



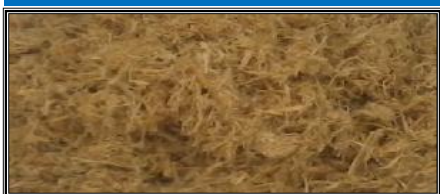
UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



TRABALHO DE LICENCIATURA



**Compósitos à base de cimento reforçados com
fibras de celulose**



Autor: Nhantumbo, Gilberto Jacinto

Maputo, Julho de 2014



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



TRABALHO DE LICENCIATURA

Compósitos à base de cimento reforçados com fibras de celulose

Autor: Nhantumbo, Gilberto Jacinto

Supervisor: Doutor Pedro Horácio Massinga Júnior

Co-supervisor: dr. Francisco Maleiane

Maputo, Julho de 2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Aos meus pais, em especial à minha mãe Elina Constâncio Miambo pelo amor, dedicação e pelo encorajamento concedidos durante a minha formação.

Aos meus filhos, António Gilberto Nhantumbo, Schodlina Gilberto Nhantumbo e à minha esposa, Idília João Zandamela pelo amparo, amor e confiança concedidos ao longo do curso.

Aos meus irmãos, dr. António, Júlio, André, Deolinda, Cineta, Inês, Margarida, Jacinto e às minhas sobrinhas, em especial à Maira Mboene, Emilia Mainga e à Leonora, pelo amor, ajuda e companheirismo.

Aos meus amigos, António Dramuce Alice, Nelson Maluana, Frâncio Magaia, Andriano Dramuce Alice, Lucas Mathe, dr. Enércio Utchovo, dr. Santos Munjaide, Ana Maria e à Cândida Paulo, pela confiança, amizade e ajuda.

AGRADECIMENTOS

Neste trabalho foi indispensável a cooperação, a ajuda e o estímulo de muitas pessoas. Cabe, portanto, agradecer a todos que, directa ou indirectamente, colaboraram para tal, em especial,

A Deus, pelas graças e por proporcionar momentos ditosos ao longo da minha vida;

Ao Doutor Pedro Horácio Massinga Júnior e ao dr. Francisco Maleiane, por terem aceite supervisionar este trabalho e, por outro lado, pela sua orientação segura e credível no desenvolvimento do trabalho, além do apoio e o estímulo constantemente dispensados;

Ao senhor Dimas, do Departamento de Cerâmica do Laboratório de Engenharia de Moçambique, por ter disponibilizado a argila bentonítica e pelos ensinamentos durante a conformação dos compósitos assim como nos ensaios realizados;

A todos os funcionários do Laboratório de Engenharia de Moçambique, em especial, ao senhor Cossa, o meu muito obrigado pelo apoio;

Ao dr. Moisés Mabui, à dra. Carla Macie, ao senhor Macuácuca e aos demais funcionários do Departamento de Química do Laboratório de Engenharia de Moçambique, pela orientação e paciência dada, durante a realização da parte experimental, concernente à extracção da fibra celulósica de caniço;

A todos os docentes do Departamento de Química pelos ensinamentos transmitidos durante a formação;

Aos meus colegas, dr. Vicente Boa, Emília, José Sibindi, Crisóstomo, César, Pascoal, Samira, Alda, entre outros, por terem compartilhado comigo maus e bons momentos ao longo do curso;

A comissão científica do Departamento de Química em particular a Prof. Doutora Fung Dai Kin pela correcção deste trabalho;

Ao Eng^o Afonso Macheça, pela realização dos ensaios de análise termogravimétrica;

A minha família, que fundamenta a minha existência, obrigado por tudo.

DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA

Gilberto Jacinto Nhantumbo, candidato à conclusão do Curso de Química, declara sob compromisso de honra, que o presente trabalho é da sua autoria, tendo sido elaborado com uso dos recursos aos quais faz menção ao longo do mesmo.

O autor

.....

(Gilberto Jacinto Nhantumbo)

Maputo, Julho de 2014

RESUMO

A demanda na utilização de materiais ecologicamente sustentáveis e economicamente acessíveis é o intento actual em todas as áreas do mundo, especificamente na construção civil. O propósito deste trabalho é investigar a viabilidade de uso da fibra celulósica de caniço em compósitos à base de cimento como alternativa na conformação de blocos. As fibras celulósicas foram extraídas do caniço pelo método Kraft.

Na formulação da argamassa, fez-se variar o teor de fibras em 0, 15, 20 e 25% em massa de cimento. Foram moldados 14 corpos de prova para análise da carga de compressão (6 cubetas) e os inerentes à capacidade de resistência do material (8 prismas). Os corpos de prova foram curados por 28 dias de idade e, em seguida, foram realizados os ensaios predefinidos. Determinou-se também a estabilidade térmica com base na análise termogravimétrica.

Os resultados indicaram que todos os compósitos absorveram água, porém, proporcionalmente ao teor de fibra incorporado. A resistência à flexão foi de 0, 40, 0,34, 0,30 e 0,23 MPa para as proporções de 0, 15, 20 e 25% de fibras, respectivamente, o que indica que o teor óptimo de fibra se situou em torno de 15%. Os resultados de resistência à compressão foram decrescentes com o aumento do teor de fibra, 4,41; 0,87; 0,69 e 0,31 MPa.

O uso da fibra celulósica de caniço para o reforço de propriedades mecânicas de compósitos à base de cimento como alternativa na fabricação de blocos não foi viável, pois a norma NBR 6136 (1994) exige que a resistência à compressão simples seja superior a 4,5 MPa após 28 dias, para a argamassa ser usada para produção de blocos.

Palavra-chave: Fibras celulósicas, Argamassas, Cimento Portland.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| DEDICATÓRIA | i |
| AGRADECIMENTOS | ii |
| DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA..... | iv |
| RESUMO..... | v |
| LISTA DE TABELAS..... | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | ix |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS..... | x |
| I. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objectivos do trabalho | 2 |
| 1.1.1 Objectivo geral..... | 2 |
| 1.1.2 Objectivos específicos: | 2 |
| II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1 Compósitos fibrocimento..... | 3 |
| 2.2 Fibras vegetais | 4 |
| 2.2.1 Composição e microestrutura das fibras | 6 |
| 2.2.2 Reacções químicas da celulose | 8 |
| 2.3 Utilização de fibras celulósicas em compósitos à base de cimento | 9 |
| 2.4 Composição química do cimento Portland | 11 |
| 2.4.1 Cimento Portland e possíveis forças de adesão entre as fases do compósito | 12 |
| 2.5 Principais factores de controlo do desempenho teórico de materiais compósitos | 15 |
| 2.5.1 Caracterização dos compósitos | 16 |
| 2.5.2 Propriedades de matrizes reforçadas com fibras vegetais..... | 18 |
| 2.6 Técnicas termoanalíticas | 21 |
| 2.6.1 Análise termogravimétrica (TGA) e análise termogravimétrica derivada (DTG)..... | 21 |
| 2.6.2 Análise termogravimétrica (TGA)..... | 22 |
| 2.6.3 Equipamento de análise termogravimétrica..... | 22 |
| 2.6.4 Principais equipamentos de uma termobalança | 22 |
| 2.6.5 Factores mais comuns que podem afectar as medidas de TGA/DTG | 23 |

| | |
|---|----|
| 2.7 Obtenção da pasta celulósica | 24 |
| 2.7.1 Métodos de deslignificação (preparação da pasta celulósica) | 25 |
| 2.7.2 Hidrólise alcalina | 26 |
| 2.7.3 Processo Kraft | 26 |
| 2.7.4 Processo soda | 27 |
| 2.8 Mecanismo de tenacidade | 28 |
| 2.8.1 Mecanismo de degradação dos compósitos à base de cimento..... | 29 |
| 2.9 Cura em água | 30 |
| III. PARTE EXPERIMENTAL | 32 |
| 3.1 Materiais e métodos | 32 |
| 3.2 Procedimentos da extracção da fibra celulósica | 33 |
| 3.3 Processo de fabricação dos compósitos | 37 |
| 3.4 Ensaio realizados | 38 |
| 3.4.1 Propriedades físicas | 38 |
| 3.4.2 Ensaio de flexão | 39 |
| 3.4.3 Ensaio de compressão | 40 |
| 3.4.4 Ensaio de Análise Termogravimétrica | 41 |
| IV. RESULTADOS: ANÁLISE E DISCUSSÃO | 42 |
| 4.2 Absorção de água | 42 |
| 4.3 Resistência à flexão..... | 45 |
| 4.4 Resistência à compressão..... | 48 |
| 4.5 Análise termogravimétrica..... | 50 |
| V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 55 |
| 5.1 Conclusões | 55 |
| 5.2 Recomendações..... | 55 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-------------------------------------|
| Tabela 1: Composição de alguns tipos de fibras vegetais. | 8 |
| Tabela 2: Diversificação da composição do clínquer | 11 |
| Tabela 3: Massa específica seca (s), massa específica saturada (sat) e massa específica real (real) das pastas de cimento contendo fibras, após 28 dias de cura | 20 |
| Tabela 4: Resumo dos principais eventos térmicos | 21 |
| Tabela 5: Principais factores que podem afectar as medidas de TGA/DTG | 23 |
| Tabela 6: Materiais, equipamentos e reagentes | 32 |
| Tabela 7: Composição de corpos de prova para ensaios de resistência à flexão, à compressão e propriedades físicas..... | 37 |
| Tabela 8: Massa, porosidade aparente e densidade aparente em função dos teores de fibra..... | 42 |
| Tabela 9: Massa de porções de provetes (em gramas) depois de imersos na água, secos na estufa durante 24h e, valores em percentagens do ensaio de absorção de água (Aa)..... | 43 |
| Tabela 10: Força aplicada sobre provetes com 0, 15, 20 e 25 % de fibras, medida em (Kgf) | 45 |
| Tabela 11: Resistência à compressão de cubetas de 0, 15, 20 e 25 % fibras medida em (Kgf) .. | 48 |
| Tabela 12: Resíduos e voláteis de cada amostra..... | Error! Bookmark not defined. |
| Tabela 13: Temperaturas onde ocorre perda máxima em eventos térmicos associados à presença de fibra nas amostras..... | 53 |
| Tabela 14: Temperaturas onde ocorre a perda máxima em eventos térmicos semelhantes em todas as amostras..... | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema das fibras, microfibras e cadeias celulósicas (Souza, 2010)..... | 5 |
| Figura 2: Estrutura da celulose. | 5 |
| Figura 3: Estrutura de uma fibra vegetal. | 7 |
| Figura 4: Ilustração de plantio de caniço..... | 10 |
| Figura 5: Distribuição dos componentes numa partícula de clínquer..... | 12 |
| Figura 6: Diagrama de um equipamento genérico para análise termogravimétrica. | 23 |
| Figura 7: Representação da deslignificação | 25 |
| Figura 8: Representação esquemática do comportamento sob flexão de um compósito | 29 |
| Figura 9: Caniço destroçado | 33 |
| Figura 10: Aparas cobertas pelo licor de cozimento | 34 |
| Figura 11: Representação da etapa do cozimento | 34 |
| Figura 12: Representação da etapa da descarga | 35 |
| Figura 13: Pasta celulósica após a lavagem..... | 35 |
| Figura 14: Fibras celulósicas após a secagem | 36 |
| Figura 15: Prensas de moldagem de corpos de prova prismáticos (à esquerda) e cúbicos (à direita)..... | 37 |
| Figura 16: Compósitos prismáticos (à esquerda) e cúbicos (à direita)..... | 38 |
| Figura 17: Prensa de ensaio à flexão | 40 |
| Figura 18: Prensa de ensaio à compressão | 41 |
| Figura 19: Absorção de água em função do teor de fibra adicionada | 44 |
| Figura 20: Carga de flexão em função do teor de fibra | 48 |
| Figura 21: Termogramas das amostras sem fibra e sem água e com água..... | 51 |
| Figura 22: Termogramas das amostras com 15% fibra sem água e com água..... | 52 |
| Figura 23: Termogramas das amostras com 20% fibra sem água e com água..... | 52 |
| Figura 24: Termogramas das amostras com 25% fibra sem água e com água..... | 53 |

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|--|
| C-S-H | Silicato de Cálcio Hidratado |
| C-A-H | Aluminato de Cálcio Hidratado |
| C ₄ AF | aluminoferrato tetracálcico |
| C ₃ S | Silicato tricálcico |
| C ₃ A | Aluminato tricálcico |
| C ₂ S | Silicato bicálcico |
| GP | Grau de polimerização |
| D.P | Desvio padrão |
| I.C | Intervalo de confiança |
| Da | Densidade aparente |
| NP | Norma Portuguesa |
| Kgf/cm ² | Kilograma-força por centímetros quadrado |
| s | Massa específica seca |
| real | massa específica real |
| sat | massa específica saturada |
| LEM | Laboratório de Engenharia de Moçambique |
| NBR | Norma Brasileira |
| m/m | Peso por peso |
| m/v | Peso por volume |

I. INTRODUÇÃO

A incorporação de fibras em matrizes cimentícias é considerada uma alternativa eficaz na alteração das características dos compósitos formados. Possibilita melhorar várias propriedades mecânicas das matrizes cimentícias, incluindo a resistência à tracção, à flexão e ao impacto, bem como a melhoria na ductilidade e redução de fissuras (Bernardi, 2003; Almeida *et al.*, 2010).

A aplicação de compósitos de fibrocimentos em placas e telhas de cobertura e componentes pré-fabricados pode representar significativa contribuição para a construção de habitações e para o crescimento de infra-estruturas de países em desenvolvimento (Anjos *et al.*, 2003; Tonoli, 2009).

Fibras celulósicas de árvores madeireiras ou plantas anuais (ex: caniço), possuem várias características preponderantes, como o seu carácter renovável, a baixa densidade, a biodegradabilidade, a disponibilidade a baixo custo e em grande variedade de morfologia e de razão de aspecto (Tonoli, 2009; Almeida *et al.*, 2010).

Em compósitos à base de cimento, as fibras podem perder resistência, devido a factores como ataque alcalino e mineralização do lúmen, causados pela migração de hidróxido de cálcio. Porém, estudos recentes demonstram que é possível minimizar estes efeitos e garantir a durabilidade dos compósitos através da redução do teor de hidróxido de cálcio livre na matriz. Isto pode ser conseguido usando adições pozolânicas como sílica activa, cinza de casca de arroz, metacaulinite e blendas com duas ou mais pozolanas, incluindo matéria-prima cerâmica e metacaulinite (Filho *et al.*, 2010; Filho *et al.*, 2012).

Mussequejua (2013) produziu blocos à base de cimento-argila reforçados com fibras de celulose de caniço e avaliou o reforço dos compósitos produzidos. A fibra foi misturada depois de submetida à polpação e deslignificação para remover lignina e hemicelulose. A substituição parcial do cimento pelas fibras na produção de compósitos foi de 10, 20 e 30% mássicos. Os ensaios de resistência à flexão e de absorção de água após 28 dias de cura indicaram que os compósitos com 20% de fibras apresentaram melhores desempenhos em ambos os ensaios

(Mussequejua, 2013). Estes resultados parecem contraditórios, pois, segundo o mesmo autor, maior absorção de água tende a ser inversamente proporcional ao desempenho como reforço.

Por isso, o presente trabalho procura aprofundar a viabilidade do uso de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de celulose extraídas de caniço.

1.1 Objectivos do trabalho

1.1.1 Objectivo geral

- ✓ Testar a viabilidade de reforço de blocos de cimento com fibras de celulose de caniço.

1.1.2 Objectivos específicos:

- ✓ Extrair fibras de celulose de caniço, separando lignina, hemicelulose e celulose;
- ✓ Substituir parcialmente cimento por diferentes teores de fibras em compósitos à base de cimento-argila e determinar o teor ideal da fibra para o reforço dos blocos;
- ✓ Avaliar a resistência à flexão, à compressão e absorção de água dos compósitos reforçados com fibras celulósicas de caniço.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos fibrocimento

O concreto com fibra, apesar de conhecido há muito tempo, representa apenas uma pequena percentagem do concreto produzido no mundo. A argamassa armada e o fibrocimento ainda são produzidos, essencialmente, com fibras de aço e asbesto, respectivamente, apesar da imensa disponibilidade de outras fibras para reforço. Os princípios relativos à utilização de fibras como reforço de matrizes frágeis (pasta de cimento, argamassa, concreto) só começaram a ser compreendidos nos últimos 25 anos (Filho *et al.*, 2012).

A aplicação das fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias tem sido investigada, devido à sua disponibilidade, baixo custo, salubridade, biodegradabilidade e baixo consumo energético de produção. Com a adição destas fibras, a fissuração da matriz frágil é reduzida, pois as fissuras são interligadas pelas fibras. Como resultado, incrementa-se a tenacidade e a resistência à tracção e ao impacto. A forma como essas propriedades do compósito vão ser modificadas dependerá do tipo de matriz, das propriedades físicas e geométricas das fibras e da interacção entre a fibra e a matriz (Almeida *et al.*, 2010; Lopes *et al.*, 2011; Filho *et al.*, 2012).

Compósitos são uma classe de materiais resultantes de uma combinação racional de um componente contínuo e outro(s) descontínuo(s). Os componentes descontínuos ou reforço conferem a principal resistência ao esforço, enquanto que o componente contínuo (componente matricial ou matriz), com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas do descontínuo, constitui o meio de transferência do esforço (Bernardi, 2003; Santos, 2006).

Os compósitos reforçados com fibras, ao invés de romperem-se subitamente após o início da fissuração da matriz, apresentam uma deformação plástica considerável, o que os torna um material adequado para construção (Lopes *et al.*, 2011)

2.2 Fibras vegetais

Fibra é um termo geral que denomina um corpo flexível, cilíndrico, com secção transversal reduzida e elevado factor de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro) (Bernardi, 2003). Uma das condições necessárias para que um material seja considerado fibra é que o seu comprimento seja pelo menos 100 vezes maior do que o seu diâmetro médio (Silva, 2002).

As fibras naturais podem ser divididas segundo a sua fonte de origem em mineral, animal e vegetal. As fibras minerais são compostas por cadeias cristalinas com grande comprimento, como as de asbesto e amianto. As fibras de origem animal têm cadeias proteicas, enquanto as vegetais apresentam cadeias celulósicas. Dentre as últimas incluem-se as fibras de sisal, bambu, coco e bananeira. Além da abundância e disponibilidade, uma das principais vantagens da utilização deste tipo de fibra consiste no baixo consumo de energia quando comparado com o consumo necessário utilizando fibras sintéticas (Souza, 2010).

Os componentes principais das fibras vegetais são: celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras. As fibras vegetais podem ser consideradas compósitos naturais, porque são constituídos principalmente de fibrilas de celulose inseridas numa matriz de lignina. As fibrilas de celulose são alinhadas ao longo do comprimento da fibra, o que resulta em máxima resistência à tracção e flexão. Também confere rigidez no eixo das fibras, portanto é um material anisotrópico, que varia suas propriedades físicas com a orientação/direcção. A eficiência do reforço da fibra vegetal está relacionada com a natureza da celulose e sua cristalinidade (Souza, 2010; Daltro, 2011).

A Figura 1 representa um esquema que compreende as células vegetais, a disposição do conjunto de fibras, passando pelas fibras elementares que são as microfibras, até chegar às cadeias de celulose propriamente ditas.

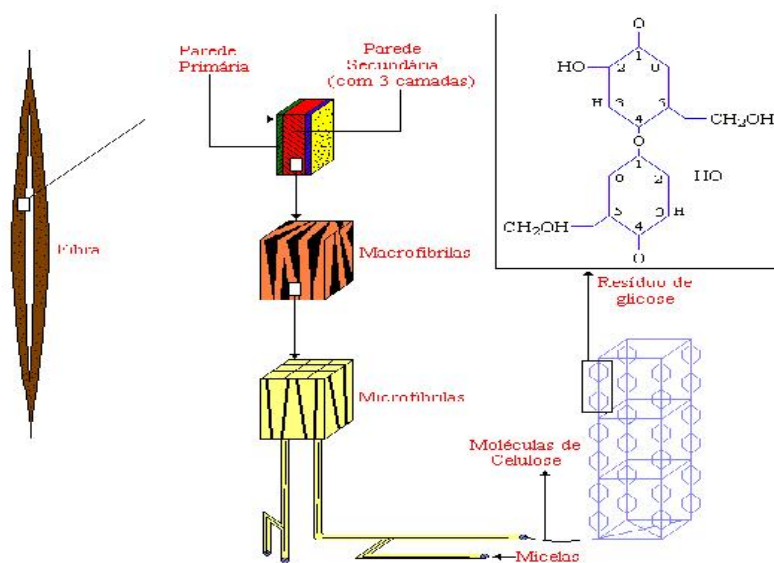


Figura 1: Esquema das fibras, microfibrilas e cadeias celulósicas (Souza, 2010).

A celulose é um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear com comprimento suficiente para ser insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e álcalis diluídos à temperatura ambiente, consistindo única e exclusivamente de unidades de -D-anidroglicopiranosose (Figura 2). Estas unidades ligam-se entre si através dos carbonos 1-4, possuindo uma estrutura organizada e parcialmente cristalina (Klock *et al.*, 2005; Caux, 2009).

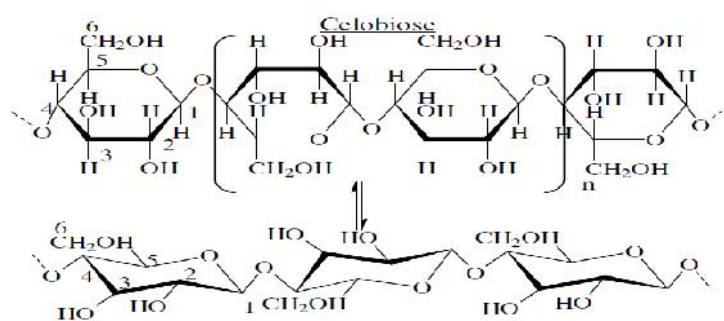


Figura 2: Estrutura da celulose (Klock *et al.*, 2005; Caux, 2009).

A celulose corresponde a uma estrutura microcristalina, ou seja, regiões de alta ordem, que são as regiões cristalinas e regiões de baixa ordem, ou seja, as regiões não-cristalinas (Navarro *et al.*, 2007; Souza, 2010). O grau de polimerização (GP) de uma celulose pode variar entre 5 e 10 mil. Cada unidade de repetição contém três grupos hidroxílicos.

A celulose forma hastes delgadas que são as microfibrilas cristalinas. A ocorrência natural da celulose cristalina é conhecida como a celulose I. Conforme relatado por John e Thomas (2008) citado por Sousa e Soares (2010), a celulose mostra-se resistente ao ataque de álcali forte até à concentração máxima de 17,5% m/v, mas é facilmente hidrolisada por ácidos em altas concentrações, libertando açúcares solúveis em água.

As fibras naturais têm baixa densidade, alto módulo de elasticidade, são materiais menos abrasivos aos equipamentos de processamento quando comparados com a fibra de vidro, o que lhes permite competir com outros materiais fósseis e outros industrializados como a fibra de vidro (Souza, 2010).

2.2.1 Composição e microestrutura das fibras

O conhecimento da estrutura interna das fibras lignocelulósicas e da sua composição química é de extrema importância para a compreensão de como ela pode influir nas características do compósito onde forem aplicadas (Lima, 2011).

As fibras são usadas como reforço de compósitos porque proporcionam às matrizes cimentícias melhorias de resistência mecânica e rigidez. Tais melhorias dependem das fibras a serem utilizadas: devem ter boa resistência mecânica, qualidades adequadas ao tipo de matriz que será reforçada. Essas qualidades incluem (i) compatibilidade química com a matriz, (ii) leveza, boa aderência à matriz e (iii) resistência ao calor (Tonoli, 2009; Daltro, 2011).

Microscopicamente, as fibras vegetais são constituídas por células individuais que, por sua vez, compõem-se de microfibrilas (Figura 3) dispostas em camadas de distintas espessuras e ângulos de orientação (Tabela 1). As células das fibras vegetais têm diâmetro de aproximadamente 10 a

25 μm . As diversas células constituintes das fibras (macrofibras) encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, sendo composta de hemicelulose, pectina e principalmente lignina na parte central da célula pode apresentar uma cavidade denominada de lúmen com secção elíptica de dimensões que variam de 5 a 10 μm (Savastano, 2000).

A parte central das fibras pode apresentar uma cavidade denominada de lacuna. Os lúmens e as lacunas são responsáveis pela formação dos poros permeáveis na fibra, o que leva a uma elevada absorção de água (Tonoli, 2009; Daltro, 2011).

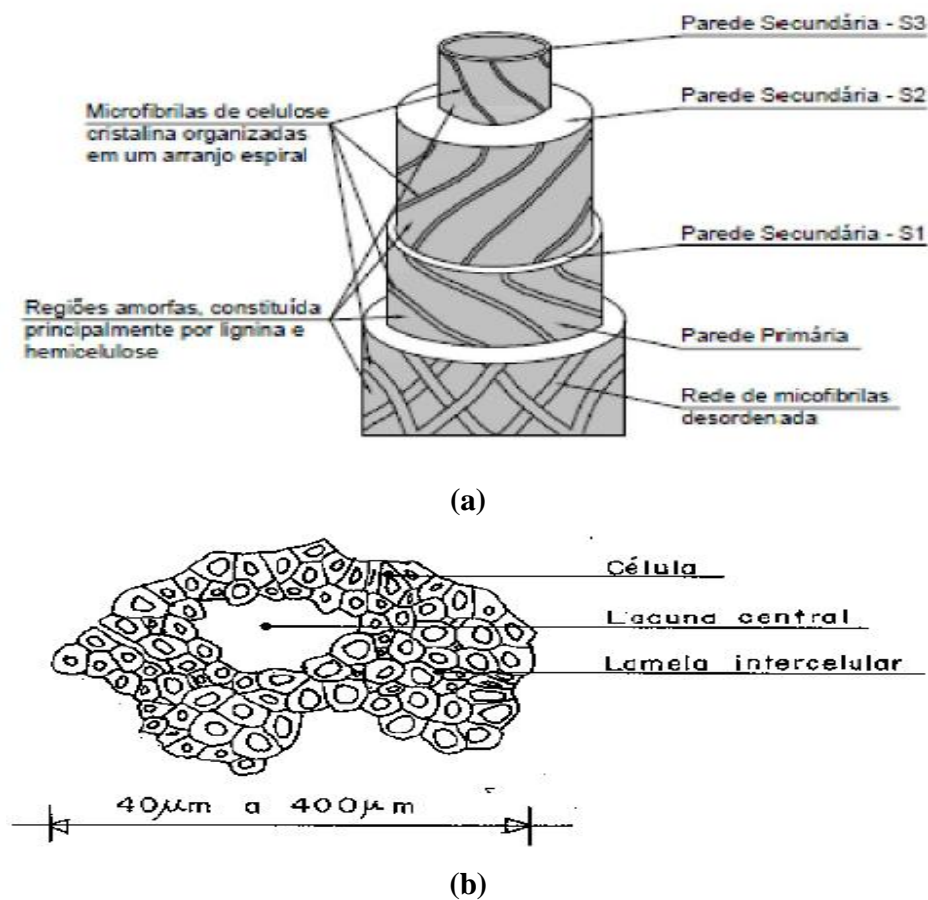


Figura 3: Estrutura de uma fibra vegetal: (a) Célula individual, (b) Macrofibra: aglomerado de células (Daltro, 2011; Lima, 2011).

Tabela 1: Composição de alguns tipos de fibras vegetais (Savastano, 2000).

| Fibras | Celulose (%massa) | Lignina (%massa) | Ângulos das microfibrilas(A°) |
|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Malva | 76,0 | 10,0 | 8 |
| Sisal | 78,6 | 9,9 | 10-22 |
| Coco | 53,0 | 40,8 | 30 - 49 |

As fibras de celulose são materiais adequados para o reforço de matrizes, tais como compósitos poliméricos ou aplicações em fibrocimento, mas a sua empregabilidade depende do método de produção, que pode influenciar o seu desempenho. Entretanto, muitos estudos são necessários, tanto para a caracterização da matéria-prima fibrosa como no desenvolvimento de novos produtos e métodos de produção. O estudo da interface entre a fibra e a matriz contribui para a engenharia dos compósitos fibrosos, para que o seu desempenho mecânico seja otimizado (Tonoli, 2009).

2.2.2 Reações químicas da celulose

As reações da celulose com compostos inorgânicos são determinadas, em grande parte, pela sua constituição molecular e estrutura física. Além da capacidade de sofrer hidrólise que equivale à ruptura nas ligações hemiacetálicas entre as unidades de anidroglicose, a celulose reage através dos grupos alcoólicos e grupos hemiacetálicos. Os grupos alcoólicos podem sofrer, principalmente, reações de adição, substituição e oxidação. Os grupos redutores geralmente reagem através de redução e oxidação (Klock *et al.*, 2005).

Cada macromolécula é formada de unidades de anidroglicose contendo cada uma 3 grupos OH (um álcool primário e dois álcoois secundários). Consequentemente, a reactividade da celulose está em função da acessibilidade dos grupos OH para reagirem e/ou possibilidade do reagente penetrar através das microfibrilas. Se o reagente penetra unicamente na região amorfa da estrutura, a reação aumenta mas o produto final não será uniforme porque não ocorrerão reações nas regiões cristalinas. As experiências têm mostrado que, geralmente, o grupo hidroxílico do carbono 6 (primário) é o mais reactivo de todos (Klock *et al.*, 2005).

2.3 Utilização de fibras celulósicas em compósitos à base de cimento

Os compósitos à base de cimento podem ser encontrados em produtos como reservatórios de água e materiais de construção, incluindo os de baixa espessura como telhas e placas planas para forros e divisórias. As fibras têm sido aplicadas em materiais cimentícios com o intuito de promover o aumento da ductilidade e tenacidade. A utilização de compósitos reforçados com fibras de celulose tem sido consagrada graças a constantes melhoramentos das matérias-primas, processos produtivos com o consumo racionalizado de energia e custos de investimentos cada vez menores (Tonoli, 2009).

O Instituto Americano de Concretos recomenda a utilização de fibras Kraft para uso como reforço em materiais cimentícios, pois grande parte da lignina e hemiceluloses são removidas durante o processo de polpação. Estas são menos resistentes à alcalinidade do que a celulose (Anjos *et al.*, 2003; Tonoli, 2009).

As propriedades mecânicas de compósitos de fibrocimentos são dependentes da uniformidade da distribuição (dispersão) do volume de fibras. O parâmetro geométrico de maior relevância no controlo do desempenho dos compósitos é a distância (espaçamento) entre as fibras (Tonoli, 2009).

Geralmente, quando o compósito é sujeito a esforços mecânicos, a trinca se inicia e avança para regiões com ausência de fibras ou de agregação das mesmas (Tonoli, 2009).

O emprego das fibras vegetais traz algumas dificuldades associadas ao uso em compósitos à base de cimento, dependendo do aperfeiçoamento da tecnologia. Algumas dificuldades no seu uso estão relatadas abaixo (Silva, 2002):

- A presença de contaminantes que interferem, por exemplo, na hidratação dos aglomerantes.
- Os processos convencionais de mistura e modelagem, geralmente originam problemas de má distribuição das fibras na matriz, onde ocorre uma incorporação de vazios em excesso causando um aumento na porosidade do compósito.

Em geral, as fibras podem-se dividir de acordo com o seu módulo de elasticidade em fibras de baixo e alto módulo, diferindo, assim, as suas aplicações. As fibras de alto módulo melhoram a resistência do compósito, principalmente à tração, enquanto as de baixo módulo propiciam melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós-fissuração aumentando consideravelmente a sua tenacidade quando aplicadas em teores adequados (Lima, 2011).

Neste trabalho, foram usadas fibras de caniço como reforço de cimento. O caniço (Figura 4) é uma planta da família Typhaceae pertencente à ordem Poales. Esta família contém apenas o género *Typha*, com cerca de uma dúzia de espécies. São plantas perenes e de habitats húmidos, amplamente utilizadas em certas regiões de Moçambique na construção de casas tradicionais ou palhotas.



Figura 4: Ilustração de plantio de caniço

O interesse no uso de fibras celulósicas é galvanizado pelo processo de polpação que remove, da matéria vegetal, impurezas não celulósicas como a lignina e a hemicelulose, diminuindo o ataque às fibras, sem modificar a matriz cimentícia. O processo de polpação tipo Kraft pode chegar a remover toda a lignina presente no material de origem (Anjos *et al.*, 2003).

2.4 Composição química do cimento Portland

Cimento Portland é um material aglomerante hidráulico obtido através da moagem ultrafina do clínquer Portland e certa quantidade de gesso (3-6% m/m). É usado para unir firmemente e com resistência diversos tipos de materiais utilizados na construção civil. Assim, permite a construção de diversos tipos de obras e edificações resistentes e duráveis. A composição do clínquer usado para produzir cimento é ilustrada na Tabela 2 (Azenha, 2004; Oliveira, 2004).

Tabela 2: Diversificação da composição do clínquer (Azenha, 2004; Oliveira, 2004)

| Designação | Composição | Percentagem mássica (m/m) de ocorrência |
|---|---|---|
| Silicato tricálcico (C ₃ S) | 3CaO.SiO ₂ | 20% a 65% |
| Silicato bicálcico (C ₂ S) | 2CaO.SiO ₂ | 10% a 55% |
| Aluminato tricálcico (C ₃ A) | 3CaO.Al ₂ O ₃ | 0% a 15% |
| Aluminoferrato tetracálcico (C ₄ AF) | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ | 5% a 15% |

Os quatro componentes apresentados na Tabela 2 contêm, geralmente, algumas impurezas. Por isso, são por vezes referenciados com denominações alternativas: a alite corresponde ao C₃S, a belite corresponde ao C₂S, a fase aluminato corresponde ao C₃A e a fase ferrítica ou celite corresponde ao C₄AF.

Os silicatos de cálcio, conjunto formado pela alite e belite, constituem cerca de 85% do clínquer de cimento. As fases aluminato e ferrítica encontram-se distribuídas na zona intersticial, conforme se pode observar na Figura 5 (Azenha, 2004).

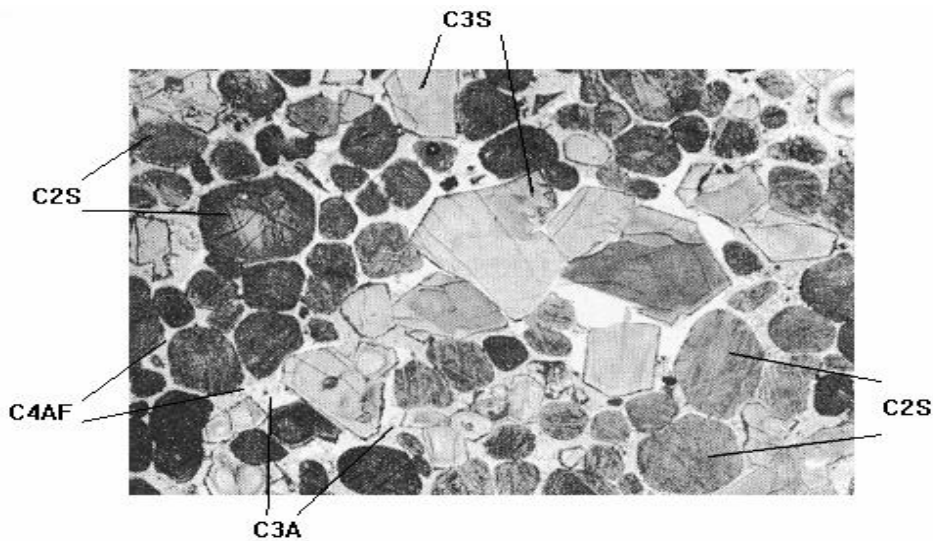


Figura 5: Distribuição dos componentes numa partícula de clínquer (Azenha, 2004)

2.4.1 Cimento Portland e possíveis forças de adesão entre as fases do compósito

A reactividade dos constituintes do cimento com a água varia significativamente e deste modo cada característica na fase de pega e endurecimento é influenciada pela proporção desses compostos. A hidratação do cimento promove a dissolução dos compostos cimentícios, fundamentalmente em iões de Ca^{2+} e Si^{4+} , destes, são gerados os embriões das fases hidratadas de silicatos e aluminatos de cálcio (Christófolli, 2010).

A hidratação prossegue até que ocorra a redução da energia livre de Gibbs, para tal sucede (i) o incremento das fases hidratadas e (ii) a densificação. A contínua existência de água proporciona o crescimento dos silicatos hidratados e aluminatos de cálcio, enquanto que o maior empacotamento das partículas favorece a densificação (Rossetto *et al.*, 2009).

Os principais produtos de hidratação são basicamente o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e, possivelmente, fases amorfas ricas em iões de Al^{3+} e SO_4^{2-} (Almeida *et al.*, 2010).

Um dos processos indispensáveis para a redução do teor de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia é a carbonatação, esta, ocorre devido à difusão de CO_2 disponível na atmosfera através dos poros insaturados da matriz cimentícia. Neste processo, o CO_2 sofre dissolução na fase aquosa presente nos poros, transformando-se em ácido carbónico (H_2CO_3). Este, por sua vez, sofre dissociação em iões de HCO_3^- e CO_3^{2-} . A dissociação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberta iões Ca^{2+} e OH^- , os quais precipitam e formam o carbonato de cálcio, CaCO_3 (Tonoli, 2009; Almeida *et al.*, 2010).

A carbonatação melhora a durabilidade das polpas celulósicas em compósitos cimentícios, pois reduz a alcalinidade da matriz devido à redução do teor de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultando em maior quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3). Este, além de melhorar as propriedades mecânicas, é um composto insolúvel em água e mais denso que o hidróxido de cálcio. O rápido ganho de resistência mecânica dos compostos silicatos dicálcico e tricálcico (C_2S e C_3S , respectivamente) através do tratamento com CO_2 logo após a moldagem sugere que a carbonatação nas idades iniciais melhore as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios (Almeida *et al.*, 2010).

Tonoli (2009) referiu que Peter *et al.*, (2008) realizou um estudo paramétrico e aprofundado sobre a reacção do CO_2 em cada constituinte do cimento. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é o composto que reage mais com CO_2 , devido ao maior grau de solubilidade, formando CaCO_3 . O processo de hidratação é responsável por reduzir as superfícies cimentícias (Almeida *et al.*, 2010).

A água é uma substância preponderante para a obtenção da resistência mecânica dos produtos cimentícios, então, é provável que também desempenhe um papel na adesão das partículas cimentícias. Cada molécula de água é capaz de doar duas ligações hidrogénio e de aceitar outras duas. Deste modo as moléculas de água configuram-se tetraedricamente. Portanto, cada átomo de oxigénio é coordenado por quatro outros átomos de oxigénio que apresentam átomos de hidrogénio entre eles. À medida que a temperatura decresce a estrutura tetraédrica é restabelecida e o número de defeitos na rede de ligações hidrogénio tende a zero (Rossetto *et al.*, 2009). Segundo Rossetto *et al.*, (2009), o efeito de confinamento assemelha-se ao da redução da

temperatura no que concerne à estruturação das moléculas de água e consequente adesão ao material em função dos pontos discretos de contacto.

O consumo da água dos poros da matriz cimentícia cessa o processo da dissolução dos iões dos componentes do cimento, e a partir daí, a água confinada actua somente na adesão das fases cimentícias (Tonoli, 2009).

As fibras celulósicas aderem à matriz por ligações físicas (mecânicas) e por pontes de hidrogénio. Em escala micrométrica, quando a interface e a matriz é porosa, a fibra liga-se a matriz por poucos pontos discretos, devido a rugosidade das superfícies de ambas as fases. Em escala nanométrica, quanto mais próximas as superfícies, menores serão os capilares entre as partículas e mais fortes as ligações de hidrogénio por água confinada (Tonoli, 2009). Segundo este autor, quanto menos camadas de água entre as partículas, mais fortes as ligações de hidrogénio.

A adição de fibras em compósitos proporciona tendência de aumento da resistência à flexão até um teor óptimo com posterior decréscimo na propriedade. A explicação é: após certa taxa de polpa, a concentração volumétrica da fibra acarreta dificuldade na mistura e dispersão (Anjos *et al.*, 2003).

A utilização de resíduo cerâmico, metacaulinite e de fibras vegetais na produção de fibrocimento resulta em um material mais eficiente que os tradicionais. O hidróxido de cálcio representa cerca de 20% dos compostos hidratados do cimento e não contribui para a resistência final do material endurecido. Em presença de argila calcinada, forma-se, durante a hidratação do cimento Portland, silicatos de cálcio hidratados que podem melhorar a resistência das argamassas e concretos tanto no estado fresco quanto endurecido (Anjos *et al.*, 2003; Filho *et al.*, 2010; Filho *et al.*, 2012).

2.5 Principais factores de controlo do desempenho teórico de materiais compósitos

Em geral, o componente matricial é um meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Distintos materiais de engenharia podem servir de componente matricial, desde que sejam capazes de: (i) manter a orientação das fibras e seu espaçamento, (ii) transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras e (iii) fornecer protecção ao elemento de reforço contra danos superficiais. O componente matricial pode ser dúctil (orgânico ou polimérico) ou frágil (cimentício ou vidrado) (Bernardi, 2003; Santos, 2006).

O reforço de matrizes é demanda em várias áreas de aplicação, tais como na construção civil, tendo, comumente, o objectivo de melhorar a resistência à flexão e à tracção, a resistência ao impacto, controlar a fissuração e o modo de falhas por meio de ductibilidade pós-fissuração, bem como mudar a reologia do material no estado fresco (Silva, 2002).

A base de reforço (material estrutural) em materiais compósitos deve ter boa resistência mecânica, rigidez e moldabilidade que, geralmente, encontram-se nas fibras. A função primordial destas é de reforçar mecanicamente matrizes frágeis, como as de cimento, cal ou gesso para além de suportar as cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis (Santos, 2006). Segundo este autor, a acção das fibras em materiais compósitos é de impor um obstáculo à propagação de fissuras para além de servir como uma ponte de transferência dos esforços através da fissura, garantindo uma resistência após a abertura da mesma.

A aderência entre o reforço e a matriz é crítica, num compósito. A interface entre os elementos apresenta influência dominante sobre as características do conjunto, sendo tão essencial quanto as propriedades e características dos materiais empregados (Mano, 2000). Segundo o mesmo autor, o principal papel da interface é permitir que ocorra uma adequada transferência dos esforços entre o reforço e a matriz. Consequentemente, a interface é a principal responsável pela existência de um trabalho conjunto. A aderência entre os componentes do compósito pode ser mecânica ou físico-química e estar centrada nas características da interface entre eles. Porém, um factor que contribui para uma maior adesão na interface é a compatibilidade física entre a

superfície da matriz e das fibras. Outro factor importante, é a possibilidade de existência de ligações químicas entre os componentes, quando um dos grupos presentes na matriz é capaz de reagir com os grupos polares existentes nas fibras (Félix, 2002). Este autor realça que a interação química entre as superfícies permite que as tensões mecânicas sofridas pelo material sejam transferidas com mais eficiência da matriz para o reforço, fazendo com que melhorem as propriedades mecânicas do material.

Problemas associados com o deslocamento na interface matriz-fibra podem ser prevenidos pela utilização de materiais com baixos valores de coeficiente de Poisson (mede a deformação do material). Assim, quando solicitados, esses materiais não vão variar intensamente a sua secção transversal, prevenindo questões de aderência (Silva, 2002).

As fibras celulósicas devem ser secas e tratadas para que se tenha um grau de adesão aceitável entre fibra e matriz, e assim alcançar o pleno potencial de reforço das fibras. A secagem das fibras é necessária para evitar a influência negativa da presença de humidade na interface entre fibras e os diferentes constituintes (Santos, 2006).

2.5.1 Caracterização dos compósitos

Muitas variáveis necessitam de ser consideradas quando se pretende caracterizar o desempenho potencial de um material compósito. A caracterização das propriedades mecânicas e reológicas de um compósito é função da fracção volumétrica, da distribuição e da orientação das fibras, as quais são definidas durante o processo de fabricação (Félix, 2002).

As etapas de fabricação e a natureza do processo são críticas porque as propriedades e o comportamento do compósito dependem não só das características da matriz, mas também da orientação e dispersão das fibras. De forma genérica, além do tipo de matriz, do tipo de reforço e da interface entre eles, entre as variáveis que devem ser analisadas para a caracterização de um compósito destacam-se o teor de fibra, o seu volume relativo e a sua distribuição dentro da matriz (Bernardi, 2003).

As propriedades mecânicas dos compósitos são dependentes do teor de fibras presente no material. Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura, evitando a propagação das mesmas. Como o carregamento imposto à matriz é parcialmente transferido para as fibras, que passam a absorver parte das tensões internas, o aumento do teor de fibras resulta ainda, na maioria dos casos, no aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito, devido ao aumento da contribuição da resistência mecânica da fibra nas propriedades mecânicas do material compósito (Félix, 2002). Segundo este autor, há casos em que o incremento progressivo do teor de fibras resulta num decréscimo das propriedades mecânicas do compósito, o que pressupõe a introdução do volume máximo de fibras, ou seja, da máxima quantidade de fibras que pode ser adequadamente incorporada à matriz, de modo a otimizar as propriedades mecânicas do material compósito.

Segundo CEPED (1982), citado por Bernardi (2003), a resistência dos compósitos aos esforços de tracção cresce linearmente com o volume de fibras adicionado, até atingir um valor limite. Esse limite é determinado pela quantidade de fibras que pode ser adicionada de maneira a se obter uma dispersão uniforme das mesmas na matriz. Outro factor preponderante é o volume crítico de fibras, isto é, o volume mínimo para que o seu efeito seja significativo.

A influência da resistência à compressão e à tracção de um compósito é pequena quando o volume de adição está abaixo do volume crítico. O volume crítico varia com o comprimento, o diâmetro e o tipo de fibras e com o método de fabricação utilizado. Portanto, as percentagens viáveis de incorporação de fibras, em volume, isto é, percentagens que efectivamente contribuem no acréscimo da resistência à tracção da matriz estão compreendidas entre o volume crítico e o volume limite de fibras.

As fibras, independentemente do seu tipo, quando adicionadas à matriz cimentícia reduzem a trabalhabilidade desta. Segundo (Mehta & Monteiro, 2008), essa redução é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto. Isto é, volumes elevados de fibras devem ser usados com cautela, pois podem causar falta de uniformidade e homogeneidade.

2.5.2 Propriedades de matrizes reforçadas com fibras vegetais

O concreto é um material importante de construção, composto fundamentalmente de materiais não renováveis e a sua produção consome quantidades elevadas de energia, o que têm levado à produção mais racional do concreto, passando pela incorporação de materiais alternativos (por exemplo as fibras) com intuito de incrementar a durabilidade (vida útil) além de minimizar a expansão e contracção térmica devido à flutuações de temperatura no concreto (Rohden, 2001).

A adição de fibras naturais em matrizes cimentícias diminui a resistência à compressão. Os factores que determinam as propriedades dos compósitos são, fundamentalmente: o comprimento, o volume, a quantidade e as características físicas e mecânicas das fibras; a resistência da matriz, a sua mistura com fibra. O processo de mistura pode formar compósitos com baixa resistência à compressão, quando as fibras se aglomeram devido à formação de novos que geram vazios e, conseqüentemente, pontos de concentrações de tensões (Lima, 2004).

Soto *et al.* (2013) fizeram blocos de prisma reforçados com 0,5 e 1% de fibras de sisal e mostraram uma redução média de 41% na resistência à compressão em comparação com os valores de referência a um nível de confiança de 95%. Estes autores admitiram que a redução estava ligada às densidades inferiores dos blocos que continham as fibras e também às interacções fracas entre as fibras e a matriz cimentícia. Isto provoca danos na estrutura do material. Além disso, Soto *et al.* (2013) notaram que era difícil de moldar e compactar o conteúdo contendo o sisal adicionado, o que pode ter conduzido à formação de defeitos nos blocos.

A carga de flexão suportada por uma viga de concreto pode ser incrementada pela adição de fibras (Picanço, 2005). A manifestação destas é marcante depois de alcançada a carga de pico, que corresponde ao início da fissuração da argamassa. Portanto, ao invés da ruptura repentina apresentada pela matriz sem reforço, o compósito continua a suportar carga, embora em níveis inferiores à carga de pico, apresentando grande deformação (Picanço, 2005).

Atendendo à existência de comportamento elástico perfeito, pode-se considerar que, quando uma viga rectangular é carregada em flexão, as tensões e deformações longitudinais, em uma dada secção transversal, variam de forma linear à superfície em compressão, atingindo um máximo de tracção na superfície oposta. A tensão de ruptura, calculada a partir do momento de flexão, é denominada módulo de ruptura e é uma medida da resistência à tracção do material. Na prática, mesmo para um material elástico, o módulo de ruptura é, em geral, maior que a resistência à tracção (Picanço, 2005) citado por (Mussequejua, 2013).

É importante referir que a quantidade da pasta cimento-água deve ser suficiente para cobrir todas as partículas de areia e brita, de outra forma a ligação de cimentação será incompleta. Além disso, todos os constituintes devem ser misturados por completo. Uma ligação completa entre o cimento e as partículas agregadas é dependente da adição da quantidade correcta de água. Muito pouca água leva a uma ligação incompleta, enquanto muita água resulta em uma porosidade excessiva. Em ambos os casos, a resistência do produto final é inferior à óptima (Rohden, 2001).

As fibras vegetais apresentam alta capacidade de absorção de água, pois têm comportamento higroscópico. Deste modo, as fibras aumentam a capacidade de absorção do compósito (Carneiro, 2010). Carneiro (2010) avaliou a absorção de pastas produzidas com cimento, metacaulinite, resíduo cerâmico e agente de enchimento (*filler*), enriquecidas com fibras nas porções de 1, 2 e 3% v/v. Aos 28 dias foi verificado que para 3% de fibra houve um aumento na absorção de água em cerca de 4% comparado com a matriz com 1% de fibra.

Porém, a inclusão de fibras tende a tornar o compósito menos trabalhável, o que aumenta os vazios e deixa o material mais poroso (Lima, 2004). Este autor analisou argamassas compósitas com frações volumétricas de 1, 2 e 3% de fibras curtas de sisal, tendo verificado que a fibra incrementou o índice de vazios em 8,6% em relação à argamassa sem reforço. Por outro lado a porosidade reduziu para argamassa com teor de 3% de fibra, o que o autor atribuiu à diminuição da ligação dos poros gerados pela adição do sisal (Lima, 2004).

O acréscimo do índice de vazios e aumento da porosidade devido à adição da fibra vegetal diminui a massa específica do compósito. Carneiro (2010) estudou pastas de cimento com fracções volumétricas de fibras curtas de coco de 1, 2 e 3%, tendo verificado a redução das massas específicas da pasta enriquecida com fibra de coco (Tabela 3).

Tabela 3: Massa específica seca (s), massa específica saturada (sat) e massa específica real ($real$) das pastas de cimento contendo fibras, após 28 dias de cura (Carneiro, 2010)

| Volume de fibras | s (g/cm³) | sat (g/cm³) | $real$ (g/cm³) |
|-------------------------|--|--|---|
| 1% | 1,44(0,0) | 1,86(0,0) | 2,5(0,5) |
| 2% | 1,41(0,0) | 1,83(0,0) | 2,45(0,2) |
| 3% | 1,39(0,0) | 1,81(0,0) | 2,4(0,4) |

Nas experiências em que se usam as fibras vegetais como reforço de matrizes à base de cimento Portland, verifica-se a debilidade da fibra e as perdas das vantagens como reforço estrutural. Porém, a durabilidade do compósito é de grande importância na vida útil do material (Barreto, 2011).

A fibra é fragilizada não só pelo processo de apodrecimento devido ao ciclo de humedecimento e secagem, mas também pelo ataque dos álcalis presentes no cimento. Além disso, a fibra sofre ataque de fungos e bactérias que alteram negativamente a sua resistência. Os intervalos entre o humedecimento e secagem, propiciam a proliferação de alguns tipos de bactérias, o que gera a propagação de microorganismos que atacam as fibras. O surgimento de bolores e bactérias é mais intenso em temperaturas entre 30 e 37 °C (Barreto, 2011).

O conhecimento das propriedades térmicas de um material pode levar à melhoria dos processos de conservação, moldagem, transporte e até melhoria na aplicação de determinados compostos e materiais. No caso da decomposição é útil saber quais são os produtos voláteis e os resíduos gerados, tendo em conta a sua acção biológica ou ambiental (Denari & Cavalheiro, 2012).

2.6 Técnicas termoanalíticas

Quando a amostra é aquecida, podem ocorrer mudanças químicas ou físicas na sua estrutura, dependendo se o calor é menor ou maior que as suas energias de ligações (Caux, 2009; Denari & Cavalheiro, 2012). A Tabela 4 resume os principais eventos térmicos.

Tabela 4: Resumo dos principais eventos térmicos (Denari & Cavalheiro, 2012)

| Reagente | | Produto | Evento térmico |
|------------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|
| $A_{1(s)}$ | | $A_{2(s)}$ | Mudança de fases |
| | | $A_{2(l)}$ | Fusão |
| | | $A_{2(g)}$ | Sublimação |
| | | $B_{(s)} + \text{gases}$ | Decomposição |
| | | Gases | Decomposição |
| $A_{(vítreo)}$ | | $A_{(borrachoso)}$ | Transição vítrea |
| $A_{(s)} + B_{(g)}$ | | $C_{(s)}$ | Oxidação /Redução |
| $A_{(s)} + \text{gases (1)}$ | | $A_{(s)} + \text{gases (2)}$ | Catálise heterogénea |
| $A_{(s)} + B_{(s)}$ | | $AB_{(s)}$ | Adição/síntese |
| $AB_{(s)} + CD_{(s)}$ | | $AD_{(s)} + CB_{(s)}$ | Decomposição dupla |
| $A_{(s)} + B_{(g)}$ | | Gases | Combustão/Sublimação/Volatilização |

2.6.1 Análise termogravimétrica (TGA) e análise termogravimétrica derivada (DTG)

A determinação de propriedades térmicas de fibras vegetais e a transição de fases de materiais argilo-cimentícios pode ser feita por análise termogravimétrica (Martin *et al.*, 2009).

Análise termogravimétrica (TGA) é a técnica termoanalítica que acompanha a perda ou ganho de massa de uma amostra em função do tempo ou temperatura. Por sua vez, a análise termogravimétrica derivada (DTG) é um arranjo matemático, no qual a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo. Em outras palavras, a DTG é a primeira derivada da TGA (Caux, 2009; Denari & Cavalheiro, 2012) e indica a temperatura onde cada evento térmico ocorre.

2.6.2 Análise termogravimétrica (TGA)

Em geral, na termogravimetria (TGA), resulta uma curva com o percentual relativo da massa em função da temperatura (Caux, 2009). De acordo com este autor, na TGA são obtidas informações importantes sobre a estabilidade e degradação térmica de fibras naturais. Segundo Princi *et al.*, (2008), citado por Caux (2009), a TGA é considerada a melhor ferramenta para investigar propriedades térmicas de materiais à base de celulose.

2.6.3 Equipamento de análise termogravimétrica

O equipamento de análise termogravimétrica pode mudar de configuração de um fabricante para outro, mas os fundamentos de todos eles são os mesmos. A sua composição básica é uma termobalança, um instrumento que possibilita a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura, ou seja, à medida que a amostra é aquecida ou resfriada (Denari & Cavalheiro, 2012).

2.6.4 Principais equipamentos de uma termobalança

- ✚ Balança registradora
- ✚ Forno
- ✚ Suporte da amostra
- ✚ Sensor da temperatura
- ✚ Programador de temperatura do forno
- ✚ Sistema registrador
- ✚ Controle da atmosfera do forno.

A Figura 6 representa um diagrama de um equipamento termogravimétrico genérico.

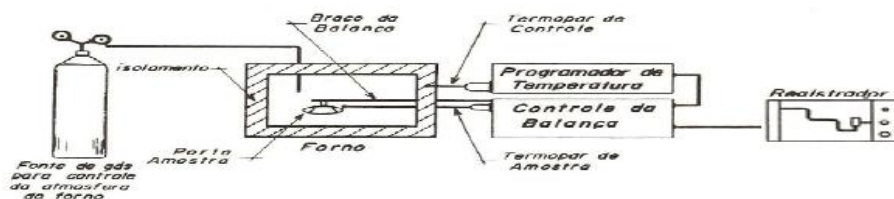


Figura 6: Diagrama de um equipamento genérico para análise termogravimétrica (Denari & Cavalheiro, 2012).

Em geral, em equipamentos de análise termogravimétrica, a taxa de aquecimento pode variar de 1°C/min até 100°C/min dependendo do fabricante. Enquanto isso, a temperatura final vai depender do forno, podendo chegar até 2000°C. A sensibilidade do equipamento varia de 0,1 µg até 1 g (Caux, 2009; Denari & Cavalheiro, 2012).

2.6.5 Factores mais comuns que podem afectar as medidas de TGA/DTG

Os factores mais comuns que podem afectar as medidas de TGA/DTG estão representados na Tabela 5.

Tabela 5: Principais factores que podem afectar as medidas de TGA/DTG

| Factores instrumentais | Factores da amostra |
|----------------------------------|---|
| Razão de aquecimento do forno | Solubilidade dos gases envolvidos |
| Velocidade de registo (papel) | Quantidade de amostra |
| Atmosfera do forno | Tamanho das partículas e calor da reacção |
| Geometria do suporte de amostra | Empacotamento da amostra |
| Sensibilidade da balança | Condutividade térmica |
| Composição do suporte de amostra | Natureza da amostra |

Entretanto há diversos outros factores que podem provocar tais alterações, razão pela qual se deve reportar o maior número possível de detalhes quanto ao experimento realizado, incluindo informações sobre o histórico da amostra, sempre que possível (Denari & Cavalheiro, 2012).

A temperatura de decomposição da celulose observada através de análise termogravimétrica (TGA) ocorre de 330 a 350°C, o que define o limite superior na temperatura de processamento dos compósitos baseados em fibras celulósicas (Sousa e Soares, 2010).

2.7 Obtenção da pasta celulósica

A preparação da pasta celulósica consiste na separação das fibras dos demais componentes constituintes do organismo vegetal, em particular a lignina, que actua como um cimento, ligando as células entre si e proporcionando rigidez à madeira. A presença da lignina e hemicelulose na fibra celulósica causa a desestruturação do material, devido à fácil solubilização das mesmas pelo hidróxido de cálcio presente na pasta hidratada do cimento (Navarro *et al.*, 2007).

Para Silva (1997), os processos químicos de produção de celulose são relativamente simples do ponto de vista conceptual. Porém, quando estes são analisados detalhadamente, verifica-se que existem variáveis que os afectam das mais diversas formas. Estas variáveis podem ser divididas em dois grandes grupos:

- ✚ variáveis relacionadas à matéria-prima
- ✚ variáveis relacionadas ao processo

Couto (1979), citado por Silva (1997), afirma que variações no álcali activo, temperatura e tamanho de cavacos afectam significativamente o rendimento e o número kappa da celulose. A distribuição de cavacos por classes de comprimento, largura e espessura representa uma importante ferramenta para análise do comportamento do sistema de processamento de cavacos (picador e peneiras classificatórias), para determinação da estratégia ideal de polpação, bem como para avaliação da qualidade da polpa obtida após o processo de polpação.

Foelkel (1990) citado por Silva (1997), diz que na caracterização de matérias-primas destinadas ao processamento industrial a densidade básica é de fundamental importância, pelas inúmeras facilidades que apresenta para sua determinação e pelas excelentes relações que mostra com as utilizações da madeira.

A densidade básica tem-se constituído em um índice universal para a avaliar a qualidade da mesma, que no entanto, deve ser analisada com critério para não se cometer erros e exageros. Na matéria-prima para produção de celulose, a título de exemplo, a densidade básica tem influência sobre parâmetros de processo tais como rendimento, teor de rejeitos, consumo de reagentes, entre outros, como consequência da sua relação com a composição química da madeira (Silva, 1997).

Para uma completa caracterização de matérias-primas destinadas à produção de celulose é necessário determinar-se as dimensões das suas fibras. Tal facto deve-se às propriedades físico-mecânicas da polpa obtida, em grande parte determinadas pelas características das fibras (Silva, 1997).

2.7.1 Métodos de deslignificação (preparação da pasta celulósica)

Deslignificação ou simplesmente polpação é a remoção ou desestruturação da lignina e hemicelulose das fibrilas de celulose (Figura 7) através de técnicas de pré-tratamento que podem ser físicas, químicas ou biológicas, ou ainda, pela combinação destas, o que dependerá do grau de separação desejado e do fim proposto (Dias, 2011).



Figura 7: Representação da deslignificação (Dias, 2011)

A hidrólise alcalina é, de uma gama de técnicas de polpação, uma das mais utilizadas para a produção da polpa celulósica, sendo uma das mais promissoras em termos de sustentabilidade. Neste sentido, é conveniente uma breve descrição deste processo.

2.7.2 Hidrólise alcalina

A hidrólise alcalina é a técnica de polpação química mais antiga e explorada pelo homem para obtenção da celulose. Os álcalis preservam as fibras celulósicas e solubilizam a hemicelulose e lignina, separando-as com mais eficiência da celulose. O maior uso que se faz desta técnica é na indústria de papel e celulose, para fabricação do papel Kraft, papelão ondulado e embalagens de alimento (Bracelpa, 2011, citado por Dias, 2011).

Geralmente, a técnica é acompanhada de um tratamento térmico e ou mecânico e diversifica-se quanto ao tipo de álcali utilizado, podendo ser o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂], hidróxido de amónio (NH₄OH), a combinação destes com alguns sais de sódio como o sulfito de sódio (Na₂SO₃) e sulfeto de sódio (Na₂S), ou compostos orgânicos sintéticos, como a antraquinona. Os processos químicos mais explorados nesta vertente são: processo soda (NaOH) e o processo Kraft (NaOH + Na₂S), sendo este último o mais empregue no Brasil e outros países produtores de celulose (Silva, 1997; Navarro *et al.*, 2007; Dias, 2011).

2.7.3 Processo Kraft

Neste processo, utiliza-se a combinação de hidróxido de sódio com sulfeto de sódio a altas temperaturas (aproximadamente 170 °C). A polpa é aquecida em reactores com sistemas de vaso de pressão ocorrendo a dissolução da lignina e parte das hemiceluloses, preservando a resistência e grau de cristalinidade das fibras de celulose. A pasta forte obtida (Kraft significa forte em alemão) possui um rendimento entre 50 a 60% (Navarro *et al.*, 2007).

A principal biomassa utilizada para extracção das fibras, neste tipo de processo, é a madeira de reflorestamento, pinus e eucalipto. Porém, há um significativo encaminhamento para o uso do bagaço de cana para fabricação de embalagens de alimento e produtos afins, utilizando hidróxido

de sódio e agentes catalíticos como a antraquinona (Silva, 1997, Navarro *et al.*, 2007; Sousa & Soares, 2010).

As principais vantagens do processo Kraft estão relacionadas com a qualidade da celulose obtida, apresentando a resistência desejada, ciclo de cozimento mais curto que o processo soda, produzindo subprodutos valiosos como a resina tall oil e a terebintina (solvente para tintas e verniz). Além disso, actualmente, as indústrias já possuem sistemas eficientes de recuperação dos reagentes. As desvantagens do processo Kraft estão relacionadas com os custos de investimento, poluição odorífera do licor negro que contem enxofre, e ainda, o processo de branqueamento das fibras quando se utiliza o cloro, gerando compostos cancerígenos como a dioxina, demandando, assim, alto custo no tratamento dos efluentes gerados (Navarro *et al.*, 2007; Dias, 2011).

2.7.4 Processo soda

No processo soda, geralmente, utiliza-se somente a base, que pode estar concentrada ou diluída, acompanhada ou não de tratamento térmico e/ou mecânico. O alcalí mais utilizado é o hidróxido de sódio. Neste processo, comparando com Kraft, a deslignificação não é tão eficiente na separação da lignina e hemicelulose, componentes da celulose. Além disso, o cozimento exige mais tempo para que as hidrólises aconteçam. As polpas obtidas apresentam lignina residual, pelo que, desejando-se uma polpa celulósica mais pura, requer-se um segundo tratamento (Dias, 2011).

Assim, para que este processo obtenha um maior rendimento pode-se utilizar agentes catalisadores como a antraquinona e acompanhamento térmico, categorizando-o em processo soda-antraquinona. Actualmente, a antraquinona está sendo muito utilizada como substituinte do sulfeto de sódio no processo Kraft, por sua rápida clivagem nas ligações -aril éter (da complexa estrutura da lignina), acelerando o processo e aumentando o rendimento da polpação, além de não formar compostos odoríferos inconvenientes e poluentes para o homem e para o ambiente (Silva, 1997; Navarro *et al.*, 2007; Sousa & Soares, 2010).

O processo soda, sem a presença de aditivos químicos e técnicas mais sofisticadas, é comumente utilizado para procedimentos mais simples, de baixo custo, que não requerem uma polpa celulósica de alta qualidade. Muito uso se faz em processos artesanais para fabricação de papel, artefactos decorativos, embalagens para presentes, que representam produtos atractivos pela beleza e rusticidade que apresentam e, principalmente, por serem feitos a partir de matéria prima renovável (Dias, 2011).

2.8 Mecanismo de tenacidade

Materiais compósitos à base de cimento, geralmente, têm um comportamento mecânico frágil (Figura 9a). As fibras celulósicas permitem o surgimento de mecanismo de tenacificação, conferindo um comportamento mecânico pseudoplástico ao compósito. Isto é, as fibras incrementam a resistência mecânica e a possibilidade do compósito absorver energia com a distribuição de microfissuras ao longo do material (Figura 9b). A fractura dos compósitos pode ocorrer a partir de defeitos do material, que podem ser fibras rompidas, falhas na matriz e descolamentos entre a fibra e a matriz que ocorrem na interface Coutts (1988) citado por (Tonoli, 2009).

No acto de fractura, as fibras tendem a auxiliar a distribuição das tensões adicionais para matriz cimentícia, através das tensões de aderência (principalmente ligações de hidrogénio). Se essas tensões de aderência não excederem a resistência da fibra, pode ocorrer o descolamento fibra-matriz (Figura 8c, ponto 1 e ponto 2) em detrimento da ruptura das ligações de hidrogénio na sua interface. O processo de rompimento das ligações de hidrogénio na interface entre fibra e a matriz possibilita arrancar as fibras (Figura 8c, ponto 3). Isto confere maior tenacidade ao compósito, devido ao maior consumo de energia para fracturar completamente o material. Caso contrário, se as ligações físicas (provenientes do empacotamento e da densificação do material) e as ligações químicas (principalmente pontes de hidrogénio) entre as fibras e a matriz são muito fortes, o escorregamento da fibra é substituído pela sua ruptura (Figura 8c, ponto 4). O processo da ruptura da fibra resulta na redução da tenacidade do compósito (Tonoli, 2009). Portanto, para evitar um comportamento frágil do compósito deve-se buscar um balanço entre as forças de adesão fibra-matriz e entre os mecanismos de escorregamento das fibras.



Figura 8: Representação esquemática do comportamento sob flexão de um compósito: a) sem fibras, e b) reforçado com fibras, c) detalhe do caminhamento da trinca através do compósito reforçado com fibras: (Pontos 1 e 2) descolamento da fibra, 3) arrancamento (pull-out) da fibra, (ponto 4) rompimento da fibra Coutts (1988) citado por (Tonoli, 2009).

2.8.1 Mecanismo de degradação dos compósitos à base de cimento

O desempenho dos compósitos, em particular, a longo prazo, depende da interação das propriedades das fibras com as da matriz. Matrizes ricas em portlandite (hidróxido de cálcio) podem apresentar durabilidade reduzida. Esses cristais concentram-se na interface fibra/matriz diminuindo a aderência (Tonoli, 2009). Adicionalmente, o hidróxido de cálcio pode depositar-se dentro do tecido das fibras de celulose e provocar a mineralização dessas fibras, reduzindo a tenacidade do sistema (Tonoli, 2009).

A incompatibilidade química é o principal agente actuante e decorre da sensibilidade das fibras, particularmente as de origem vegetal, ao meio alcalino produzido pela hidratação do cimento. A água presente nos poros da matriz cimentícia é rica em álcalis e, portanto, possui pH elevado. Portanto, ela é capaz de quebrar as ligações químicas poliméricas das fibras, reduzindo o comprimento de cadeia. Como quase toda a reacção química, a velocidade desse processo de degradação cresce com a elevação da temperatura desde que exista água adsorvida no compósito (Mussequejua 2013).

A reacção do CO_2 com os compostos hidratados do cimento, principalmente o Ca(OH)_2 , forma o carbonato de cálcio $\text{Ca(CO}_3)_2$ e água. O efeito da carbonatação em compósitos cimentícios é muito complexo. Em matrizes de cimento Portland com baixos teores de adições, ela provoca a densificação da interface fibra/matriz e o aumento da aderência entre fibra e matriz, podendo

reduzir ou aumentar a tenacidade. Nessas matrizes, a carbonatação contribui para a diminuição da alcalinidade do meio e para a redução da porosidade do material com a obturação dos poros. Porém, em matrizes cimentícias mais ácidas, ou seja, com menor relação entre CaO e SiO₂, por exemplo, ricas em pozolanas e escória de alto-forno, a carbonatação pode ocasionar a decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Amorim, 2010).

A água, embora fundamental para a hidratação que provoca o crescimento da resistência da matriz, também é um importante factor de degradação: ela viabiliza o ataque alcalino e também a carbonatação. A sua capacidade solvente pode levar à decomposição de compostos presentes na fibra e à lixiviação de produtos hidratados ou de produtos da carbonatação. Tanto as matrizes cimentícias como as fibras naturais apresentam variações dimensionais diferentes, se submetidas a variações de humidade. Por isso, surge o mecanismo chamado incompatibilidade física (Amorim, 2010).

Variações de humidade heterogéneas dentro do componente ou que são restringidas por fixações levam ao surgimento de tensões. Ciclos repetidos podem levar à fadiga pela propagação de microfissuras, um mecanismo conhecido como dano progressivo, que pode reduzir a resistência mecânica e a ligação entre as fibras e a matriz. Em menor proporção, dependendo da alcalinidade do material, a acção de fungos também pode ser descrita como agente de degradação. Os fungos agem pela quebra e pela diminuição das cadeias poliméricas, com a redução do seu grau de polimerização e a destruição progressiva da capacidade de reforço das fibras (Amorim, 2010).

2.9 Cura em água

A exposição do compósito à água, após a hidratação do cimento, ou seja, durante o período de cura (28 dias), provoca a continuação da dissolução dos iões (principalmente Ca²⁺) de grãos anidros e de fases cimentícias menos estáveis como o Ca(OH)₂ (Tonoli, 2009). Novamente estes iões serão transportados e reprecipitados em locais que favorecem a estabilidade dos embriões, geralmente onde há poros na matriz cimentícia (ex: na interface entre a fibra e a matriz). Esta reprecipitação dos produtos da hidratação do cimento, que se dá em ambos os níveis, micrométricos e nanométricos, ao redor das fibras, melhora as forças de aderência entre a fibra e

a matriz. Dependendo das características das fibras (composição química, morfologia e grau de hidratação), a reprecipitação dos íons das fases cimentícias também pode ocorrer entre as cadeias celulósicas das microfibrilas, entre as microfibrilas, entre as camadas de microfibrilas das paredes celulares das fibras e principalmente nas cavidades internas das fibras (lúmen) causando a degradação da fibra.

III. PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental compreendeu a extracção das fibras, a preparação de compósitos e a moldagem dos corpos de prova, realizada no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Química da UEM. A experimentação também envolveu a caracterização (ensaios das propriedades físicas e mecânicas) dos corpos, realizada no Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM). Finalmente, a parte experimental envolveu a análise termogravimétrica, que foi realizada pela Universidade de Pretória.

3.1 Materiais e métodos

O material vegetal utilizado neste trabalho, o caniço, foi adquirido no bairro Polana Caniço, no Mercado Mucoriane, onde é vendido para a construção de habitações e vedação de quintais. Na confecção dos compósitos foi usado cimento Portland 32.5 produzido pela Cimentos de Moçambique (Fábrica da Matola), argila bentonítica obtida em Boane, fibras de caniço e água. Os demais materiais, equipamentos e reagentes estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6: Materiais, equipamentos e reagentes

| MATERIAIS | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| Crivo de 300 μm , série 211284 | Balões volumétricos de 1 L e 250 mL | Vidro de relógio |
| Copos de precipitação de 2 L | Copos de precipitação de 400 mL | Varetas |
| Bico de bunsen | Bandejas | Colher de aço |
| Tripé | Proveta de 250 mL | Espátulas rectangulares |
| Rede de amianto | Esguicho | Tábuas |
| EQUIPAMENTOS | | |
| | Prensa de moldagem | Termómetro de escala de 250 °C |
| Balança analítica (PGW 2502, Max: 2500g, d: 0.01g) | Prensa de ensaio de flexão | Paquímetro |

| | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|---|
| Compactador macho (grande e pequeno) | pH metro (370pH) | Prensa de ensaio de compressão (Schaffhouse-amsler/699/365) |
| Triturador manual | Nicho | Estufa |
| REAGENTES | | |
| Ácido sulfúrico 1 mol/L | Hidróxido de sódio 98% (Skylabs) | Água destilada |
| Argila bentonítica | Sulfeto de sódio 65% (EREZ) | Água da torneira |

3.2 Procedimentos da extração da fibra celulósica

- Destroçou-se o caniço (Figura 9) de modo a permitir a sua entrada no copo de precipitação de 2 L, para boa impregnação pelo licor de cozimento;



Figura 9: Caniço destroçado

- Preparou-se soluções de cozimento de NaOH 12,5% e Na₂S 1% num nicho;

- Colocou-se 250 g das aparas do caniço destruçado num copo de precipitação e pos-se o licor de cozimento constituído de 1000 mL de NaOH e 500 mL de Na₂S até a cobertura total das aparas (Figura 10);



Figura 10: Aparas cobertas pelo licor de cozimento

- Cozinhou-se a mistura anterior num bico de bunsen (Figura 11), tendo a temperatura de cozimento sido alcançada após 1-1,5 h de fervura (125C);



Figura 11: Representao da etapa do cozimento

- Após alcançar a temperatura de cozimento, deixou-se em fervura por 2h de modo a completar as reacções de cozimento;
- Descarregou-se a mistura numa bandeja de alumínio (Figura 12) por queda de pressão, de modo a promover a desintegração das fibras;



Figura 12: Representação da etapa da descarga

- Separou-se as fibras do licor negro através de um crivo de 300 μm ;
- Procedeu-se à lavagem sucessiva das fibras com água da torneira, até o pH neutro (Figura 13). Para tal, várias alíquotas foram retiradas e medidas até à sua neutralização;



Figura 13: Pasta celulósica após a lavagem

O licor de cozimento, extraído na filtração, foi neutralizado com solução de ácido sulfúrico 1 mol/L, antes do seu descarte, visando a necessidade de práticas laboratoriais sustentáveis no descarte e gerenciamento de resíduos tóxicos químicos. Após neutralizar o resíduo, este foi descartado na rede colectora de esgoto.

- De seguida procedeu-se à dispersão das fibras e à respectiva secagem (Figura 14) numa estufa, à temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$;



Figura 14: Fibras celulósicas após a secagem

Das aparas postas em fervura, obteve-se apenas 50% de fibras (correspondente a 125 g de fibras celulósicas). Esta quantidade encontra-se dentro do intervalo do rendimento da polpação kraft (50-60%).

- Fabricou-se corpos de prova constituídos de cimento, argila bentonítica, fibras de celulose e água. Para cada composição, produziu-se 14 corpos de prova para ensaios de resistência à flexão (8 prismas) e resistência à compressão (6 cubetas).

3.3 Processo de fabricação dos compósitos

Os materiais utilizados para produção dos compósitos foram matrizes argilo-cimentícias reforçados com fibras de celulose de caniço previamente extraídas pelo método Kraft. Foram usadas proporções de 15, 20 e 25% de fibra em relação à massa do cimento. A Tabela 7 mostra a diversificação da composição em função da substituição parcial do cimento por diferentes teores de fibras.

Tabela 7: Composição de corpos de prova para ensaios de resistência à flexão, à compressão e propriedades físicas

| Argila (g) | Cimento (g) | Fibra (g) | Fibra (%) |
|------------|-------------|-----------|-----------|
| 900 | 150 | 0 | 0 |
| 900 | 127.5 | 22.5 | 15 |
| 900 | 120 | 30 | 20 |
| 900 | 112.5 | 37.5 | 25 |

A primeira etapa de produção dos compósitos foi a dispersão da argila bentonítica, seguida da incorporação do cimento. Após a homogeneização da mistura, adicionou-se 450 mL de água, e por fim dispersou-se o teor de fibra, seguida da segunda homogeneização, resultando em uma pasta fibroargilosa-cimentícia susceptível de ser moldada. A Figura 15 mostra os detalhes das prensas de moldagem de corpos de prova prismáticos e cúbicos.



Figura 15: Prensas de moldagem de corpos de prova prismáticos (à esquerda) e cúbicos (à direita)

A mistura foi inserida na câmara de moldagem, e após sucessivos golpes de soquete obteve-se como produto final os compósitos (Figura 16) com dimensões aproximadas de 12.0 cm x 2.5 cm x 2.0 cm (prismáticos) e 5.0 cm x 5.0 cm x 5.0 cm (cúbicos). Os compósitos produzidos foram conservados à temperatura ambiente durante 24h e após a desmoldagem foram imersos em água, durante 28 dias. Após este período de cura foram realizados os testes predefinidos.



Figura 16: Compósitos prismáticos (à esquerda) e cúbicos (à direita)

3.4 Ensaio realizados

3.4.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas determinadas neste trabalho foram densidade aparente (D_a), absorção de água (A_a) e porosidade aparente (P_a), segundo adaptações da Norma NP-80 (1964-IGPI). Essas propriedades foram calculadas através de relações simples entre a massa do compósito saturado, saturado submerso e seco. Os espécimes utilizados para determinação dos índices físicos foram os mesmos utilizados nos ensaios de flexão, sendo os testes realizados aos 28 dias de idade. A absorção de água, porosidade aparente (vazios permeáveis) e densidades seca e húmida dos compósitos, são propriedades físicas inter-relacionadas e de grande importância para o uso pretendido dos compósitos, seja, painéis de cobertura ou blocos de construção. As fórmulas que correlacionam a porosidade aparente (vazios permeáveis) e a densidade aparente (peso específico, ou seja, relação entre a massa e o volume de um corpo) em função da absorção de água, são apresentadas abaixo.

$$Aa(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

onde: Aa (%) = Absorção de água em percentagem; m_2 = Peso do provete seco na estufa; m_1 = Peso do provete saturado. O resultado deve ser aproximado às centésimas.

$$Pa(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (2)$$

onde: Pa (%) = Porosidade aparente em percentagem; m_2 = Peso do provete seco na estufa; m_1 = Peso do provete saturado; m_3 = Peso do provete submerso. O resultado deve ser aproximado às centésimas.

$$Da(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{m_2}{m_1 - m_3} \times 10^3 \quad (3)$$

onde: Da (kg/m^3) = Densidade aparente em Kg/m^3 ; m_2 = Peso do provete seco na estufa; m_1 = Peso do provete saturado; m_3 = Peso do provete submerso. O resultado deve ser aproximado às centésimas.

3.4.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados também aos 28 dias em equipamento de três cutelos com vão livre $L = 8$ cm e aplicação de carga centrada no sentido da espessura, com deslocamento de travessão constante. Os espécimes utilizados tinham dimensões variadas em detrimento da variação do volume durante o período de cura. Este ensaio define a força máxima que um corpo de prova suporta antes de romper-se, sob condições específicas. Adicionalmente, o mesmo avalia a acção de cargas acidentais no componente e mede a capacidade de resistência do material. Consiste em aplicar, no meio do vão do componente apoiado nas duas extremidades, uma carga com velocidade constante até à ruptura do material, alicerçado na Norma NP-80 (1964-IGPI).

Procedimento: Mediu-se a altura (a) e a espessura (e) sensivelmente no meio da zona onde ocorre o rompimento do provete. De seguida, ajustou-se o provete entre os apoios e aplicou-se a carga em forma crescente e uniforme até ao seu rompimento. A tensão de ruptura à flexão é calculada pela fórmula abaixo.

$$u_F = \frac{3 \times d \times F}{2 \times e \times a^2} \quad (4)$$

onde: F = Força aplicada; d = Distância entre os apoios; e = Espessura do provete; a = Altura do provete; 3/2 = Constante K. O resultado deve ser aproximado às centésimas.



Figura 17: Prensa de ensaio à flexão

3.4.3 Ensaios de compressão

Foram moldados corpos de prova cúbicos para a realização de ensaios de compressão, de acordo com adaptação da Norma NP-80 (1964-IGPI). Para realizar o ensaio pôs-se o corpo de prova em direcção às duas faces que entram em contacto com os pratos da prensa. Em seguida, havendo irregularidades, não foi o caso neste trabalho, estas são eliminadas usando-se uma camada de argamassa não superior a 5 mm. Após a secagem da argamassa, efectuou-se o ensaio de compressão, aplicando a força a uma velocidade de 100 Kgf/cm², por minuto, até à ruptura do provete. A tensão de ruptura à compressão é calculada pela fórmula abaixo:

$$u_c = \frac{F}{l \times e} \quad (5)$$

onde: F = Força aplicada; $l \times e$ = média das áreas do trabalho do provete. O resultado deve ser aproximado às centésimas.



Figura 18: Prensa de ensaio à compressão

3.4.4 Ensaio de Análise Termogravimétrica

Para a realização de análises termogravimétricas usou-se amostras secas em estufa e outras submetidas ao teste de absorção de água. Todas as amostras foram aquecidas de 25 a 1000 °C, à taxa de aquecimento de 10 °C/min. As amostras analisadas tinham massa de cerca de 15 mg, tendo sido colocadas em cadinhos de alumina 150. Este ensaio visava a determinação das propriedades térmicas (estabilidade térmica e temperaturas de degradação) da fibra celulósica de caniço, numa atmosfera oxidativa, com fluxo de ar de 50 mL/min. As análises termogravimétricas foram realizadas pela Universidade de Pretória.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tabelas de resultados

A Tabela 8 apresenta os valores médios das massas m_1 , m_2 e m_3 , porosidade aparente (Pa) e densidade aparente (Da) em diferentes teores da fibra. Os compósitos com 15% de fibra apresentam baixo percentual de vazios permeáveis. Porém, a adição de fibras devia resultar na incorporação de vazios (poros) na matriz (Lima, 2004). A Tabela 8 mostra um aumento de porosidade com a incorporação de fibras, excepto para compósitos com 15% mássicos.

Tabela 8: Massa, porosidade aparente e densidade aparente em função dos teores de fibra

| % de fibras | m_1 (g) | m_2 (g) | m_3 (g) | Pa (%) | Da(Kg/m ³) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|--------|------------------------|
| 0 | 102 | 78,82 | 45,95 | 41,36 | 1406,11 |
| 15 | 102,03 | 78,12 | 34,06 | 35,18 | 1149,29 |
| 20 | 104,58 | 79,87 | 46,36 | 42,45 | 1371,62 |
| 25 | 97,92 | 73,49 | 43,17 | 44,62 | 1342,13 |

m_1 = Peso do provete saturado; m_2 = Peso do provete seco na estufa; m_3 = Peso do provete submerso

4.2 Absorção de água

A Tabela 9 apresenta valores em massa dos compósitos após a secagem na estufa e imersos em água por 24 h. A discrepância das massas deveu-se ao facto dos corpos de prova quebrarem-se irregularmente. Assim, no ensaio da absorção de água usou-se porções diferentes dos corpos de prova, em função de como estes se quebravam.

Os valores médios da absorção de água (Tabela 9) mostram uma tendência crescente com o aumento do teor de fibra. Isto é atribuído a alta capacidade de absorção de água pelas fibras, pois têm comportamento higroscópico.

Tabela 9: Massa de provetes (em gramas) depois de imersos na água, secos na estufa durante 24h e valores em percentagens do ensaio de absorção de água (Aa).

| PROVETES IMERSOS NA ÁGUA (m₁) | | | | |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N | 0% fibras (g) | 15% fibras (g) | 20% fibras (g) | 25% fibras (g) |
| 1 | 101,4 | 95,4 | 93,2 | 96,7 |
| 2 | 94,2 | 96,7 | 95,1 | 87,4 |
| 3 | 104,1 | 112,9 | 102,9 | 100,7 |
| 4 | 116,4 | 91,4 | 116,7 | 106,8 |
| 5 | 97,5 | 100,6 | 115,3 | 103,1 |
| 6 | 92,3 | 104,9 | 97,2 | 96,2 |
| 7 | 111,9 | 109,6 | 96,5 | 93,8 |
| 8 | 98,2 | 105,0 | 119,9 | 98,8 |
| μ | 102,0 | 102,1 | 104,6 | 97,9 |
| D.P | 8,4 | 7,4 | 10,9 | 5,9 |
| I.C | 102±7,1 | 102,1±6,2 | 104,6±9,1 | 97,9±5,0 |
| PROVETES SECOS NA ESTUFA (m₂) | | | | |
| 1 | 78,7 | 73,3 | 70,9 | 72,2 |
| 2 | 71,6 | 74,2 | 72,1 | 65,4 |
| 3 | 80,8 | 86,9 | 78,3 | 75,7 |
| 4 | 91,0 | 69,6 | 89,6 | 79,8 |
| 5 | 75,9 | 76,8 | 88,3 | 77,2 |
| 6 | 70,4 | 80,1 | 74,5 | 72,7 |
| 7 | 85,5 | 83,4 | 73,5 | 70,7 |
| 8 | 76,5 | 80,8 | 91,7 | 74,3 |
| μ | 78,8 | 78,1 | 79,9 | 73,5 |
| D.P | 6,9 | 5,7 | 8,6 | 4,4 |
| I.C | 78.8±5,8 | 78,1±4,8 | 79,9±7,2 | 73,5±3,4 |
| ABSORÇÃO DE ÁGUA | | | | |
| 1 | 28,8 | 30,2 | 31,5 | 33,9 |

| | | | | |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2 | 31,6 | 30,3 | 32,0 | 33,6 |
| 3 | 28,8 | 29,9 | 31,4 | 33,0 |
| 4 | 27,9 | 31,3 | 30,2 | 33,8 |
| 5 | 28,5 | 31,0 | 30,6 | 35,5 |
| 6 | 31,1 | 31,0 | 30,5 | 32,3 |
| 7 | 30,9 | 31,4 | 31,3 | 32,7 |
| 8 | 28,4 | 30,0 | 30,8 | 33,0 |
| μ | 29,5 | 30,6 | 31,0 | 33,5 |
| D.P | 1,4 | 0,6 | 0,6 | 0,92 |
| I.C | 29,5 \pm 1,0 | 30,6 \pm 0,4 | 31,0 \pm 0,4 | 33,5 \pm 0,7 |

Legenda: D.P-Desvio padrão, I.C-Intervalo de confiança μ -média das réplicas, N-número de réplicas

O aumento da absorção de água foi ligeiro e regular (Figura 19). Especula-se que o principal mecanismo de absorção de água é o comportamento higroscópico da fibra vegetal, em vez da formação de vazios. Compósitos com 15% de fibras absorveram mais água do que as amostras de controlo (0% fibras), embora a porosidade de amostras com 0% fibras tenha sido maior que a de amostras com 15 % fibras (Tabela 8).

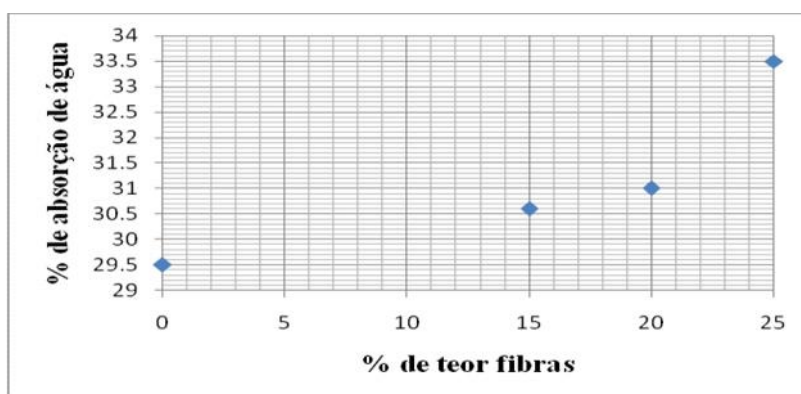


Figura 19: Absorção de água em função do teor de fibra adicionada

4.3 Resistência à flexão

A incorporação de fibras em matrizes cimentícias possibilita melhorar várias propriedades mecânicas. A Tabela 10 apresenta resultados do ensaio da resistência à flexão para amostras com 0, 15, 20 e 25% de fibras. As amostras de controlo (0% de fibras) apresentam valores baixos de resistência à flexão, assim como da carga máxima aplicada, quando comparados com os compósitos contendo fibras. Em um compósito sem adição de fibras, a abertura progressiva de uma fissura dá origem ao colapso da peça. Porém, nos compósitos com fibras a fractura é retardada: as pontes de transferência formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída (Bernardi, 2003). A Tabela 10 mostra os resultados de resistência à flexão dos compósitos com 15% de fibras. Tanto os valores obtidos na resistência à flexão, assim como na carga máxima aplicada, são melhores quando comparados com os de 0, 20 e 25% de fibra. Por sua vez os valores de resistência à flexão dos compósitos com 20% de fibras e a carga máxima aplicada superam os de 0 e de 25% de fibras. Finalmente, os valores de resistência à flexão dos compósitos com 25% fibras bem como os da carga máxima aplicada só são bons em relação aos de 0% fibra.

Tabela 10: Força aplicada sobre provetes com 0, 15, 20 e 25 % de fibras, medida em (Kgf)

| N | a (cm) | e (cm) | d (cm) | F (Kgf) | F(Kgf/cm ²) | F(MPa) |
|-------------------|--------|--------|--------|---------|-------------------------|--------|
| 0 % FIBRAS | | | | | | |
| 1 | 2,50 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 3,20 | 0,31 |
| 2 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 1,00 | 0,74 | 0,07 |
| 3 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,96 | 0,29 |
| 4 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,43 | 0,34 |
| 5 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,96 | 0,29 |
| 6 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 2,00 | 1,37 | 0,13 |
| 7 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 2,00 | 1,48 | 0,15 |
| 8 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,74 | 0,27 |
| μ | 2,63 | 2,40 | 8,00 | 3,25 | 2,36 | 0,23 |
| D.P | 0,07 | | | 1,30 | 0,94 | 0,09 |

| | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------|--------|-----------|-------------------------|-----------|
| I.C | 2,63±0,05 | | | 3,25±0,10 | 2,36±0,84 | 0,23±0,07 |
| 15 % FIBRAS | | | | | | |
| 1 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 2,00 | 1,48 | 0,15 |
| 2 | 2,80 | 2,40 | 8,00 | 8,00 | 5,10 | 0,50 |
| 3 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 7,00 | 5,18 | 0,51 |
| 4 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 7,00 | 5,18 | 0,51 |
| 5 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,70 | 0,36 |
| 6 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 6,00 | 4,44 | 0,44 |
| 7 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 6,00 | 4,12 | 0,40 |
| 8 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,43 | 0,34 |
| μ | 2,65 | 2,40 | 8,00 | 5,75 | 4,08 | 0,40 |
| D.P | 0,07 | | | 1,71 | 1,67 | 0,11 |
| I.C | 2,65±0,05 | | | 5,75±1,32 | 4,08±1,04 | 0,40±0,09 |
| 20 % FIBRAS | | | | | | |
| N | a (cm) | e (cm) | d (cm) | F (Kgf) | F(Kgf/cm ²) | F(MPa) |
| 1 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,70 | 0,36 |
| 2 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,74 | 0,27 |
| 3 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 3,00 | 2,22 | 0,22 |
| 4 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,43 | 0,34 |
| 5 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 6,00 | 4,44 | 0,44 |
| 6 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,70 | 0,36 |
| 7 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,96 | 0,29 |
| 8 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 6,00 | 4,12 | 0,40 |
| μ | 2,64 | 2,40 | 8,00 | 4,75 | 3,41 | 0,34 |
| D.P | 0,05 | | | 1,04 | 0,74 | 0,07 |
| I.C | 2,64±0,04 | | | 4,75±0,87 | 3,41±0,62 | 0,34±0,06 |

| 25 % FIBRAS | | | | | | |
|--------------------|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 3,00 | 0,29 |
| 2 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 3,00 | 2,06 | 0,20 |
| 3 | 2,80 | 2,40 | 8,00 | 8,00 | 5,10 | 0,50 |
| 4 | 2,80 | 2,40 | 8,00 | 5,00 | 3,19 | 0,31 |
| 5 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 3,00 | 2,06 | 0,20 |
| 6 | 2,60 | 2,40 | 8,00 | 3,00 | 2,22 | 0,22 |
| 7 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 6,00 | 4,12 | 0,40 |
| 8 | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 4,00 | 2,74 | 0,27 |
| μ | 2,70 | 2,40 | 8,00 | 4,50 | 3,06 | 0,30 |
| D.P | 0,08 | | | 1,77 | 1,08 | 0,11 |
| I.C | 2,70 \pm 0,06 | | | 4,50 \pm 1,48 | 3,06 \pm 0,90 | 0,30 \pm 0,09 |

A adição de fibras em compósitos tendencialmente aumenta a resistência à flexão até um teor óptimo, a partir do qual há decréscimo na resistência. Isto é explicado da seguinte maneira: após certa taxa de polpa, a concentração volumétrica da fibra acarreta dificuldade na mistura e dispersão (Anjos *et al.*, 2003).

No presente caso, o teor ideal de reforço ocorreu para os compósitos com 15% de fibras. Observou-se um ligeiro decréscimo da força aplicada nos compósitos com 20 e 25% de fibras. Assim, assume-se que, acima deste percentual (15%), as fibras já não desempenham um efeito de reforço desejado.

Os resultados da resistência à flexão, bem como de outras grandezas, foram calculados à um nível de confiança de 95 %.

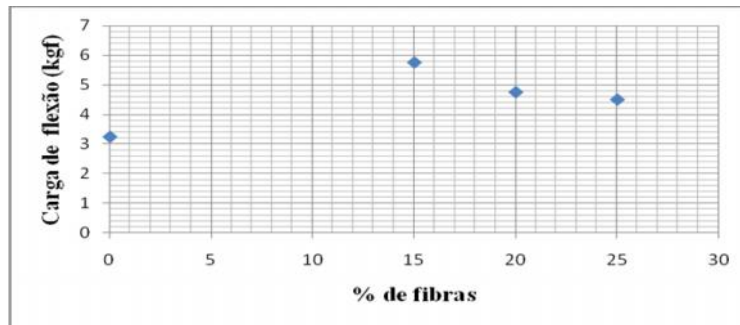


Figura 20: Carga de flexão em função do teor de fibra

4.4 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão (Tabela 11) das amostras com 0% fibras são maiores quando comparados com os compósitos contendo 15, 20 e 25% de fibras, conforme esperado. A adição de fibras naturais em matrizes cimentícias diminui a resistência à compressão (Lima, 2004). Isto é atribuído a eventual aglomeração de fibras e consequente formação de novelos. Estes geram vazios e pontos de concentrações de tensões (Lima, 2004). Adicionalmente, este resultado está ligado às densidades inferiores dos blocos que contêm as fibras. Além disso, foi difícil moldar e compactar o conteúdo contendo fibras, o que pode ter conduzido à formação de defeitos nos blocos.

Tabela 11: Resistência à compressão de cubetas de 0, 15, 20 e 25 % de fibras medida em (Kgf)

| N | l (cm) | e (cm) | F (Kgf) | c(Kgf/cm ²) | c(MPa) |
|-------------------|--------|--------|---------|-------------------------|--------|
| 0 % FIBRAS | | | | | |
| 1 | 5,00 | 5,00 | 1175,00 | 47,00 | 4,61 |
| 2 | 5,00 | 5,00 | 1325,00 | 53,00 | 5,20 |
| 3 | 5,00 | 5,00 | 1350,00 | 54,00 | 5,30 |
| 4 | 5,00 | 5,00 | 1050,00 | 42,00 | 4,12 |
| 5 | 5,00 | 5,00 | 975,00 | 39,00 | 3,83 |
| 6 | 5,00 | 5,00 | 862,50 | 34,50 | 3,38 |

| | | | | | |
|--------------------|--------|--------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| μ | 5,00 | 5,00 | 1122,92 | 44,92 | 4,41 |
| D.P | | | 178,01 | 7,12 | 0,70 |
| I.C | | | 1122,92 \pm 164,63 | 44,92 \pm 6,59 | 4,41 \pm 0,65 |
| 15 % FIBRAS | | | | | |
| 1 | 5,00 | 5,00 | 225,00 | 9,00 | 0,88 |
| 2 | 5,00 | 5,00 | 225,00 | 9,00 | 0,88 |
| 3 | 5,00 | 5,00 | 250,00 | 10,00 | 0,98 |
| 4 | 5,00 | 5,00 | 225,00 | 9,00 | 0,88 |
| 5 | 5,00 | 5,00 | 225,00 | 9,00 | 0,88 |
| 6 | 5,00 | 5,00 | 175,00 | 7,00 | 0,69 |
| μ | 5,00 | 5,00 | 220,83 | 8,83 | 0,87 |
| D.P | | | 24,58 | 0,98 | 0,09 |
| I.C | | | 220,83 \pm 25,80 | 8,83 \pm 1,03 | 0,87 \pm 0,10 |
| 20 % FIBRAS | | | | | |
| N | l (cm) | e (cm) | F (Kgf) | c(Kgf/cm ²) | c(MPa) |
| 20 % FIBRAS | | | | | |
| 1 | 5,00 | 5,00 | 260,00 | 10,40 | 1,02 |
| 2 | 5,00 | 5,00 | 125,00 | 5,00 | 0,49 |
| 3 | 5,00 | 5,00 | 200,00 | 8,00 | 0,79 |
| 4 | 5,00 | 5,00 | 150,00 | 6,00 | 0,59 |
| 5 | 5,00 | 5,00 | 200,00 | 8,00 | 0,79 |
| 6 | 5,00 | 5,00 | 110,00 | 4,40 | 0,48 |
| μ | 5,00 | 5,00 | 174,17 | 6,97 | 0,69 |
| D.P | | | 56,25 | 2,25 | 0,21 |
| I.C | | | 174,17 \pm 59,03 | 6,97 \pm 2,36 | 0,69 \pm 0,22 |
| 25 % FIBRAS | | | | | |
| 1 | 5,00 | 5,00 | 75,00 | 3,00 | 0,29 |

| | | | | | |
|-------|------|------|-------------|-----------|-----------|
| 2 | 5,00 | 5,00 | 75,00 | 3,00 | 0,29 |
| 3 | 5,00 | 5,00 | 75,00 | 3,00 | 0,29 |
| 4 | 5,00 | 5,00 | 100,00 | 4,00 | 0,39 |
| 5 | 5,00 | 5,00 | 90,00 | 3,60 | 0,35 |
| 6 | 5,00 | 5,00 | 62,00 | 2,48 | 0,24 |
| μ | 5,00 | 5,00 | 79,50 | 3,18 | 0,31 |
| D.P | | | 13,40 | 0,53 | 0,05 |
| I.C | | | 79,50±14,06 | 3,18±0,56 | 0,31±0,06 |

4.5 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica é uma importante ferramenta para obter informações inerentes a transições de fases e para determinar as propriedades térmicas de fibras vegetais, analisar a sua estabilidade térmica e temperatura de degradação. Os resíduos de decomposição de fibra apresentam uma lenta taxa de decomposição, acumulando-se e contribuindo certa massa no resíduo final. As amostras com 15 e 25% de fibra apresentam anomalias nos resíduos e nos voláteis com e sem água (Tabela 12).

Tabela 12: Resíduos e voláteis de cada amostra

| Composição | Resíduo | Voláteis |
|---------------|---------|----------|
| 0 % com água | 81,8 | 18,2 |
| 0 % sem água | 82,8 | 17,2 |
| 15 % com água | 80 | 20 |
| 15 % sem água | 77,3 | 22,7 |
| 20 % com água | 75 | 25 |
| 20 % sem água | 79,1 | 20,9 |
| 25 % com água | 79,7 | 20,3 |
| 25 % sem água | 78,2 | 21,8 |

Os termogramas das amostras de referências (0% fibras) sem água e com água mostram uma diferença na taxa de desidratação abaixo de 100 °C, conforme esperado. A desidratação é acelerada na amostra com água.

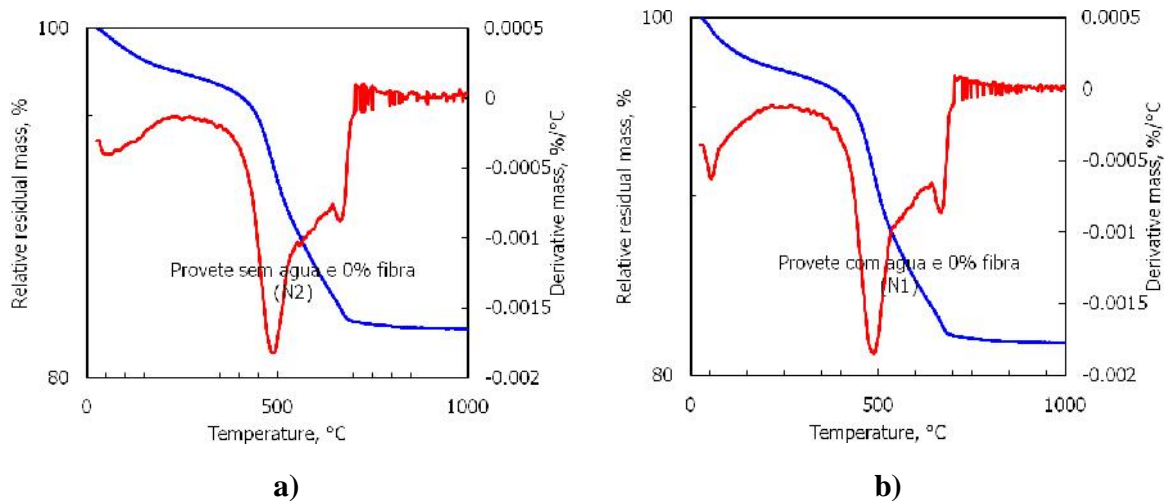


Figura 21: Termogramas das amostras sem fibra e sem água e com água

Na Figura 21, além da desidratação outros dois eventos térmicos foram registrados, sendo que o último evento ocorre com maior rapidez na amostra com água, Figura 21b.

Nas Figuras 22-24, termogramas de amostra com fibras, registou-se a presença de três picos adicionais, identificados na Tabela 13 como sendo de hemicelulose, celulose e lignina. Contrariamente ao defendido por Anjos *et al.* (2003) e Tonoli (2009), o método kraft (método sulfato) não foi eficiente na remoção desses componentes da fibra.

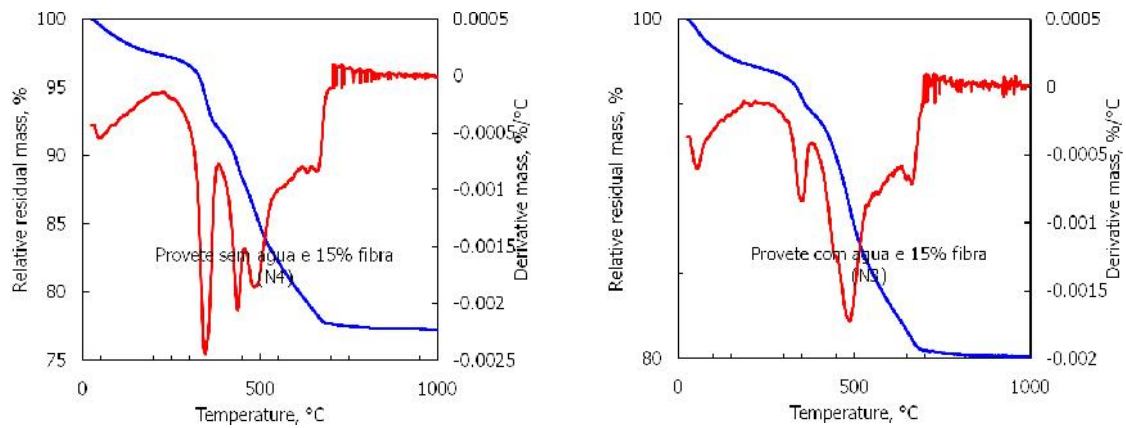


Figura 22: Termogramas das amostras com 15% fibra sem água e com água

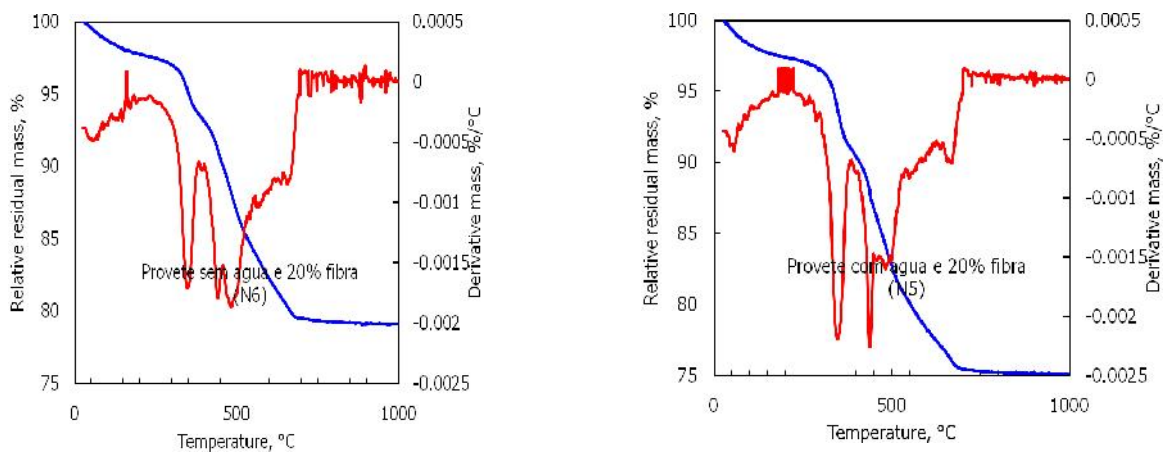


Figura 23: Termogramas das amostras com 20% fibra sem água e com água

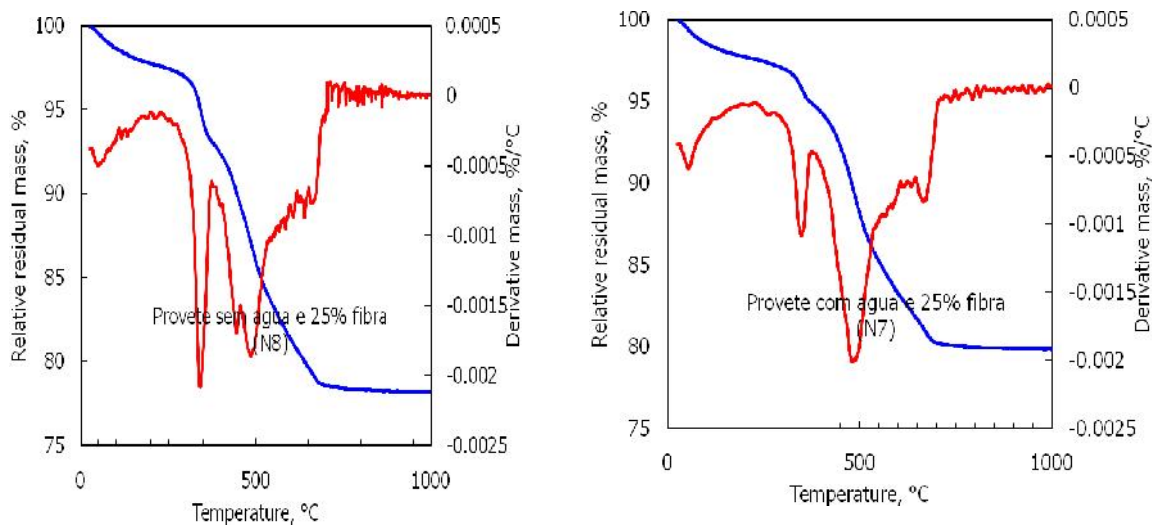


Figura 24: Termogramas das amostras com 25% fibra sem água e com água

Tabela 13: Temperaturas onde ocorre perda máxima em eventos térmicos associados à presença de fibra nas amostras

| Amostras | Hemicelulose | Celulose | Lignina |
|--------------|--------------|-------------|---|
| 15% com água | 350 °C | 438-455 °C | 626 °C |
| 15% sem água | 344 °C | 436 °C | 630 °C |
| 20% com água | 348 °C | 438 °C | Lentamente e numa ampla faixa de temperaturas incluindo 626/30 °C |
| 20% sem água | 347 °C | 441 °C | Lentamente e numa ampla faixa de temperaturas incluindo 626/30 °C |
| 25% com água | 346 °C | Inexistente | Lentamente e numa ampla faixa de temperaturas incluindo 626/30 °C |
| 25% sem água | 340 °C | 444 °C | Lentamente e numa ampla faixa de temperaturas incluindo 626/30 °C |

As temperaturas onde ocorre perda máxima em eventos térmicos semelhantes em todas amostras, não associados à presença de fibras, estão indicadas na Tabela 14.

Tabela 14: Temperaturas onde ocorre perda máxima em eventos térmicos semelhantes em todas amostras

| Amostra | Evento inicial | Evento intermédio | Evento final |
|----------------|--|--------------------------|---------------------|
| 0% com água | 53 °C, degradação lenta | 464 °C | 666 °C |
| 0% sem água | Ampla faixa de temperatura, degradação lenta | 462 °C | 663 °C |
| 15% com água | 51 °C, degradação lenta | 486 °C | 662 °C |
| 15% sem água | Ampla faixa de temperatura, degradação lenta | 483 °C | 657 °C |
| 20% com água | Ampla faixa de temperatura, degradação lenta | 482 °C, degradação lenta | 669 °C |
| 20% sem água | Ampla faixa de temperatura, degradação lenta | 482 °C | 656 °C |
| 25% com água | 52 °C, degradação lenta | 479 °C | 662 °C |
| 25% sem água | 50 °C, degradação lenta | 485 °C | 661 °C |

Em amostra com água, a degradação de hemicelulose e de celulose ocorrem lentamente em comparação com amostra sem água para teores de fibra de 15 e 25%. Porém, para amostras com 20% fibra ocorre o contrário, a que contem água sofre degradação mais acelerada da hemicelulose e celulose em relação a amostra sem água.

V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

As fibras celulósicas foram extraídas de caniço pelo método kraft (método sulfato). Entretanto, o método não foi eficiente na remoção da lignina e hemicelulose, conforme defendido por alguns autores.

A resistência à flexão apresentou tendência de crescimento com o aumento no teor de reforço até um ponto ótimo que, no caso presente, foi a 15% de fibras. Acima deste teor de fibra houve dificuldade de misturar e dispersar as fibras no compósito, o que ocasionou a diminuição da resistência à flexão. Na percentagem ideal de 15%, as fibras promoveram uma resistência à flexão de 77%, em relação à matriz.

A incorporação de fibras aumentou significativamente a absorção de água, reduziu ligeiramente a porosidade aparente para o caso de 15% e aumentou subitamente nos compósitos com 20 e 25% de fibras.

A incorporação de fibras diminuiu significativamente a resistência à compressão quando comparado com os compósitos sem reforço.

Concluiu-se, então, que o uso da fibra celulósica de caniço para o reforço de propriedades mecânicas de compósitos à base de matrizes argilo-cementícias como alternativa na fabricação de blocos ecologicamente sustentáveis e economicamente acessíveis à população de países em desenvolvimento não é viável.

5.2 Recomendações

Para melhor investigação da influência da fibra vegetal sobre as propriedades mecânicas dos compósitos à base de cimento, recomenda-se o uso de: (i) ensaio termogravimétrico para determinar os teores de fibras incorporados à matriz, (ii) uma prensa de flexão não convencional e bem calibrada, pois neste trabalho foi usada uma prensa em que a tara era 23 kgf e não zero

como habitual, (iii) um misturador eléctrico para evitar a aglomeração das fibras e consequente surgimento de pontos de concentrações de tensão. Também se recomenda a comparação da resistência à flexão e à compressão de compósitos com a mesma composição, curados no ar com outros imersos em água. Neste trabalho, somente se usou a água como agente de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A. E. F. S; Tonoli, G. H. D; Santos, S. F; Savastano, H. J. (2010). *Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas*. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Brasil.

Amorim, A. A. (2010). *Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes*. Curso de especialização em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Anjos, M. A; Ghavami, K; Barbosa, N. P. (2003). Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu (Brasil). *Engenharia Agrícola e Ambiental*, **7**: 339-345.

Azenha, M. A. D. (2004). *Comportamento do betão nas primeiras idades, fenomenologia e análise termo mecânica*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Barreto, T. F. A. (2011). *Avaliação da durabilidade e desempenho térmico de telhas reforçadas com resíduos de fibras de coco*. Trabalho de bacharel em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil.

Bernardi, S. T. (2003). *Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de aramida kevlar*. Tese de mestrado, Univerdade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Carneiro, V. L. (2010). *Perspectivas do Aproveitamento de Resíduo de Casca de Coco em Produtos de Fibrocimento*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Brasil.

Caux, L. S (2009). *Modificação da celulose Kraft branqueada de eucalipto por tratamento térmico e de radiação ultravioleta*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

Christófolli, J. L. (2010). *Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba*. Dissertação de mestrado em construção civil, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Daltro, N. R. (2011). *Desenvolvimento de um laminado compósito híbrido a base de fibras de vidro/licurí*. Dissertação de mestrado, Universidade de Rio Grande de Norte, Brasil.

Denari, G. B; Cavalheiro, E. T. G. (2012). *Princípios e aplicações de análise térmica*. Material de apoio de curso prático e teórico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Dias, B. P. (2011). *Bagaço de cana-de-açúcar: matéria-prima para fabricação de materiais biodegradáveis*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Brasil.

Félix, A. H. O. (2002). *Compósitos de polipropileno com fibras de vidro utilizando viniltrióxissilano como agente de adesão*. Dissertação de mestrado, Universidade do Rio Grande do Porto Sul, Porto Alegre, Brasil.

Filho, J. F; Filho, R. D. T & Lima, P. R. L. (2010). Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal (Brasil). *Engenharia Agrícola e Ambiental*, **14**: 1109–1114.

Filho, N. T. A; Dantas, C. P; Leal, A. F; Barbosa, N. P; Silva, C. G; Alexandre, M. V. (2012). Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal (Brasil). *Engenharia Agrícola e Ambiental*, **16**: 1415-4366.

Klock, U; Muñiz, G. I. B; Hernandez, J. A; Andrade, A. S. (2005). *Química da madeira*, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 3ª edição, Paraná, Brasil.

Lima, P. R. L. (2004). *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, Brasil.

Lima, S. Y. V. (2011). *Propriedades físicas e mecânicas de compósitos a base de gesso contendo fibras e resíduos*. Trabalho de licenciatura, Universidade Federal do Semi-árido, Brasil.

Lopes, F. F. M; Araújo, G. T; Luna, S; Nascimento, J. W. B; Silva, V. R. (2011). Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação (Brasil). *Engenharia Agrícola e Ambiental*, **15**: 1807-1929.

Mano, E. B. (2000). *Polímeros como materiais de engenharia*. 2ª edição, Edgard blucher. São Paulo.

Martin, A. R; Martins, M. A; Mattoso, L. H. C; Silva, O. R. R. F. (2009). *Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agavesisalana*. Associação brasileira de polímeros, Brasil.

Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. (2008). *Estrutura, propriedades e materiais*. 3ª edição. Ibracon, São Paulo, Brasil.

Mussequejua, M. J. (2013). *Compósitos reforçados com fibras de celulose*. Trabalho de licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique.

Navarro, R. M. S; Navarro, F. M. S; Tambourgi, E. B. (2007). Estudo de diferentes processos de obtenção da pasta celulósica para fabricação de papel (Brasil). *Ciência e Tecnologia*, 1: 1-5.

Oliveira, C. A. S. (2004). *Comportamento físico e avaliação microestrutural de argamassas produzidas a partir da mistura exaurida gerada na indústria de magnésio metálico*. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Picanço, M. S. (2005). *Compósitos Cimentícios Reforçados Com Fibras de Cuará*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Rohden, B. B. (2001). *Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho*. Tese de mestrado em engenharia civil, Universidade de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Rossetto, H. L; Sousa, M. F; Pandolfelli, V. C. (2009). Adesão em materiais cimentícios (Brasil). *In-built nanotechnology*, **55**: 199-205.

Santos, A. M. (2006). *Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Savastano, H. (2000). *Materiais à Base de Cimento Reforçados com Fibra Vegetal: Reciclagem de resíduos para construção de baixo custo*. Tese (Livre-Docência em Materiais e Componentes de Construção). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Silva, A. C. (2002). *Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Silva, F. G. (1997). *Polpação kraft do eucalipto com adição de antraquinona, polissulfetos e surfactante*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

Soto, I. I; Ramalho, M. A; Izquierdo, O. S. (2013). Comportamento pós-fissuração de blocos, prismas e pequenas paredes de concreto reforçado com fibra vegetal (Brasil). *Ibracon de estruturas e materiais*, **6**: 598-612.

Sousa, G. D. A; Soares, B. I. G. (2010). *Estudos avançados de cozimento Kraft da madeira de eucalyptus globulus*. Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Lisboa, Portugal.

Souza, S. F. (2010). *Obtenção de nanofibras de curauá e aplicação como reforço em compósitos baseados em PVA*. Dissertação de mestrado em Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Brasil.

Tonoli, G. H. D. (2009). *Fibras curtas de eucalipto para novas tecnologias em fibrocimentos*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.