



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DA
DURABILIDADE DAS FIBRAS DE SISAL SUBMETIDAS A
TRATAMENTOS QUÍMICOS SUPERFICIAIS E DE IMPREGNAÇÃO

AUTORA: CIBELLE GUIMARÃES SILVA

ORIENTADOR: PROF^o ANTÔNIO FARIAS LEAL

CO-ORIENTADORA: DOUTORANDA FERNANDA FERNANDES

SUPERVISORA: PROF^a VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO

Campina Grande, PB – Brasil.

Agosto de 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Julho de 2021.

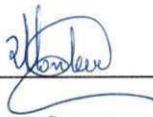
Sumé - PB

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DA
DURABILIDADE DAS FIBRAS DE SISAL SUBMETIDAS A
TRATAMENTOS QUÍMICOS SUPERFICIAIS E DE IMPREGNAÇÃO**

AUTORA: CIBELLE GUIMARÃES SILVA

**MONOGRAFIA SUBMETIDA À SUPERVISORA E À COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE, COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE GRADUADA EM
ENGENHARIA CIVIL.**

Aprovada por:



Profª Dra. VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO

(Supervisora)

Campina Grande, PB – Brasil.

Agosto de 2007

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por me dar a família maravilhosa que tenho, os amigos perfeitos, as oportunidades que me surgiram, a força para toda luta até aqui, a humildade para encarar minhas vitórias como uma vitoriosa e a coragem de recomeçar quando algo não deu certo.
- Aos meus pais que foram os primeiros sábios a passarem na minha vida me dando toda uma base para que eu pudesse realmente viver, sonhar e lutar pela realização dos meus sonhos.
- A Fernanda minha companheira de trabalho que muito me ensinou sobre toda a pesquisa, e me fez amadurecer também como pessoa.
- Ao meu amigo Cláudio que assim como Fernanda também faz parte dessa longa jornada de trabalho.
- Ao professor Antônio que é o grande responsável pelo projeto do Sisal.
- A professora Veruschka que me acolheu e compreendeu todas minhas dificuldades, com muita paciência e boa vontade.
- Ao SEBRAE por estar financiando todo o estágio.
- A UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) por se o intermediador de todos os conhecimentos técnicos adquiridos.
- A todas pessoas que durante esse tempo passaram na minha vida e de alguma forma seja direta ou indiretamente me ajudaram.

Dedico este trabalho aos meus pais, Aderson Apolinário e Edna Maria, que me fizeram perceber que não vale a pena apenas viver é preciso sempre sonhar e lutar pela realização dos sonhos. Fizeram com que acreditasse que nada é impossível quando se tem coragem e com suas simples palavras ou pelo fato de existirem na minha vida, me cederam toda coragem que necessitei para vencer mais essa etapa.

RESUMO

O uso de fibras vegetais na produção de compósitos tem tido grande destaque no que se refere a materiais alternativos aplicados para construção de pequenas estruturas. As vantagens nesta utilização não se limitam ao setor econômico, mas abrangem também outras vertentes importantes para o homem moderno, como a aplicação de materiais ecologicamente seguros e que possam trazer benefícios sociais.

Embora as fibras tenham muitas vantagens, deve-se também observar suas limitações, pois, por serem materiais biológicos as fibras vegetais são higroscópicas, ou seja, absorvem umidade e esta característica apresenta-se como um dos principais problemas da produção de compósitos cimentícios.

Com o objetivo de otimizar, as propriedades das fibras podem ser melhoradas através de tratamentos superficiais ou tratamentos que modificam seus componentes constituintes, pois, as modificações das superfícies alteram propriedades como aderência e absorção de umidade e, modificações dos constituintes alteram propriedades de equilíbrio, tais como instabilidade dimensional com a variação de umidade. Este projeto tem o objetivo de analisar tratamentos para melhorar essas propriedades sem afetar sua resistência mecânica.

Foi realizado três tipos de tratamentos a acetilação, o tratamento térmico e a impregnação com licor pirolenhoso.

Após a realização dos tratamentos foi feito ensaio mecânico e de absorção para analisar sua eficiência, e escolher o melhor tratamento. Esta escolha deve levar em conta os tratamentos em que foi obtido o melhor resultado (a menor absorção e maior resistência) e também um custo acessível para sua produção.

Nesta análise observou-se que dos tratamentos realizados o que mostrou o melhor resultado foi o de acetilação onde foi conseguindo uma redução de absorção maior que 60 % e mantendo suas características mecânicas.

Palavras-Chave: Sisal, Acetilação, Tratamento Térmico e Impregnação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O Sisal.....	13
Figura 2 – Secagem das fibras de Sisal.....	15
Figura 3 – Transporte de fibras por um jumento.....	16
Figura 4 – Máquina paraibana para o desfibramento das folhas de sisal.....	16
Figura 5 – Dispositivo de proteção frontal para da máquina paraibana.....	17
Figura 6 – Lavagem das fibras de sisal.....	18
Figura 7 – Estrutura celular da fibra vegetal.....	20
Figura 8 – Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado por fibra.....	24
Figura 9 – Aumento do conteúdo de acetilas com o incremento do tempo de reação do tratamento de acetilação.....	30
Figura 10 – Absorção e estabilidade dimensional em madeira tratada com óleo e secagem sob diferentes temperaturas.....	32
Figura 11 – Esquema do corpo de prova montado para o ensaio de tração.....	36
Figura 12 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força ,tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e acetiladas em diferentes temperaturas de reação.....	38
Figura 13 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força, tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e aquecidas em diferentes temperaturas...	39
Figura 14 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força, tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e aquecidas em diferentes temperaturas...	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de sisal.....	22
Tabela 2 – Percentual de absorção d’água das fibras de sisal não tratadas e acetiladas em diferentes temperaturas de reação.....	36
Tabela 3 – Percentual de absorção d’água das fibras de sisal não tratadas e aquecidas em diferentes períodos.....	42
Tabela 4 – Percentual de absorção d’água das fibras de sisal não tratadas e impregnadas com licor pirolenhoso em diferentes períodos de tempos.....	43

LISTA DE EQUAÇÃO

Equação 1 – Reação de anidrido acético com fibra vegetal.....	29
Equação 2 - Equação da determinação da percentagem de absorção.....	36

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Generalidades.....	11
1.2 Objetivo.....	11

CAPÍTULO II

2.0 FUNDAMENTAÇÃO LITERÁRIA.....	13
2.1 Fibras de Sisal	13
2.1.1 Generalidades da fibra.....	13
2.1.2 Ciclo Produtivo.....	13
2.1.3 Estrutura e propriedade da fibra.....	20
2.2 Compósito cimento-celulose.....	22
2.3 Influência da Microestrutura no comportamento do compósito.....	23
2.4 Tratamento das fibras vegetais com o objetivo de aumentar a adesão fibra/matriz e redução de absorção de água.....	26
2.4.1 Acetilação.....	28
2.4.2 Tratamento térmico.....	30
2.4.3 Impregnação com licor Pirolenhoso.....	32

CAPÍTULO III

3.0 METODOLOGIA.....	33
3.1 Ensaio nas Fibras.....	33

3.2 Fibras vegetais.....	33
3.3 Tratamentos das Fibras.....	34
CAPÍTULO IV	
4.0 RESULTADOS E ANÁLISES.....	37
4.1 Propriedades Mecânicas.....	37
4.2 Absorção d'água.....	40
CAPÍTULO V	
5.0 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O sisal destaca-se pela capacidade de geração de empregos, por meio de uma cadeia de serviços que abrange, desde trabalhos de manutenção das lavouras (baseados na mão-de-obra familiar), a extração e o processamento da fibra para o beneficiamento, até atividades de industrialização de diversos produtos, bem como uso para fins artesanais.

Hoje, novas perspectivas surgem com pesquisas que avaliam o uso da fibra do sisal como componente do fibrocimento, em substituição ao amianto na indústria da construção civil.

Nos últimos anos as pesquisas sobre a empregabilidade de fibras vegetais em compósitos têm se intensificado e diversas fontes de matérias primas estão sendo exploradas. O uso das fibras vegetais não se restringe apenas as fibras longas e beneficiadas, rejeitos de beneficiamento como a mucilagem de sisal e o bagaço de cana-de-açúcar também podem ser usadas como reforço de matrizes à base de cimento na forma de polpa celulósica, ou na forma de conjunto de células fibrosas (macrofibra), denominada de fibra vegetal. O uso destas fibras é motivado por serem renováveis, biodegradáveis, pela disponibilidade a baixo custo, possibilitando a produção de compósitos também viáveis economicamente.

As fibras naturais podem ser consideradas como polímeros naturais compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de açúcares livres, proteínas, extrativos e produtos inorgânicos em menores quantidades. Os componentes químicos são distribuídos entre as paredes primária, secundária e terciária das paredes celulares (Carvalho, 2005). Essas substâncias são cadeias poliméricas que vão, desde longas, como a celulose, até menores, como a lignina. A

lignina apresenta baixo grau de polimerização, tendendo a ser mais solúvel, e devido a esta característica pode provocar perdas na resistência mecânica por decomposição quando empregada como reforço (Silva, 2002).

O conhecimento da estrutura interna das fibras ligno-celulósicas e da sua composição química é importante para compreensão de sua influência nas características do compósito, e também na escolha dos tratamentos químicos e físicos das mesmas. Os principais métodos propostos para aumentar a vida útil das fibras e melhorar a interface de adesão em compósitos cimentícios são: a modificação química da lignocelulose, com o uso de anidrido e epóxi; impregnação de polímeros sobre a lignocelulose; e o uso de agentes acoplantes, como os silanos (Khalil et al., 2001).

Com o objetivo de melhorar as propriedades da fibra para o objetivo proposto (utilizar como compósito), foram realizados diversos tratamentos em vários níveis fatoriais, analisando sempre a potencialidade do mesmo comparando com os resultados existentes na literatura. Os tratamentos de aquecimento e impregnação com ácido pirolenhoso foram escolhidos devido ao custo diminuto de aplicação e obtenção. No tratamento de aquecimento procurou-se determinar sua potencialidade, já que na literatura é referido como um tratamento aplicável, porém ainda não otimizado. Quanto ao tratamento de impregnação com o ácido pirolenhoso a literatura não apresenta nenhuma pesquisa exploratória para fibras, somente têm-se referências a cerca deste tratamento para madeiras. (Melo, 2007)

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é estudar tratamentos para o desempenho e a durabilidade das fibras de Sisal, quando usadas como reforço de matrizes cimentícias.

Os tratamentos investigados procuram melhorar algumas características da fibra como: porosidade elevada, alta absorção de água e instabilidade dimensional com a variação da umidade. A eficiência dos tratamentos através de ensaios na fibra e os resultados comparados com os já existentes na literatura.

CAPÍTULO II

2.0 FUNDAMENTAÇÃO LITERÁRIA

2.1 Fibras de Sisal

2.1.1 Generalidades da Fibra

O sisal é nativo da Península de Yucatán, no México, e espalhou-se pelas regiões tropicais do planeta. Hoje, o Brasil é o maior produtor mundial. Da planta, extrai-se a fibra vegetal mais dura e resistente, utilizada em cordas, barbantes, tapetes, estofamentos, artesanatos, entre outros. No cenário agrícola nacional, não tem grande importância; porém, é uma cultura vital em muitos locais do semi-árido nordestino. Planta xerófila - adaptada a regiões muito secas -, garante a sobrevivência de quase 1 milhão de pessoas, produzindo mesmo em períodos de estiagem prolongada.(SILVA, 2007)

Apesar de o mercado ser satisfatório, com grande parte da produção destinada à exportação, a cultura sisaleira encontra-se em franco declínio.. A preferência pelas fibras sintéticas, mais baratas e de qualidade superior, explica em parte a decadência do sisal. De fato, a partir dos anos 60, quando surgiram as primeiras fibras sintéticas, o mercado encolheu para as fibras de sisal. Mas, ultimamente, a demanda por fibras naturais tem aumentado, fato que, aliado à redução das áreas produzidas, elevou novamente os preços. (SILVA, 2007)

O problema que os sisaleiros encontram é o enorme atraso tecnológico, gerando baixa produtividade e encarecimento da produção. De todo o volume de folhas colhidas, apenas cerca de 4% se transformam em fibras. O restante é descartado. Há muitas possibilidades de utilização dos subprodutos da extração das fibras, como forragem animal, celulose, acetona e álcool. Basta dizer que a tequila, bebida tradicional mexicana, é produzida a partir do sisal.O cultivo da planta é feito de maneira muito simples no Nordeste, já que é uma cultura pouquíssimo exigente.

2.1.2 Ciclo Produtivo

No cultivo de *A. sisalana* (Figura 1), cujo ciclo varia entre 8 e 10 anos, o primeiro corte é realizado aproximadamente aos 36 meses após o plantio, no qual podem ser colhidas de 50 a 60 folhas/planta. Nesta primeira colheita, 30 a 40% são folhas curtas, impróprias para a cordoaria enquanto, que nas colheitas subseqüentes, são retiradas cerca de 30 folhas/planta.

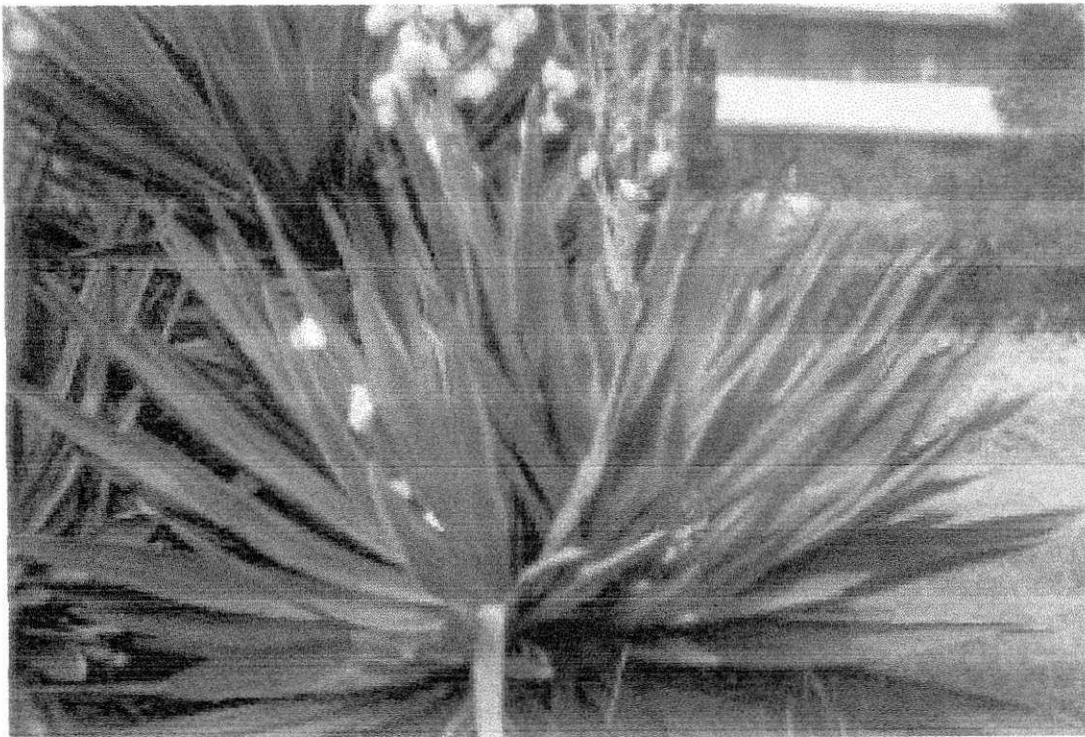


Figura 1. O Sisal

O ciclo da produção dos fios de sisal tem início no campo, onde as folhas são cortadas, desfibradas e colocadas para secar (Figura 2).



Figura 2. Secagem das fibras de Sisal

As operações de corte, enfeixamento, transporte e desfibramento devem ser sincronizadas, de modo que as folhas cortadas sejam beneficiadas no mesmo dia, para evitar o murchamento, o que dificulta o desfibramento e causa depreciação da fibra.

No Nordeste brasileiro, o transporte mais comum das folhas de sisal do campo até a máquina desfibradora é feito por jumentos. O animal pode transportar uma carga de aproximadamente 200 folhas, cujo peso varia de 100 a 130 Kg (Figura 3). Quando há uma máquina desfibradora automática, que é fixa e tem maior capacidade de processamento, as folhas são reunidas em feixes de aproximadamente 50 unidades e transportadas em caminhão ou reboques tracionados a trator.



Foto: Odilon R. R. F. da Silva (1997)

Figura 3. Transporte das fibras por um jumento

A principal operação pós-colheita é o desfibramento do sisal, processo pelo qual se elimina a polpa das fibras, mediante uma raspagem mecânica, o que torna esta prática complexa e de custo elevado. No Nordeste brasileiro, o desfibramento é realizado por meio de uma máquina denominada “motor de agave” ou “máquina Paraibana” (Figura 4). Esta máquina desfibra em torno de 150 a 200kg de fibra seca em um turno de 10 horas de trabalho, desperdiçando, em média, 20 a 30% da fibra. Além disso, envolve um número elevado de pessoas para a sua operacionalização (SILVA e BELTRÃO, 1999).



Foto: Wirton Macedo Coutinho (1997)

Figura 4. Máquina Paraibana para o desfibramento das folhas do sisal.

A rusticidade da máquina exige grande esforço do operador (puxador). Em uma operação normal desfibram-se, em média, 20 a 30 folhas por minuto, ou 1.200 a 1.800 folhas por hora. A fadiga, aliada à falta de segurança da máquina, expõe os operadores a constantes riscos de acidentes, o que constitui em um dos principais problemas da operação de desfibramento da folha do sisal.

Nas regiões produtoras de sisal existe um grande número de pessoas com mãos mutiladas pela máquina Paraibana. No entanto, é importante salientar que pelo fato deste equipamento ser um dos únicos disponíveis no mercado, ter baixo custo aquisitivo e ser de fácil manutenção, tem grande aceitação por parte dos pequenos e médios produtores. Desde o surgimento da máquina Paraibana, poucas modificações foram introduzidas com o propósito de melhorar sua capacidade produtiva e a redução dos riscos de acidente. Dentre essas modificações, destaca-se o dispositivo protetor montado no orifício de alimentação da máquina (**Figura 5**), desenvolvido pela Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO), com a finalidade de evitar que a mão do operador alcance o rotor desfibrador (ROBIN e XAVIER FILHO, 1984).

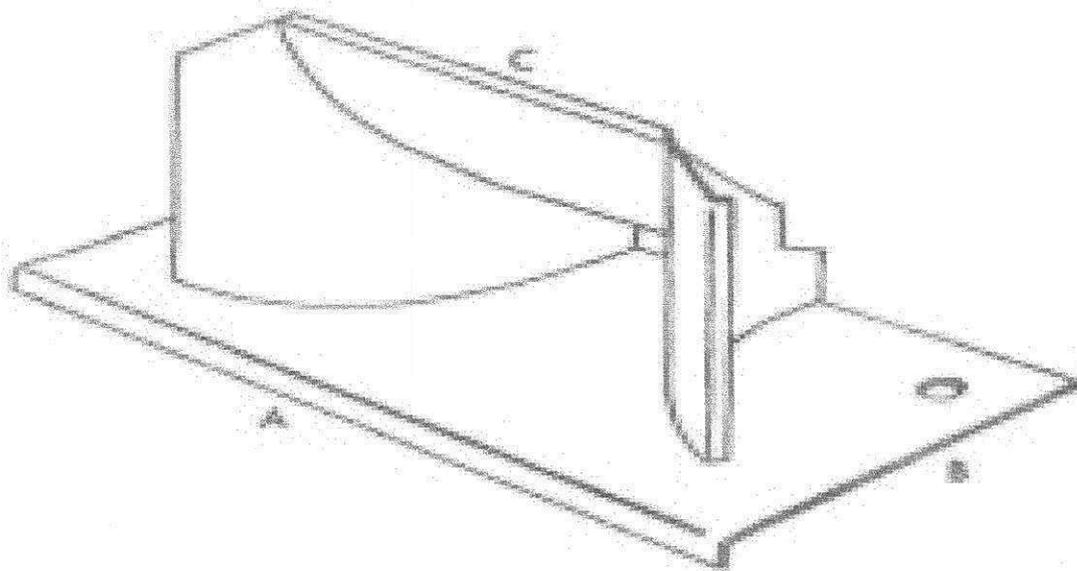


Foto: Xavier Filho

Figura 5. Dispositivo de proteção frontal para a Máquina Paraibana

Após o término da operação diária de desfibramento, a fibra obtida é transportada em carrinho de mão ou no dorso de animais, para tanques com água limpa (**Figura 6**), onde

deverá ser imersa durante oito a doze horas. Isto é necessário para a eliminação dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofílica, que ficam aderidos a fibra de sisal. Não é aconselhada a utilização de água salobra para a lavagem da fibra do sisal, em virtude da sua alta higroscopicidade, que poderá afetar a qualidade da fibra depois de secas.



Figura 6. Lavagem das fibras de Sisal.

Após a lavagem, as fibras deverão secar ao sol por 8 a 10 horas. Se este período for ultrapassado, os raios solares poderão depreciar a fibra, causando amarelecimento. O local de secagem poderá ser uma área onde as fibras não absorvam impurezas, como em varais ou estaleiros, feitos com fio de arame galvanizado, ou em área cimentada devidamente limpa. Depois de secas, as fibras são arrumadas em pequenos feixes, denominados de manocas, amarradas pela parte mais espessa e armazenadas em depósito sem serem dobradas.

No Nordeste brasileiro, grande parte dos produtores de sisal comercializa seu produto na forma bruta, sem realizar qualquer processo de melhoria do produto, como o batimento ou penteamento. Esta operação visa remover o pó e o tecido parenquimatoso

aderido aos feixes fibrosos, além de retirar as fibras de pequeno comprimento, o que resulta em um produto limpo, brilhoso, macio e valorizado.

As bateadeiras são máquinas de funcionamento semelhante às desfibradoras, e são dotadas de um tambor rotativo de aproximadamente 0,60m de diâmetro e seis lâminas planas de 5cm de largura, protegidas por uma tampa metálica, que gira no sentido inverso ao das desfibradoras. A velocidade de giro do tambor está em torno de 200 rpm. Nesta operação, geralmente, são perdidas entre 8 a 10% do peso original da fibra.

O pó, que é um resíduo do batimento, pode ser utilizado como adubo orgânico e até mesmo em misturas para ração animal, enquanto que a bucha pode ser empregada para obtenção de celulose, no revestimento interno de estofados e como componente de polímeros para uso doméstico e até mesmo para a indústria automobilística

Após o batimento, as fibras são selecionadas de acordo com os padrões de classificação vigentes no Brasil, segundo Portarias do Ministério de Agricultura e Abastecimento, tendo como base a classe (comprimento) e o tipo (qualidade) da fibra.

Depois de classificada, a fibra é acondicionada em fardos para o seu transporte até a indústria de fiação. Os fardos são preparados em prensas mecânicas ou hidráulicas, dotadas de caixas de dimensões médias de 150x50x70cm, podendo variar entre 200 e 250kg de peso. O fardo deve ser envolto por uma faixa de tecido contendo as seguintes informações, em caracteres perfeitamente legíveis: produto, safra, lote, número do fardo, nome da prensa, classe, tipo, peso bruto, local de prensagem, cidade, unidade federativa e data da prensagem.

O armazenamento é uma operação simples, desde que sejam observados os seguintes pontos:

- Os fardos deverão ser colocados em duas pilhas cruzadas, em cada lado do corredor central do armazém. A altura da pilha deverá ter no máximo 2,4m, de modo a facilitar a ventilação dos fardos;
- O armazém deverá oferecer segurança contra incêndio, ter boa ventilação e possuir número suficiente de portas para o escoamento do produto armazenado;
- Deverá ser rigorosamente proibido fumar nos armazéns e, por medida de precaução, estes deverão possuir de sistemas de combate a incêndios.

2.1.3 Estrutura e Propriedades da Fibra

As Fibras de Sisal são obtidas das folhas da planta, por esta razão são geralmente duras, resistentes, e de textura mais rugosa do que as fibras de caule.

A estrutura das células da fibra vegetal é constituída por células individuais que, por sua vez, compõem-se de camadas de diferentes espessuras formadas por microfibrilas (Figura7).

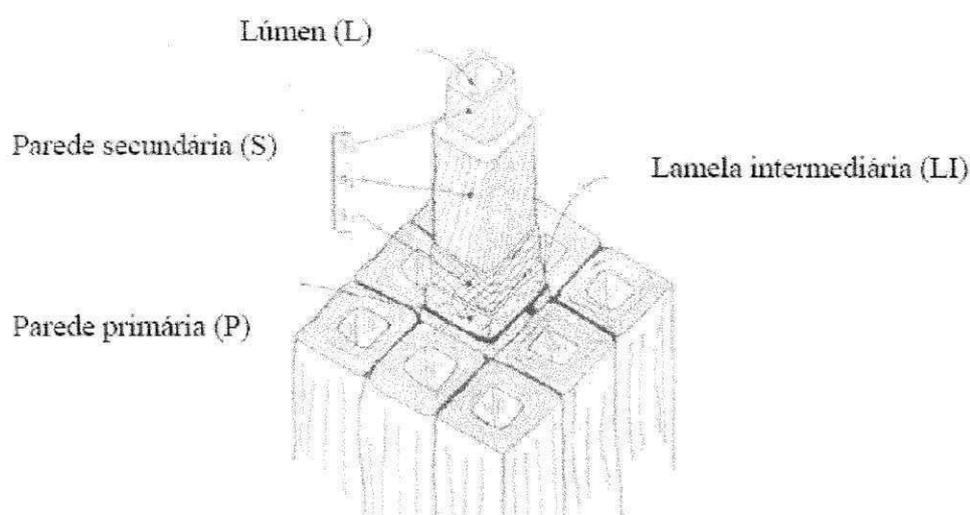


Figura 7. Estrutura celular da fibra vegetal (PERSON, 2000)

As diversas células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pelas lamelas intercelulares (lamela média). A região central da fibra também pode apresentar cavidade que se chama lacuna (GRAM, 1988)

A fibras são constituídas por cerca de 99% de matéria orgânica, onde são formada basicamente por celulose hemicelulose e lignina, e o restante de matéria inorgânica.

As fibras de Sisal são constituídas por cerca de 13% de hemicelulose, 10% de lignina, 2% de extrativos, 1% de cinzas, 52% de celulose (MOTTA, 2005).

A celulose é formada a partir de unidades de glicose ($C_6H_{12}O_6$) que tem suas extremidades ligadas com a eliminação de uma molécula de água para cada ligação química formada entre unidades de moléculas vizinhas. A unidade que se repete é chamada unidade

celobiose. Dessa forma a celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n é conceituada como polissacarídeo que se apresenta como polímero bem definido como uma estrutura de cadeia linear uniforme, constituindo única e exclusivamente $C_6H_{12}O_5$, com ligações 1,4. O número de unidades de glicose em uma molécula de celulose refere-se ao grau de polimerização, que varia principalmente em função da matéria prima, método de isolamento, purificação e sua determinação. É comum considerar como oscilando entre 5.000 e 10.000 (BRITO; BARRICHELO, 1985)

A fração hemicelulose das plantas consiste de uma coleção de polímeros, polissacarídeos com grau de cristalinidades mais baixo que a celulose e contém principalmente açúcares. A hemicelulose também contém grupos substituídos acetil e metil e é caracterizado pela estrutura como muitas ramificações resultando em uma cadeia linear (BRITO; BARRICHELO, 1985).

A estrutura e ligações químicas da lignina ainda são incertas. Sabe-se que é um polímero tridimensional constituído principalmente de unidades de fenilpropano, grupos metoxi e outros grupos quimicamente ativos, que prescrevem uma rede altamente interligada e completamente amorfa. Devido a estas ligações transversais entre cadeias, a lignina é relativamente estável e hidrofóbica, comparada a hemicelulose e celulose (MORSING, 2000). Está presente entre as fibras individuais (lamela) e dentro das paredes das células servindo com agentes ligante e dando rigidez à estrutura. Sua estrutura ramificada e interligada faz com que seja quase impossível extraí-la sem degradar. (STROMDHL, 2000). No entanto, as substâncias que a constituem são facilmente destruídas em ambiente alcalino, ocorrendo a sua lixiviação. A lignina começa a amolecer a 70-80°C e torna-se líquida a 120°C (GRAM, 1983).

Existem vários fatores que influenciam as propriedades mecânicas, como a umidade que com seu aumento reduz a resistência e o módulo de elasticidade. Por estarmos tratando de um material natural, as condições do meio ambiente e as características do solo onde crescem as plantas variam suas propriedades mecânicas. A idade das plantas de onde as fibras são extraídas também influenciam as propriedades mecânicas.

Ainda, mudanças no pH e temperatura ambiente tem efeitos nas propriedades mecânicas da fibra. Os efeitos imediatos da elevação da temperatura são o aumento da plasticidade da lignina e o aumento das dimensões, que reduz o contato intermolecular

sendo portanto, reversível. Em geral, a resistência é maior à temperaturas mais baixas e menor a temperaturas mais elevadas. Entretanto, esta relação pode ser influenciada pelo teor de umidade e duração da temperatura, que pode induzir a efeitos permanentes (WINANDY; ROWEL, 1984)

A tabela 1 mostra algumas propriedades mecânicas e físicas da fibra de Sisal.

Tabela 1. Propriedades Mecânicas e físicas da fibra de sisal.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro (µm)
Guimarães (1987)	14,9	176	29,2	-	-
Chand et al (1988)	9,4-22	530-640	3-7	1450	50-300
Tolêdo Filho (1997)	10,94-26,70	227,8-230	2,08-4,18	750-1070	80-300
Beaudoin (1990)	13-26	1000-2000	3-5	-	-

2.2 Compósito Cimento-celulose.

Em função do seu comprimento (<5mm), a celulose é utilizada principalmente no reforço de pastas com ou sem adições e, em todo mundo, seu uso é combinado ou não a fibras plásticas. Com este compósito é realizada a produção de componentes esbeltos como telhas, painéis, caixas d'água e tubos. Estima-se que a produção anual é de cerca de 3 milhões de toneladas do material em todo o mundo (HEINRICKS *et al*, 2000). Este valor apresenta um acréscimo de mais de 100% se comparado a dados anteriores, caso dos levantados por RONGXI (1995), que quantificou a produção, naquele ano, em 1,4 milhão de toneladas. Grande parte dessa produção se concentra nos EUA, Europa, Ásia e Oceania. A Austrália, seguida da Nova Zelândia, foi o primeiro país a produzir comercialmente fibrocimentos sem o uso de amianto (COUTTS, 1992 e RONGXI, 1995).

Nos estudos reportados ao longo do tempo, o cimento Portland tem sido o material mais empregado na produção de matrizes para a construção civil. Apesar da alta alcalinidade apresentada pelos seus produtos hidratados, inúmeras pesquisas têm avaliado compósitos produzidos pela sua mistura com fibras ligno-celulósicas. Diversas técnicas (GUIMARÃES, 1990; GRAM, 1988) têm sido empregadas buscando aperfeiçoar a durabilidade dos materiais reforçados com estas fibras, destacando os processos de proteção das fibras, tais como a sua impregnação com diversas substâncias, sua mineralização, ou a utilização de revestimentos como barreira física. A eficiência dessas técnicas é contestada por alguns pesquisadores (AGOPYAN, 1991).

Com o intuito de aumentar a durabilidade das fibras deve-se diminuir a alcalinidade da matriz, para que não comprometa o desempenho da fibra como reforço ao longo do tempo.

A agressividade da matriz pode ser explicada pela presença de produtos alcalinos na água do poro das matrizes hidratadas. O principal responsável pela alta alcalinidade é a portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], liberada em grande quantidade quando da hidratação do cimento Portland. Contribui, ainda, a presença de álcalis solúveis como o óxido de potássio [K_2O] e o de sódio [Na_2O]. Soluções como a carbonatação acelerada da matriz têm sido avaliadas como forma de redução de alcalinidade. (SILVA.A.C, 2002)

2.3 Influência da Microestrutura no comportamento do compósito.

O comportamento mecânico adequado dos compósitos de fibras de celulose depende de alguns fatores considerados importantes na sua estrutura interna e estão relacionados à capacidade do compósito de absorver os esforços aos quais foi submetido, ou seja, da sua tenacidade e da manutenção da integridade das características de sua microestrutura. Essas propriedades dependem do tipo e das características da matriz, do tipo e da rigidez da fibra empregada, e das características na interação entre esses dois constituintes (SILVA.A.C, 2002).

Matrizes compostas por matérias-primas distintas apresentam composições próprias em seus produtos hidratados. A composição desses produtos hidratados ajudará a definir as

propriedades físicas e mecânicas do compósito. A presença de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) em excesso, por exemplo, pode levar a uma concentração desses cristais nas interfaces das fibras com a matriz, produzindo uma aderência deficiente em função do aumento da porosidade do sistema. Essa concentração também contribui para a diminuição na durabilidade da fibra, em contato direto com o material alcalino. (SILVA.A.C, 2002)

SAVASTANO Jr. (2000), ao avaliar a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do compósito, concluiu que, ao se empregar fibras vegetais, o mecanismo de arrancamento da fibra do interior da matriz é mais importante que a ruptura da fibra no ganho de tenacidade, ou seja, compósitos reforçados com fibras de baixo módulo tendem a se romper devido ao arrancamento das fibras do interior da matriz e não em função da sua ruptura.

A Figura 8 mostra a representação de uma fissura atravessando um compósito reforçado com fibras, onde: o número (1) representa uma fibra rompida; o (2) representa uma fibra arrancada; enquanto o (3) representa uma fibra íntegra, se deformando e atravessando a fissura. O número (2) exemplifica um caso onde a fibra escorrega da matriz, caso típico citado anteriormente. No caso apresentado da fibra (3), esta se apresenta íntegra, absorvendo parcialmente a energia a qual o material está submetido. Deve-se atentar para o caso de descolamento apresentado na interface (COUTTS, 1986), que pode ocorrer pela movimentação das fibras devido à variação de umidade. (SILVA.A.C, 2002)

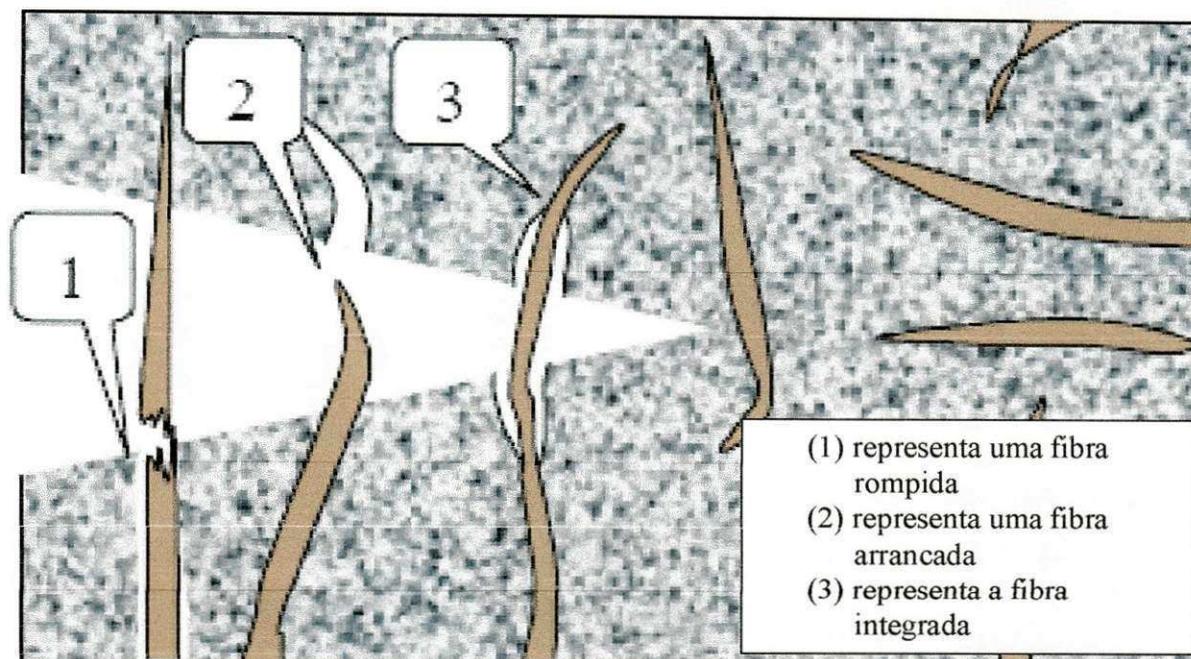


Figura 8. Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras (a partir de COUTTS, 1986)

Observa-se que a estrutura interna dos compósitos e sua interação, que, é função da aderência entre fibra e matriz, influenciam no seu desempenho e na durabilidade. . Considerando fibras de mesma natureza, a aderência é influenciada, em grande parte, pelas características da zona de transição. A maior aderência pode ser conseguida através da melhora do desempenho da zona de transição entre as fibras e a matriz, fazendo com que as duas fases trabalhem solidariamente. Alguns fatores podem contribuir para o melhor desempenho da zona de transição, destacando-se entre eles a morfologia e rugosidade das fibras, sua absorção e porosidade.

SAVASTANO Jr. (2000) destaca que, no caso específico das fibras vegetais, há um descolamento da interface fibra-matriz, ocorrido pela variação dimensional gerada pela perda de água absorvida durante a moldagem. Isto favorece uma concentração de portlandita na zona de transição.

Como o arrancamento da fibra é considerado fator preponderante na ruptura do compósito, o comprimento de ancoragem da fibra na matriz é outro fator que também deverá ser levado em consideração. Essa ancoragem pode ser otimizada empregando-se

fibras de superfície rugosa, com maiores relações de aspecto e isentas de impurezas na superfície. A presença de fibras lisas pode diminuir a aderência.

2.4 Tratamentos das fibras vegetais com o objetivo de aumentar a adesão fibra/matriz e redução da absorção d'água.

As propriedades das fibras podem ser melhoradas através de tratamentos superficiais e modificações dos compostos constituintes propriamente ditos. Modificações das superfícies alteram propriedades como aderência e absorção de umidade, modificações dos constituintes alteram propriedades de equilíbrio, tais como instabilidade dimensional com a variação da umidade. Ainda a densificação das fibras pode ser obtida através da impregnação e/ou tratamento termomecânico.(MOTTA. C. A, 2005)

Os principais métodos propostos para aumentar a vida útil das fibras e melhorar a interface de adesão em compósitos cimentícios são: a modificação química da lignocelulose, com o uso de anidrido e epóxi; impregnação de polímeros sobre a lignocelulose; e o uso de agentes acoplantes, como os silanos. O tratamento das fibras com estes métodos disponíveis aumentam a compatibilidade entre a lignocelulose e a matriz. De alguma forma estes tratamentos promovem modificações que permitem menores variações físicas e biológicas das fibras (SILVA, 2005).

As modificações químicas aperfeiçoam a interface fibra/matriz. Porém, o desenvolvimento de uma teoria definitiva para o mecanismo de acoplamento através de substâncias químicas em compósitos é um problema complexo. Geralmente, os agentes de químicos acoplantes são moléculas que possuem duas funções. A primeira função é reagir com grupos de hidroxila da celulose e o segundo é reagir com grupos funcionais da matriz (LI *et al.*, 2007).

O tratamento das fibras é conduzido para melhorar as condições de adesão entre as fibras e a matriz ou ainda para alterar as características das fibras. Como resultado destes processos tem se obtido um aumento da rugosidade e da superfície exposta das fibras, remoção da lignina externa das fibras, ou o aumento da cristalinidade dos polímeros naturais das fibras (CARVALHO, 2005).

Ao estudar diferentes métodos de modificação superficial das fibras de sisal Rong et al., (2001), concluiu que as fibras podem ser modificadas efetivamente por substância química e tratamentos físicos. Métodos químicos normalmente provocam uma superfície ativa introduzindo algum grupo reativo, e proporciona as fibras extensibilidade mais alta pela remoção parcial da lignina e hemicelulose. Em contraste, o tratamento térmico pode resultar em maior dureza de fibra devido ao aumento da cristalinidade da celulose.

Para desenvolver compósitos que apresentem boas propriedades físico-mecânicas é necessário melhorar a interface entre a matriz e o material de lignoceluloso. Existem vários métodos que podem promover melhor adesão interfacial como a esterificação, tratamento com agentes acoplantes (silanos), copolimerização, uso de compatibilizadores e tratamento com outras substâncias químicas. Estes métodos normalmente são baseados no uso de reagentes que contenham grupos funcionais capazes de reagir e formarem ligações químicas com os grupos hidroxila do material lignoceluloso, enquanto mantém uma boa compatibilidade com a matriz. A compatibilização interfacial melhora a transferência de tensão entre os dois componentes e desta forma, também melhoram as propriedades mecânicas e físicas das combinações produzidas. Por outro lado, o uso de tratamentos de superfície tem a desvantagem de aumentar o custo do produto final (TSERKI *et al.*, 2005).

Uma outra observação importante diz respeito à influência as propriedades do compósito em decorrência da sua interface fibra/matriz. As propriedades mecânicas de um compósito fibra/matriz não dependem somente das propriedades de seus componentes, mas também das propriedades da região ao redor da fibra conhecida como interfase. A interfase é a região de transferência de tensão da matriz para a fibra e a caracterização das suas propriedades permite um maior entendimento do desempenho desta combinação (FRANCO e GONZÁLES, 2005).

Os tratamentos químicos são baseados no uso de reagentes, que contêm grupos funcionais que são capazes de reagir e formar ligações químicas com os grupos hidroxila do material lignoceluloso, enquanto mantém boa compatibilidade com a matriz. A compatibilização interfacial melhora a transferência de tensão entre os dois componentes e conduz à melhoria de propriedades mecânicas e físicas das combinações produzidas.

A efetividade de um tratamento à repelência d'água pode ser definido como a habilidade de um tratamento para prevenir ou controlar a taxa de captação de água líquida (ROWELL e BANKS, 1985).

2.4.1 Acetilação.

Um dos tratamentos químicos estudados na literatura para melhorar o desempenho das fibras vegetais em compósitos é a acetilação, que envolve reações com anidrido acético. As reações acontecem com grupos hidroxila acessíveis nos polímeros das paredes das células e dependem da reatividade destes grupos e da taxa de difusão do reagente na matriz da fibra (HILL *et al.*, 1998). Segundo Rowell (1994), os polímeros das paredes das células vegetais apresentam reatividade segundo a seguinte ordem: lignina > hemicelulose > celulose. Os grupos hidroxilas são substituídos por grupo acetil. Durante a reação dos compostos da parede celular com o anidrido acético é formado ácido acético como sub produto. A acetilação causa inchamento permanente das paredes das células, acompanhado do ganho de massa devido ao maior peso molecular dos grupos acetil comparados aos grupos hidroxilas (SANDER *et al.*, 2003)

Ao estudar os efeitos da acetilação sobre a interface fibra-matriz Khalil *et al.* (2001), constatou em várias matrizes que a modificação da superfície pelo tratamento melhora a compatibilidade fibra-matriz e une as suas características criando superfícies de energia compatíveis e formando ligações químicas, físicas e mecânicas. Ainda observou que a acetilação modifica a morfologia da superfície das fibras.

A reação de acetilação envolve a geração de ácido acético como um subproduto que deve ser removido da lignocelulose antes da fibra ser usada. Modificação química com anidrido acético ($\text{CH}_3\text{-C(=O)-O-C(=O)-CH}_3$), substitui os polímeros do grupo hidroxil nas paredes das células pelo grupo acetil, modificando as propriedades destes polímeros de forma que eles se tornam hidrofóbicos. Além disso, tal modificação causa o aumento da parede das células proporcionalmente à extensão da substituição, ou ganho percentual de peso, e torna o material menos suscetível a decaência biológica. Esta reação introduz um grupo funcional acetila (CH_3COO) em uma combinação orgânica e que se processa como

um método de esterificação que causa plastilização da celulose das fibras (HILL *et al.*, 1998).

A equação abaixo representa a reação do anidrido acético com fibra vegetal.



Há muito tempo estudos utilizando o tratamento por acetilação foram desenvolvidos para madeira, porém, seu emprego em fibras vegetais ainda é incipiente. Hill *et al.* publicou um estudo onde acetilação era aplicada na melhoria das propriedades das fibras vegetais longas e obteve resultados como melhorias de propriedades mecânicas e em particular na resistência a degradação microbiana. Também relatou que a proteção biológica advém da combinação da redução do conteúdo de umidade de equilíbrio do material, e da modificação química dos polímeros da parede das células, de forma que eles não são mais reconhecidos pelas enzimas associadas aos organismos de degradação.

Ao avaliar os efeitos da acetilação sobre as propriedades mecânicas, hidrofobicidade e estabilidade dimensional em *Pinus sylvestris*, Ramsden *et al.* (1997), concluiu que o tratamento promoveu uma melhoria nas propriedades de repelência a água; também sugeriu que o processo de acetilação produz um módulo elástico mais alto e que esta mudança é irreversível, ainda que a acetilação que usa anidrido acético em xileno apresenta ótimas condições de reação.

A Figura 9 mostra o conteúdo de acetilas atingido em função do incremento do tempo de reação de acetilação.

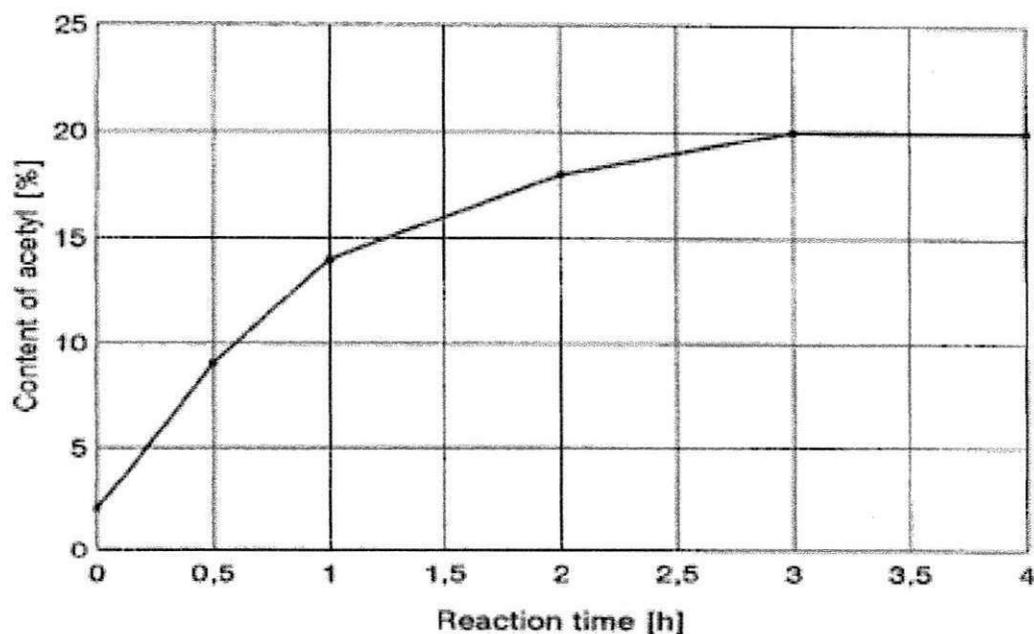


Figura 9. Aumento do conteúdo de acetilas com o incremento do tempo de reação no tratamento de acetilação (BLEDZKI e GASSAN, 1999)

2.4.2 Tratamento Térmico

O tratamento térmico na madeira tem efeito na composição das suas substâncias químicas e por isso também influenciam as suas propriedades. Este efeito é facilmente observado pela maior durabilidade, redução da higroscopicidade e estabilidade dimensional da madeira tratada termicamente (JAMSA e VITANIEMI, 2002).

Existe uma relação entre durabilidade e propriedades mecânicas. Tratamentos com altas temperaturas podem levar a uma maior durabilidade, mas, reduzem algumas propriedades mecânicas como a tensão de ruptura. Sabe-se que o tratamento da madeira a 230-240°C, a torna mais durável, mas, pode diminuir em até 40% o módulo de ruptura. A 210°C, o material, dependendo da espécie, pode ser menos frágil com relação às propriedades mecânicas próximo dos valores originais, mas, quanto a durabilidade esta só seria melhorada momentaneamente. Isto significa que o tratamento térmico deve ser ajustado de acordo com a taxa de aquecimento, duração e temperatura máxima para alcançar os objetivos de acordo com a aplicação (VERMOIS, 2002).

A lignina comporta-se como um polímero, com o aquecimento ela derrete e/ou amolece; as fibras vegetais quando aquecidas em altas temperaturas exudam lignina derretida e ao esfriar esta polimeriza-se ao redor da fibra, este fenômeno é chamado efeito melting.

Sabe-se que acima de 120°C a lignina tende a derreter-se; quando as fibras são aquecidas acima desta temperatura e em seguida resfriadas a lignina volta a cristalizar-se em torno da fibra causando o efeito “melting”.

Rowell e Banks (1985), ao citar o trabalho de Stamm (1956), acrescentaram que o tratamento térmico causa a degradação do componente hemicelulose, e que é este mecanismo que confere uma redução na higroscopicidade. E ainda, a hemicelulose é o componente mais suscetível à degradação térmica, e é também o mais higroscópico dos polímeros da parede das células; com a polimerização dos produtos de degradação pelo calor produz um polímero insolúvel em água. Outro aspecto a considerar no tratamento térmico é o amolecimento da matriz nas paredes das células, principalmente a lignina, permitindo seu rearranjo. Rowell e Banks (1985) também observaram que a higroscopicidade da madeira reduz significativamente quando a esta é aplicado um tratamento térmico. O aquecimento da madeira na ausência de oxigênio a temperaturas até 350°C por curto período de tempo resulta em reduções de até 40% de absorção d'água. Também sugerem que o tratamento térmico pode ser realizado aquecendo a madeira a temperaturas mais baixas por períodos mais longos de tempo.

Rong *et al.* (2001), ao estudar o efeito do tratamento das fibras sobre as suas propriedades mecânicas observou que o tratamento térmico apresentou um aumento mais significativo na resistência à tração devido à melhora na cristalinidade da celulose.

A melhora na absorção d'água e estabilidade dimensional (ASE), de espécimes de madeiras tratadas com impregnação de óleo e secagem sob diferentes temperaturas e com umidade ambiente de 85% pode ser observada na Figura 10.

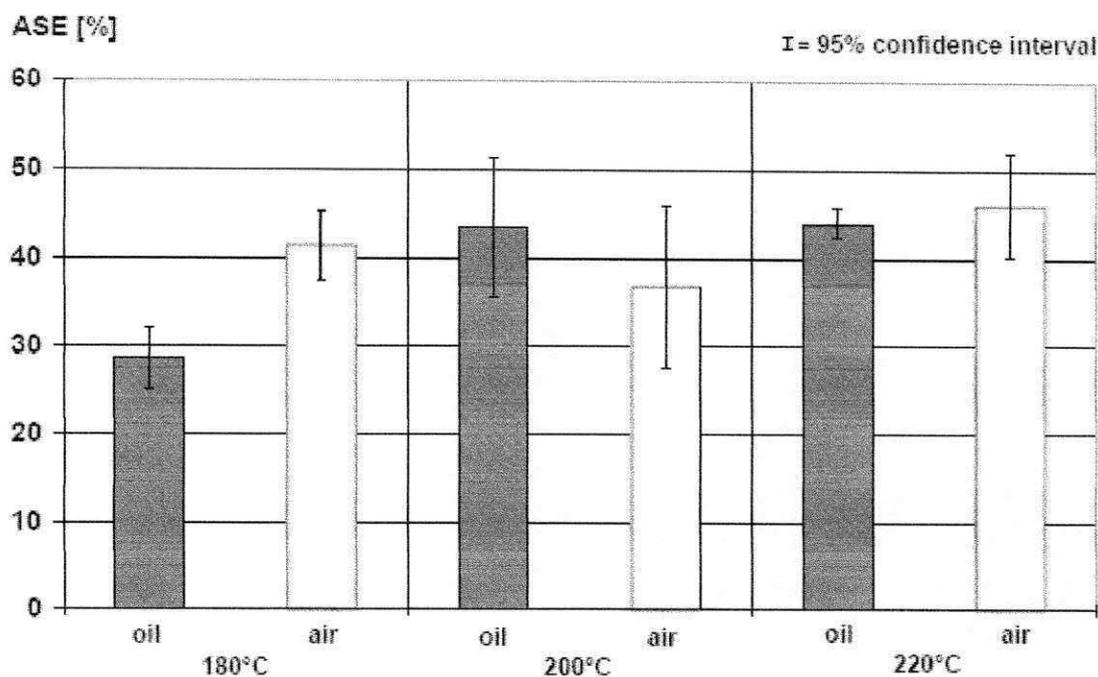


Figura 10. Absorção e estabilidade dimensional em madeira tratada com óleo e secagem sob diferentes temperaturas, em umidade relativa de 85% (Rapp e Sailer, 2001)

2.4.3 Impregnação com Ácido Pirolenhoso

A literatura não apresenta referências de impregnação de fibras com ácido pirolenhoso; este tratamento é aplicado como preservante em madeiras, por isto, este estudo é inovador e traz consigo inúmeros questionamentos.

O alcatrão de madeira é o mais antigo dos produtos preservadores conhecidos na história do homem, e é obtido como um subproduto da destilação da madeira. A decomposição térmica da madeira inicia-se em temperaturas ligeiramente acima de 100°C. Até 150-170°C, tem-se a eliminação da água presente na madeira; a liberação de gases (CO e CO₂) é o início da destilação de ácido acético, metanol e alcatrão que ocorre entre 170 e 270°C. Entre 270 e 280°C ocorrem reações exotérmicas cuja energia liberada corresponde de 5,7 a 7,0% do calor de combustão da madeira. Acima dessa temperatura, o processo de carbonização evolui sem a necessidade do fornecimento de calor, com a liberação de gases e de vapores condensáveis. Parte dos gases liberados durante a carbonização da madeira

podem ser condensados dando origem ao licor pirolenhoso bruto, que é composto basicamente de água, ácido acético e alcatrão dissolvido e em suspensão. Por decantação separa-se o alcatrão insolúvel com um rendimento de 4% a 20% em relação ao peso inicial da madeira seca. Devido ao alto teor de fenóis, a destilação do alcatrão decantado tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. O alcatrão pode ser dividido em três frações: "óleos leves", "óleos pesados" e piche. A fração de "óleos pesados", normalmente com ponto de ebulição acima de 120°C, é utilizada para a obtenção do creosoto (JNAKOWSSKY, 1986).

CAPÍTULO III

3.0 METODOLOGIA

3.1 Ensaio nas Fibras

Este capítulo apresenta a visão geral do trabalho experimental adotado e a descrição dos métodos de ensaios utilizados no estudo. O planejamento experimental permite um arranjo ordenado das etapas para obtenção de dados e a sua análise. Os métodos de ensaios utilizados neste estudo objetivam a obtenção de resultados que possam caracterizar a influência dos tratamentos das fibras vegetais basicamente quanto as suas propriedades físico-mecânicas.

3.2 Fibras Vegetais

Fibras de Sisal (*Agave sisalana*), foram fornecidas pela EMBRAPA Algodão, produzidas e beneficiadas no município de Pocinhos – PB.

Segundo Melo Filho (2005) a exploração do sisal no Brasil concentra-se no Nordeste, geralmente em áreas de pequenos produtores, cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis com escassa ou nenhuma alternativa para a exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. A Bahia e a Paraíba são os principais

produtores de sisal. Apesar da importância, a cultura do sisal é explorada com baixo índice de modernização e capitalização. O Brasil exporta cerca de 62% da produção de sisal, em forma de fibras e manufaturados. O sisal é uma planta de fácil cultivo e de curto tempo de renovação, produzindo, em média, 200 folhas. Cada folha produz uma média de 1000 fibras, o que corresponde a apenas 4% do volume da folha.

3.3 Tratamentos das Fibras

Foi realizado tratamentos na fibra de acetilação, tratamentos térmico e impregnação com licor Pirolenhoso, e ensaios como o de absorção e ensaios mecânicos.

Previamente aos tratamentos as fibras são cortadas com comprimentos de 20cm, para que posteriormente possam ser aplicadas nos corpos-de-prova dos ensaios de tração direta.

Os tratamentos realizados foram baseados no trabalho de Barreto – Acetilação de Fibra de Bucha, Escola Química – UFRJ, com modificações feitas pelo Professor Gilmar Trindade do departamento de engenharia química da Universidade Federal de Campina Grande.

- **Acetilação**

As amostras de fibras condicionadas em um reator de condensação, sob banho termostático com solução de anidrido acético e ácido acético, na proporção de 1:1, e como catalisador utilizou-se um ácido forte como ácido clorídrico, na proporção de aproximadamente 10 gotas/200 ml. Os tempos de reação (contato entre fibras e solução) foram de 60, 120 e 180 minutos. As temperaturas de reação de 100, 110 e 120°C. Decorrido o tempo de reação as amostras são lavadas inicialmente em água corrente e posteriormente em destilada para remoção do produto; para uma melhor avaliação o pH da água da última lavagem deve ser determinado e, este deve apresentar-se neutro. Em seguida foram levadas à estufa a 60°C por 24 horas, para secagem, e resfriadas em dessecador.

- **Aquecimento**

As amostras de fibras foram levadas à estufa a com circulação de ar a temperaturas de

130, 140 e 150°C por 2, 4 e 6 horas respectivamente. Decorrido o período de aquecimento as fibras foram resfriadas em dessecador.

- **Impregnação com Ácido Pirolenhoso**

1. Banho termostático

As amostras de fibras foram imersas em licor pirolenhoso sob banho termostático a 80°C por períodos de 60, 90 e 120min. Em seguida as amostras foram secas em estufa a 60°C por 24 horas e resfriadas em dessecador.

2. A vácuo

As amostras de fibras foram acondicionadas em câmara de vácuo e suspensas a o licor pirolenhoso. O vácuo foi aplicado por períodos de 60, 90 e 120min. Após este período é removido para que a solução entre em contato com as fibras, neste momento o líquido é absorvido pelas fibras preenchendo seus poros e lumens vazios. Em seguida as amostras foram secas em estufa a 60°C por 24 horas e resfriadas em dessecador.

3.4 Métodos de Ensaio das Fibras

- **Ensaio de Tração Direta**

Este ensaio visa a determinação do comportamento mecânico pela resistência à tração das fibras vegetais. Neste ensaio é levado em consideração o fator forma das fibras (relação comprimento/diâmetro). É possível através deste ensaio observar os efeitos dos tratamentos propostos nas propriedades mecânicas das fibras como a força, tensão, deformação e módulo de elasticidade suportados. A determinação é realizada em uma máquina de ensaios de tração, marca LLOYD e modelo LR10K, acoplada a uma célula de carga de 10kN.

Para que as garras da máquina possam segurar as fibras são montados corpos-de-prova com o auxílio de papel tipo cartolina nas dimensões de 15cm x 2,5cm (Figura 11), para o engate nas garras. As fibras com comprimento de 20cm são coladas a estes corpos-de-prova deixando um comprimento útil de ensaio de 10cm. No momento do ensaio o papel é cortado.

Foram utilizados 12 corpos-de-prova para cada tratamento de fibra. Para confecção dos resultados foram contabilizados apenas os 8 melhores ensaios. A seleção foi feita com base no ajuste dos dados experimentais aos calculados.

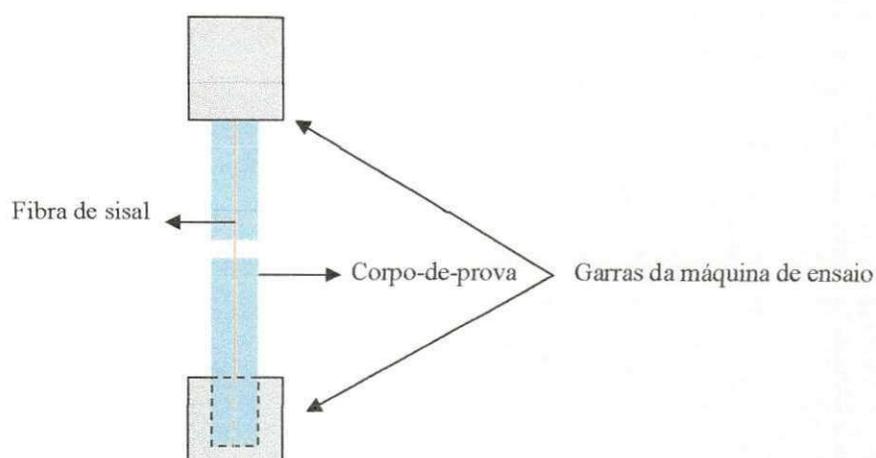


Figura 11. Esquema do corpo-de-prova montado para o ensaio de tração direta.

- **Absorção d'água**

Este ensaio visa a determinação da absorção d'água em fibras naturais e tratadas por imersão. As fibras foram previamente secas em estufa a 60°C por 24h e resfriadas em dessecador. As amostras de fibra foram pesadas e imersas em recipientes com água destilada, a verificação da capacidade de absorção foi realizada após 2, 24 e 48h do início do teste, neste momento as fibras foram retiradas d'água, secas superficialmente com papel absorvente e colocadas sob uma corrente de ar por 10 segundos; em seguida foram pesadas. Os resultados foram determinados de acordo com a equação.

$$P(\%) = [(P_1 - P_0) / P_0] \quad \text{eq (2)}$$

onde: P_0 é o peso seco inicial, P_1 é o peso após o período de imersão em água, P e a percentagem de água absorvida.

CÁPITULO IV

4.0 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1-Propriedades mecânicas

Para a análise das propriedades mecânicas foram encontrados através do teste de tração parâmetros médios de módulo de elasticidade (MOE), força, tensão e deformação, onde o módulo de elasticidade relaciona a força com sua deformação, a força equivale a carga que a fibra suporta até a ruptura, a deformação o quanto a fibra alongou antes de romper e tensão é a força por unidade de área. Lembrando que o papel da fibra no compósito é reduzir a propagação de uma possível fissura, quando a fibra é solicitada no compósito antes de sua ruptura ocorre uma deformação por esta razão estes parâmetros são de suma importância para a previsão do comportamento da fibra no compósito.

A maior preocupação com os tratamentos é não provocar redução nas propriedades mecânicas da fibra de sisal, por esta razão a análise aqui feita será sempre com relação aos resultados obtidos a fibra não tratada, pois deseja-se que os tratamentos não reduzam a capacidade mecânicas da fibra .

Foi observada uma mudança de comportamento entre fibras tratadas a diferentes temperaturas de reação. As fibras em geral apresentaram decréscimo na deformação máxima. Quanto às demais propriedades analisadas todos os valores obtidos à temperatura de reação $95\pm 5^{\circ}\text{C}$, foram superiores aqueles observados para as fibras não tratadas em 1,3 a 1,7% tendo uma maior discrepância a acetilada a 85°C (Figura 12).

Ao estudar a resistência à tração de diferentes fibras naturais tratadas com anidrido acético (acetilação) sob diferentes temperaturas de reação, Hill *et al.* 1998, observou que a resistência à tração das fibras tratadas a 100°C , obteve um aumento quando comparada com as fibras naturais; e que quando tratadas a 120°C houve uma redução, e esta diminuição da resistência à tração pode estar relacionada à degradação das fibras nesta temperatura. Também salientou que o aumento da resistência à tração observada nas fibras modificadas a mais baixa temperatura está relacionada a uma redução no conteúdo d'água de equilíbrio, como uma consequência do aumento da hidrofobicidade.

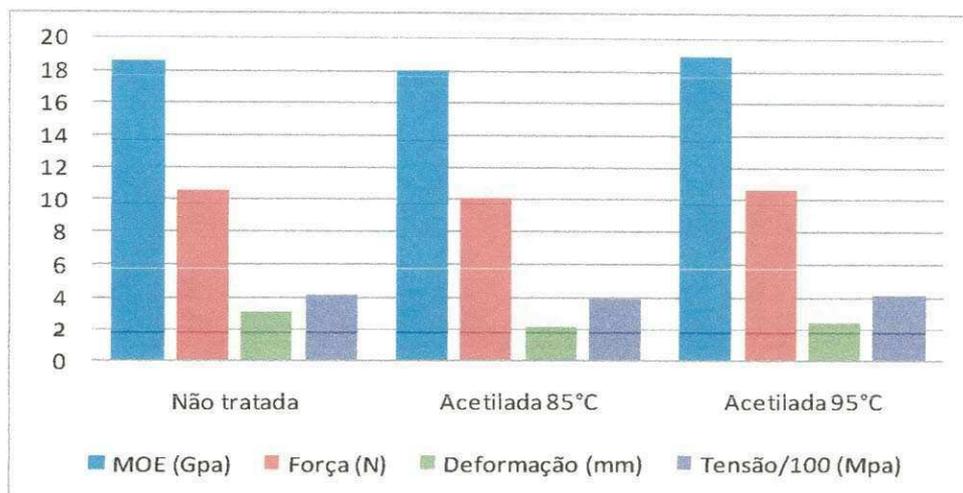


Figura 12- Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força ,tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e acetiladas em diferentes temperaturas de reação.

Quanto às propriedades mecânicas das fibras tratadas com aquecimento a 150°C, representadas na Figura 13, observou-se que os valores para tensão, força e deformação máximas das fibras aquecidas por 2h foram superiores as das fibras naturais. Por 4h de aquecimento somente a deformação foi superior; e apresentaram decréscimos de 17% para tensão e força, e 36% para MOE. Para as fibras aquecidas por 6h todas as propriedades mecânicas analisadas foram inferiores aquelas obtidas para as naturais; mais uma vez pode-se salientar a degradação térmica ocorridas as fibras neste tratamento.

Os bons resultados para os tempos de 2 e 4 horas deve-se ao derretimento da lignina e sua recristalização na superfície. No tempo de tratamento de 6 horas as propriedades foram inferiores a natural pelo fato de ter ocorrido perda de lignina, ocorrida pela evaporação ou pela consistência muito aquosa que esta obteve, facilitando sua saída da célula, ou pelo fato de a alta temperatura ter degradado a fibra reduzindo assim sua resistência.

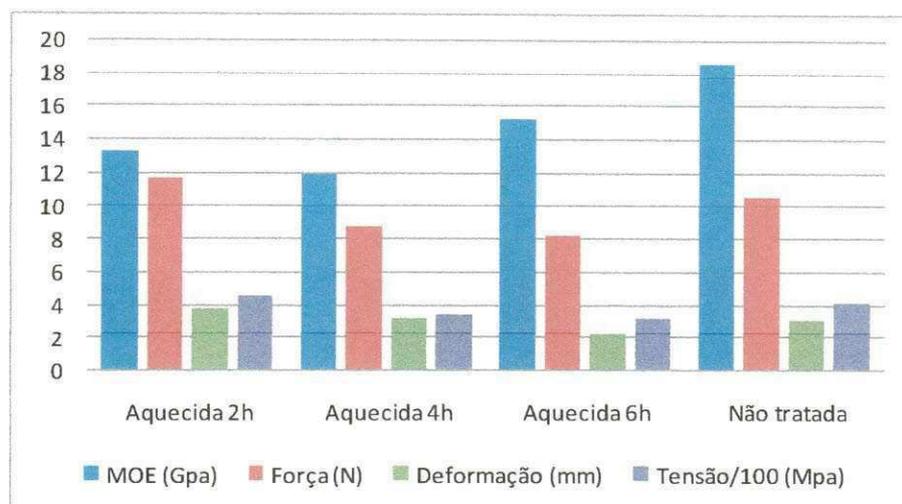


Figura 13- Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força, tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e aquecidas em diferentes temperaturas.

Todas as propriedades mecânicas das fibras de sisal impregnadas com licor pirolenhoso apresentaram reduções quando comparadas às não tratadas (Figura 14). Entre os tratamentos de impregnação estas propriedades apresentaram pequena variabilidade em seus valores; a maior diferença notada foi aos 60min, onde se registrou os menores valores do ensaio. Aos 90min a redução nos valores de tensão, deformação, força e MOE foram respectivamente de 13, 21, 13 e 14%, com relação às fibras não tratadas.

O fato de ter havido redução das propriedades mecânicas pode se dar a absorção de água que foi pouco reduzida, além de outros fatores que são desconhecidos por se tratar de um tratamento ainda pouco estudado e inovador.

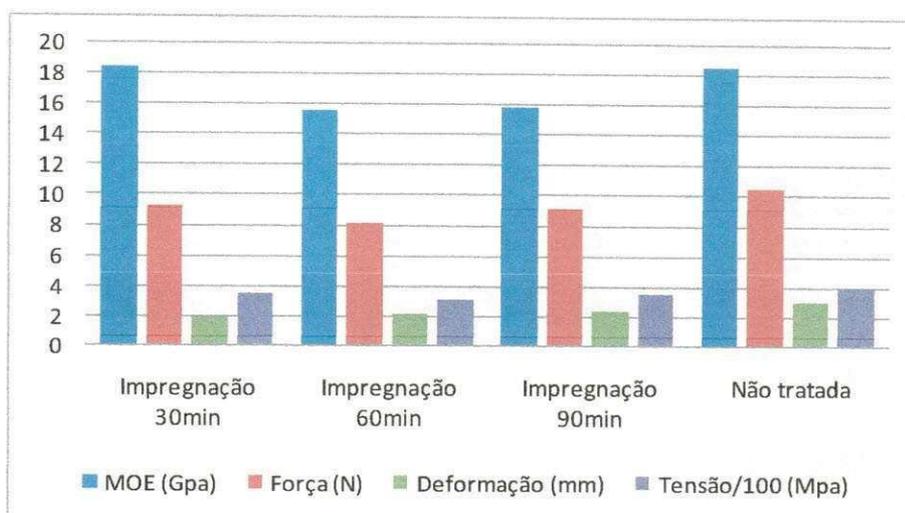


Figura 14- Valores médios de módulo de elasticidade (MOE), força, tensão e deformação das fibras de Sisal não tratadas e impregnadas em diferentes períodos de tempo.

4.2 Absorção d'água

As fibras de sisal não tratadas apresentaram um ganho de peso por absorção d'água de 94 e 98%, em 2 e 24h respectivamente. Quando comparados estes resultados aos obtidos para todos os tratamentos das fibras observou-se que estes apresentaram alguma eficiência na redução da absorção de umidade, pelo fato de haver modificações específicas proporcionadas pelo tratamento a fibra.

As fibras acetiladas a $85 \pm 5^\circ\text{C}$ apresentaram um ganho de peso por absorção de 59% do valor inicial em 24h; enquanto que, a $95 \pm 5^\circ\text{C}$ este ganho foi de 47%; uma diferença de 12% na absorção apenas pelo aumento da temperatura em $\pm 10^\circ\text{C}$. A causa da redução na absorção de umidade com o aumento na temperatura deve-se ao fato de que elevação na temperatura causa um efeito de catalisação nas reações químicas, onde os grupos hidroxilas são substituídos pelos de acetil, com essa aceleração no processo pode-se observar que as amostras acetiladas em temperaturas mais elevadas terão maior número dessa substituição provocando o aumento da hidrofobicidade nas células da fibra reduzindo assim a absorção de água.

Outra informação importante pode ser obtida entre os tempos de absorção; à

85±5°C o ganho de peso aumenta em 14% entre 2 e 24h, à 95±5°C este aumento é de 12% no mesmo período (Tabela 2).

Pode-se observar que o tratamento de acetilação promoveu uma redução na absorção de até 63% para uma temperatura de 95 °C num tempo de imersão de 2 horas e 52% num tempo de 24 h, o que foi um resultado muito favorável.

Na literatura não foi encontrado resultados de absorção das fibras de sisal acetiladas, para que fossem comparados com os resultados aqui discutidos, pois, na maioria das pesquisas o teste de absorção só são executados no compósito fibra/matriz e não na fibra em separado. Na pesquisa em que se baseia este trabalho foi preferível analisar o comportamento das matérias primas em separado para melhor entender o comportamento do compósito.

Observando os resultados dos tratamentos de acetilação pode-se perceber que o melhor resultado quanto a redução na absorção de água foi obtido a uma temperatura de 95° C.

Tabela 2- Percentual de absorção d'água das fibras de sisal não tratadas e acetiladas em diferentes temperaturas de reação.

Tratamento das fibras	Absorção d'água (%)	
	Tempo de absorção d'água (h)	
	2	24
Não tratada	94	98
Acetilada a 85°C	45	59
Acetilada a 95°C	35	47

Após o tratamento com aquecimento a 150°C, as fibras apresentaram um aspecto sedoso, coloração e cheiro adocicado forte, o que pode ser causado pelo derretimento da lignina. Com relação à absorção o melhor período de aquecimento observado, na Tabela 3, foi de 4h, com decréscimo de 26% em 24h. Com 2 e 6h de aquecimento a absorção teve uma redução de 20 e 14% respectivamente, com relação às fibras não tratadas. A tendência neste caso seria do tratamento por 6h apresentar resultado mais satisfatório, mas a explicação está na possível degradação térmica ocorrida nas fibras neste período de exposição. O contrário pode ser deduzido ao tratamento de 2h, onde possivelmente o efeito 'melting' não foi bem completado. Rowell e Banks, observaram que a higroscopicidade da madeira reduz significativamente quando a esta é aplicado um tratamento térmico. O

aquecimento da madeira na ausência de oxigênio a temperaturas até 350°C por curto período de tempo resulta em reduções de até 40% de absorção d'água. Também sugerem que o tratamento térmico pode ser realizado aquecendo a madeira a temperaturas mais baixas por períodos mais longos de tempo.

Após 4 horas de aquecimento houve um aumento na absorção de água, quando comparado a 2 e 4 horas o que deve-se ao fato de ter ocorrido uma perda de lignina, pois, sabe-se que no tratamento térmico a lignina é derretida migra para superfície e é recristalizada formando uma película impermeável em sua superfície, no tempo de 6 horas parte dessa lignina deve ter evaporado ou adquirido uma consistência muito aquosa saindo da célula e por esta razão a película impermeável não foi formada por completo deixando lacunas as quais ocorreu uma maior absorção de água.

Tabela 3- Percentual de absorção d'água das fibras de sisal não tratadas e aquecidas em diferentes períodos.

Tratamento das fibras	Absorção d'água (%)	
	Tempo de absorção d'água (h)	
	2	24
Não tratada	94	98
Aquecimento por 2h	73	78
Aquecimento por 4h	69	72
Aquecimento por 6h	72	84

A literatura não apresenta referências de impregnação de fibras com licor pirolenhoso, este tratamento é aplicado como preservante em madeiras. Os resultados da absorção das fibras impregnadas com licor pirolenhoso podem ser visualizados na Tabela 4. Após 2h de imersão em água apresentaram reduções de 21, 33 e 27% respectivamente para 30, 60 e 90min de impregnação, com relação às fibras não tratadas. Após 24 h essa diferença entre os tratamentos de impregnação diminuiu consideravelmente.

Os resultados obtidos foram favoráveis por ter conseguido reduzir a absorção, mas por ser um teste inovador, por não ser encontrado na literatura sua utilização em fibras,

acreditava-se que haveria uma melhor impermeabilização na fibra, por julgar-se que a impregnação com licor formava uma película protetora contra a infiltração de umidade ao redor de toda a superfície e também em seus lumens, logo quanto este tratamento deve ser feito novos estudos mais aprofundados ou até algumas modificações na forma de impregnação.

Tabela 4 - Percentual de absorção d'água das fibras de sisal não tratadas e impregnadas com licor Pirolenhoso em diferentes períodos de tempos.

Tratamento das fibras	Absorção d'água (%)	
	Tempo de absorção d'água (h)	
	2	24
Não tratada	94	98
Impregnação 30min	73	85
Impregnação 60min	61	77
Impregnação 90min	67	85

CAPÍTULO V

5.0 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de absorção e de propriedades mecânicas com fibras tratadas pelos métodos de acetilação, tratamento térmico e impregnação com licor Pirolenho, pode-se observar que quanto a absorção, em geral, foram satisfatórios, pois conseguiu-se reduzir a quantidade de umidade absorvida pela fibra, já quanto as propriedades mecânicas o tratamento de impregnação com licor pirolenhoso não apresentou resultados favoráveis, por motivos até então desconhecidos, por tratar-se de um tratamento inovador, ou seja, não foi encontrado na literatura nenhum tratamento utilizando o licor Pirolenhoso em fibras, apenas é utilizado na preservação de madeira, por esta razão optou-se verificar sua eficiência na redução da absorção de umidade em fibras de sisal para isso deve-se fazer um estudo mais aprofundado.

Ao analisar os dados para se ter uma conclusão qual o melhor tratamento deve-se ter a preocupação de lembrar qual o objetivo da pesquisa, a produção de compósitos de fibrocimento, o qual, na prática será produzido em grande escala, e terá um custo e um lucro a competir no mercado, por esta razão não deve-se observar apenas aspectos físicos e químicos mas também os economicamente viáveis.

Dos tratamentos estudados fazendo uma comparação no aspecto de absorção de água pode-se dizer que a acetilação foi o que apresentou o melhor resultado, pois, conseguiu a melhor redução, esta foi maior para uma temperatura de 95 ° C sendo favorável também a 85°C, deve-se perceber que no aspecto químico e físico o mais favorável seria a acetilação a 95°C mas com o pensamento econômico deve-se observar que se obteve resultado similar a 85°C que por precisar de menos energia terá um custo menor.

Quanto as propriedades mecânicas o tratamento térmico ultrapassou as expectativas que era apenas manter as propriedades mecânicas, neste tratamento houve um melhoramento destas.

Todos os resultados deste trabalho por serem preliminares e por tratar-se do estudo da fibra sem a matriz, não podem ser conclusivos, quanto qual o melhor tratamento para a fibra de sisal utilizada no fibrocimento, estes estudos serviram apenas para entender melhor

o comportamento da fibra como matéria prima, facilitando assim a compreensão de como funcionará ela acoplada ao compósito.

Para uma conclusão geral e definitiva, novos testes serão feitos com a fibra e em seguida iniciará os teste do compósito de fibrocimento, analisando os aspectos físicos, químicos e econômicos para a escolha da melhor forma para sua produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GATTO E. G., KAWABATA C. Y., SAVASTANO JÚNIOR H. Polpas kraft de *Agave sisalana* e de *Musa cavendishii* para reforço de fibrocimento alternativo. *Revista Engenharia Agrícola*, 23, n. 2, 2003, p. 211-220.
2. HILL C.A.S., KHALIL H.P.S.A., HALE M.D. A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products*, 8, 1998, p. 53-63.
3. LEAL, A. F. Utilização de resíduos das indústrias de cerâmicas e de calçados na elaboração de materiais e produtos à base de cimento portland reforçados com fibras de sisal. Tese de Doutorado. UFCG/Campina Grande. Campina Grande, 2004.
4. MOTTA L. C. Melhoria do desempenho de fibras de coco e sisal para reforço de matrizes cimentíceas através de tratamento termomecânico e impregnação de resinas. Tese de Doutorado. USP/Escola Politécnica. São Paulo, 2005.
5. RONG M.Z., ZHANG M.Q., LIU Y., YANG G.C., ZENG H.M. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61, 2001, p. 1437-1447.
6. ROWELL, R.M.; BANKS, W.B. Water repellency and dimensional stability of wood. Gen. Tech. Rep. FPL-50. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1985. 24 p.
7. SAVASTANO JÚNIOR H., PIMENTEL L. L. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4, n. 1, 2000, p. 103-110.
8. SILVA A. C. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2002.
9. BARRETO W. DANIEL. Acetilação da Fibra de Bucha. *Polímeros Ciência e Tecnologia*. Revista Associação Brasileira de Polímeros. Ano/Vol-15, pp 59-62, São Carlos, Brasil.
10. CARVALHO R. F. Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira. Tese de Doutorado. USP-São Carlos. São Carlos, 2005.
11. HILL C. A. S., KHALIL H. P. S. A., HALE M. D. A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products*, 8, p. 53-63. 1998.

12. SILVA A. C. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2002.

13 RAMSDEN M. J., BLAKE F. S. R., FEY N. J. The effect of acetylation on the mechanical properties, hydrophobicity, and dimensional stability of *Pinus sylvestris*. Wood Science and Technology, 31, p. 97-104. 1997.

