensaio de resistência à abrasão
(b) Corpo-de-prova colado em duas partes

O método de ensaio é segundo a norma DIN 53516 (1987). Este ensaio consiste na perda de volume com um índice de ataque definido (teórico) só por uma pressão determinada. O índice de ataque do papel esmeril de teste deve ser avaliado recorrendo-se ao valor médio dos índices de ataque antes e após a série de ensaios, onde é feita a medida da densidade dos corpos de prova conforme a norma DIN 53 479, sendo a seguir realizados os cálculos da resistência à abrasão dos compósitos (vide anexo A2).

4.4.2 COMPÓSITOS TUBULARES

A partir do molde apresentado no Anexo A3 – Figuras 2 a 4, foram preparados compósitos tubulares (Figura 12) que foram submetidos à ensaios de resistência à pressão hidrostática e resistência ao impacto por queda de dardos. A opção por este comprimento e diâmetro ocorreu devido à adequação da aparelhagem do teste de impacto e de pressão

hidrostática das empresas onde foram realizados os ensaios. Já para o ensaio de resistência à compressão os corpos de prova foram cortados nas dimensões exigidas pela norma utilizada (ver Figuras 7 a 9).

4.4.2.1 RESISTÊNCIA À PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Corpos de prova tubulares para ensaios de resistência à pressão hidrostática foram confeccionados a partir dos tubos produzidos, conforme e descritos no item 4.2. (preparação dos compósitos tubulares) e ilustrados na Figura 12. Os compósitos tubulares foram ensaiados segundo a NBR 5683 da ABNT (1999) para tubos de PVC conforme apresentado no Anexo A4. Foram submetidos a ensaio de pressão hidrostática, utilizando gás nitrogênio, para garantir a distribuição uniforme da pressão na parede. De acordo com a NBR 5683 (1999), calculou-se a pressão hidrostática a ser aplicada no corpo de prova, a qual correspondeu à pressão horizontal máxima atuante nas paredes de silos, destinados ao armazenamento de cimento, dimensionados com relação altura/diâmetro iguais a 1,5; 2,5 e 3,0, respectivamente, para os seguintes diâmetros dois e três metros, conforme Tabelas (C1 e C2 - Anexo C). Na Figura 5 = Anexo A4, é ilustrado o esquema simplificado da aparelhagem para teste de pressão hidrostática.

Segundo Ravenet (1977), os primeiros grandes silos para armazenamento de cereais foram construídos em concreto armado e pressões hidrostáticas foram aplicadas, como sendo:

$$P = h\gamma \quad (12)$$

Onde: P → Pressão lateral ou vertical em kg/m^2 ;

h → Altura desde a borda superior à seção considerada, em m;

γ → Peso específico do material armazenado, em kg/m^3 .

Aplicando-se pressões hidrostáticas, as densidades da parede eram bastante elevadas; por outro lado, esta teoria não considera os esforços de atrito que aparece nas paredes e que a teoria hidrostática não prevê. Seguindo esta teoria, a pressão sob um ponto é constante e independente da direção.

4.4.2.2 RESISTÊNCIA AO IMPACTO POR QUEDA DE DARDO

O ensaio foi realizado com corpos de prova a partir dos compósitos tubulares, seguindo a NBR 14262 (1999), com três camadas de reforço atingindo uma espessura de aproximadamente três milímetros, conforme descritos no item 4.2. (preparação dos compósitos tubulares) e ilustrados na Figura 12.

A Tabela 5 reporta dados que são utilizados neste tipo de ensaio tendo sido adotados o DN 75 mm e PN 0,4 MPa, em virtude dos diâmetro do corpo de prova ser adequado aos pesos de 500, 1000, 1500 e 2000 gramas), seguindo a norma ABNT- NBR 14312 (1999) para tubos de PVC.

Tabela 5 – Dados utilizados nos testes de resistência ao impacto

DN (mm)	PN (MPa)	Nº de impactos	Peso do pereussor (kg)
50	0,4	3	1,5
75	0,4	4	2,0
100	0,4	6	3,0

4.4.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Corpos de prova tubulares para ensaios de resistência à compressão foram obtidos a partir dos tubos produzidos como descritos no item 4.2. (preparação dos compósitos tubulares) e ilustrados na Figura 12, Para a realização deste ensaio nos compósitos investigados, a norma exige $L/D = 3$ e, como o D externo dos tubos variam com o teor de fibras, estes foram cortados no comprimento necessário à manutenção desta relação L/D . As figuras constantes no Anexo A6 sob números 7, a 9 representam os corpos de prova para os teores de fibra de 22, 29 e 31 % respectivamente

O ensaio foi realizado seguindo a norma NBR 12770 (1992) na máquina para teste de compressão FARNELL, operando a uma velocidade de carregamento 1,27 mm/ min, em corpos de prova tubulares (com duas, quatro e seis camadas de reforço). Os resultados obtidos foram tratados em um sistema de aquisição de dados da Linx – ADS 2000 (Figura 17), o qual possui um conversor A/D e utilizou-se software AqDados, para aquisição de sinais

permitindo o armazenamento. Para efetuar este ensaio os corpos de prova foram utilizados de acordo com o item 4.2.1. (compósitos tubulares sem pré-secagem). Utilizaram-se três séries de compósitos tubulares com teores de fibras de tecido de juta, variados para cada número de camadas (22,33%, 30,58% e 31,70% em peso), atingindo espessuras respectivas de três, quatro e seis milímetros.



Figura 17 – Sistema de aquisição de dados

O procedimento de obtenção dos resultados da medição da resistência à compressão está apresentado no Anexo - A6. Onde se mediu a deformação, através do extensômetro colado ao corpo de prova (Figura 10 – Anexo A6) e a força pela célula de carga (Figura 11 – Anexo A6).

4.3 ESFORÇO DE TRAÇÃO NA PAREDE DO SILO

Para se calcular o esforço de tração, precisa-se inicialmente calcular as pressões exercidas nas paredes do silo, as quais foram calculadas seguindo a Norma DIN 1055 (1987), pelas fórmulas (de 02 a 08), obtendo-se os resultados, destas pressões, que estão dispostos nas Tabelas C1 e C2 (Anexo C). Para chegar as essas tensões foi necessário à simulação de dados, adotando-se diâmetros e alturas para projeto de silo de fundo plano, construído com os compósitos em estudo, e como tivesse armazenando eimento (Anexo C).

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS SOB TRAÇÃO EM COMPÓSITOS PLANOS

5.1.1 EFEITO DA INCLUSÃO E PRÉ-SECAGEM DAS FIBRAS

Na Figura 18 observa-se que a resistência à tração dos compósitos é inferior à da matriz e que a secagem prévia dos tecidos levou à obtenção de compósitos mais resistentes e com menor teor de fibras. Ambos os compósitos possuíam quatro camadas de reforço, mas o teor de fibras foi de aproximadamente 34 e 29 % respectivamente para aqueles confeccionados com tecido como recebido e previamente seco. Observa-se que este decréscimo está dentro do erro experimental.

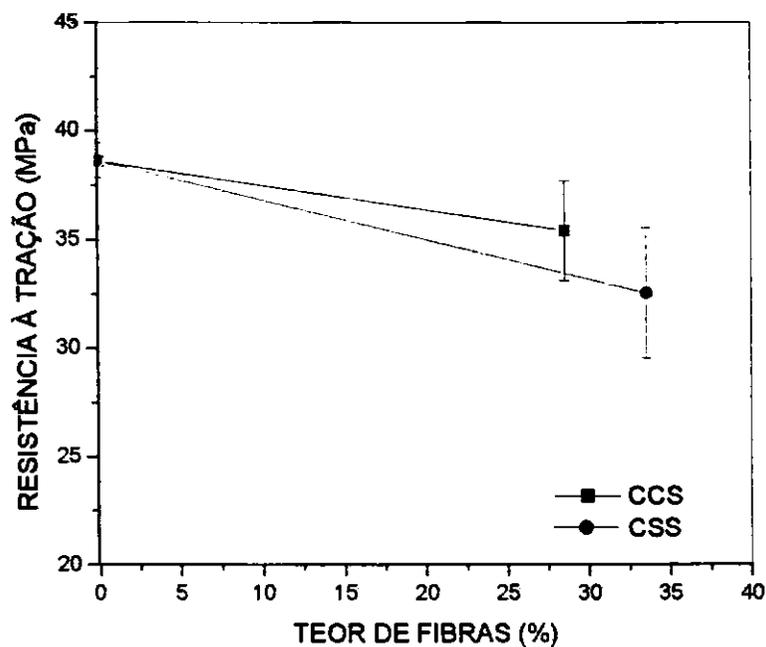


Figura 18 – Resistência à tração dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem pré-secagem)

Os comportamentos observados eram esperados já que a juta é higroscópica e, portanto, reduz seu peso durante a secagem. O fato da resistência à tração dos compósitos ser inferior à da matriz é associada à disposição e orientação das fibras que estão na forma de tecido tramado, trama simples, de modo que 50 % das fibras estão alinhadas na direção do esforço e 50 % ortogonalmente ao esforço.

Cavalcanti (2000) estudou um compósito similar (poliéster/tecido de juta) e observou que, ao incorporar este tecido com baixos teores de fibras (em torno de 30% em peso) na matriz (poliéster) os resultados da resistência à tração foram inferiores aos da matriz (poliéster). E que somente com teor de fibras na faixa de 51% em peso, houve um aumento de 56% da resistência à tração em relação a matriz. Mesmo apresentando teores de fibras menores, os compósitos reforçados por tecidos pré-secos evidenciaram resistência à tração superior ao tecido sem a secagem, o que indica que quando se faz a pré-secagem a umidade diminui melhorando significativamente a interação fibra/matriz.

Joseph & Carvalho (1999) relataram comportamento análogo em polímeros reforçados por tecidos híbridos algodão-juta e algodão-sisal. Concluíram que quando se utiliza tecido tramado como reforço, as fibras alinhadas ortogonalmente ao esforço agem como inclusões ou defeitos. A baixos teores de fibras, este efeito sobrepuja o efeito reforçante das fibras quando solicitadas na direção longitudinal e o resultado é um decréscimo na tensão de tração do compósito. Com elevados teores de fibra, as propriedades dos compósitos passam a serem dominadas pelas fibras sendo solicitadas na direção longitudinal e o tecido passa a atuar como elemento de reforço.

Observa-se na Figura 19 o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do compósito com a inclusão das fibras (quatro camadas de tecido de juta com e sem pré-secagem/teor de fibras de 28,52% e 33,69%), houve um aumento significativo em relação ao poliéster (matriz), evidenciando assim que a adição destas fibras eleva a rigidez dos compósitos.

Estes resultados eram esperados já que o módulo de elasticidade aumenta com o teor de fibras e, em menor grau, com a qualidade de interface fibra /matriz (D'ALMEIDA, 1987; ARRUDA, 1994; CAVALCANTI, 2000; CAVALCANTE, 2001).

Tal como observado para a resistência à tração, a pré-secagem da fibra levou a um aumento na propriedade investigada, apesar da redução no teor total de fibras, o que é atribuído a uma melhor interação fibra /matriz.

Segundo Cavalcanti (2000), com o aumento de teor de fibras, o módulo de

elasticidade (Young) em tração dos compósitos (poliéster/ tecido de juta) aumenta. Este fato é consequência de aumento da rigidez do compósito e está associado à rigidez e teor do reforço. Observou-se experimentalmente que com a adição das fibras o módulo de elasticidade aumentou, o que era esperado. A inclusão das fibras torna o compósito mais rígido e menos deformável, ou seja, mais frágil. O aumento observado, no entanto, não foi tão elevado quanto o esperado, o que pode ser atribuído a má adesão fibra/matriz causada por defeitos de moldagem ocasionados por: umidade residual das fibras; dificuldades de impregnação provocadas pela superposição dos fios e tecidos e/ou formação de vazios. A adesão entre os componentes de um compósito tem importância primordial para que o reforço possa exercer sua função de forma efetiva e os esforços aplicados, divididos entre as duas fases (RICHARDSON, 1977).

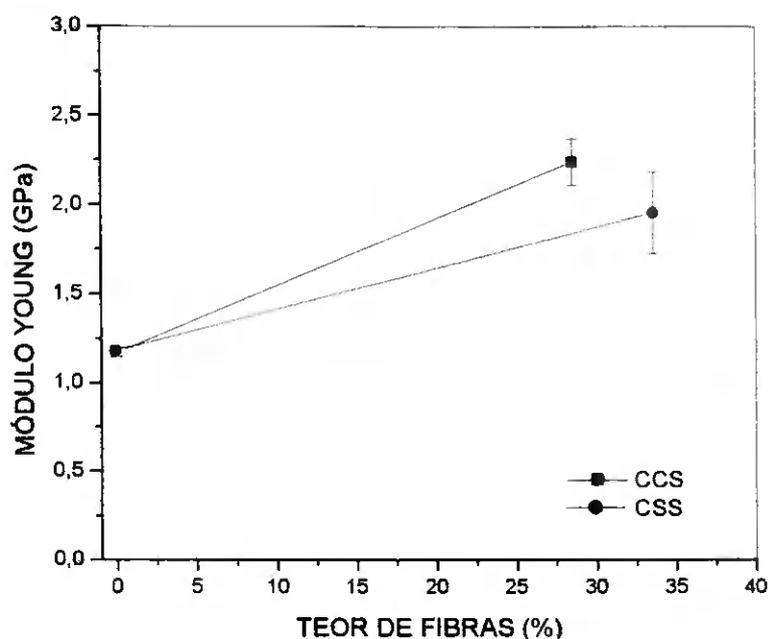


Figura 19 - Módulo de Young dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem pré-secagem)

Como se observa na Figura 20, a incorporação do tecido de juta à matriz reduziu a deformação na ruptura que variou de 34% a 44,6% em função do teor de fibras. A secagem prévia do tecido levou a uma redução na deformação do compósito que permaneceu inferior à da matriz (poliéster). Atribui-se este fato à maior rigidez da fibra em relação a matriz. Conseqüentemente, a rigidez do compósito é também elevada.

Entre os dois compósitos estudados (CS e SS), observa-se melhor aderência quanto ao tecido de juta com secagem prévia, portanto menor deformação. Comportamento análogo para compósito igual ao investigado nesta pesquisa foi reportado por Batista (1995), e que, quando se aumenta o teor de fibras, duplicando-se a quantidade de camadas, a quantidade de fios não alinhados ao esforço também duplica. O que pode explicar a queda na deformação para o teor de fibras em 28,52% e 33,69%.

Estudos evidenciaram que a pré-secagem do tecido de juta é de fundamental importância na produção de compósitos reforçados por fibras vegetais de qualidade e com propriedades mecânicas otimizadas (PAL, 1984 e BATISTA, 1997).

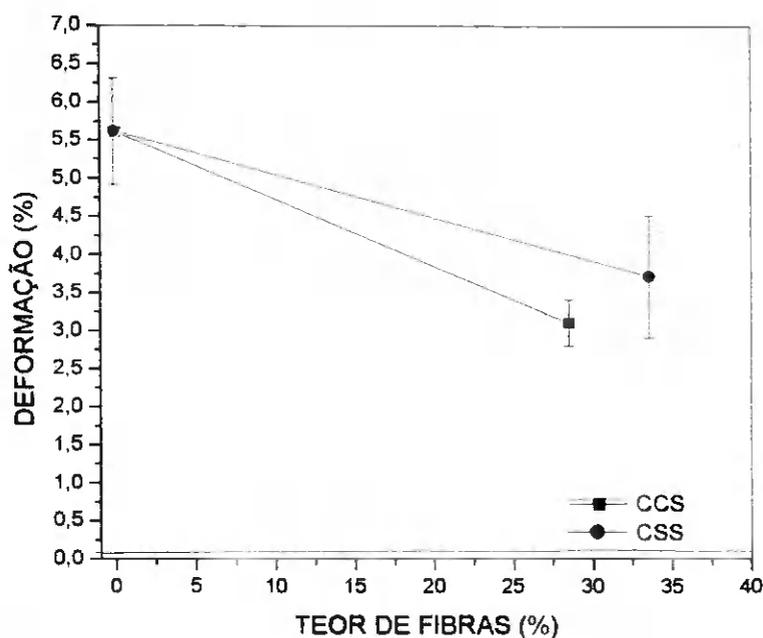


Figura 20 - Deformação dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem pré-secagem)

5.1.2 EFEITO DE INSERÇÃO EM CIMENTO DOS COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA) POR 60 E 100 DIAS

Na Figura 21 são ilustrados os efeitos de inserção em cimento na resistência à tração da matriz e dos compósitos (poliéster/tecido de juta). Os resultados indicam que tanto a matriz quanto os compósitos, sofreram uma leve redução de aproximadamente 10 a 15% em sua resistência após 100 dias inseridos no cimento. A redução mais acentuada da resistência dos

compósitos com tecidos pré-secos é atribuída à inexistência de uma camada de água adsorvida, capaz de retardar o ataque do cimento às fibras de reforço (JOSEPH *et. al.*, 1999).

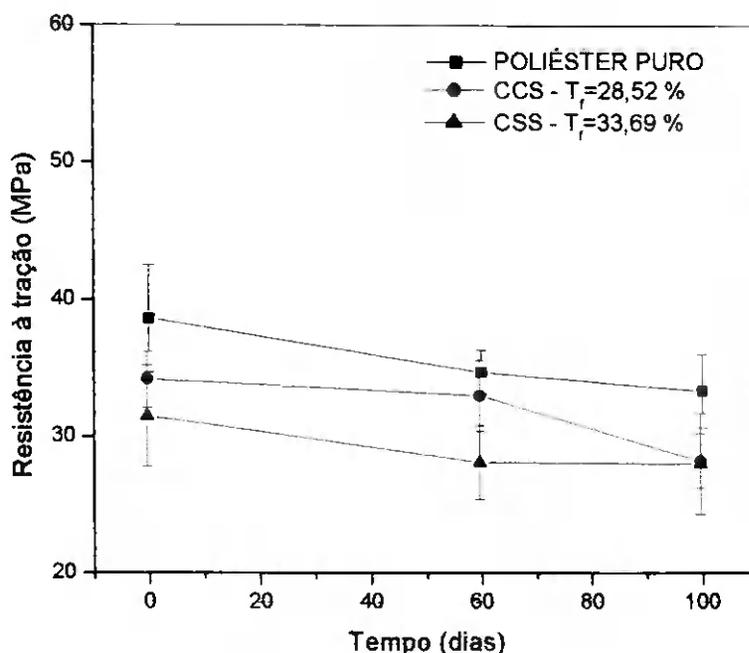


Figura 21 – Resistência à tração dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias

Observa-se na Figura 22, a redução no módulo de Young tanto dos compósitos quanto da matriz após inserção no cimento e que esta redução é mais acentuada para os compósitos. O que indica que ambas – matriz e fibras - são atacadas pelo cimento e que houve pouco ou nenhum efeito de secagem das fibras na taxa de redução do módulo por inserção em cimento. Estes dados indicam que, apesar do ataque químico, a redução nas propriedades mecânicas dos compósitos e da matriz é lenta e pequena o suficiente para permitir o uso deste compósito para aplicação em silos para armazenagem de produto agressivo (cimento).

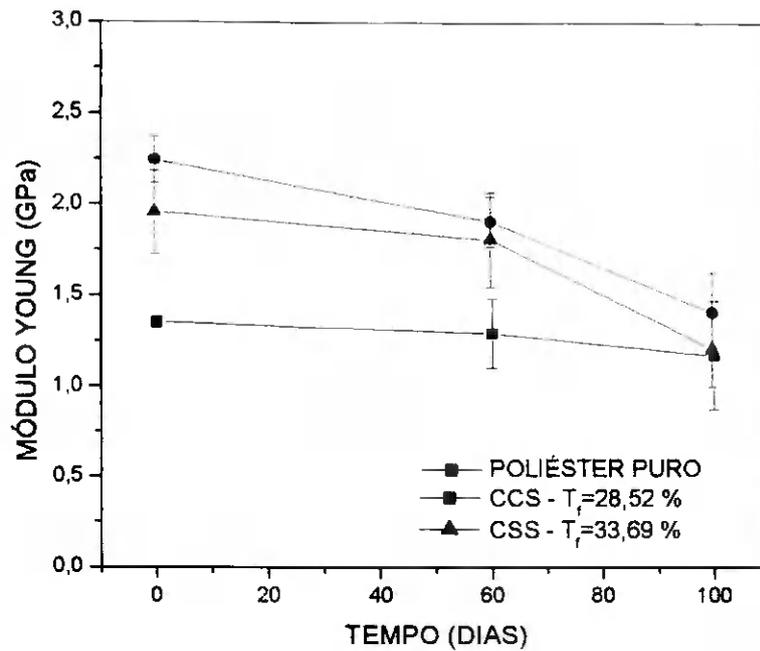


Figura 22 – Módulo de Young dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias

A Figura 23 ilustra o efeito de inserção em cimento no alongamento na ruptura da matriz e dos compósitos. Ao contrário do observado para o módulo e resistência houve um aumento na deformação na ruptura com o tempo de inserção no cimento. Atribui-se este comportamento à degradação da matriz e das fibras com conseqüente redução do entrecruzamento e de massa molar, o que leva uma redução na rigidez e aumento na flexibilidade da matriz e dos compósitos.

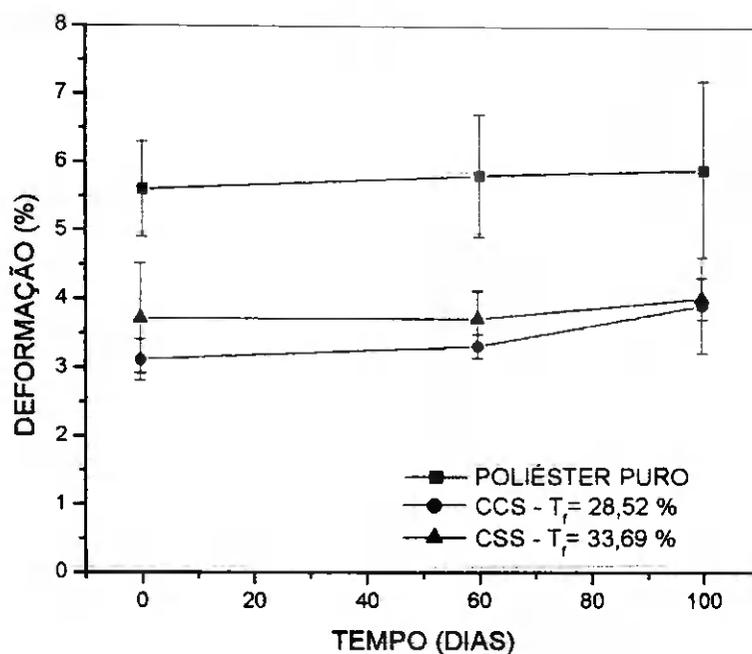


Figura 23- Deformação dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias

5.2 ESFORÇO DE TRAÇÃO NAS PAREDES DO SILO

O efeito da força de tração é proveniente das pressões horizontais obtidas através do carregamento e descarregamento do produto nas paredes do silo. Daí a importância de se calcular as pressões antes de qualquer projeto de para determinar o material e as dimensões de silos.

As pressões atuantes nas paredes dos silos foram obtidas segundo recomendação da norma DIN 1055 (1987). Estas pressões foram calculadas, a partir dos dados de resistência, módulo e deformação dos compósitos planos, para silos com dois e três metros de diâmetro e três, seis e nove metros de altura. Como se observa na Figura 24, a cada profundidade haverá uma pressão horizontal que atuará na parede e por sua vez, provocará esforço de tração circunferencial, sendo máximo na base do silo.

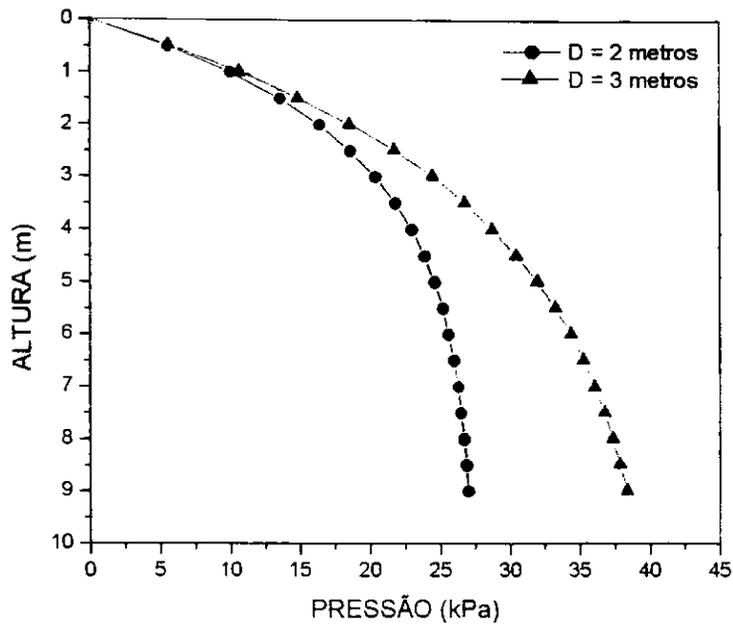


Figura 24 – Pressão atuante na parede do silo para D = 2 m e D = 3 m

Esta tração é provocada pela força de atrito (Figura 25) nas paredes durante o armazenamento do produto no silo. Teoricamente, simularam-se dados (ver anexo C) e de acordo com estes, calculou-se a tensão de tração (Tabela C4 - Anexo C). Estes cálculos foram feitos baseados nas três espessuras do compósito tubular (poliéster/tecido de juta) de 3mm; 4mm; e 6mm e os dois diâmetros hipotéticos e as alturas preditas. Observou-se que a tensão de tração diminuiu à medida que aumentou a espessura, conforme Figuras 26 e 27.

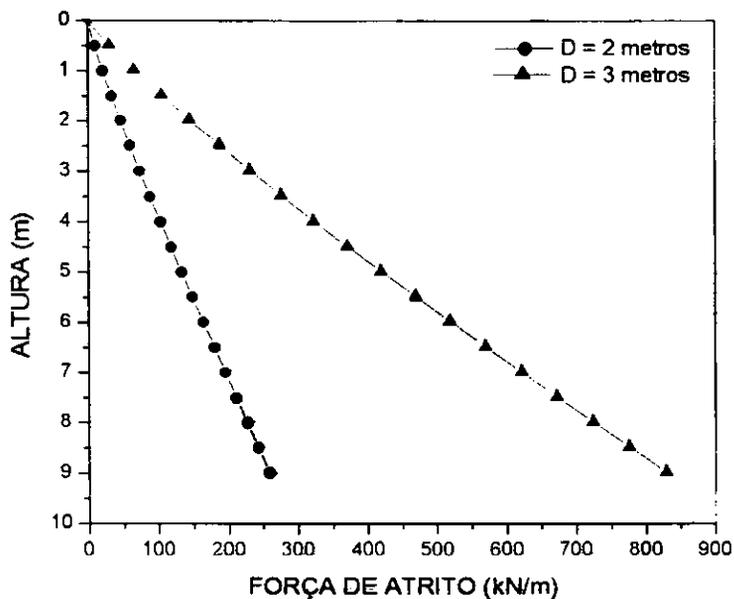


Figura 25 – Força de atrito sobre as paredes do silo para D = 2 m e D = 3 m

Quanto ao valor teórico da tensão de tração em relação à altura e ao diâmetro, revelou-se com aumento insignificante.

De acordo com o ensaio de tensão de tração, verificou-se que o compósito (poliéster/tecido de juta) atingiu a tensão de tração máxima de 35,4 MPa para o compósito (CS) e de 32,5 MPa para o compósito (SS). Para efeito comparativo com os dados teóricos, utilizam-se apenas os dados da tensão de tração com espessura de 3 mm, já que o ensaio foi feito com os compósitos laminados com tal espessura. Comparando os dados da tensão de tração experimentais (CS e SS) com os dados teóricos calculados para silos de dois e três diâmetros com três, seis e nove metros de altura, observa-se que os valores experimentais atingidos são bem superiores aos valores da tensão de tração calculadas para o diâmetro máximo e a altura máxima é de 19,23 MPa. Permitindo assim, a utilização deste compósito (poliéster/ tecido de juta) para construção de silos cilíndricos verticais.

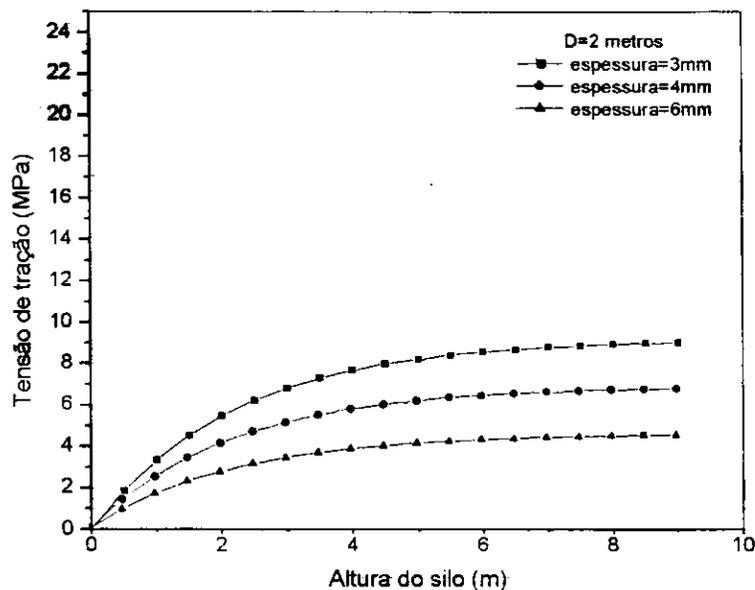


Figura 26 - Tensão de tração no silo com H = 3; 6 e 9m e D =2m (e =3; 4 e 6 mm)

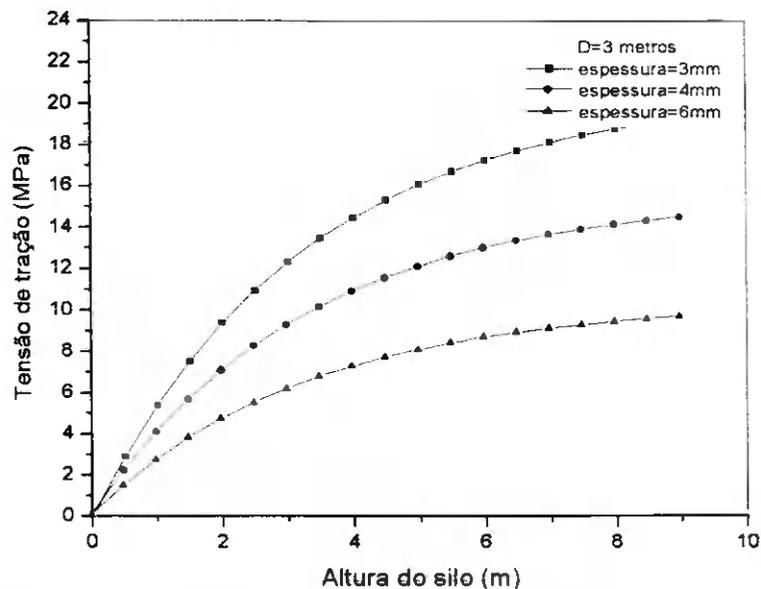


Figura 27 - Tensão de tração no silo com H = 3; 6 e 9m e D = 3m (e = 3; 4 e 6 mm)

5.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO (IZOD) NOS COMPÓSITOS PLANOS

5.3.1 EFEITO DA INCLUSÃO DAS FIBRAS

Observa-se na Figura 28, que a resistência ao impacto dos compósitos é bem superior à da matriz e que a secagem do tecido gera um material menos resistente ao impacto do que a dos compósitos reforçados por tecidos não secos. Aumentos na resistência ao impacto de 44 e 63 % em relação à matriz foram obtidos para compósitos contendo quatro camadas de tecidos secos e não secos. A incorporação da fibra, geralmente, conduz a melhor resistência ao impacto com uma tendência a retardar ou a desviar a propagação da frente de fratura no compósito (BATISTA, 1995). A redução na resistência ao impacto é atribuída tanto à maior adesão fibra/matriz interfacial quanto à redução do reforço no compósito (LARANJEIRA; CAVALCANTI, 2002).

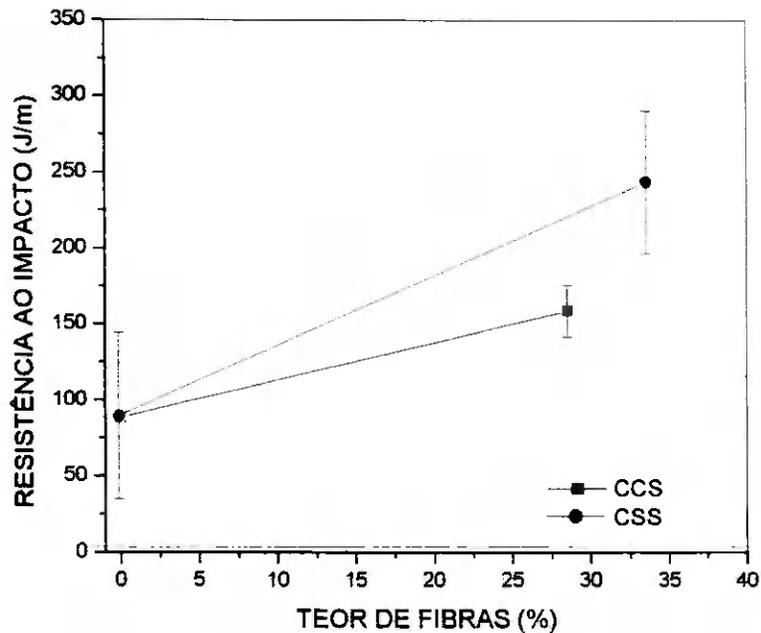


Figura 28 - Resistência ao impacto dos compósitos com quatro camadas de reforço (com e sem pré-secagem)

5.3.2 EFEITO DA INSERÇÃO DOS COMPÓSITOS (POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA) POR 60 E 100 DIAS

O efeito do tempo de inserção em cimento na resistência ao impacto da matriz e dos compósitos é ilustrado na Figura 29. Nota-se que, em todos os casos, houve redução desta propriedade com o tempo de inserção e que esta foi bem mais intensa para os compósitos aonde reduções de até 55 % chegaram a ser obtidas.

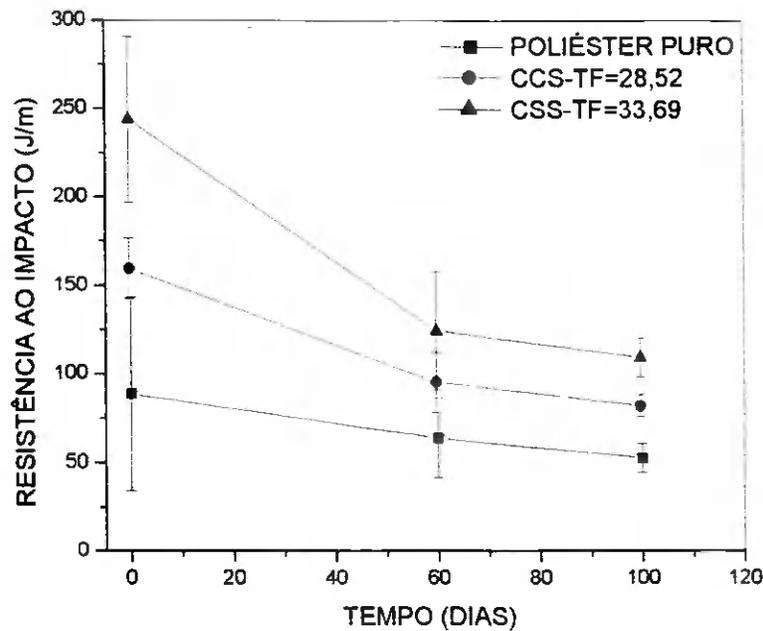


Figura 29– Resistência ao impacto dos compósitos após serem inseridos no cimento por 60 e 100 dias (com e sem pré-secagem)

Resultados compatíveis com os observados para as propriedades em tração. A queda da resistência ao impacto foi mais acentuada nos primeiros 60 dias. Observa-se uma tendência à estabilização desta propriedade em tempos longos de inserção no cimento.

Os dados revelam que a resistência ao impacto dos compósitos (SS) é superior aos compósitos (CS). São consistentes com os observados para o efeito da inserção no cimento no módulo e deformação dos compósitos e indicam que os compósitos (SS) apresentam maior capacidade de dissipação de energia, por apresentarem mais umidade, provocando assim a degradação.

5.3.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO POR QUEDA DE DARDO NOS COMPÓSITOS TUBULARES

Os resultados obtidos com este ensaio são ilustrados nas Figuras 30, a 33. Podendo ser observado o comportamento para cada peso utilizado neste teste. Verificou-se que com o peso de 500 e 1000gramas, o compósito não foi perfurado (sendo atingido superficialmente). Com o teste de 1500 gramas danificou o compósito perfurando após o quarto impacto (Figura 32) e com 2000 gramas, houve a perfuração no primeiro impacto como se vê na Figura 33.



Figura 30 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 500 gramas



Figura 31 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 1000g



Figura 32- Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 1500 gramas



Figura 33 - Compósito tubular após ensaio de resistência ao impacto com peso de 2000 gramas

Para os compósitos ensaiados com 0,5; 1 e 1,5 quilogramas, o número de impactos foi conforme a Tabela 5 e resultou a danificação superficial em 0,5 e 1 kg, com o número de impactos previstos. Já no caso do compósito com o percussor de 1,5 kg ficou perfurado (três impactos) em menos proporção que o de 2 quilogramas que perfurou no primeiro impacto. Mesmo atingindo esta perfuração, os silos podem ser construídos com este compósito, devido a facilidade de processamento. Pois, caso ocorra acidente de tamanho dano, o conserto pode ser feito no próprio local que se encontra estabelecido o silo.

Os resultados indicam que a resistência ao impacto dos compósitos tubulares é superior a de tubos PVC utilizados para esgoto e é considerado adequado para as aplicações previstas.

5.3.4 RESISTÊNCIA À PRESSÃO HIDROSTÁTICA

O valor máximo da pressão hidrostática de ruptura dos corpos de prova foi de 1,8 MPa, que submeteu à parede a tensão de tração (tensão circunferencial) de 22,5 MPa, enquanto a tensão de tração máxima atuante nas paredes de silos cilíndricos com altura de três, seis e nove metros e diâmetros de dois e três metros (Tabela C4 – Anexo C) é de 19,23 MPa. Portanto, o compósito (poliéster/ tecido de juta) com três milímetros de espessura é adequado para construção de silos cilíndricos com relação $H/D = 3$ e diâmetro de três metros, para estocagem de cimento.

Indica-se na Figura 34 a forma de ruptura do compósito tubular (poliéster/tecido de juta) durante os ensaios de pressão hidrostática. Observa-se ainda, que a fissuração ocorreu na emenda do molde interno, o que possivelmente em outra maneira de confecção ou de moldagem, poderia aumentar a resistência à tração do tubo.

Como existem produtos sólidos agressivos aos metais, logo o compósito (poliéster/tecido de juta) apresenta-se como uma alternativa para construção de silos para armazenamento destes produtos.



Figura 34 - Compósito tubular após ensaio de pressão hidrostática

5.3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Neste ensaio pode-se determinar através do diagrama tensão x deformação, algumas propriedades importantes como, por exemplo: o módulo de elasticidade. (sabendo-se que este diagrama varia de material para material). Os resultados obtidos neste ensaio são ilustrados na Tabela 6 os quais surpreenderam quando o compósito com um número maior de camadas de fibras, obteve menor resistência à compressão. Supõe-se que este fato ocorra devido à confecção dos compósitos tubulares, pois o molde foi projetado para produzir compósitos com quatro camadas de fibras.

Tabela 6 - Ensaio de resistência à compressão no compósito tubular (P/TJ)

Camadas de fibras	E (GPa)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação (%)
3	2,5	17,93	25	1,4
4	2,7	19,35	24,5	1,09
6	2,0	14,30	11,5	0,7

Observa-se na Figura 35, que a tensão de ruptura no compósito tubular (poliéster/tecido de juta) com $T_f=22,33\%$ foi a mais elevada e conseqüentemente tolerou uma deformação maior ($\epsilon = 1,4\%$).

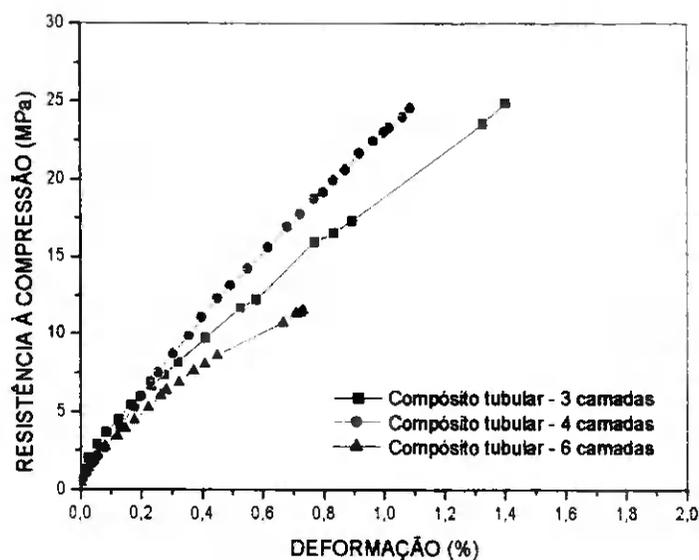


Figura 35 – Resistência à compressão dos compósitos tubulares

Nos materiais frágeis, a deformação até a ruptura é menor do que nos materiais rígidos, ou seja, para uma mesma tensão os materiais frágeis rompem antes que os dúcteis.

Observa-se que o compósito com teor de fibras de 28,70%, obteve o melhor comportamento atingindo módulo de elasticidade mais elevado e também maior tensão de ruptura.

O mesmo comportamento foi observado na tensão de ruptura à compressão, evidencia-se a tendência de decréscimo em função do aumento do teor de fibras. Segundo Toledo Filho (1997), a adição de fibras naturais no concreto reduz sua resistência à compressão em cerca de 10% a 30% dependendo do tipo, comprimento e fração volumétrica da fibra. De acordo com Barbosa (2002), em ensaios realizados com Bambu (*Bambusa Vulgaris*) verificou-se que a resistência de ruptura à compressão atingiu resultados de 35 a 50 MPa), concluindo porém que valores da resistência à compressão máxima dos compósitos em estudo (Tabela. B8 – Anexo B) são favoráveis já que a espessura do bambu é bem superior a dos compósitos tubulares.

As curvas de força de atrito do produto armazenado (cimento) sobre as paredes dos silos são apresentadas na Figura 25 (calculadas de acordo com as Eqs. 09 e 10). Segundo Ravenet (1992), em silos com relação $H/D \leq 3$, não é necessário colocar colunas internas para absorver as forças de atrito. O autor quer dizer que para a relação citada a parede do silo deve ter capacidade de absorver tais forças, sem causar ruptura ou flambagem local.

Os dados da tensão de compressão teórica e experimental são apresentados pela Tabela C5 – Anexo C. Verificou-se que a tensão admissível foi superior à tensão atuante para silos, ou seja, $\sigma_{adm} > \sigma_{at}$ com $H = 3$ m e $D = 2$ m e espessura igual a 3 mm; para esta mesma altura com $D = 3$ m a $\sigma_{adm} < \sigma_{at}$ em todas as espessuras ($e = 3; 4$ e 6 mm) simuladas para silos. Já para $H = 6$ m e 9 m, $\sigma_{adm} > \sigma_{at}$. E com estes resultados, segundo Baêta e Sartor (1999), pode-se afirmar que onde a $\sigma_{adm} < \sigma_{at}$, não atende a flambagem e nem a compressão do material. E quando isso ocorre deve-se redimensionar a área do silo. A Figura 36 ilustra os resultados da tensão de compressão teórica e experimental. Dados teóricos foram comparados aos experimentais observando o efeito do teor de fibras no compósito, e conclui-se que silos para ser construídos com este compósito polimérico, devem ter altura máxima de seis metros e diâmetros de dois e três metros.

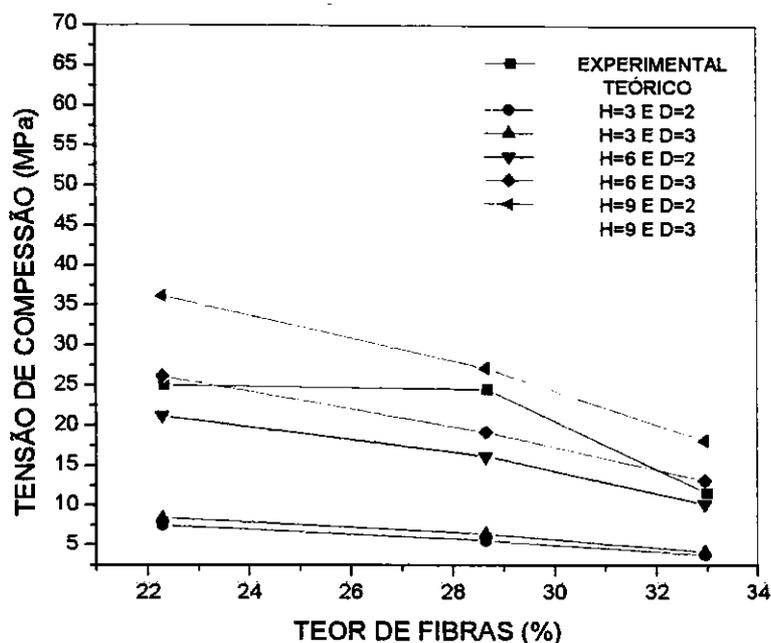


Figura 36 –Dados teóricos da resistência à compressão do silo

5.3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Observa-se na Figura 37 que não houve praticamente alteração nos resultados das amostras entre si, ou seja, não houve variação significativa nos resultados quando as amostras foram submetidas a um percurso de dez metros. Nota-se ainda que a resistência à abrasão é dominada pela matriz e com a incorporação das fibras o desgaste diminuiu um pouco não influenciando o compósito em relação à secagem prévia da fibra. (apresentou valores equivalentes a de um uma amostra de resina pura). As amostras que não foram submetidas a uma secagem prévia, apresentaram valores inferiores, porém com uma diferença muito pequena em relação à resina pura. Quando as amostras foram submetidas a um percurso de vinte metros os resultados obtidos com relação à resina pura foram superiores, pois quanto maior o desgaste menor é a resistência à abrasão. Portanto, quando o ensaio teve o percurso de vinte metros, as fibras tiveram um maior desgaste em relação à resina, este fato pode ser causado pelo aumento do percurso. A resistência à abrasão é dominada pela matriz e não foi afetada pela inclusão da fibra com valores significativos. Observa-se que no percurso de vinte metros a fibra aumenta aparentemente o desgaste e que,

o compósito não teve diferença com a secagem ou sem secagem prévia.

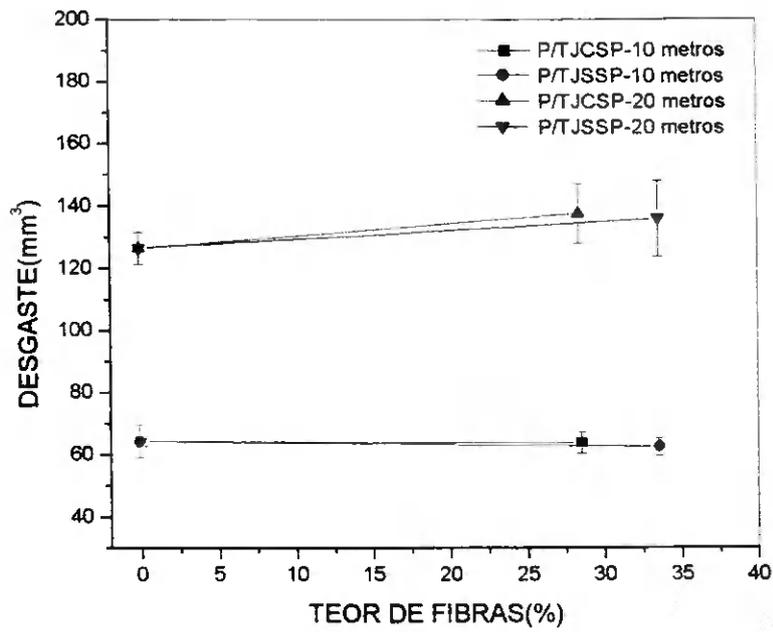


Figura 37 – Resistência à abrasão dos compósitos (com e sem pré-secagem) com quatro camadas de reforço no percurso de 10 e 20 metros

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

O conjunto de propriedades obtidas para os compósitos poliéster/tecido de juta manufaturados nos permite concluir que:

- A secagem prévia das fibras tende elevar as propriedades mecânicas dos compósitos investigados.
- A incorporação das fibras e a sua secagem não alteraram a resistência à abrasão dos produtos.
- As propriedades mecânicas da matriz e dos compósitos foram reduzidas com o tempo de inserção em cimento. O decréscimo nas propriedades tênsis foi pequeno e inferior ao decréscimo sofrido pela resistência ao impacto dos compósitos. Os resultados indicam que o envelhecimento por inserção em cimento por tempos de até 100 dias não foi significativo, e são inferiores ao sofrido pelo aço. Os dados evidenciam que a degradação sofrida não impede o uso destes compósitos na confecção de silos para armazenagem de produtos agressivos como o cimento.
- Compósitos tubulares com três camadas de reforço, testados em impacto por queda de dardo a 2m de altura, só sofreram danos graves com pesos superiores a 1,5kg e foram completamente perfurados por um peso de 2kg.
- A pressão hidrostática dos compósitos tubulares foi de 1,8 MPa, o que submete a parede a uma tensão de tração (circunferencial) de 22,5MPa. Os compósitos tubulares com três camadas de reforço ao atingir esta pressão sofreram fissuras e não estilhaçamento, o que indica que podem ser utilizados para armazenagem de produtos

pulverulentos ou granulares em pressões superiores a 1,8 MPa sem que sua integridade física seja ameaçada.

- Dados teóricos foram comparados aos experimentais observando o efeito do teor de fibras no compósito, e conclui-se que os silos para ser construído com este compósito polimérico, devem ter altura máxima de seis metros e diâmetros de dois e três metros.
- A partir dos dados obtidos foram estimadas as tensões de tração nas paredes de silos verticais com diferentes relações altura/diâmetro. Os resultados indicam que os compósitos tubulares desenvolvidos atingiram propriedades superiores às requeridas. Portanto, os dados indicam a viabilidade de construir silos cilíndricos verticais utilizando os compósitos investigados neste trabalho, em substituição ao aço, que é o material utilizado normalmente para esta finalidade.

CAPÍTULO 7

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12770. **Determinação da resistência à compressão não confinada**. Ed. Copyright (1990), Outubro de 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5683, NBR 14 262. Ed. Copyright (1999), Janeiro de 1999.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8681. Ed. Copyright (1984).

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Normas para elaboração de teses, dissertações e monografias /2004**.

ALEXANDRE, M.; DUBOIS, P. Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials; Reports: A Review Journal, **Materials Science and Engineering**, v. 28, p. 1-63, 2000.

ALMEIDA, S. D., GODOY, L. A. **Stresses redistributions due to circumferencial imperfections and craks in vertical silos**, **Bulk Solids**. Vol. 16, Jul/Set, 1996.

ARAÚJO, E.; MELO, T.; MORAIS, C.; CARVALHO, L.; ARAÚJO, K.; PEREIRA, O.; SOUZA, T. Mechanical properties of glassfibre residues/polyester. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 5TH., 2004, São Pedro, **Proceedings...** Symposium on the Chemistry of Lignins and other Wood Components, São Paulo, v. 005, 2004.

ARRUDA, G. S. Desenvolvimento de compósitos poliéster/ juta: Um estudo comparativo. 1994. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.

ASA B.31 - American Standards Association - Published by the American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, 345 East 47th Street, New York, New York 10017.

ASTM – Anual Book of ASTM Standards D-256. Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials, Philadelphia, 1978.

ASTM – Anual Book of ASTM Standards D-3039. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.

BAÊTA, C.F.; SARTOR V. Resistência dos materiais e dimensionamento de estruturas para construções rurais. Material didático, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

BATISTA, W. W. Propriedades mecânicas de compósitos poliéster/ juta: Efeitos de tratamentos superficiais. 1995. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

BATISTA, W. W.; CARVALHO, L. H.; ALSINA, L. S.; ROCHA, A. P. T. Efeito das condições de pré-secagem nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/ juta. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, IV., 1997, Salvador. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Polímeros.** Salvador: Ass. Bras. Pol., 1997. pp. 161-162.

Boletim técnico EMBRAPOL, Resina poliéster.

BRYDSON, J. A. , *Plastics materials*, **Butterworth Scientific**, 4ª edição, London, 1982.

CALIL Jr., C. (1987). **Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro.** In: Colloquia, Porto Alegre, 1987. *Anais*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. V.3, p.229-243.

CALIL Jr., C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.200p. (Apostila).

CALIL JR., C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. Silos metálicos multicelulares. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.117p.

CALIL, Jr., C. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** 1984. 184p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1984.

CALLISTER JR, W.D.; **Materials Science and Engineering: an Introduction**; 4th edition; John Wiley & Sons; 1997.

CARVALHO, A; **Fiberglass x corrosão: Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos**; São Paulo, Asplar; 1992.

CARVALHO, L. H. **Chemical modification of fibers for plastics reinforcement in composites.** First International Lignocellulosics Plastics Composites. São Paulo. 1996.

CARVALHO, L. H. **Chemical Modification of Fibers For Plastics Reinforcement in Composites.** In: LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X. & FROLLINI, E. Lignocellulosic-Plastics Composites, p. 197-222-247, São Paulo, 1997.

CARVALHO, L. H.; ALVES, K. G.; FONSECA, V.M. Mechanical Properties of Polyurethane/hessian Cloth Composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 5TH., 2004, São Pedro, **Proceedings....** Symposium on the Chemistry of Lignins and other Wood Components, São Paulo, v. 046, 2004.

CARVALHO, L. H.; BATISTA, W.W.; SOUSA, N. A.: Influência do tipo de Poliéster e de Modificação Alcalina nas Propriedades Tênses de Compósitos Poliéster/Juta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, IV, 1997, **Anais do IV Congresso Brasileiro de Polímeros**, p. 163-164, 1997.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W.S. Tensile Properties of Unsaturated Polyester/hybrid Sisal-glass Fabric Reinforced Composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 5TH., 2004, São

Pedro, **Proceedings...** Symposium on the Chemistry of Lignins and other Wood Components, São Paulo, v. 005, 2004.

CAVALCANTE J. M.F., **Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/ Juta (tricotado e tramado)**. 2001.95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 2001.

CAVALCANTI W. S., **Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/ Juta: Efeitos de Tratamentos Superficiais, Envelhecimento Térmico e Absorção de Água**. 2000.107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 2000.

CHAUD, N., VARMA, S., KOZAUCHI, A.C. Sem And Strength Characteristics of Acetylated Sisal Fibre; **J. Mater. Sci. Let.**, 1989,v.8, . 1307-1309.

CHAWLA, K. K.; BOSTOS, A. C. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS. Third, 1979, Pergamon Press Cambridge. **Proceedings...**Vol. 3, p. 191. 1979.

CLARK, R.A.; ANSELL, M.P.; Jute And Glass Fibre Hybrid Laminates; **Journal of Materials Science**; v. 21, p. 269-276; 1986.

COOK, D. J. , **Concrete and cement composites reinforced with natural fibers**, *Concrete International, Ci80, Fibrous Concrete*, The Concrete Society, the Construction Press, UK,99-114,1980.

CORAN, A.Y.; BOUSTANY, K.; HAMED,P. **Rubber Chemistry and Thecnology**, Akron, v.47, p.396, 1974.

D'ALMEIDA, J. R. M., **Propriedades Mecânicas de Fibras de Juta**, *Ciência e Cultura*, 39. 1025-1032, (1987).

D'ARSIE, D; **Los plásticos reforzados com fibras de vidro**; 2ª Edição. Buenos Aires: Editorial Americale; 1986.

DASH, B. N.; RANA, A. K.; MISHRA, H. K.; NAVAK, S. K.; MISHRA, S. C.; TRIPATHY, S. S. **Novel, low –cost jute-polyester composites**. Part 1: processing mechanical properties, and analysis. *Polymer Composites*, 20, 62-71, 1999.

- DE PAULA, C. M. S.; BITTENCOURT, E.; SILVA, J. L. G. & ARNICO, S. C. Influência do Tratamento Químico em Fibras de Sisal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 12, UNICAMP, Anais... CBECIMAT. Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Polímeros, Campinas, 1996.
- DIN 1055 – Lastnnahment fur. Bauter, Biatt 6, Lasten in silozellen. German, 1987. 12p.
- DIN 53516 - Deutsches Institut für Normung e. V. Teste da borracha, elastômeros; determinação da resistência à abrasão. 1987.
- ERHARDT, T.; BLUCKE, A.; BURGER, W.; MARKLIN, M.; QUINZIER, G. **Curso Técnico Têxtil**. E.P.U.- São Paulo, 1975.
- FELIX, J.M.; GATENHOLM, P.; The Nature of the Adhesion in Composites of Modified Cellulose Fibers and Polypropylene; **Journal of Applied Polymer Science**; v. 42, p. 606-620; 1991.
- FILHO, R.P., ROSA, D.S., CHUI, Q.S.H., AGNELLI, J.A.M. Avaliação.o da biodegradação de PHB, PHB-V e PCL em solo compostado. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2001. **Anais do 6º Congresso Brasileiro De Polímeros**. Belo Horizonte.
- FLINN, R. ; TROJAN, P.; Enginering Materials and their Applications. ; Boston: Houghton Mifflin Company; 1981
- FONSECA, V.M. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos poliéster/sisal quimicamente tratado**. 1998. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.
- FONSECA, V. M. **Desenvolvimento de sistema antichama aplicado a compósitos de Poliéster insaturado reforçado com fibra de sisal**. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

FONSECA, V.M; FERNANDES JR, V.J; CARVALHO, L.H; D'ALMEIDA, J.R.
AL Evaluation of the mechanical properties of sisal-polyester composites as a
function of the matrix formulation; journal applied polymer science v 94 – 1209-1217
2004.

FREITAS, E. G. A., **Estudo teórico e experimental das estudo teórico e
experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e
fundo plano.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de
São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

GAY, D. - **Matériaux Composites** – Paris: Editions Hermès, 569 P., 1991-

GOMES, F. C. **Estudos teóricos e experimental das ações em silos horizontais,**
2000. São Paulo: Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos,
Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000, 205 p.

GOULARTI FILHO, A.; GENOVEVA NETO, R. Indústria do Vestuário,
Florianópolis, Livraria e Editora Obras Jurídicas LTDA, 1997.

GOWDA, T.; M.; NAIDU, A. B. C.; CHHYA, R. Some Mechanical of Untreated Jute
Fabric – Reinforced Polyester Composites. Part A, **Applied Science and
Manufacturing**, v. 30, p.237-248, 1999.

HAGE Jr., E. **Compósitos e Blendas Poliméricas.** Campinas. Instituto Latino
Americano e IBM. 1989.

HARA, T.; CORRÊA, P. C. **Armazenagem de Milho a granel na Fazenda.** Inf.
Agropecu. Belo Horizonte. 1983.

HAYNAL, A. O cofre da propriedade pede mais recurso. **Revista Armazenagem.**
p.32-33, mar/abr. 1989.

HAZIM, A; **Introduction to Composite Materials** [s.l: s.n], 1984.

HULL, D. - **An Introduction to Composite Materials** – Londres: Ed. Cambridge
University Press, 246 P., 1986.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **Composites Materiales.** 2.ed. Chapman & Hal, Cambridge
University Press, 1996.

ISO 4649 – Borracha, vulcanizados ou termoplásticos - Determinação da resistência da abrasão – International Organization for Standardization, Switzerland, 1985.

JOHANSON, J. R. **Modeling Flow of Bulk Solids**. American Institute of Chemical Engineers. Jenike and Jonhasen, Inc., Winchester, Massachusetts. 1969. 12 p. Joinville: , v.4, n.2, 1969.

JOSEPH, K.; CARVALHO, L. H. Propriedades de Compósitos Poliéster Insaturado/Tecido Híbrido de Juta/Algodão, 5º Congresso Brasileiro de Polímeros, ABPol, p. 834-839, Águas de Lindóia, São Paulo, 1999b.

JOSEPH, K.; CARVALHO, L. H. **Tensile properties of jute – cotton hibrid fiber Reinforced polyester composites**, Brazilian Polymer Conference, 2000.

-JOSEPH, K.; THOMAS, S. & PAVITHRAN, C.; Tensile Properties of Short Sisal Fiber Reinforced Polyethylene Composites; **Journal Applied Polymer Science**; v. 47, p. 1731-1739; 1993.

JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C., **Viscoelastic properties of short sisal fiber filled low density polyethylene composites: Effect of fiber length and orientation**. Material Letters, North-Holland, v. 15, p.224, 1992.

JOSEPH, K.; TOLÊDO FILHO, R. D.; JAMES, B. THOMAS, S.; CARVALHO, L. H. A review on sisal fiber reinforced polymer composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.3, n. 3, p.67-379, set./dez., 1999.

KARMAKER, A.C.; HINRICHSEN, G.; Processing and Characterization of Jute Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer; **Polym.- Plast. Technol. Eng.**; v. 30, p. 609-629; [s.l.] 1991.

KARMAKER, A.C.; CLEMONS, C.M.; Water Absorption and Load Transferring Mechanisms in Polypropylene Reinforced With Lignocellulosic Fibers; **Antec**; p. 2091-2095; [s.l.], 1995.

KELLY, A; MILEIKO, S.T. ; **Fabrication of Composites** .Handbook Of Composites ; v. 4; p. 3-4, 8-10;[s.l; s.e.] 1986

KISHORE, R.M.; SHIRIDHAR, M.K.; RAO, R.M.V.G.K; Compressive Strength of Jute/Glass Hybrid Fibre Composites; **Journal of Materials Science Letters**; v.2, p. 99-102; 1993.

KURUVILLA, J.; MEDEIROS, E.; CARVALHO, L.H.; **Compósitos de matriz de poliéster reforçados por fibras curtas de sisal**; Polím. C& T., Out/Dez 1999, 136-140.

KURUVILLA, J; TOLEDO FILHO, R.D., BEENA, J., SABU, T. & CARVALHO, L.H; A Review on Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites; **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v.3,n.3, p.367-379, 1999.

LARANJEIRA, E. **Propriedades de Compósitos Poliéster/Juta. Influência da Adição de Carga Mineral Nanoparticulada e Sistema Antichama**. 2004. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LARANJEIRA, E.; CARVALHO, L. H. Compósitos poliéster/fibras unidirecionais de juta In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, XV,2002, Natal, RN, **Anais... CBECIMAT**, Trabalho 201-023. 2002.

LAUCAS, M. T.; CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L. Tenacidade à fratura de materiais compósitos pultrudados. **Anais XIV CEBECIMAT (2000)**.

LEE, S. M. **International Encyclopedia of Composites**, v. 1-6, VCH, New York, 1991.

LYNX. **Manuais do usuário**. AC-2120: Módulo Controlador do Sistema ADS 2000, AI-2160: Módulo Condicionador de 16 entradas. Programa de aquisição de sinais – AqDados, Brasil, 1996.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA. 1991.175p.

MANO, E.B; **Introdução aos Polímeros**; 2ª Edição; São Paulo: Edgard Blucher; 1985.

MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. **Efeito de Envelhecimento Térmico nas**

- MENDES, T.M.F.F - **Propriedades de resistência à tração e ao impacto de compostos poliéster/sisal**- Um Estudo Comparativo - Natal; 1992. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Studies on jute composites – A literature review, *Polym. Plast. Technol. Eng.* 34(5), 729-792.1995.
- MORAIS, S. A. **Argila Esmectítica Como Carga Para o Polipropileno. Efeito de Modificações Ácidas na Carga.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB, 1995.
- NASCIMENTO, J. W. B. **Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração.** 1996. 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- NIELSEN, L. E. ; **Mechanical of Proprieties of Polymer and Composites**; 1: Marcel Deker; 1974.
- NÓBREGA, M. M. S. **Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Tecidos Híbridos Juta/Vidro.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2000.
- NOTHEMBERG, M.; Cresce o Interesse Pelo Uso de Fibras Naturais; **Anuário Brasileiro Do Plástico**, P.6-15; 1996.
- OWES C.; **Guia De Laminação Manual**; [s.l.]: 1992.
- PAIVA JÚNIOR, C. Z. et al, *Polymer Testing*, **23** (2004) 131-135
- PAL, P. K. **Jute Reinforced Plastics: A low cost composite material.** *Plastics Rubber Processing and Applications*, v.4,:215-219. 1984.
- PAVHTHRAN, C.; MUKHRJEE, P.S.; BRAHMAKUMAR, M.; DAMODARAM, A.D.; Impact Performance of Sisal - Polyester Composites; **Journal of Materials Letter**; v. 7, p. 825-826; 1988.

PAVITHRAN, C.; MUKHREJEE, M., BRAHMAKUMAR, M.; DAMODARAN A.D.; Impact Properties of Natural Fibre Composites; **Journal of Materials Science Letters**, v.6, p. 882-884, 1987.

PHANI, K.K; BOSE, N.R.; Hydrothermal Ageing of Jute/ Glass Fibre Hybrid Composites - and Coats - Ultrasonic Study; **Journal of Materials Science**; v. 22, p. 1929-1933, (1987).

RABELLO, M.S.; **Comportamento Físico de compósitos polipropileno/atalugita. Um estudo comparativo**; 1989. Dissertação (Mestrado); Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1989.

RABELLO, M.S; CARVALHO, L.H; BATISTA, W.W. & MEDEIROS, T.G; Desenvolvimento de Compósitos de Poliéster Insaturado com Fibras de Vidro e Sisal; in I Congresso Brasileiro de Polímeros, **Anais...** São Paulo: [s.n] p. 439-443; 1991.

RAI, M.;JAISINGH, M.P. **Advances in building and construction materials**. Roorkee; Central Building Research Institute, 1986.

RAVENET, J. **Dust explosions in silos and plants**. Causes e prevention. Bulk solids and handling, volume 10, number 2, pp. 201-210.May, 1990.

RAVENET, J. **Overpressures in silos with off-centre emptying**. Acier-Shahl-Metal, v.41, n° y3, Mar.pp109-13, 1976.

RAVENET, J. **Silos Teoria, Investigation, Construction**. Editores Maignón, 26 – Barcelona - Espanha, 1977. Ed. Editores Técnicos Associados, S.A. Barcelona, 1977. p.10, 205.

RAVENET, J. **Silos**. Editora IMGESA c/ Alareón,138-140. Barcelona – Espanha, 1992. 508 p.1997.

RESANA S/A – Divisão de resinas para compósitos reforçados. RESAPOL 10-116. Boletim técnico – São Paulo, 1997.

RICHARDSON, H. **Polymer Engineering Composites**, *Applied Science Publishers*, London, 1977.

- ROE, P.J. ; ANSELL, M.P.; Jute Reinforced Polyester Composites; **Journal of Materials Science**; v. 20, p. 4015-4020; 1985.
- ROTTER, J.M. **Buckling of Ground-Supported Cylindrical Steel Bins under Vertical Compressive Wall Loads**, Proc., Metal Structures Conf., Instn Engrs Australia, Melbourne, pp 112-127, May, 1985.
- ROTTER, J.M. **Stress amplification in unstiffened steel silos and tanks**. Research Report. R437. School of Civil and Mining Engineering. University of Sydney, Australia. march 1983.
- ROTTER, J.M. **The analysis of steel bins subject to eccentric discharge**, Proc., Second Int. Conf. Bulk Materials Storage Handling and Transportation, I.E. Australia., Wollongong, pp 264-271. 1986
- ROWEL, R.M.; SANADI, A.R.; CAULFIELD, D.F.; JACOBSON, R.E.. **Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities**. First International Lignocellulosics Plastics Composites, São Paulo, 1996.
- ROWELL, R. et al. Utilisation of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. In: LEÃO, A.; CARVALHO, F. X., FROLLINI, E., eds. *Lignocellulosic – plastics composites*. São Paulo: USP; UNESP (1997) p.23-51
- SATYANAYRANA, K.G, SUKUMARAN, A.G, PILLI, S.G.K. AND ROHATGI, P.K., **Fabrication and Properties of Natural Fibre-Reinforced Polyester Composites**; *Composites*, 1986, v.17, n.4 .
- SHAH, A.N.; LAKKAD, S.C.; **Mechanical Properties Of Jute Reinforced Plastics**; *Fiber Science And Technology*; v. 15, p. 41-46; 1981.
- SHAKELFORD, J.F.; *Ciência dos Materiales para Ingenieros*; 3 adición; Prentice Hall Hispanoamericana; 1995.
- SILVA, E. T.; FREIRE, W. J.; CALIL JR., C. Elementos pré-moldados de concreto armadora silos quadrados verticais, modulares, para armazenamento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.325-328, 1998.

SOSA GRIFFIN, M. **Utilización de materias primas vegetales para la producción de materiales de construcción: Análisis Crítico.** Caracas, p.11, 1994. Trabajo Especial (Agregado) – Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. 1994.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos, 3ª Edição,** São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1982.

SYDENSTRICKER, T. H. D.; MOCHNAZ, S. & AMICO, S. C. **Pull-Out and Other Evaluations in Sisal-Reinforced Polyester Biocomposites.** Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com> > Acesso em 22 de outubro de 2002.

TELES, P.C.S.. **Tubulações Industriais.** Ed. da Universidade de São Paulo, Rio de Janeiro, p. 238, 240, 244 e 245.1968.

Thermoset resins for composite directory & databook , Woodhead publishing limited, 1998 second edition

TOLÊDO FILHO, R. D. **Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais Vegetais. Materiais Não Convencionais para Construções Rurais.** XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – SBEA, UFPB. Campina Grande, PB. Cap.2 , p. 49-82.1997.

UTRACKI, L;. **Thermoplastics Vs Thermosets in Advanced Composites (Panel Discusion) ;Polymer Composites;** v. 6, p. 437-440 ; 1987.

VAN DAM, J.E.G. et al. **Icreased Aplication Of Domestically Produced Plant Fibres in Textiles, Pulp And Paper Production, And Composite Materials.** Wageningen: EUROPEAN COMMISSION FIBRE CROPS. Directorate – general XII/ Agro Industrial Division, 1994. 249 p.

WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I. **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?.** *Composites Science and Technology* **63** (2003) 1259–1264.

WINFIELD, AG. **Plastics and Rubber Int** 1979; 4(11):23-28.

WOLLERDORFER M, M.; BADER, H. **Influence of natural fibers properties of biodegradable polymers.***Industrial Crops and Products*,8, 105-112. 1998.

YAN LI, YIU-WING MAI, LIN SIE, Sisal Fibre and its composites: a review of recent developments, *Composites science and technology*, (2000).

YOUNG, R. A. **Utilization of natural fibers:** Characterization, modification and applications. In: LEAO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. , *Lignocellulosic – Plastic Composites*, USP – UNESP. 1997.

CAPÍTULO 8

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- A realização de ensaios de flexão nos compósitos (poliéster/ tecido de juta), destinados à construção de silos cilíndricos verticais, investigando as flexões possíveis que podem aparecer nas paredes dos silos.
- Testes para determinação da abrasão após serem inseridos no cimento.
- Ensaios mecânicos não destrutivos (ultra-som, magnaflux e outros) que visam não danificar a peça ensaiada.
- Estudo do compósito (poliéster/tecido de juta) sujeito aos esforços do vento.
- Estudo das tensões de atrito nas paredes do silo através de construção de protótipo com o compósito (poliéster/tecido de juta).
- Confeccionar um molde mais eficiente, onde possa produzir tubos de poliéster puro e compósitos tubulares com mais perfeição.
- Fazer testes com compósitos tubulares cheios de cimento para verificar o efeito do tempo de inserção em produtos agressivos.
- Avaliar teores de fibra superiores aos que foram ensaiados neste trabalho.

CAPÍTULO 9

ANEXOS

ANEXO A - DETALHAMENTO EXPERIMENTAL E TEÓRICO

A1 - MOLDE DOS COMPÓSITOS PLANOS

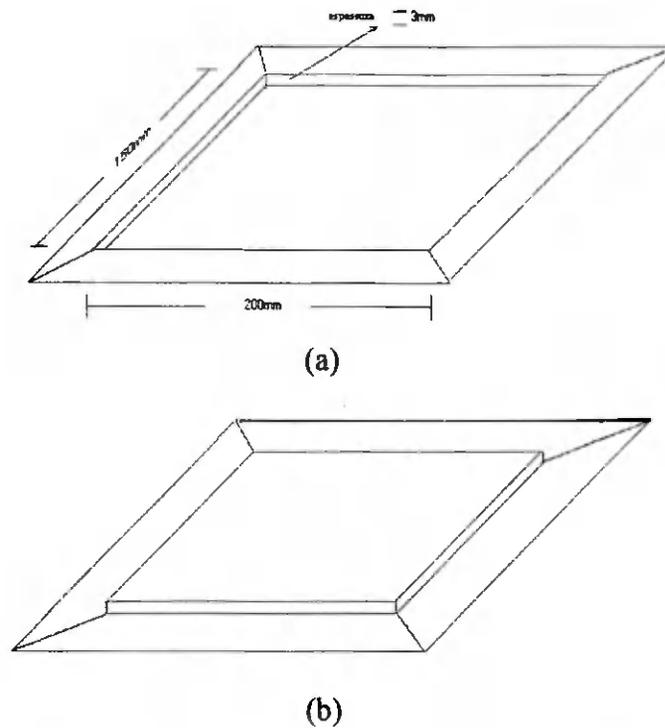


Figura 1 – Molde de compressão (aço) aberto – (a) parte inferior e (b) tampa

A2 - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Para cálculo da abrasão, a perda de massa (valor médio de 3 a 10 valores individuais) é convertida para a perda de volume com auxílio da densidade; a perda de volume é corrigida pelo desvio do índice de ataque do papel esmeril de teste em relação ao índice de ataque teórico. Para isso considera-se a seguinte equação:

$$A = \frac{\Delta m \times S_0}{\delta \times S} \quad (13)$$

Onde:

A = Abrasão, em mm^3

Δm = perda de massa, em mg

δ = densidade, em g/cm^3

S_0 = índice de ataque teórico

S = índice de ataque, em mg

A3 - MOLDE DOS COMPÓSITOS TUBULARES

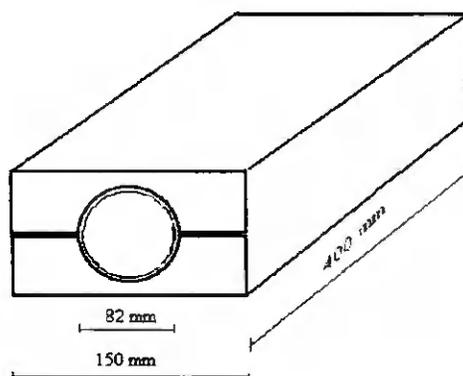


Figura 2 – Molde Fechado para confecção dos tubos

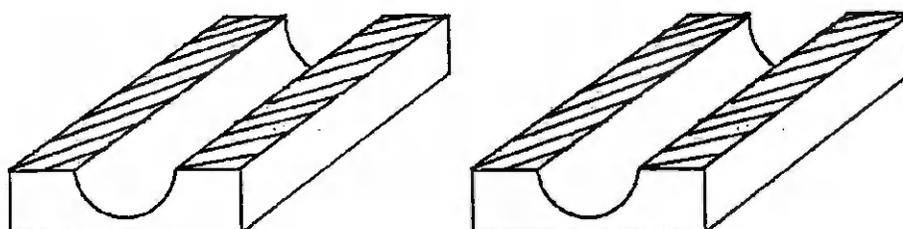


Figura 3 – Perspectiva do molde para confecção dos compostos tubulares

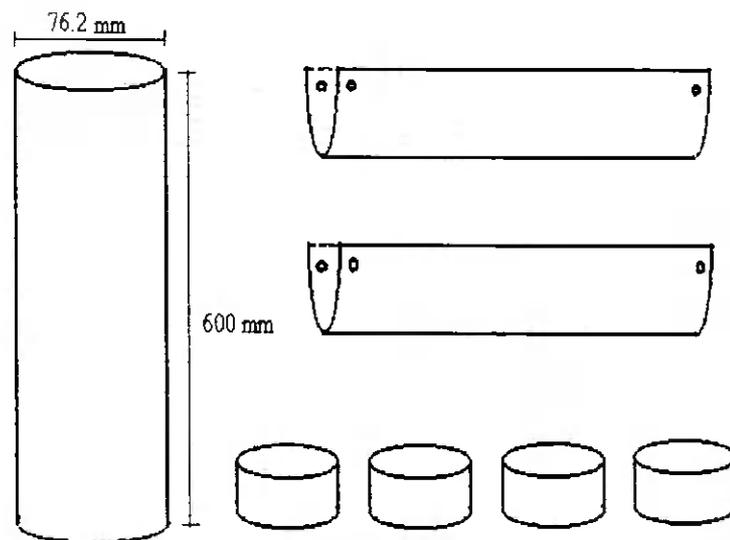


Figura 4 - Molde interno para confecção do compósito tubular (tubo PVC e quatro bases de madeira)

A4 - ENSAIO DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Como mostra a Figura 5, a aparelhagem necessária à execução do ensaio é a seguinte:

- a) banho de água termoestabilizado capaz de conter todos os corpos de prova e mantê-los na temperatura especificada durante todo o ensaio;
- b) equipamento de pressurização e respectivo regulador de pressão, capaz de elevar, gradativamente e sem golpe, em um tempo máximo de 30 s, a pressão requerida mantida durante todo o ensaio com tolerância de 2%;
- c) reservatório de água pressurizada capaz de suprir os corpos de prova durante sua dilatação;
- d) manômetro capaz de medir a pressão hidrostática de ensaio, com exatidão de $\pm 2\%$;
- e) caps de fechamento e peças de conexão para montagem e acoplamento do corpo de prova ao equipamento de pressurização.

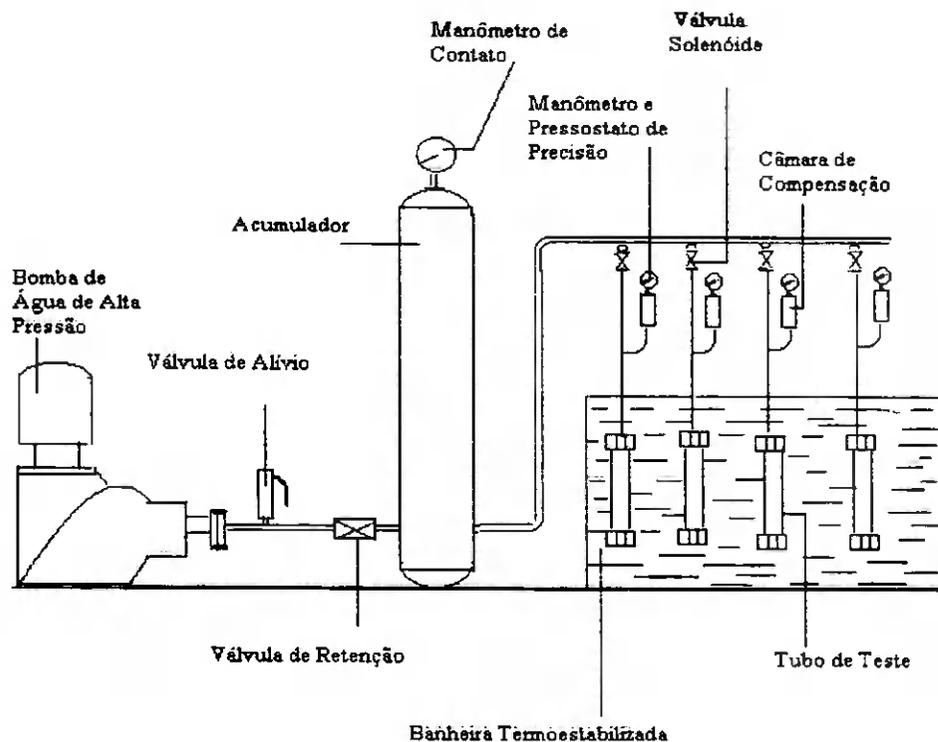


Figura 5 - Esquema simplificado da aparelhagem para teste de pressão hidrostática

Seguindo a norma NBR 5683 da ABNT, deve-se calcular a pressão hidrostática a ser aplicada no corpo de prova, correspondente a tensão circunferencial exigida, através da seguinte fórmula:

$$P = \frac{2 \times \sigma \times t}{d_{em} - t} \quad (14)$$

Onde:

P → pressão hidrostática de ensaio, em MPa;

σ → tensão circunferencial, em MPa;

d_{em} → diâmetro externo médio, em mm;

t → espessura mínima da parede, em mm.

A5 - ENSAIO DE IMPACTO POR QUEDA DE DARDO

A aparelhagem necessária à execução do ensaio é a seguinte: aparelho de impacto, conforme mostrado na Figura 6, que tenha os seguintes elementos: tubo-guia, de metal ou de plástico, de pelo menos dois metros de comprimento, que permita centrar o percussor durante a sua queda, com o mínimo de atrito; - percussor metálico; - apoio de aço, em forma de V, com ângulo de 120° e comprimento mínimo de 230 mm; - sistema ou dispositivo de ajuste de altura do corpo-de-prova em relação ao tubo-guia; - sistema ou dispositivo ou drenagem que impeça o percussor dar mais de um impacto por queda no corpo de prova.

O corpo de prova é colocado na posição horizontal como pode-se observar pela Figura 6. O dardo é lançado de uma altura de dois metros com o peso do percussor de acordo com o diâmetro nominal (DN).

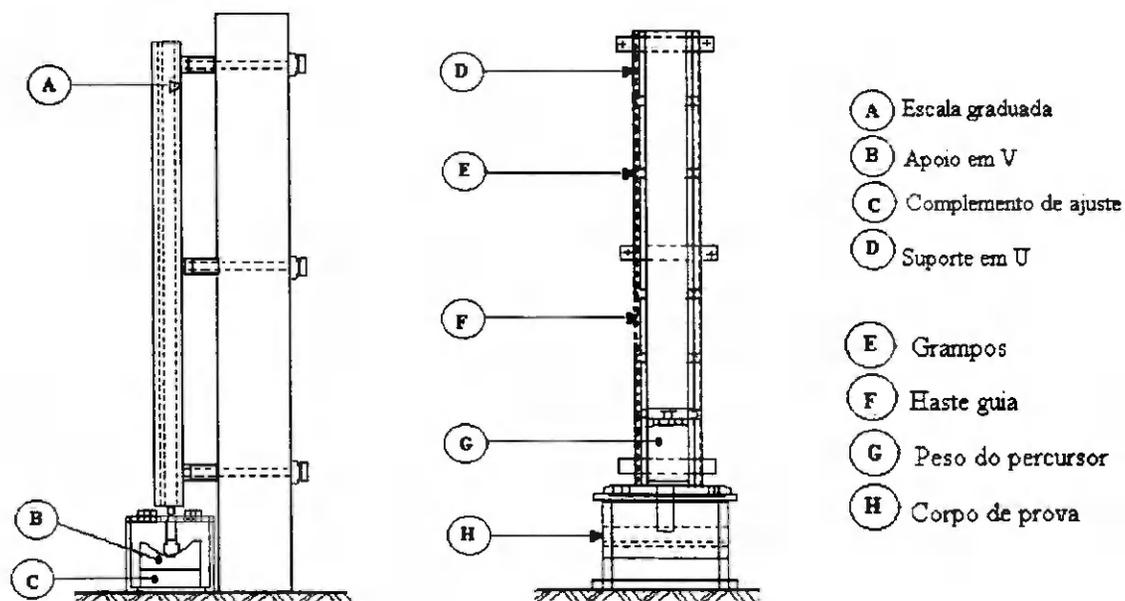


Figura 6 – Ilustração da máquina para ensaio de impacto composto tubular

A6 - ENSAIO DE COMPRESSÃO

Na Figura 7, observa-se as dimensões do corpo de prova com 3 mm de espessura de parede e aproximadamente 22 % em peso de fibra; na Figura 8, com 4 mm de espessura de parede e aproximadamente 29 % em peso de fibras e na Figura 9, com 6 mm de espessura de parede com aproximadamente 31 % em peso de fibra %.



Figura 7 – Compósito tubular com duas camadas de tecido de juta após usinagem para ensaio de compressão



Figura 8 – Compósito tubular com quatro camadas de tecido de juta após usinagem para ensaio de compressão

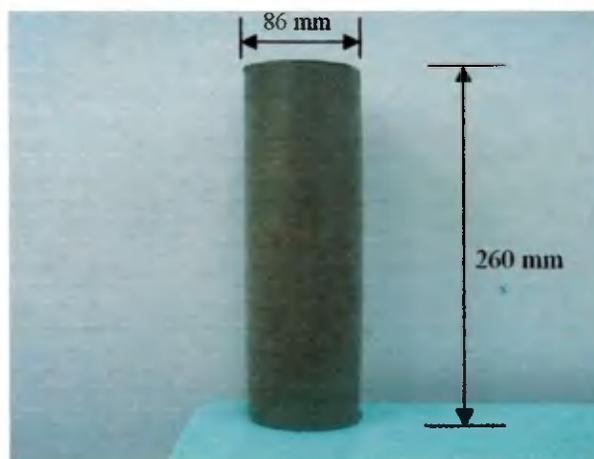


Figura 9 – Compósito tubular com seis camadas de tecido de juta após usinagem para ensaio de compressão

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

É um sistema utilizado nas diversas aplicações da engenharia por necessidade de dados automatizados, gerando grande captura de pontos.

Para conseguirmos medir deformações com extensômetros elétricos devemos obter um equipamento de leitura, onde o princípio fundamental do nosso medidor é a variação de nossa resistência elétrica.

A medição parte da utilização de algum efeito físico, isto é, através de um transdutor a variável a ser medida é transformada num outro tipo de grandeza. Essa segunda grandeza é que será efetivamente medida. Conhecendo-se as relações e propriedades válidas para o efeito físico empregado, pode-se medir indiretamente a grandeza original. Nesta técnica enquadra-se o processo de medição de deformação mecânica por medição elétrica (extensometria elétrica). O transdutor é o elemento que faz a conversão da grandeza a ser medida na grandeza de medição, através de um efeito físico de uma alteração das condições do circuito de medição. Dentre os transdutores podemos destacar o *strain gage* (extensômetro). Este transdutor é utilizado na medição de tensões mecânicas através da determinação do alongamento relativo (ϵ), num ponto genérico da estrutura. Para isto devemos colar o *strain gage* na região em que se deseja que as tensões sejam analisadas. As deformações do corpo são transmitidas ao *strain gage* acarretando uma modificação de suas propriedades elétricas. A deformação mecânica do *strain gage* é igual a do corpo nesse ponto.

Aplicando-se a Lei de *Hooke* para a estrutura determina-se a tensão mecânica atuante no local. O circuito mais adequado para se amplificar o sinal é em Ponte de *Wheatstone*, devido à alta sensibilidade na leitura de saída. Na maioria das aplicações busca-se medir deformações (que é o caso em estudo).

Foram colados extensômetros nos corpos de prova para medição da deformação (Figura 10) e aliados ao sistema de aquisição dados conectados ao computador e obtiveram-se os dados os quais estão registrados na Tabela B8 – Anexos B.



Figura 10 – Forma como foi colado o extensômetro elétrico no corpo de prova para medir a deformação

Os procedimentos para a colagem do extensômetro nos corpos de prova foram feitos do seguinte modo:

- remoção da gordura ou graxa;
- lixar a seco do corpo de prova para regularizar a superfície;
- limpar a superfície com álcool isopropílico;
- retirar o *strain gage* da embalagem de proteção com auxílio de uma pinça marcar os eixos de aplicação;
- segurar o final da fita e aplicar uma ou duas gotas de adesivo ciano acrilato na dobra formada entre a fita e o corpo de prova;
- pressionar constante com a fita plástica; depois de alguns minutos
- retirar a fita; depois de devidamente colado
- fazer a instalação elétrica do extensômetro, soldando o fio condutor no terminal.

Figura 11. Centralizou-se cuidadosamente o corpo-de-prova tubular na base da máquina de ensaio de compressão aliada ao sistema e foi aplicada a carga de forma contínua.



Figura 11 - Ilustração da célula de carga no ensaio de compressão

A célula de carga foi calibrada e obteve-se a seguinte curva de calibração: $y = 47,51x + 24,31$ (como pode ser observada na Figura 12).

Onde:

y – carga de ruptura lida (célula de carga), em N.

x – leitura de carga, em divisões.

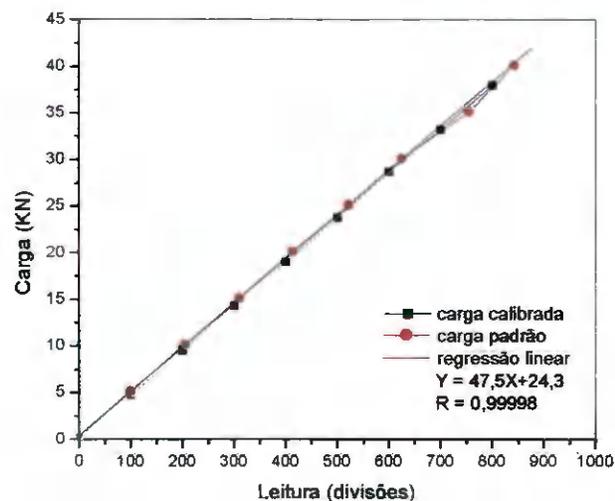


Figura 12 - Calibração da célula de carga

FLAMBAGEM

Admitindo-se que a flambagem se dê no domínio de Euler, calcula-se o momento de inércia de superfície (depende da forma, das dimensões e da orientação da seção).

$$I_x = I_y = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

(15)

CARGA CRÍTICA DE EULER

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

(16)

Onde:

L → comprimento de flambagem do tubo, dependendo do tipo de sollicitação;

E → módulo de elasticidade do material;

I → momento de inércia

De modo que foi necessário simular dados hipotéticos de entrada para as reais condições do problema. Como por exemplo, altura e diâmetro de silo.

A determinação da tensão de compressão atuante no material, uma vez que:

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{Atuante} = \frac{P_{cr}}{A}, \text{ (tensão admissível do material)}$$

(17)

ANEXO B - PROPRIEDADES MECÂNICAS

PROPRIEDADES MECÂNICAS SOB TRAÇÃO

Tabela B1.

Compositos (poliéster/tecido de juta) com pré-secagem (CS)

Nº camadas	Teor de fibra (%)	RT (MPa)	$\pm \sigma$	MY (GPa)	$\pm \sigma$	Def. (%)	$\pm \sigma$
0	0	38,6	0,8	1,35	0,03	5,6	0,7
4	28,52	35,4	2,3	2,24	0,13	3,1	0,3

RT - Resistência à tração MY - Módulo de Young Def. - Deformação

Tabela B2

Compositos (poliéster/tecido de juta) sem pré-secagem (CSS)

Nº Camadas	Teor de fibra (%)	RT (MPa)	$\pm \sigma$	MY (GPa)	$\pm \sigma$	Def. (%)	$\pm \sigma$
0	0	38,6	0,8	1,35	0,03	5,6	0,7
4	33,69	35,4	3,0	1,95	0,23	3,7	0,8

RT - Resistência à tração MY - Módulo de Young Def. - Deformação

PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS INSERÇÃO NO CIMENTO

Tabela B3

Compositos (poliéster/tecido de juta)
após inserção no cimento por 60 e 100 dias

bb	Tempo (dias)	Propriedades Mecânicas	Teor de Fibras (%)		
			0	28,52 Com secagem	33,69 Sem secagem
0		Tensão de tração (MPa)	38,6 ± 0,8	35,4 ± 2,3	32,5 ± 3,0
		Módulo de Young (GPa)	1,35 ± 0,3	2,24 ± 0,13	1,95 ± 0,23
		Deformação (%)	5,6 ± 0,7	3,1 ± 0,3	3,7 ± 0,8
		Impacto (J/m)	88,7 ± 54,7	158,9 ± 17,2	243,3 ± 47
60		Tensão de tração (MPa)	34,7 ± 1,6	32,9 ± 2,6	28,0 ± 2,7
		Módulo de Young (GPa)	1,29 ± 0,19	1,9 ± 0,26	1,8 ± 0,14
		Deformação (%)	5,8 ± 0,9	3,3 ± 0,17	3,7 ± 0,4
		Impacto (J/m)	63,8 ± 22,6	94,5 ± 16,8	123,6 ± 33,7
100		Tensão de tração (MPa)	33,3 ± 2,7	28,1 ± 2,0	27,9 ± 3,7
		Módulo de Young (GPa)	1,17 ± 0,03	1,4 ± 0,22	1,2 ± 0,21
		Deformação (%)	5,9 ± 1,3	3,9 ± 0,7	4,0 ± 0,3
		Impacto (J/m)	52,5 ± 8,2	81,4 ± 6,2	108,5 ± 11

PROPRIEDADES MECÂNICAS SOB IMPACTO (IZOD)

Tabela B4

Resistência ao impacto de compósitos (poliéster/tecido de juta) -(J/m)

Poliéster/tecido de juta	Camadas	T _f (%)	Resistência ao impacto
Poliéster	0	0	88,7±54,7
CS	4	28,52	158,9±17,2
SS	4	33,69	243,3±47

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Tabela B5

Determinação da abrasão de compósitos

(poliéster/tecido de juta) com percurso de 10 e 20 metros - mm³

Poliéster/tecido de juta	Camadas	T _f (%)	Resistência à abrasão	
			Percurso do teste (mm)	
			10	20
Poliéster	0	0	63,97±5,2	126,03±5,2
CS	4	28,52	63,77±3,46	136,98±9,7
SS	4	33,69	62,14±2,62	135,34±12,3

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Tabela B6

Calibração da célula de carga de 5 toneladas

Valor em Volts		Valor de Engenharia (N)		Leitura (divisões)	
calibração	calibração	Padrão	calibração	padrão	
-2,2491	4760	5000	100	103,7	
-2,4139	9520	10000	200	208,5	
-2,5574	14280	15000	300	313,7	
-2,6907	19040	20000	400	417,5	
-2,8186	23800	25000	500	525,3	
-2,9575	28703	30000	600	629,3	
-3,1219	33177	35000	700	758,2	
-3,2660	37985	40000	800	846,5	

Tabela B7

Características mecânicas
dos compósitos tubulares (poliéster/tecido de juta) – médias

Corpos de prova (*)	Descrição	Valores
1	Diâmetro externo do tubo (mm)	82
	Diâmetro interno do tubo (mm)	76,2
	Comprimento (mm)	246
	Área (mm ²)	720
	Deformação de ruptura (%)	1,40
	Carga de ruptura (kN)	17,93
	Módulo de Elasticidade (GPa)	2,5
	Momento de inércia (mm ⁴)	564.378
	Carga crítica de Euler (N)	470
	Tensão atuante (MPa)	0,65
	Tensão de compressão (MPa)	25
	Tensão admissível (MPa)	11
	2	Diâmetro externo do tubo (mm)
Diâmetro interno do tubo (mm)		76,2
Comprimento (mm)		248
Área (mm ²)		789
Deformação de ruptura (%)		1,09
Carga de ruptura (kN)		19,35
Módulo de Elasticidade (GPa)		2,7
Momento de inércia (mm ⁴)		622.315
Carga crítica de Euler (N)		550
Tensão atuante (MPa)		0,7
Tensão de compressão (MPa)		24,5
Tensão admissível (MPa)		11
3		Diâmetro externo do tubo (mm)
	Diâmetro interno do tubo (mm)	76,2
	Comprimento (mm)	260
	Área (mm ²)	1248
	Deformação de ruptura (%)	0,74
	Carga de ruptura (kN)	14,30
	Módulo de Elasticidade (GPa)	2,0
	Momento de inércia (mm ⁴)	1.030.151
	Carga crítica de Euler (N)	614
	Tensão atuante (MPa)	0,5
	Tensão de compressão (MPa)	11,5
	Tensão admissível (MPa)	5

(*) Amostras 1, 2 e 3 correspondem ao $T_f = 22,33\%$, $28,70\%$ e $31,08\%$ respectivamente.

Tabela B8

Dados experimentais do ensaio de resistência
à compressão de compósitos tubulares (poliéster/tecido de juta)

Amostras (2 , 4 e 6 camadas de tecido de juta)								
T _f =22,33%			T _f =28,70%			T _f =31,08%		
F (kN)	ε (%)	σ (MPa)	F (kN)	ε (%)	σ (MPa)	F (kN)	ε (%)	σ (MPa)
0,9	0,009	1,29	0,3	0,007	0,43	0,4	0,007	0,36
1,4	0,025	2,00	0,7	0,022	0,93	0,8	0,013	0,63
2,1	0,054	2,91	1,0	0,032	1,29	1,2	0,026	1,01
2,6	0,084	3,65	1,3	0,050	1,72	1,6	0,032	1,31
3,2	0,123	4,51	1,6	0,062	2,07	1,9	0,039	1,55
3,9	0,164	5,43	2,0	0,087	2,57	2,2	0,048	1,76
4,3	0,196	5,96	3,1	0,135	4,00	2,6	0,061	2,14
4,7	0,232	6,63	4,0	0,182	5,15	3,3	0,086	2,67
5,3	0,272	7,33	4,7	0,205	5,93	4,2	0,126	3,35
5,9	0,319	8,18	5,4	0,235	6,86	4,8	0,154	3,84
7,0	0,411	9,71	5,8	0,260	7,44	5,4	0,183	4,35
8,3	0,526	11,70	6,8	0,308	8,65	6,5	0,226	5,20
8,8	0,577	12,24	7,7	0,362	9,80	7,4	0,270	5,97
11,5	0,770	15,97	8,7	0,404	11,01	7,9	0,287	6,33
11,9	0,831	16,53	9,6	0,456	12,23	8,5	0,329	6,82
12,5	0,893	17,33	10,3	0,498	13,08	9,4	0,378	7,55
16,9	1,325	23,55	11,2	0,556	14,16	9,9	0,414	8,00
17,9	1,401	24,88	12,2	0,622	15,52	10,6	0,455	8,54
-	-	-	13,3	0,686	16,87	13,3	0,672	10,64
-	-	-	13,9	0,728	17,66	14,0	0,716	11,25
-	-	-	14,7	0,774	18,66	14,1	0,729	11,32
-	-	-	15,0	0,805	19,09	14,3	0,738	11,46
-	-	-	15,6	0,838	19,88	-	-	-
-	-	-	16,2	0,878	20,52	-	-	-
-	-	-	17,0	0,923	21,59	-	-	-
-	-	-	17,6	0,971	22,38	-	-	-
-	-	-	18,1	1,005	22,95	-	-	-
-	-	-	18,3	1,023	23,24	-	-	-
-	-	-	18,9	1,067	23,95	-	-	-
-	-	-	19,3	1,092	24,53	-	-	-

ANEXO C = DADOS HIPOTÉTICOS PARA SILO CONSTRUÍDO COM O COMPÓSITO POLIÉSTER/ TECIDO DE JUTA

C1- Determinações das pressões

Cálculo das pressões para projeto de silo de fundo plano, construído com o compósito poliéster/ tecido de juta para o armazenamento de cimento portland, utilizando a Norma DIN (1987).

Dados hipotéticos:

Produto armazenado: Cimento

Altura do silo: 3; 4; 4,5; 5; 6; 7,5 e 9 metros

Diâmetro do silo: 2 e 3 metros

Relação H/D: 1,5, 2 e 3

$$\gamma = 16 \text{ kN / cm}^3$$

$$K_2 = 0,65$$

$$R = 0,5 \text{ m}$$

$$\mu = 0,35$$

$$C = 1,2 \text{ (coeficiente de sobrepressão)}$$

C2 - Memorial de Cálculo

De acordo com as fórmulas de 02 a 08 (RAVENET, 1977) obteve-se as pressões calculadas atuantes no corpo do silo e os dados estão dispostos nas Tabelas C1 e C2. Os valores da força de atrito nas paredes do silo para diâmetro de dois e três metros apresentam-se na Tabela C3.

DADOS DAS PRESSÕES ATUANTES NO CORPO DO SILO

Tabela C1

Pressões atuantes no corpo do silo - **D = 2m**

H (m)	Phc (kPa)	Pvc (kPa)	Pwc(kPa)	Pwd (kPa)	Phd (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	4,7	3,0	1,6	1,8	5,6
1,0	8,4	5,4	2,9	3,2	10,0
1,5	11,3	7,3	4,0	4,4	13,6
2,0	13,7	8,8	4,8	5,3	16,4
2,5	15,5	10,0	5,4	6,0	18,6
3,0	17,0	11,0	6,0	6,6	20,4
3,5	18,2	11,8	6,4	7,0	21,8
4,0	19,2	12,4	6,7	7,4	23,0
4,5	19,9	12,9	7,0	7,7	23,9
5,0	20,5	13,3	7,2	7,9	24,6
5,5	21,0	13,6	7,3	8,1	25,2
6,0	21,4	13,8	7,5	8,2	25,6
6,5	21,7	14,0	7,6	8,3	26,0
7,0	21,9	14,2	7,7	8,4	26,3
7,5	22,1	14,3	7,7	8,5	26,5
8,0	22,3	14,4	7,8	8,6	26,7
8,5	22,4	14,5	7,8	8,6	26,9
9,0	22,5	14,6	7,9	8,7	27,0

Tabela C2

Pressões atuantes no corpo do silo – $D = 3m$

H (m)	Phc (kPa)	Pvc (kPa)	Pwc (kPa)	Pwd (kPa)	Phd (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	4,8	3,1	1,7	1,9	5,8
1,0	9,0	5,8	3,1	3,5	10,8
1,5	12,5	8,1	4,4	4,8	15,0
2,0	15,6	10,1	5,5	6,0	18,7
2,5	18,2	11,8	6,4	7,0	21,9
3,0	20,5	13,3	7,2	7,9	24,6
3,5	22,4	14,6	7,8	8,6	26,9
4,0	24,1	15,7	8,4	9,3	28,9
4,5	25,5	16,6	8,9	9,8	30,6
5,0	26,8	17,4	9,4	10,3	32,1
5,5	27,8	18,1	9,7	10,7	33,4
6,0	28,7	18,7	10,1	11,1	34,5
6,5	29,5	19,2	10,3	11,4	35,4
7,0	30,2	19,6	10,6	11,6	36,2
7,5	30,8	20,0	10,8	11,8	36,9
8,0	31,3	20,3	10,9	12,0	37,5
8,5	31,7	20,6	11,1	12,2	38,0
9,0	32,0	20,8	11,2	12,3	38,5

DADOS DA FORÇA DE ATRITO SOBRE A PAREDE

Tabela C3

Força de atrito sobre a parede (kPa)

H (m)	D = 2 metros	D = 3 metros
0,0	0,0	0,0
0,5	9,9	32,8
1,0	21,1	68,6
1,5	33,3	107,0
2,0	46,2	147,5
2,5	59,8	190,0
3,0	73,8	234,1
3,5	88,3	279,6
4,0	103,1	326,2
4,5	118,1	373,9
5,0	133,3	422,5
5,5	148,7	471,9
6,0	164,2	521,9
6,5	179,8	572,5
7,0	195,5	623,5
7,5	211,2	675,0
8,0	227,0	726,8
8,5	242,9	778,9
9,0	258,7	831,3

DADOS DA TENSÃO DE TRAÇÃO

Tabela C4

Dados da tensão de tração
(teóricos) – relação H/D = 1,5; 2,5 e 3

H (m)	Tensão de tração (MPa)					
	e = 3mm		E = 4mm		e = 6mm	
	D = 2m	D = 3m	D = 2m	D = 3m	D = 2m	D = 3m
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	1,86	2,89	1,40	2,17	0,93	1,45
1,0	3,34	5,38	2,51	4,04	1,67	2,69
1,5	4,52	7,52	3,39	5,64	2,26	3,76
2,0	5,46	9,36	4,10	7,02	2,73	4,68
2,5	6,21	10,93	4,66	8,20	3,11	5,47
3,0	6,81	12,29	5,11	9,22	3,40	6,15
3,5	7,28	13,46	5,46	10,09	3,64	6,73
4,0	7,66	14,46	5,75	10,84	3,83	7,23
4,5	7,96	15,32	5,97	11,49	3,98	7,66
5,0	8,20	16,06	6,15	12,04	4,10	8,03
5,5	8,39	16,69	6,30	12,52	4,20	8,35
6,0	8,55	17,24	6,41	12,93	4,27	8,62
6,5	8,67	17,71	6,50	13,28	4,33	8,85
7,0	8,76	18,11	6,57	13,58	4,38	9,06
7,5	8,84	18,46	6,63	13,84	4,42	9,23
8,0	8,90	18,75	6,68	14,07	4,45	9,38
8,5	8,95	19,01	6,71	14,26	4,48	9,51
9,0	8,99	19,23	6,74	14,42	4,50	9,61

DADOS DA TENSÃO DE COMPRESSÃO

Tabela C5

Dados da tensão de compressão
experimental e teóricos para silos com $H=3; 6$ e 9m e $D=2$ e 3m

Espessura (mm)	Dados experimentais (MPa)	Dados teóricos					
		H = 3 m		H = 6 m		H = 9 m	
		D = 2	D = 3	D = 2	D = 3	D = 2	D = 3
3	25	7,3	8,2	21	26	36	47
4	24,5	5,4	6,2	16	19	27	35
6	11,5	3,6	4,0	10	13	18	24