

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÕES RURAIS

ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADA COM FIBRAS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA UTILIZAÇÃO COMO
MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

por

CECILIA RAMÍREZ SARMIENTO

Orientador:

Prof. Dr. Wesley Jorge Freire

Barcar

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Cecilia Ramirez Sarmiento e aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de setembro de 1996. Campinas, 31 de outubro de 1996.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Construções Rurais.

Presidente da Banca CAMPINAS - SP

Setembro de 1996

Wesley Jorge Freire



| | |
|-------------|-------------------------------------|
| UNIDADE | BC |
| N.º CHAMADA | TUNICAMP |
| | R145a |
| Ex. | |
| COMBO BC/ | 31546 |
| NºOC. | 281197 |
| C | <input type="checkbox"/> |
| D | <input checked="" type="checkbox"/> |
| RECEB. | RB11400 |
| | 30/08/97 |

CM-00100035-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R145a Ramírez Sarmiento, Cecilia
Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção / Cecilia Ramírez Sarmiento.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Wesley Jorge Freire.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Compostos fibrosos. 2. Cimento portland. 3. Biomassa vegetal. 4. Placas (Engenharia). 5. Argamassa. 6. Bagaço de cana. I. Freire, Wesley Jorge. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

A mi adorada hijita Camila.

A mi querido esposo Tito.

A mis extrañados padres.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Dr. Wesley Jorge Freire, orientador de esta disertación, a quien le debo la más profunda admiración tanto por su capacidad intelectual, por la seriedad con la que encara su vida profesional, así como también, por la amistad surgida a lo largo de este período.

Al Prof. Dr. Antonio L. Beraldo por su experiencia y contribución en varios momentos de este trabajo.

A los Profesores del Departamento de Construcciones Rurales y de toda la FEAGRI.

A las secretarias: Vanessa, Deise, Ana y Marta, por la atención prestada.

A los laboratoristas, a las personas del Campo Experimental y a todos los funcionarios de la FEAGRI, por la gran ayuda.

A los diferentes laboratorios de la UNICAMP, que hicieron posible la realización de los ensayos:

- Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil, en particular a la Dra. Gládis, a Luciano y a Marçal.
- Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil, en especial a la Dra. Stellamaris.
- Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Alimentos.
- Laboratorio de Instrumentación y Medidas del Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, de la Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Laboratorio de Inclusiones Fluídas de Microtermometría del Instituto de Geociências.

A mis amigos del "mestrado" William, Yamilia, Mário, Paulo, Mariella, Nilda, Celina, André y a todos los colegas de la "pós", con los cuales fue muy bueno estudiar y compartir lindos momentos.

A mi hermano Richard, por el “incentivo” a venir a estudiar al Brasil.

A la Usina São Martinho por el fornecimiento del bagazo y a la COPERSÚCAR.

A la CAPES por el apoyo financiero.

A la CPG/FEAGRI por los recursos fornecidos.

A todos aquellos que directa o indirectamente contribuyeron para la realización de esta disertación.

Muchas gracias a todos “você” por la cariñosa acogida lejos de mi patria.

CONTEÚDO

| | página |
|---|--------|
| CONTEÚDO..... | v |
| LISTA DE QUADROS..... | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| RESUMO..... | xi |
| SUMMARY..... | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 01 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 04 |
| 2.1. Definição e Histórico dos Materiais Compósitos..... | 04 |
| 2.2. Propriedades dos Compósitos..... | 06 |
| 2.3. Matriz..... | 07 |
| 2.4. Biomassa Vegetal..... | 09 |
| 2.4.1. Características das Fibras Vegetais..... | 11 |
| 2.4.2. Características do Bagaço de Cana-de-açúcar..... | 12 |
| 2.4.2.1. Composição Física do Bagaço..... | 13 |
| 2.4.2.2. Composição Morfológica do Bagaço..... | 14 |
| 2.4.2.3. Densidade e Umidade do Bagaço..... | 15 |
| 2.4.2.4. Composição Química do Bagaço..... | 16 |
| 2.4.2.5. Desmedulação do Bagaço..... | 17 |
| 2.4.2.6. Armazenamento e Usos do Bagaço..... | 18 |
| 2.4.2.7. Características Físicas das Fibras do Bagaço..... | 20 |
| 2.5. Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento..... | 23 |
| 2.5.1. Incompatibilidade Química entre a Biomassa Vegetal e o Cimento..... | 24 |
| 2.5.1.1. Influência da Biomassa Vegetal..... | 25 |

| | |
|--|----|
| 2.5.1.2. Influência da Matriz..... | 26 |
| 2.5.2. Tratamentos para Redução de Incompatibilidade com a Matriz Cimentícia..... | 28 |
| 2.5.3. Compósitos com Fibras Vegetais..... | 33 |
| 2.5.3.1. Compósitos com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar..... | 38 |
| 2.5.3.2. Normatização para Compósitos em Forma de Chapas ou Painéis..... | 45 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 47 |
| 3.1. Materiais..... | 47 |
| 3.1.1. Bagaço de cana-de-açúcar..... | 47 |
| 3.1.2. Aditivos Químicos..... | 47 |
| 3.1.3. Cimento e Areia..... | 48 |
| 3.1.4. Água..... | 48 |
| 3.1.5. Equipamentos de Laboratório..... | 48 |
| 3.2. Métodos..... | 50 |
| 3.2.01. Ensaios Preliminares Aplicados ao Bagaço de Cana-de-açúcar..... | 50 |
| 3.2.02. Determinação do Teor de Açúcar Residual do Bagaço de Cana-de-açúcar..... | 52 |
| 3.2.03. Tratamento Químico das Fibras do Bagaço de Cana-de-açúcar..... | 52 |
| 3.2.04. Determinação do Diâmetro e Comprimento das Fibras..... | 54 |
| 3.2.05. Determinação do Teor de Umidade..... | 55 |
| 3.2.06. Determinação da Massa Específica Aparente das Fibras..... | 55 |
| 3.2.07. Determinação da Massa Específica Aparente das Fibras Secas e Solta..... | 56 |
| 3.2.08. Ensaio de Absorção de Água das Fibras..... | 56 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.09. Determinação da Água da Pasta de Cimento de Consistência Normal..... | 56 |
| 3.2.10. Determinação dos Tempos de Pega da Pasta de Cimento..... | 57 |
| 3.2.11. Ensaio de Expansibilidade da Pasta de Cimento..... | 58 |
| 3.2.12. Escolha dos Traços para a Confeção dos Corpos-de-prova..... | 58 |
| 3.2.13. Determinação do Índice de Consistência Normal da Argamassa de Cimento:Areia:Fibras..... | 59 |
| 3.2.14. Moldagem dos Corpos-de-prova..... | 59 |
| 3.2.15. Ensaio de Compressão Simples..... | 60 |
| 3.2.16. Ensaio de Tração na Compressão Diametral..... | 61 |
| 3.2.17. Escolha do Tratamento..... | 61 |
| 3.2.18. Moldagem das Placas..... | 62 |
| 3.2.19. Ensaio à Flexão..... | 70 |
| 3.2.20. Ensaio de Condutibilidade Térmica..... | 72 |
| 3.2.21. Ensaio de Absorção Acústica..... | 74 |
| 3.2.22. Ensaio de Absorção de Água..... | 76 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 78 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 98 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 101 |

LISTA DE QUADROS

| | página |
|--|--------|
| Quadro 1 Massa específica aparente do bagaço de cana-de-açúcar em função da umidade e a compactação..... | 16 |
| Quadro 2 Características típicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar..... | 21 |
| Quadro 3 Características físicas de algumas fibras vegetais..... | 22 |
| Quadro 4 Comparação das características físicas do bagaço de cana-de-açúcar com outras fibras usadas na indústria de celulose, polpa e papel..... | 23 |
| Quadro 5 Propriedades dos compósitos de bagaço de cana-de-açúcar e cimento..... | 44 |
| Quadro 6 Exigências físicas para a fabricação de chapas de isolamento térmico para fins de cobertura e paredes, conforme a Norma ASTM C208-72..... | 46 |
| Quadro 7 Redução do teor de açúcar residual em função da lavagem a quente do bagaço de cana-de-açúcar..... | 79 |
| Quadro 8 Porcentagem de absorção de água com fibras de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo..... | 79 |
| Quadro 9 Principais características físicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar..... | 83 |
| Quadro 10 Tempos Inicial (TIP) e Final (TFP) de pega da pasta de cimento, horas-minutos, preparada com água de amassamento de diferentes composições..... | 83 |
| Quadro 11 Ensaio de expansibilidade da pasta de cimento preparada con água de amassamento na qual foram previamente mergulhados fibras quimicamente tratadas..... | 85 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Quadro 12 | Índices de consistência da argamassa de cimento e areia reforçada com diferentes teores de fibras de bagaço de cana-de-açúcar..... | 85 |
| Quadro 13 | Resistência mecânica de corpos-de-prova de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras tratadas de bagaço de cana-de-açúcar, aos 7 dias de idade..... | 87 |
| Quadro 14 | Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, ao longo do tempo..... | 87 |
| Quadro 15 | Tratamentos aplicados à fibra de bagaço de cana-de-açúcar em relação à resistência à compressão simples e à massa específica aparente de corpos-de-prova moldados com traço 1:2:0,20: 0,78..... | 88 |
| Quadro 16 | Resultados dos ensaios das placas de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar..... | 92 |
| Quadro 17 | Resistência à compressão e massa específica aparente de corpos-de-prova moldados com a mesma mistura com que foram moldadas as placas..... | 94 |
| Quadro 18 | Resultados do ensaio de absorção acústica..... | 94 |
| Quadro 19 | Resultados do ensaio de absorção de água..... | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | | página |
|-----------|---|--------|
| FIGURA 1 | Fluxograma da preparação das fibras de bagaço de cana-de-açúcar..... | 51 |
| FIGURA 2 | Preparação da mistura em betoneira utilizada para a confecção do compósito..... | 63 |
| FIGURA 3 | Moldagem das Placas sobre mesa vibratória..... | 65 |
| FIGURA 4 | Compactação da mistura na fôrma..... | 66 |
| FIGURA 5 | Cura das placas e corpos-de-prova em câmara úmida..... | 67 |
| FIGURA 6 | Placa acabada..... | 68 |
| FIGURA 7 | Ruptura à compressão simples de corpos-de-prova..... | 69 |
| FIGURA 8 | Ensaio à flexão de amostras de placas..... | 71 |
| FIGURA 9 | Ensaio de condutibilidade térmica..... | 73 |
| FIGURA 10 | Tubo de ondas estacionárias utilizado no ensaio de absorção acústica..... | 75 |
| FIGURA 11 | Curvas de absorção de água por fibras de bagaço de cana-de-açúcar (fração B)..... | 80 |

RESUMO

No presente trabalho pesquisou-se o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar, resíduo sólido da indústria sucro-alcooleira, para fins de obtenção de um material de construção alternativo.

A argamassa de cimento e areia, reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, pode resultar em um bom material de construção, desde que solucionados os problemas de incompatibilidade química entre a fibra e o cimento e definidas as técnicas de sua confecção (desmedulamento, lavagem e “mineralização”, entre outras)

Fibras de bagaço de cana-de-açúcar, desmeduladas mecanicamente na própria Usina, foram selecionadas e classificadas, por peneiramento, para se separar a fração utilizável. As fibras foram “mineralizadas”, após lavagem, com sais inorgânicos (silicato de sódio a 5 % e sulfato de alumínio em solução saturada) com a finalidade de proteger as fibras contra a agressão do meio alcalino; imobilizar a matéria orgânica e o açúcar residual, evitando sua interferência nas reações de pega do cimento; reduzir a capacidade de absorção de água, diminuindo as variações dimensionais; e proporcionar melhores qualidades ao compósito, tais como, durabilidade, resistência ao fogo e ao ataque de microrganismos.

Foram testados diferentes traços e variadas porcentagens de fibras (0, 10, 20 e 30%, em massa), sendo escolhido o traço 1:2:0,2:0,78 de cimento:areia:fibra:água por ser aquele que apresentou satisfatória resistência à compressão e menor massa específica aparente.

Placas e corpos-de-prova foram, então, moldados, misturando-se os componentes na seguinte ordem: cimento, areia, e água, e, após perfeita homogeneização, acrescentadas as fibras, lenta e gradualmente. A mistura foi lançada à fôrma e manualmente compactada, ao mesmo tempo em que era adensada em mesa vibratória, dando-se acabamento final à superfície. A cura foi realizada em câmara úmida e por aspersão.

As placas e corpos-de-prova foram ensaiados em laboratório para se determinar suas características físicas, resistência mecânica e vantagens como material de isolamento térmico e acústico, sendo comparados os resultados com as exigências da Norma C 208 - 72, da ASTM.

Os resultados experimentais mostraram que, no que se refere à carga transversal mínima, módulo de ruptura e deflexão, os dados obtidos dos ensaios de flexão das placas, moldadas com argamassa de cimento e areia e fibras de bagaço de cana-de-açúcar, satisfizeram as exigências da Norma, quando destinadas à fabricação de chapas de isolamento térmico para fins de cobertura, mas não para a utilização como paredes. Tais chapas apresentaram boas características de isolamento térmico e acústico, ficando a dever apenas no que refere à absorção de água que apresentou um valor excessivo.

Summary

In this research, "Cement mortar reinforced with sugar cane bagasse fibers and its use as building material", the use of solid waste from sugar alcohol industry as a component to alternative material.

The addition of cane bagasse to cement mortar can result in a good building material, provided that problems of chemical incompatibility of fiber and cement are solved and previous methods of treatment of fibers are followed.

The sugar cane bagasse fibers, whose pith was removed in the sugar mill, were selected by sieving in order to get the eligible fibers fraction. After washing, these fibers went through a "mineralization" treatment with inorganic salts (sodium silicate at 5% and aluminium sulfate in saturated solution) to protect fibers from alkaline action. The mineralization also allows immobilization of the organic material and remaining saccharose (this acts as a delaying agent in cement setting); the reduction in water absorption and dimensional variation; and the increase of composite quality such as durability and resistance to microorganisms and fire.

Different mortar composition and fibers amount were tested, being selected the ratio 1:2:0,20:0,78, (cement:sand:fibers:water, respectively) as the one that showed satisfactory resistance and lower apparent density.

Panels and cylindrical samples were shaped, mixing components in the following order: cement, sand, water and after homogenization, the fibers were

incorporated slowly. The mixture was placed in a mould and handily pressed (at the same time it was adensed on a vibrating table). The samples were cured in humid room and under aspersion.

Tests were conducted in laboratory to determine panels and samples physical properties, mechanical resistance and their suitability as thermal and acoustic insulation material, assessment was based on requiriments of the ASTM standart C 208-72.

Results related to minimun transversal load and modulus of rupture and deflection obtained by panels were satisfactory considering their use as thermal insulation boards for covering aims, but not as building boards. The panels have showed good characteristics in thermal and acoustic insulating. On the other hand, their water abroption has not been satisfactory.

1. INTRODUÇÃO

O déficit habitacional, associado aos aumentos exponenciais dos custos da construção, assume primordial importância, particularmente para o segmento populacional de baixa renda, não apenas nos países em desenvolvimento mas, também, naqueles industrializados.

A habitação é uma necessidade básica do homem e um abrigo seguro representa um direito básico humano. No entender de alguns autores, a habitação de baixo custo constitui programa de alta prioridade para todos os países em desenvolvimento no mundo, sendo que o aumento populacional, a industrialização, a urbanização e o conseqüente aparecimento de favelas e colônias de posseiros (sem-terras) contribuem como um todo para que esse problema seja resolvido com urgência (AZIZ et al., 1986).

No Brasil, atualmente, ressen-te-se da falta de moradias para uma grande faixa de sua população. Tal fato, aliado aos altos custos dos materiais de construção e mão-de-obra, faz com que todos os setores da sociedade, públicos e privados, se mobilizem em busca de soluções apropriadas, simples, práticas e avançadas, que permitam considerável barateamento da construção.

A redução nos custos construtivos pode ser conseguida pelo menos de duas maneiras: nas intervenções por ajuda mútua, para a mão-de-obra, e no uso de materiais locais, preferentemente obtidos a partir de fontes renováveis.

Neste particular, a utilização de fibras, naturais ou artificiais, como reforço de pastas, argamassas e concretos, tem-se revelado de grande importância, pois permite a obtenção de produtos chamados compósitos que, além de apresentarem menor massa específica aparente, apresentam, também, valores satisfatórios de resistência à tração e ao impacto, maior controle da fissuração, além de comportamento dúctil na ruptura. Frequentemente, as áreas de engenharia e ciência dos materiais são pressionadas a oferecerem ao mercado materiais baratos mais do que materiais resistentes. Chega-se mesmo a afirmar que "o maior erro em um material de engenharia não é a falta de resistência ou a falta de rigidez, muito embora desejáveis, mas a ausência de ductibilidade, isto é a falta de resistência à propagação de fissuras" (FREIRE, 1991).

Existem antecedentes que demonstram ser este tipo de material apropriado para a construção de casas pré-fabricadas de baixo custo (moradias moduladas), escolas e edificações industriais e comerciais, podendo ser usado como elemento de revestimento e/ou divisórias internas, resistente ao fogo (desde que as fibras utilizadas sejam tratadas quimicamente) e aos temporais, além de ser caracterizado como bom isolante termo-acústico. De acordo com o Instituto Cubano de Investigações dos Derivados da Cana-de-açúcar (ICIDCA 1988), sua aceitação é crescente em virtude de suas excelentes características, tendo um

amplo e variado uso em construções, a partir do desenvolvimento da tecnologia de produção de painéis de partículas de madeira e cimento. Instalações para a produção desses painéis existem na Suíça, Alemanha, França, Itália, Hungria, Japão, Rússia, México, Finlândia, Malásia, Vietnã, entre outros.

Por outro lado, o aproveitamento da fibra do bagaço de cana-de-açúcar para a fabricação de compósitos está justificado pela grande produção e disponibilidade desse material, resíduo da indústria sucro-alcooleira.

Neste trabalho, procurou-se confeccionar chapas de argamassa de cimento e areia reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e avaliar sua adequação, como material de construção, determinando suas características físicas e mecânicas e comparando-as com as exigências mínimas das diferentes normas e com outros materiais projetados para o mesmo fim.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição e Histórico dos Materiais Compósitos.

O termo “compósito” é definido como sendo o material obtido de diferentes componentes, cuja combinação proporciona características favoráveis que aqueles isoladamente não possuem.

“Compósito”, tal como usado em ciência dos materiais, é um substantivo e refere-se ao material obtido a partir de uma matriz reforçada com fibras.

Os materiais fibrosos, segundo JOHN e AGOPYAN (1993), são polifásicos, distinguindo-se neles duas fases básicas, as fibras e a matriz em que as fibras estão incorporadas. A função principal das fibras é a de ser reforço mecânico da própria matriz, cuja característica é ser frágil.

O material de construção básico mais utilizado no passado foi a terra; as diversas técnicas construtivas desenvolvidas em diferentes culturas, condições econômicas e regionais, levaram o homem a descobrir a arquitetura em terra crua, empregando este material com absoluto sucesso ao longo da história da civilização, melhorando suas características ao se misturar a ela outros

materiais, como fibras, raízes vegetais, palha e, posteriormente, resíduos agro-industriais, como a casca de arroz, dentre outros.

Tem-se informações sobre o uso de amianto há 2500 A.C. na região que hoje é a Finlândia (Swamy, 1975, citado por AGOPYAN, 1993) sendo que, após o Renascimento, placas de gesso chegaram a ser reforçadas com sisal ou crina de cavalo; porém, foi apenas no século passado que se realizaram as primeiras tentativas de produção racional destes compósitos, inicialmente por mistura de pastas diluídas de cimento com fibras naturais, como as vegetais e as de amianto.

O cimento-amianto, foi, de fato, o primeiro material de construção civil reforçado com fibras, produzido em escala industrial, ocupando, até hoje, um lugar de destaque entre os demais, apesar dos possíveis riscos de saúde que o manuseio das fibras de amianto traz ao homem. É por isso que, na década de 60, com a confirmação de alguns problemas de saúde advindos do uso de amianto e a conseqüente restrição do seu emprego nos países desenvolvidos, a engenharia civil voltou a preocupar-se em estudar e desenvolver novos compósitos, buscando desta vez, substituir o amianto na fabricação de materiais à base de cimento.

Diferentes tipos de compósitos, utilizando fibras de vidro, de prolipropileno e metálicas, eficientes e baratas, foram lançados no mercado, especialmente o europeu e o norte-americano, na década de 80. Mas, a inquietude em buscar novos materiais, levou os pesquisadores a continuarem pesquisando fibras vegetais.

No Brasil, assim como em todos os países do Terceiro Mundo, a utilização de fibras industrializadas não é uma vantagem, pelo custo de produção das mesmas. A expectativa da utilização de fibras vegetais, assim como resíduos agro-industriais, na década de 80, foi muito grande; o CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Camaçari, Bahia), realizou estudos com fibras de sisal e côco, alcançando ótimos resultados.

Ao contrário do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológicas de São Paulo), que prioriza a escolha da matriz, utilizando aquelas de baixo teor alcalino que não comprometam seriamente as fibras vegetais, o CEPED contempla, prioritariamente, o tratamento das fibras para resistirem ao meio agressivo em que são lançadas.

2.2. Propriedades dos Materiais Compósitos.

Com a adição de fibras às matrizes é possível melhorar as suas propriedades mecânicas, segundo AGOPYAN (1993), como a resistência à tração, à flexão e ao impacto. Sem dúvida, o maior benefício obtido por reforçar uma matriz frágil é alterar o seu comportamento após a fissuração. O compósito, ao invés de romper-se subitamente após o início da fissuração da matriz, pode apresentar uma deformação plástica considerável, o que o torna um material adequado para construção. Para que isto ocorra, as fibras devem ser adicionadas em volume, comprimento e formatos adequados, valores estes objetos de diversos modelos teóricos.

Posteriormente, SAVASTANO et al. (1994) afirmaram que os compósitos, pelas suas propriedades mecânicas adequadas e, principalmente, pelo aumento de ductibilidade da matriz, têm apresentado uso crescente na construção civil. As principais propriedades mecânicas dos materiais reforçados com fibras podem ser explicadas a partir das características de sua microestrutura, que fornecem respostas para a influência do tipo de fibra, idade de hidratação e relação água/cimento e de como esses fatores devem ser corretamente definidos.

2.3. Matriz.

No caso particular da indústria de construção civil, segundo JOHN e AGOPYAN (1993), as matrizes mais empregadas são as frágeis (que rompem-se sem deformação plástica), notadamente: pastas, argamassas e concretos de aglomerantes minerais, como o cimento Portland, e, em menor escala, a cal e o gesso.

O comportamento frágil dessas matrizes muda com a adição das fibras, tornando-se um material dúctil. Basicamente, tem-se três conjuntos fibra-matriz utilizados na construção civil:

a) Matriz frágil, como pastas, argamassas, concretos e plásticos com estrutura cristalina ou ligações cruzadas, com reforço de fibras de vidro, aço, amianto e alguns tipos de plásticos;

b) Matriz frágil, como no caso anterior, reforçadas com fibras de módulo de elasticidade similar ou até inferior ao da matriz, como fibras plásticas e fibras vegetais;

c) Matriz dúctil, como os plásticos e os metais, com fibra de módulo de elasticidade geralmente superior ao da matriz.

A matriz de cimento é a mais usada comumente na elaboração de compósitos. O aglomerante hidráulico, misturado com a água, forma uma pasta capaz de endurecer por hidratação, através de reações químicas exotérmicas, sendo, suas propriedades mais importantes, a resistência mecânica, conseguida à medida que se processa a hidratação da pasta no decorrer do tempo, e a durabilidade, relacionada com a capacidade de se manter agregada sua pasta, depois de endurecida.

Em 1845, Isaac Johnson, iniciou a produção daquele que é hoje o mais difundido material de construção, o cimento Portland, um aglomerante hidráulico que contém silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre.

Segundo MOUGEL et al. (1994), a utilização de um cimento adequado pode permitir a obtenção de um compósito biomassa vegetal-cimento de características físico-mecânicas adequadas, mesmo em presença de uma biomassa vegetal incompatível quimicamente com o cimento. Certos autores propõem o uso de cimentos de alta resistência inicial (WĪENHAUS, 1979), com alto teor de alumínio (GRAM, 1986) ou com baixo teor de álcali (SCHUBERT et al. 1990).

Os cimentos comuns, com adição de escória, são também apropriados para este fim (CP II - E).

Na escolha da matriz, segundo o CEPED (1982), a fim de se evitar a retração e problemas de fissuração, recomenda-se a substituição de, no mínimo, 50% do volume de cimento por um inerte, que pode ser um agregado miúdo, como areia, pó de pedra calcária ou outro material. Quando for usada areia, esta deve ter um diâmetro máximo das partículas igual a 5 mm.

A adição, na mistura do compósito, de um agregado de dimensões adequadas, diminui sensivelmente as variações dimensionais do compósito biomassa vegetal-cimento, preenchendo os vazios e diminuindo a porosidade (MOUGEL, 1992); a adição de sólidos minerais, todavia, está relacionada diretamente com a massa específica aparente do compósito, que aumenta notavelmente (SIMATUPANG, 1979).



2.4. Biomassa Vegetal.

Existem muitas maneiras de se definir o outro componente dos compósitos, sendo o termo geral "biomassa vegetal" usado para denominar a inumerável variedade de matéria-prima vegetal disponível no mundo inteiro, resultante das atividades agrícolas, florestais e agro-industriais, que liberam quantidades consideráveis de resíduos vegetais, dentro dos quais estariam compreendidos as partículas e fibras; tal biomassa vegetal pode ser classificada baseando-se em critérios morfológicos, dimensionais e estruturais, dentro de

cada espécie vegetal, assim como quanto à sua função dentro do compósito, ou seja, enchimento, substituição do agregado miúdo, ou reforço da matriz.

Segundo MOSLEMI (1974), vários tipos de partículas são usados na confecção de chapas. Estas partículas diferem-se quanto à dimensão, densidade e formato, podendo ser denominadas:

- “Flakes” : partículas planas, finas, com geometria retangular e espessura entre 0,2 e 0,4 mm, comprimento de 25 a 100 mm e largura entre 10 e 25 mm;

- “Aparas” (shavings) : partículas finas de madeira produzidas em operações de trabalho da madeira; produzem chapas de resistência, rigidez e estabilidade dimensional linear inferiores, comparadas às chapas produzidas com flakes;

- “Chips” (lascas, cavacos) : pedaços de madeira comumente usados na indústria de papel e celulose; seu tamanho é variado, encontrando-se, neste grupo, o bagaço de cana-de-açúcar;

- “Wood-wool” (lã de madeira) : partículas longas e finas, com aproximadamente 250 mm de comprimento, 5 mm de largura e 0,5 mm de espessura; são normalmente obtidas de madeiras de baixa densidade (*Pinus sp.*) e utilizadas para aplicações estruturais.

Segundo o ICIDCA (1988), o material lignocelulósico a empregar deve ser selecionado de acordo com sua composição química, já que as matérias fibrosas, com alto conteúdo de açúcares e fenóis (madeiras duras), não são aptas para a fabricação dos compósitos, pela presença destes compostos acima de certas concentrações, que inibem ou retardam a pega do cimento; por outro lado,

está comprovado que as madeiras leves, que têm menor conteúdo de hemicelulose, geralmente são apropriadas para este fim.

2.4.1. Características das Fibras Vegetais

A biomassa vegetal apresenta, juntamente com as partículas, fibras na sua estrutura; estas, por sua vez, são formadas por micro-fibras unidas por uma substância cimentante, a lignina, sendo as micro-fibras constituídas por uma única célula, com uma estrutura oca chamada lúmen.

As fibras, usadas na fabricação de compósitos, podem ser agrupadas em dois tipos distintos: as de módulo de elasticidade alto (aço, vidro, amianto, carbono, etc.) e as de baixo módulo de elasticidade (polipropileno, nylon e as fibras vegetais). As fibras com alto módulo de elasticidade conferem maior resistência à tração à matriz, em relação às fibras de menor módulo de elasticidade que, por outro lado, são responsáveis pelo grande acréscimo da resistência ao impacto, devido ao elevado alongamento na ruptura.

As exigências básicas das fibras naturais, quando usadas como reforço em matrizes de cimento, são, de acordo com AZIZ et al. (1986), alta resistência à tração e baixo módulo de elasticidade, razoável aderência na interface com a matriz, boa estabilidade química e dimensional, e durabilidade.

De acordo com o CEPED (1982), a relação comprimento/diâmetro equivalente da fibra, denominada índice de enfiamento, traduz a atuação das

fibras na distribuição dos esforços e, conseqüentemente, das fissuras, ou seja, quanto maior esse índice tanto melhor a aderência fibra-matriz, menores espaçamento e diâmetro das fissuras, maior acréscimo na resistência à tração.

O comprimento crítico da fibra, para fibras de pequeno índice de enfiamento, é, segundo COOK *et al.* (1978), o comprimento de fibra que, nos compósitos, se romperá sob tensão máxima, pressupondo-se que, a comprimentos menores que o crítico, as fibras não se romperão.

2.4.2. Características do Bagaço de Cana-de-açúcar

Bagaço é o resíduo lignocelulósico fibroso do colmo da cana-de-açúcar, produzido após moagem e extração do caldo; formado por um conjunto heterogêneo de partículas de tamanho variável entre 1,00 e 25,0 mm (média de 20 mm), a distribuição em tamanho das partículas do bagaço depende, fundamentalmente, dos equipamentos de preparação da cana e, em menor grau, dos moinhos e da variedade da cana-de-açúcar (GEPLACEA, 1990).

Em comparação com outros resíduos agro-industriais, pode-se afirmar que o bagaço reúne uma série de condições, o que faz com que ele seja o material fibroso com mais possibilidades de industrialização, já que encontra-se potencialmente disponível em grandes quantidades; para cada tonelada de açúcar, se obtém aproximadamente 2,5 toneladas de bagaço com 50 % de umidade (PNUD/RLA, 1986). Informações sobre sua manipulação, armazenamento e transporte, além de sua utilização na produção de polpa de

papel e produtos aglomerados, furfural e outros, encontram-se disponíveis na literatura especializada sobre o assunto.

2.4.2.1. Composição Física do Bagaço de Cana-de-açúcar.

O bagaço de cana-de-açúcar é composto, principalmente, de fibras (43 a 52%), água (46 a 52%) e pequenas quantidades de sólidos solúveis (sacarose, cera) e não solúveis (terra, pedras), estes num total de 2 a 6%.

A presença de açúcar residual (sacarose), umidade e microrganismos (leveduras, fungos e actinomicetos) no bagaço, dá início ao processo fermentativo, que resulta na produção de álcool, ácido acético e outros ácidos, além de liberar grande quantidade de calor e grandes volumes de gás carbônico. Esta fermentação provoca, segundo PATURAU (1982), significativas mudanças na quantidade e qualidade da matéria-prima fibrosa, uma vez que alguns organismos termofílicos decompõem o material celular.

Sua composição é variável em função da variedade de cana empregada, seu grau de maturidade, método de colheita utilizado e eficiência do processo industrial.

Sob o ponto de vista de estrutura anatômica, o colmo da cana-de-açúcar consiste de vários tipos de tecidos fibrosos, sendo os mais importantes a fibra propriamente dita e a medula, ambas de composição química semelhante, embora de estrutura muito diferente.

2.4.2.2. Composição Morfológica do Bagaço de Cana-de-açúcar

Os diferentes elementos morfológicos do bagaço de cana-de-açúcar apresentam-se na proporção seguinte (base seca limpa) :

- fibras longas da polpa : 50 %
- parênquima : 30 %
- vasos fibrovasculares : 15 %
- células epidérmicas : 5 %

A epiderme, capa fina que recobre a cana, atua como camada impermeabilizante, e contém abundantes componentes não fundamentais da cana, quimicamente classificados como extrativos.

A polpa, composta de fibras muito lignificadas, tem, como função principal, sustentar a planta. No seu interior encontra-se o tecido parenquimatoso, cuja função é armazenar o suco açucarado, sendo que, dentro deste tecido, aparecem os vasos fibrovasculares compostos por fibras e vasos que, conjuntamente, cumprem a função de sustentar e conduzir os alimentos e produtos elaborados ao longo das folhas da planta.

Ao ser moída a cana, este ordenamento anatômico é perdido, desde o ponto de vista estrutural, confundindo-se as diferentes partículas. Ao agrupamento das fibras da polpa e das fibras curtas do seu interior, numa fração só, denomina-se fibra ou fibra útil, restando uma segunda fração formada pela medula e uma terceira, pelos finos (terra e solúveis). Estas duas últimas frações são conhecidas, indistintamente como, "medula".

O conteúdo do bagaço integral, em base seca, é aproximadamente o seguinte:

- fibra : 55 - 60 %
- medula : 30 - 35 %
- finos, terra e solúveis : 10 - 15 %

Com o desenvolvimento da mecanização e a utilização crescente de variedades relativamente leves, de baixo conteúdo fibroso e alto teor de sacarose, estes valores estão sofrendo variações.

2.4.2.3. Densidade e Umidade do Bagaço de Cana-de-açúcar

Segundo o GEPLACEA (1990), a densidade e umidade do bagaço são as duas características físicas mais importantes relacionadas com os processos de utilização industrial.

O bagaço é um material constituído por fibras com espaços vazios entre elas, além dos poros e do lúmen. A massa específica aparente do bagaço de cana-de-açúcar que depende de vários fatores, dentre os quais o mais importante é o grau de compactação do material e a umidade.

A umidade do bagaço está em relação direta com o alto nível higroscópico da medula, assim como a porosidade das partículas, daí a grande capacidade de absorção (80 - 85 % de umidade); a umidade de equilíbrio média do bagaço está situada entre 9 e 10 %.

No Quadro 1 estão apresentados os valores de massa específica aparente do bagaço de cana-de-açúcar, em função da umidade e do grau de compactação.

QUADRO 1 - Massa específica aparente do bagaço de cana-de-açúcar em função da umidade e da compactação (GEPLACEA, 1990)

| Umidade (%) | Compactação altura (h) da camada compactada | Massa específica aparente (kg/m³) |
|------------------------|--|---|
| 9 - 10 | solto | 60 |
| 50 | solto | 70 |
| 75 | solto | 85 |
| 75 | compactado (h=10 m) | 150 |
| 75 | compactado (h=20 m) | 250 |

2.4.2.4. Composição Química do Bagaço de Cana-de-açúcar

O bagaço é composto de celulose, hemicelulose e lignina, como principais polímeros naturais, e pequenas quantidades de componentes estranhos.

A celulose, principal componente da parede celular, é insolúvel em água, solventes orgânicos e soluções alcalinas, apresentando resistência

apreciável à atuação de agentes oxidantes. Sob o ponto de vista quantitativo, a quantidade de celulose, presente no bagaço de cana-de-açúcar, é semelhante à da madeira, da ordem de 41 a 44 %. Sua massa molecular média está na faixa de 150.000 a 350.000.

A hemicelulose constitui um conjunto de polissacarídeos diferentes cuja composição tem, como características comuns: solubilidade em solventes, reatividade na presença de ácidos e decomposição em açúcares e furfural. A proporção de hemicelulose, no bagaço, é de 25 a 27 %, e sua massa molecular está compreendida entre 10.000 a 20.000

A lignina é o terceiro componente, em importância quantitativa, representando entre 20 e 22 %, sendo constituída por um conjunto de polímeros amorfos, reticulados, de alto peso molecular e natureza eminentemente fenólica.

Os demais componentes do bagaço de cana-de-açúcar, em conjunto, somam 10 %, e apresentam diferenças importantes se comparados às madeiras: baixo teor de componentes solúveis em solventes orgânicos, os quais não ultrapassam 3 %, e conteúdo de cinzas variável de 2 a 3 %. Os constituintes solúveis em água, como a sacarose, outros açúcares e polissacarídeos, se apresentam em quantidades relativamente altas em comparação com as madeiras.

2.4.2.5. Desmedulamento do Bagaço

A medula, de acordo com RACINES e PAMA (1978), é o constituinte indesejável do bagaço de cana-de-açúcar e deve ser descartada. O processo de

desmedulamento, ou seja, a separação entre a fibra e a medula, resulta em 30%, em peso, de medula extraída.

O desenvolvimento dos equipamentos e sistemas de desmedulação, podem ser classificados, de acordo com a umidade do material, da forma seguinte:

- a seco, quando realizado com o bagaço contendo entre 20 e 40 % de umidade, utilizando-se peneiras e moinhos de martelos;
- em condição úmida, quando o teor de umidade está compreendido entre 48 e 50 %, na saída da moenda;
- em suspensão ou em condição saturada, quando o bagaço apresenta consistência fluida, empregando-se hidropolpadores e drenos.

Segundo o ICIDCA (1988), a tendência atual é utilizar, nas Usinas açucareiras, desmeduladores de rotor vertical com capacidades de processamento de 10 a 15 t/h (base seca), que permitem alcançar elevadas taxas de separação, da ordem de 35 a 40 %, em peso.

2.4.2.6. Armazenamento e Usos do Bagaço

O bagaço se encontra disponível, na maioria dos países, somente durante a época da safra, que é de 4 a 5 meses; é por este motivo, que as fábricas, que utilizam bagaço como matéria prima, têm necessidade de armazená-lo, para utilização durante o ano todo.

Existem duas maneiras de armazenar o bagaço: compactada, ou a granel (bagaço pré-secado e solto).

O armazenamento do bagaço compactado pode ser feito empilhando-se fardos de bagaço, em pirâmides dotadas de dispositivos de ventilação para permitir a circulação do ar, dissipar o calor e os gases originados da fermentação, e assim preservar a qualidade das fibras. A pré-secagem do bagaço evita ou reduz ao mínimo os processos microbiológicos e problemas fermentativos, decorrentes da presença de açúcar residual, responsáveis pelas perdas de armazenamento.

Qualquer que seja a forma com que o bagaço se apresente, ele deverá ser coberto para evitar a putrefação favorecida pelo excesso de umidade provocado pelas águas de chuvas.

Outra maneira de armazenamento do bagaço compactado é na forma de briquetes, solução adequada quando o bagaço é destinado à combustão.

O armazenamento a granel ou solto se dá ao ar livre na forma de pilhas, mantendo o bagaço, no interior da pilha, com uma umidade de 75 % aproximadamente, nisto diferenciando-se dos outros métodos, nos quais a umidade se mantém ou tende a igualar-se à umidade de equilíbrio ambiental.

Afora sua utilização direta como combustível nas fornalhas das caldeiras a vapor das próprias usinas sucro-alcooleiras, uma certa quantidade do bagaço produzido é destinada a outras finalidades, como alimentação animal, geração de energia para olarias, matéria-prima para a fabricação de polpa de papel, painéis compensados e manufatura de diversos solventes industriais.

Atualmente, o crescente desenvolvimento da indústria de derivados e o tradicional compromisso energético do bagaço, segundo o ICIDCA (1988), começaram a assumir relevante importância econômica.

Alguns estudos chegam mesmo a demonstrar que é possível satisfazer as demandas energéticas de uma usina açucareira, utilizando-se apenas a metade do bagaço produzido, podendo o restante ser utilizado como matéria-prima para outras finalidades, recomendado-se, neste caso, desmedular a maior quantidade possível de bagaço nas usinas e retornar a medula às caldeiras, para entregar a fração fibrosa às indústrias de derivados.

2.4.2.7. Características Físicas das Fibras do Bagaço

De acordo com PATURAU (1982), as fibras se caracterizam por terem um índice de enfiamento (relação comprimento/diâmetro) relativamente alto, e um coeficiente de inchamento e contração, sob umidificação e secagem, também elevado, resultando em estreito entrelaçamento de uma fibra com a outra. As células da medula, por outro lado, são de forma e tamanho irregulares, apresentando índice de enfiamento igual a 5 e alta capacidade de absorção de líquidos, não se entrelaçando umas com as outras. As características típicas da fibra de bagaço de cana-de-açúcar estão apresentadas no Quadro 2.

RACINES e PAMA (1978) mediram o comprimento médio e o diâmetro da fibra de bagaço a partir de 100 fibras tomadas ao acaso, sendo o diâmetro medido com o auxílio de um microscópio micrométrico.

QUADRO 2 - Características Típicas da Fibra de Bagaço de Cana-de-Açúcar

| Características da fibra | Segundo AZIZ <u>et al.</u> (1986) | Segundo RACINES e PAMA (1978) |
|--|--|--|
| Densidade relativa | 1,20 - 1,30 | 1,25 |
| Massa específica aparente (kg/m ³) | 300 - 400 | ---- |
| Diâmetro da fibra (mm) | 0,20 - 0,40 | 0,24 |
| Comprimento da fibra (mm) | 50 -300 | 26,03 |
| Resistência à tração (MPa) | 170 - 290 | 200,2 |
| Módulo de elasticidade (10 ³ MPa) | 15 - 19 | 17,23 |
| Absorção de água (%) | 70 - 75 | 78,5 |
| Teor de umidade (%) | ---- | 12,1 |

Para a fibra de bagaço de cana-de-açúcar, o CEPED (1982) determinou os seguintes valores médios (11 medidas):

| | |
|---|---------|
| . massa (mg) | : 0,52 |
| . comprimento total (mm) | : 49,5 |
| . massa específica (g/cm ³) | : 0,75 |
| . área de seção transversal (10 ⁻⁴ cm ²) | : 1,40 |
| . comprimento inicial para ensaio de tração(mm) | : 2,00 |
| . carga de ruptura (N) | : 2,60 |
| . tensão de ruptura (MPa) | : 181,1 |
| . deformação total na ruptura (mm) | : 1,02 |
| . alongamento na ruptura (%) | : 5,11 |

Os altos valores do coeficiente de variação verificados para a tensão de ruptura (33,6%) e alongamento na ruptura (14,0%), foram atribuídos às grandes dificuldades encontradas na montagem dos corpos-de-prova, à variação na quantidade de cola usada e à pouca precisão da célula de carga disponível.

As características físicas da fibra de bagaço de cana-de-açúcar em comparação com as de outras fibras vegetais, estão relacionadas no Quadro 3; tomadas em comparação com outras fontes fibrosas usadas de forma

QUADRO 3 - Características Físicas de Algumas Fibras Vegetais

(CEPED, 1982)

| Fibra | Absorção Peso água/ Peso fibra | Massa Especí- fica (g/cm ³) | Micro-fibra | | | | |
|---|--------------------------------------|--|---------------------|----------------|--------------|--|--------------------------------|
| | | | Comprimento (mm) | Largura (μ) | Lúmen (μ) | Espessura da Parede Celular (μ) | Índice de Enfelta- mento |
| Bagaço de Cana-de- açúcar (<u>Saccharum officinarum</u>) | 5,62 | 0,7509 | 1,70 | 25,7 | 11,7 | 7,0 | 66,1 |
| Côco (<u>Cocos nucifera</u>) | 1,27 | 1,0765 | 0,70 | 0,7 | ---- | ---- | 35,0 |
| Sisal (<u>Agave sisalana</u>) | 2,39 | 1,2700 | 2,90 | 19,0 | 7,0 | 6,0 | 152,6 |
| Piaçava (<u>Attalia funifera</u>) | 1,08 | 1,0542 | 0,60 | ---- | ---- | ---- | ---- |
| Bambu (<u>Bambusa vulgaris</u>) | 1,45 | 1,1585 | 2,95 | 17,3 | 3,6 | 6,85 | 170,5 |

convencional na indústria de celulose, polpa e papel, tais características segundo o ICIDCA (1988), são aquelas apresentadas no Quadro 4.

QUADRO 4 - Comparação das Características Físicas do Bagaço de Cana-de-açúcar, com Outras Fibras Usadas na Indústria de Celulose, Polpa e Papel (ICIDCA, 1988)

| Tipo de Fibra | Comprimento (mm) | Diâmetro (μ) | Diâmetro do Lúmen (μ) | Espessura da Parede Celular (μ) | Índice de Enfretamento |
|--|------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Bagaço de Cana de açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>) | 1,5 | 20 | 12,0 | 4,0 | 75 |
| Faia (<i>Fagus silvatica</i>) | 1,5 | 14 | 7,4 | 3,3 | 107 |
| Pinho (<i>Pinus silvestris</i>) | 2,9 | 28 | 21,0 | 3,0 | 100 |
| Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>) | 1,0 | 13 | 9,8 | 1,6 | 77 |

2.5. Compósitos de Biomassa Vegetal-Cimento

O compósito de biomassa vegetal-cimento (CBC) é, segundo MOUGEL *et al.* (1994), a associação de partículas provenientes de uma biomassa vegetal qualquer com uma pasta (ou argamassa) de cimento.

De acordo com alguns pesquisadores, pode-se citar, como vantagens do CBC, as seguintes:

- Disponibilidade de matéria prima;

- Maior capacidade de isolamento termo-acústico;
- Resistência ao fogo (utilizando fibras tratadas);
- Resistência ao ataque de agentes biológicos;
- Ruptura dúctil;
- Maior trabalhabilidade.

Os compósitos CBC apresentam, também, inconvenientes, quando comparados com os materiais convencionais utilizados em construção, devendo ser considerados, na sua produção, os seguintes aspectos:

- Incompatibilidade química entre certas espécies vegetais e o cimento;
- Instabilidade dimensional, em presença de variação de umidade;
- Vida útil limitada, quando submetido a um meio alcalino;
- Longo tempo de pega.

Estes inconvenientes são motivos de desinteresse industrial pelo compósito, mas podem ser superados ou melhorados mediante perfeita caracterização de cada um dos componentes do CBC.

2.5.1. Incompatibilidade Química entre a Biomassa Vegetal e o Cimento

A incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento é um assunto pesquisado por muitos autores que chegaram à mesma conclusão: “não é difícil constatar a incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento, mediante a resistência mecânica, curvas de hidratação e ultrassonografia; mas, a compreensão dos fenômenos que regem a interação entre

esses dois constituintes é complexa (Miller e Moslemi, 1991, citados por BERALDO, 1994).

Tanto a biomassa vegetal como o cimento têm características e propriedades que influenciam o compósito e que devem ser consideradas para evitar esta incompatibilidade.

2.5.1.1. Influência da Biomassa Vegetal

Segundo VENUAT (1983), não se pode adicionar ao cimento uma biomassa vegetal qualquer, pois certos vegetais apresentam uma constituição química rica em açúcares, taninos, resinas e fenóis, que, dependendo do teor, podem retardar ou mesmo inibir completamente a pega do cimento.

O teor de substâncias inibidoras e sua influência variam de acordo com os seguintes fatores: escolha da espécie vegetal, época de corte, estocagem e dimensionamento das partículas (VALENZUELA, 1989).

Lieber e Richartz (1972), citados por BERALDO (1994), assinalaram que um teor de açúcares superior a 0,5 % reduz a resistência mecânica dos compósitos; por sua vez, SIMATUPANG (1986) afirmou que 1 % de glucose inibe completamente a pega do cimento

Um método para a avaliação da incompatibilidade química, entre a biomassa vegetal e o cimento, causado por substâncias inibidoras da pega do cimento, é aquele que se utiliza de equações matemáticas para determinar o índice de inibição (SANDERMANN *et al.*, 1960, e WEATHERWAX e TARKOW, 1964) a partir da curva da temperatura de hidratação da mistura.

Para minimizar o efeito negativo das substâncias inibidoras da biomassa vegetal, em presença do cimento, dispõe-se de tratamentos como: a lavagem das partículas em água (quente ou fria) ou em soluções aquosas (hidróxido de sódio, cal, etc.) ou imersão das mesmas em soluções salinas (aluminatos e silicatos); considerando o tipo de biomassa vegetal, os tratamentos não têm o mesmo efeito para todos.

2.5.1.2. Influência da matriz

A matriz de cimento, com sua alta alcalinidade, afeta a biomassa vegetal e, por sua vez, a durabilidade do compósito, rompendo as cadeias da lignina e desintegrando a celulose. Desse modo, propõe-se, como alternativa, diminuir o teor alcalino do cimento, substituindo parcialmente o cimento por cinzas volantes e escória de alto forno ou usando-se cimento aluminoso ou cimento com baixos teores em álcali para evitar que as fibras vegetais se tornem quebradiças.

Para resolver o problema da incompatibilidade química, causado por agentes inibidores, a solução mais comum é a utilização de aceleradores de pega ou o emprego de cimentos de alta resistência inicial, para evitar a liberação de açúcares residuais ou substâncias extrativas da biomassa vegetal (LEE, 1990, e SIMATUPANG *et al.*, 1978). Outra técnica aplicada a estes problemas é a carbonatação da matriz por meio de anidrido carbônico ou da adição de um carbonato.

Segundo BERALDO (1994), o tratamento da interface entre a biomassa vegetal e o cimento visa um duplo objetivo: aprisionar as substâncias

nocivas ao cimento (responsáveis pelo longo tempo de pega) e limitar as trocas de umidade entre as partículas e a matriz (responsáveis pela instabilidade dimensional do CBC).

A interface da biomassa vegetal e o cimento é a zona de transição, donde podem ocorrer eventuais descontinuidades, dentro de uma fase ou entre fases, tais como poros ou fissuras, que, segundo SAVASTANO et al. (1994), interferem tanto no comportamento mecânico quanto na durabilidade do material. Entretanto, quantificar a participação da zona de transição nas propriedades dos compósitos é difícil, pois outros fatores importantes, tais como o tipo de fibra ou de aglomerante, interagem no sentido de modificar o material. Além disso, muitas técnicas adotadas para tornar ótima a zona de transição acabam por melhorar o desempenho do compósito, produzido como um todo. É o caso da moldagem sob pressão que, ao remover o excesso de água de amassamento, contribui para o adensamento da matriz, pelo fato de reduzir a sua porosidade, quer nas proximidades das fibras, quer longe destas.

Bentur e Akers (1989 b), citados por SAVASTANO et al. (1994), estudaram a evolução da zona de transição em compósitos à base de cimento, com fibras de celulose, e registraram a ocorrência do aumento de porosidade e do acúmulo de portlandita, já nas primeiras idades. Em seguida, foram empregadas diversas condições de envelhecimento, constatando-se a “mineralização” das fibras, cujos vazios internos teriam sido preenchidos por produtos de hidratação do cimento, sob condições propícias de carbonatação. Como conclusão,

constataram a redução da tenacidade do compósito após o seu envelhecimento, com predominância de fibras quebradas.

SAVASTANO e AGOPYAN (1992) caracterizaram a zona de transição ou interface, para pasta de cimento reforçada com fibras de malva, sisal e côco, e ressaltaram a necessidade de melhoria dessa zona ou auréola, para incremento da durabilidade do compósito.

2.5.2. Tratamentos para Redução de Incompatibilidade com a Matriz

Cimentícia

Quando, nas espécies vegetais, foram insuficientes as técnicas naturais (época de corte, estocagem, etc.,) para evitar a incompatibilidade química com o cimento, é necessário optar por diferentes tratamentos físicos ou químicos, dependendo das características da biomassa vegetal; tais tratamentos podem ser:

- **Lavagem:** é uma das técnicas mais simples e econômicas, sendo que o tempo e a temperatura podem ser variáveis. Segundo TEIXEIRA e GUIMARÃES (1989), não houve diferença significativa entre o período de ½ hora e o de 1 hora, na lavagem à quente (80 °C) de partículas de *Acacia mearnsii*. Pode-se utilizar, também, substâncias adicionais para soluções aquosas; na opinião de SCHWARZ e SIMATUPANG (1984), certas espécies são sensíveis ao tratamento com soluções alcalinas.

- **Torrefação:** o tratamento consiste em submeter a biomassa vegetal a temperaturas entre 180 e 270 °C, eliminando-se a água e certos produtos voláteis, e provocando uma degradação térmica na estrutura das hemiceluloses, reduzindo, assim, a quantidade de substâncias nocivas ao cimento (BERALDO, 1994).

- **Pulverização:** esta técnica consiste em envolver as partículas, segundo MOUGEL (1992), com substâncias hidrófobas como óleos, cêras, resíduos minerais, entre outros. Desse modo, as partículas ficam impermeabilizadas e protegidas; porém, esta técnica deve ser utilizada de maneira que as partículas não fiquem entrelaçadas e coladas, devendo-se considerar, também, a aderência da partícula com a matriz, como resultado do uso destas substâncias.

- **Impregnação:** esta é outra técnica simples, usada para limitar a liberação de agentes inibidores e melhorar a estabilidade dimensional, ou seja, a impregnação das partículas com substâncias inorgânicas, como sais, formando soluções; SIMATUPANG et al. (1978) propuseram a impregnação das partículas com uma solução de metassilicato de sódio, enquanto que LEE e SHORT (1989) mostraram que uma mistura de metassilicato de sódio com cloreto de cálcio levou a uma diminuição na resistência mecânica do CBC.

WİENHAUS (1979) afirmou que a pega do cimento é inibida pela sacarose, propondo, como possíveis soluções:

- a impregnação das partículas com soluções hidrolizadas de sais, tais como o cloreto de cálcio, cloreto de magnésio ou sulfato de alumínio, que retardam a formação do meio alcalino sobre as partículas;

- a impregnação cuidadosa com “water glass”, betume ou polivinil, para fechar os poros das partículas;

- a eliminação ou diminuição de hidratos de carbono de fraca massa molecular.

O autor apresenta, também, exemplos de fabricas que produzem CBC (ARBOLITE, FIBRALITH, DURISOL, VELOX), utilizando diferentes produtos para mineralização da biomassa vegetal.

BIRAULT (1992) relatou o exemplo de uma companhia manufatureira de compósitos denominada Seribo Bison Bois Ciment (SBBC), ao norte da França, que vem produzindo painéis com partículas de madeira e cimento para construção civil, desde 1986, com uma capacidade de 100 m³ por dia; o material, chamado VIROC, de muita aceitação no mercado europeu, utiliza, na sua produção, a combinação do sulfato de alumínio na concentração de 14 %, como acelerador de pega do cimento, e o silicato de sódio a uma concentração de 13 %, como catalisador para a pega do cimento.

SOLÓRZANO (1992) apresentou outro exemplo, similar ao anterior, de manufatura de CBC, no México, utilizando também os mesmos sais inorgânicos, como aditivos para a produção de painéis para construção civil, misturados às partículas de madeira e ao cimento. O autor ressaltou que, para se obter um produto de alta qualidade, há necessidade de se dispor de um sistema

de controle de qualidade tanto do material orgânico, biomassa vegetal (porcentagem de açúcar e taninos no pol final), como do processo de produção (controle do tamanho e umidade das partículas, densidade e pH dos produtos químicos) e do produto final (inspeção final, dimensões, espessura, densidade, resistência à flexão, absorção de água e teor de umidade). Acrescentou, ainda, que a moldagem sob pressão e a cura são fatores importantes na fabricação, para se obter produtos de excelente qualidade, resistentes ao clima, fogo, fungos e termitas.

FORUNO *et al.* (1991) descreveram o método de “mineralização” da biomassa vegetal utilizando “water glass” (silicato de sódio) em combinação com o sulfato de alumínio e o cloreto de cálcio, como reagentes.

Os autores experimentaram dois métodos: “vacuum-impregnating” e “diffusion-penetrating process”, com soluções a diferentes concentrações de silicato de sódio e reagentes, sulfato de alumínio e cloreto de cálcio, em condições saturadas, concluindo que uma concentração de 5 % de silicato de sódio é suficiente para se alcançar o objetivo proposto, ao mesmo tempo em que reduz ao mínimo a influência do álcali na biomassa vegetal. Relataram, também, que as substâncias inorgânicas, ao serem absorvidas, são depositadas no interior do lúmen das fibras, vasos e outros componentes. A formação de minerais depositados no interior da madeira substituindo os íons de sódio do “water glass” por íons dos reagentes sulfato de alumínio e cloreto de cálcio, foi observada em provas eletrônicas de microanálise de raios X. O ganho de peso da madeira é

explicado pela presença de sais minerais no seu interior, assim como exteriormente.

No primeiro método, “vacuum-impregnating process”, a madeira foi impregnada por uma solução de “water glass” sob pressão durante 24 horas, e, no segundo método, “diffusion-penetrating process”, os espécimes foram colocados diretamente na solução de “water glass” por 24 horas. Depois da impregnação com “water glass”, em ambos os casos a madeira foi deixada em repouso durante 1 hora, depois do qual foi colocada de molho, no sulfato de alumínio ou cloreto de cálcio, resultando, como consequência desse tratamento, a formação de substâncias inorgânicas que, depois de secas, parecem cristalizadas. Após 24 horas, completado o tempo, o material foi levado à estufa a 60 °C, por mais 24 horas, completando-se a secagem, posteriormente, com pentóxido de fósforo que mantém o ambiente em condições de ausência de oxigênio.

Os compósitos assim tratados apresentaram alta resistência ao fogo, particularmente quando usado o método “diffusion-penetrating”, além de satisfatórias durabilidade e estabilidade dimensional; quando usado o cloreto de cálcio como reagente, os compósitos apresentaram maior higroscopicidade. Finalmente, concluíram FORUNO *et al.* (1991), que o tratamento da madeira com “water glass” e sulfato de alumínio torna possível a obtenção de um compósito com alta resistência ao fogo e ao ataque de fungos.

2.5.3. Compósitos com Fibras Vegetais

As fibras, incorporadas a matrizes de cimento, atuam modificando seu modo de ruptura, tornando-os materiais mais dúcteis e provocando acréscimos nas resistências à tração, à flexão e ao impacto, além de facilitar a moldagem de formas complicadas, dependendo das dimensões da peça.

Pesquisas desenvolvidas no CEPED (1982) vieram comprovar que a incorporação de fibras de comprimento adequado à matriz de argamassa, material tido como frágil, muda o comportamento desta, conferindo-lhe ductibilidade.

Volume limite de fibras é aquele que corresponde à quantidade de fibras que pode ser adicionada à matriz de cimento de modo a ficar uniformemente dispersa e completamente envolvida pela argamassa.

A resistência à tração dos compósitos cresce linearmente com o volume de fibras usado, até atingir o volume limite, de tal sorte que as porcentagens de fibras, em volume, que contribuem para o acréscimo da resistência à tração da matriz, estão compreendidas numa faixa de valores entre o volume mínimo e o volume limite de fibras.

AZIZ et al. (1986) afirmaram que vários parâmetros, tais como, a permeabilidade, a absorção de água, a dilatação térmica e a contração, geralmente variam com o tipo de fibra usado e aumentam com o aumento do teor de fibra.

Trabalhando com fibras de sisal e coco, em matrizes de cimento e areia fina (traço 1:1 e 1:2, em volume), e cimento, cal e areia (traço 1:2:3), o CEPED (1984) chegou às seguintes conclusões gerais:

- . ao aumento da proporção de agregado na matriz corresponde um decréscimo na eficiência da fibra;
- . quanto menor o fator água-cimento, maior é a resistência à flexão do compósito;
- . compósitos vibrados e prensados apresentaram valores de absorção e porosidade inferiores aos das matrizes correspondentes;
- . a resistência à flexão, absorção, porosidade e massa específica aparente variaram com a tensão de prensagem;
- . a absorção e a porosidade tiveram o mesmo tipo de comportamento, variando diretamente com os mesmos parâmetros;
- . a absorção aumentou com o teor de fibras, crescendo mais acentuadamente para fatores água-cimento mais elevados;
- . a massa específica aparente decresceu com o aumento do volume de fibras, decréscimo este mais acentuado para fatores água-cimento mais elevados;
- . foram observadas correlações entre a resistência à flexão, a absorção e a porosidade, sendo a primeira variável inversamente proporcional às demais, independentemente do teor de fibras, método de fabricação e fator água-cimento;
- . o teor de fibras é a variável que tem influência mais marcante na massa específica aparente dos compósitos.

Na tecnologia de produção de compósitos, AZIZ et al. (1986) chamaram a atenção para quatro pontos importantes, quais sejam, a preparação da fibra, a mistura dos ingredientes, a moldagem e a cura. Segundo estes autores, o comportamento de todos os compósitos com fibra natural é muito

influenciado pelo processo de produção, controle de qualidade e a maneira como o material é moldado.

A literatura em geral refere-se ao processo de fabricação como um fator decisivo para a resistência final do compósito, devendo o mesmo garantir um bom envolvimento das fibras pela matriz, boa compacidade e porosidade adequada. O aumento da compacidade é consequência direta da redução do fator água-cimento.

Durante a moldagem do compósito, pode-se usar a prensagem (que possibilita a utilização de uma maior quantidade de água cujo excesso será posteriormente eliminado), a compactação manual ou a vibração externa (mesa vibratória) ou interna (vibrador de imersão). A vibração externa é mais eficiente que a interna e ambas mais eficientes que a compactação, em termos de acréscimos da resistência à flexão.

O CEPED (1984) recomendou que, no caso de compósitos com matrizes de cimento, o diâmetro máximo das partículas de areia, seja de 5 mm. Este mesmo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento destaca, como parâmetros relevantes, o índice de enfiamento das fibras, a porcentagem volumétrica de fibras, o comprimento, a orientação e distribuição das fibras dentro da matriz, etc.

A distribuição aleatória de fibras na matriz é recomendada quando se utilizam fibras de comprimentos menores que 4 cm; fibras com comprimentos maiores devem ter um certo grau de orientação, quando usadas em compósitos de fibrocimento.

A homogeneização da matriz com fator água-cimento igual ao da argamassa de consistência normal mais 30% e adição das fibras saturadas, foi o procedimento mais viável encontrado pelo CEPED (1984) para garantir o critério de trabalhabilidade estabelecido.

O CEPED (1984) testou, também, a viabilidade da confecção de peças com compósitos de fibra vegetal e matriz de cimento, a partir de processos artesanais, de forma simplificada e prontamente assimilável pelo usuário.

Assim, foram moldadas chapas onduladas e telhões, e testados vários traços de argamassa de cimento e areia, variáveis teores de fibra, diferentes fatores água:cimento, e diversas formas de moldagem de telhas. As peças foram posteriormente ensaiadas à flexão e determinadas suas características físico-mecânicas.

Da mesma forma, caixas d'água foram confeccionadas com compósitos à base de fibras de coco e de sisal, mostrando-se as mesmas perfeitamente estanques e resistentes ao manuseio e transporte.

Ensaando pastas de cimento reforçadas com fibras de coco, COOK et al. (1978) moldaram chapas de 300 x 300 x 9 mm que, desmoldadas 24 h após, eram mantidas em câmara úmida, a $95 \pm 3\%$ de umidade relativa e a $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 28 dias, antes de serem submetidas aos ensaios. Para tal, o cimento era adicionado às fibras saturadas e com elas completamente misturado. Em seguida adicionava-se a quantidade necessária de água e prosseguia-se com a mistura até total uniformização. A mistura era então colocada nos moldes e sobre ela

aplicada uma pressão constante de moldagem durante 24 h; esta pressão variou de 1 a 2 MPa em incrementos de 0,33 MPa.

O CEPED (1984) experimentou vários tipos de chapas, dentre as quais as placas sanduíche, compostas por núcleo de fibras envolvidos por duas camadas de argamassa. O procedimento adotado compreendeu a execução da camada inferior de recobrimento com argamassa de cimento e areia fina de traço 1:3, em volume; a colocação do núcleo de fibras, no caso, fibras de sisal e coco; a prensagem simplificada através da colocação de pesos sobre o tampo móvel que cobria toda a superfície da placa, por 24 horas, e a execução da camada superior de recobrimento.

Dentre os processos construtivos testados para moldagem das placas, o que melhor resultado apresentou na execução do núcleo de fibras foi aquele que compreendia a arrumação das fibras secas até a altura desejada, derramando-se sobre elas nata de cimento. Este processo apresenta maior facilidade e uniformidade na execução.

A tensão de prensagem conseguida da forma descrita anteriormente é muito baixa, servindo apenas para adensar a mistura.

As placas foram ensaiadas à flexão, com aplicação de carga centrada, após terem permanecido em câmara úmida até a data do ensaio, aos 7 e 28 dias.

As placas assim obtidas apresentaram as seguintes características gerais: baixa massa específica aparente, alta porosidade, ductibilidade na flexão, suportando grandes deformações e sob carregamento constante.

2.5.3.1. Compósitos com Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar

Com o objetivo de estudar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e matriz de cimento e avaliar sua adequação para fins de material de construção, RACINES e PAMA (1978) realizaram ensaios de absorção de água, expansão, contração, combustibilidade, resistência ao impacto, permeabilidade e durabilidade, para três diferentes volumes de fibra (10, 20 e 30%).

A presença de sólidos solúveis (na maioria, açúcares) enfraquece o cimento e atrasa o tempo de pega. Com a finalidade de eliminar estes inconvenientes, RACINES e PAMA (1978) propuseram, como alternativa mais econômica, mergulhar as fibras de bagaço de cana-de-açúcar em água fervente, durante 30 minutos, seguido de posterior secagem antes de se misturá-las com o cimento.

Após testarem vários corpos-de-prova de compósitos moldados com 20% de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e prensados sob pressões variáveis de 0,7 a 3,15 MPa, os autores retro-mencionados concluíram que a pressão de moldagem mais adequada, que conduz à máxima resistência, é 1,75 MPa.

Isto posto, as fibras de bagaço eram manualmente misturadas à pasta de cimento, despejadas dentro do molde e comprimidas em um sistema de carregamento hidráulico sob carga constante correspondente à pressão de moldagem preestabelecida. Os corpos-de-prova eram desmoldados após 24 h e

em seguida curados em uma câmara úmida a 70% de umidade relativa e 28 °C, durante 28 dias.

Ao final, os referidos autores concluíram que a presença de vazios ocupados pelo ar afeta significativamente a resistência dos compósitos; da mesma forma, o acréscimo do teor de fibra no compósito provocou um decréscimo na resistência e módulo de elasticidade, e reduziu a durabilidade do material. A presença de fibras tornou o compósito um material dúctil em contraste com o comportamento rígido da matriz na ausência das fibras. Os resultados dos ensaios indicaram como melhor proporção o teor de 10% de fibras no compósito, em volume.

Os autores retro-mencionados chegaram, ainda, às seguintes conclusões:

- o uso de aditivos nos compósitos reduz ligeiramente a absorção de água, ao contrário das pinturas superficiais que provocaram reduções significativas;
- os compósitos com baixo teor em volume de fibras podem ser classificados como materiais impermeáveis;
- os compósitos foram classificados como materiais incombustíveis, após a aplicação dos testes, de acordo com as normas do IOS (International Organization for Standardization);
- como material de cobertura, as chapas compostas de fibras de bagaço em matriz de cimento mostraram-se mais baratas que as telhas cerâmicas e mais

ainda se comparadas com chapas onduladas de cimento-amianto e de aço galvanizado.

Trabalhando com concreto de traço 1:2:4 reforçado com 3% de fibras de bagaço de cana-de-açúcar, cortadas em pedaços de comprimento variável entre 25 e 38 mm, AZIZ et al. (1986) encontraram valores para a resistência ao impacto, ao 28º dia, da ordem de 1,96 MPa. Estes mesmos autores, trabalhando agora com chapas onduladas de 25 mm de espessura, confeccionadas com argamassa de cimento e areia de traço 1:0,5, reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar de comprimento entre 25 e 38 mm, determinaram a condutibilidade térmica das referidas chapas que foi de 0,67 e 0,69 W/m K, respectivamente, para 3 e 4%, em volume, de fibras utilizadas.

O CEPED (1982) não chegou a ensaiar compósitos de fibrocimento com fibra de bagaço de cana-de-açúcar, devido às dificuldades encontradas no desfibramento, aliado ao fato de ter o bagaço de cana-de-açúcar inúmeras outras aplicações.

HESS e BUTTICE (1990) estudaram a utilização do bagaço de cana-de-açúcar, em mistura com micro-concreto de cimento Portland comum, e suas possibilidades de uso como material mais econômico em substituição ao convencional.

Os autores retro-mencionados utilizaram fibras de bagaço de cana-de-açúcar destinadas à manufatura de papel, com dimensões variáveis entre 10 e 70 mm. Dois tratamentos foram testados com a finalidade de eliminar o açúcar residual: o primeiro, com cal a 18 %, em autoclave, por duas horas e à pressão de

0,6-0,7 MPa; o segundo, valendo-se de um processo microbiológico, no qual o bagaço permanece saturado, sendo, após, filtrado. Diferentes traços e proporções de fibra (10 - 30%) foram experimentados, utilizando o silicato de sódio como aditivo, na tentativa de “mineralizar” a fibra e impedir, desta maneira, a interferência na pega do cimento. O ordem de colocação dos materiais foi o seguinte: inicialmente a água, cimento e areia, e, após homogeneização, as fibras, evitando-se assim o enovelamento, de ocorrência comum também quando se está misturando a mais tempo que o necessário; este fenômeno acontece, também, com outros tipos de fibras (de vidro, metal, etc.). Os corpos-de-prova foram prensados e curados em câmara úmida, para, em seguida, serem submetidos a ensaios de flexão e de compressão simples, cujos resultados foram os seguintes, para o compósito de traço:

1:2:0,1:0,7 (cimento : areia : fibra : água):

| | |
|---|-------------------------|
| - Absorção de água pelas fibras : | 400 % |
| - Resistência à tração da argamassa : | 3,9 MPa |
| - Resistência à compressão da argamassa : | 20,2 MPa |
| - Massa específica aparente das fibras soltas | 70,0 kg/m ³ |
| - Massa específica aparente das fibras compactadas: | 140,0 kg/m ³ |
| - Resistência à compressão | 2,1 MPa |
| - Resistência à compressão, com aditivo | 5,2 MPa |
| - Resistência à flexão | 0,6 MPa |
| - Resistência à flexão, com aditivo | 1,5 MPa |

Finalmente, concluíram HESS e BUTTICE (1990) que as resistências aumentaram notavelmente, com o uso de aditivo, assim como foi evidente a ação das fibras, na ruptura à tração, que permaneceram aderidas à argamassa.

Segundo o ICIDCA (1988), além das fábricas produtoras de painéis prensados, ou com resina sintética, investiga-se a produção de painéis de bagaço de cana-de-açúcar aglomerados com cimento, realizando-se ensaios, em condições de laboratório e de planta piloto, com bons resultados. Os painéis de bagaço-cimento conjugam as vantagens dos painéis à base de resinas sintéticas (boa resistência mecânica, facilidade de trabalho, etc.,) com as propriedades vantajosas do cimento (resistência ao fogo, ao ataque de fungos e insetos, e às intempéries).

O processo começa com a classificação da fração fibrosa do bagaço, procedendo-se à mistura (água, aditivos, cimento e fibras) que é distribuída em fôrmas metálicas e, em seguida, prensada. Para favorecer o pega do cimento e o endurecimento da mistura, as chapas, ainda colocadas nas formas, são tratadas a quente (60 a 80 °C), durante 6 a 8 horas. Uma vez endurecidas, as chapas são retiradas das fôrmas e submetidas às operações de acabamento, corte das bordas e lixamento; são então armazenadas por um período de 20 dias, com o fim de concluir o processo de endurecimento do cimento, sendo então expostas a um tratamento de climatização, para equilibrar o teor de umidade.

AGGARWAL (1995) investigou a otimização de compósitos utilizando partículas de bagaço de cana-de-açúcar, abundante em muitos países, com aplicação na construção civil; a investigação incluiu o estudo de parâmetros como: proporção de bagaço utilizado, pressão de moldagem e tempo de desmoldagem. Foram determinadas as propriedades físico-mecânicas dos compósitos assim como a durabilidade, valendo-se de testes acelerados. Foram moldadas placas variando a proporção de bagaço (0 - 20%), a pressão de moldagem (1,0 - 5,0 MPa) e o tempo de desforma (1-10 h), de acordo com o seguinte procedimento: as partículas de bagaço foram tratadas quimicamente, por duas horas, deixando-se escorrer o excesso de líquido, para em seguida misturá-las com o cimento Portland comum; a relação água/cimento foi igual a 0,40, sendo a mistura, após homogeneização, colocada em fôrmas metálicas e prensadas hidraulicamente por diferentes períodos do tempo; após desmoldadas, foram curadas por 10 dias e finalmente secas ao ar.

Após a realização dos ensaios de absorção de água, densidade, inchamento, flexão e tração, e do ensaio de durabilidade, em ciclos acelerados, variando o tempo e a temperatura, incluindo imersão em água durante 720 dias, AGGARWAL (1995) chegou às seguintes conclusões:

- ao incremento de pressão na moldagem, ocorreu um aumento da densidade do compósito e diminuição da absorção de água, sendo que a pressão ótima foi de 2-3 MPa;
- o aumento da proporção de fibras provocou uma diminuição da densidade e um aumento da absorção de água;

- a resistência à flexão aumentou com o aumento do teor de fibras até atingir 16%, a partir do qual valor a resistência começou a cair;
- o incremento na proporção de bagaço diminuiu a resistência à tração.

Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 5, comparados com os valores requeridos pelas normas ISO.

Finalmente, AGGARWAL (1995) afirmou que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser usado para a produção de materiais compósitos com cimento, e que os compósitos bagaço-cimento apresentam alta e uniforme performance na presença de umidade e nos ciclos alternados de secagem e umedecimento, sendo, portanto, recomendados para uso em construção civil.

QUADRO 5- Propriedades dos Compósitos de Bagaço de Cana-de-açúcar e Cimento (AGGARWAL, 1995)

| Propriedades dos compósitos bagaço-cimento | Valores conforme AGGARWAL | Valores conforme a ISO |
|---|--|---------------------------------------|
| Densidade (kg/m ³) | 1550 - 1650 | 1000 (mín.) |
| Umidade (%) | 6,5 - 6,8 | 6 -12 |
| Absorção de água (%) | 12,5 - 14,5 | — |
| Inchamento em água (%) | 0,30 - 0,46 | 2 (máx.) |
| Resistência à flexão (MPa) | 8,85 - 9,60 | 9 (mín.) |
| Resistência à tração (MPa) | 1,6 - 1,14 | 0,45 (mín.) |

2.5.3.2. Normatização para Compósitos na Forma de Chapas ou Painéis

A ASTM (1972) definiu chapas de isolamento térmico como sendo painéis homogêneos feitos de fibras ligno-celulósicas (normalmente madeira ou bagaço de cana), com massa específica aparente compreendida entre 160 e 497 kg/m³. A integridade física desse material é conseguida pelo entrelaçamento das fibras que o compõem, não havendo, no processo de manufatura, qualquer forma de consolidação sob calor e pressão, embora se admita a adição de outros materiais com a finalidade de melhorar determinadas propriedades. Para estas chapas de isolamento térmico, destinadas à cobertura de instalações, a ASTM C 208-72 estabeleceu exigências no que se refere às propriedades físicas do material, estando as mesmas relacionadas no Quadro 6.

Chapas de compósitos confeccionadas na forma de painéis leves, não-portantes, podem ser usadas como paredes internas ou paredes divisórias.

QUADRO 6 - Exigências Físicas para a fabricação de Chapas de Isolamento Térmico para Fins de Cobertura e Paredes, Conforme a Norma ASTM C208-72 (ASTM, 1972)

| Exigências físicas | Chapas de parede | Chapas de cobertura de espessura | |
|--|------------------|----------------------------------|---------|
| | 12,7 mm | 12,7 mm | 25,4 mm |
| Condutibilidade térmica média máxima (W/m K), à temperatura (média de 24+/- 3 °C) | 0,055 | 0,055 | 0,055 |
| Carga transversal em qualquer direção, média mínima (N) | 53,4 | 31,1 | 62,3 |
| Resistência à tração paralela à superfície, média mínima (kPa) | 1034 | 345 | 345 |
| Resistência à tração perpendicular à superfície, média mínima (kPa) | 28,7 | 23,9 | 23,9 |
| Absorção de água em volume, máximo (%) | 7 | 10 | 10 |
| Expansão linear, 50-90% Umidade Relativa, média máxima % | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Módulo de ruptura à flexão, média mínima (kPa) | 1655 | 965 | 552 |
| Deflexão sob carga mínima especificada, média máxima (mm) | 22 | 32 | 16 |

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

3.1.1. Bagaço de Cana-de-Açúcar

O bagaço, mecanicamente desmedulado, foi fornecido pela COPERSUCAR e colhido junto à Usina São Martinho, Município de Pradópolis, Estado de São Paulo.

3.1.2. Aditivos Químicos

Foram utilizados dois sais inorgânicos, a saber, o silicato de sódio (Na_2SiO_3) e o sulfato de alumínio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$], adquiridos junto a casas comerciais do ramo.

3.1.3. Cimento e Areia

Tanto o cimento Portland CP II-E 32, como a areia média utilizados foram adquiridos em casas idôneas de materiais de construção.

3.1.4. Água

Utilizou-se água potável para o amassamento da argamassa de cimento e areia, e água destilada no preparo das soluções de silicato de sódio e de sulfato de alumínio.

3.1.5. Equipamentos de Laboratório

Os seguintes equipamentos de laboratório foram empregados para a realização dos ensaios:

- prensa de compressão, para a ruptura dos corpos-de-prova à compressão simples e à compressão diametral;
- prensa universal de ensaios, para o ensaio de flexão;
- microscópio com lâmina micrométrica de escala 1/0,01 mm, ocular de C 10x e objetiva 5/0,11, para a medição do diâmetro das fibras;
- paquímetro de precisão 0,01 mm, para a medição do comprimento das fibras;
- espectrofotômetro, para a determinação do teor de açúcares;
- estufa de temperatura regulável, para a determinação do teor de umidade e secagem do material;

- tubo de ensaio, para a determinação da massa específica das fibras, de capacidade de 1 litro;
- agulha de Le Chatelier, para a determinação da expansibilidade da pasta de cimento;
- flow table, para a determinação do índice de consistência das argamassas;
- recipientes cilíndricos de volume aproximadamente igual a 3 dm^3 , usados na determinação da massa específica aparente, na condição solta seca;
- balança de precisão 0,1 g, misturador mecânico, espátula, molde tronco-cônico, aparelho de Vicat, sonda de Tetmeyer e agulha de Vicat, usados para a determinação da consistência normal e tempos de pega da pasta de cimento;
- moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, soquete, placas de vidro, capeador, etc., para a moldagem de corpos-de-prova;
- câmara úmida, para a cura de corpos-de-prova;
- fôrmas de madeira, de dimensões 2 x 50 x 50 cm, usadas para a moldagem de placas destinadas aos ensaios de flexão, condutibilidade térmica, e absorção de água.
- betoneira de eixo inclinado;
- mesa vibratória;
- socador de madeira, de 9 x 20 cm de superfície e de aproximadamente 3 kg de peso.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Ensaios Preliminares Aplicados ao Bagaço de Cana-de-Açúcar

Recebido o bagaço de cana-de-açúcar, já desmedulado e apresentado em três frações de tamanho (figura 1), procurou-se separar a fração utilizável baseado no princípio de que a mais adequada seria aquela que apresentasse a menor porcentagem de medula residual e representasse, ao mesmo tempo, o maior volume de bagaço, uma vez que a medula é um constituinte indesejável por conter maior teor de açúcar residual em relação aos demais e, por conseguinte, maior efeito inibidor sobre a pega e o endurecimento do cimento.

A fração original escolhida foi aquela retida na peneira de 3/8" (95 mm), fração esta que representa 50% do volume total do bagaço. Tal fração, para melhor definição, foi peneirada nas peneiras nº 4 (4,76 mm de abertura de malha) e nº 10 (2 mm) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), resultando em nova fração mais uniforme, com predominância de bagaço de tamanho compreendido entre 10 e 30 mm, aproximadamente.

O bagaço foi, então, mergulhado em água fervente durante 30 minutos e, em seguida, lavado em água corrente e posto a secar ao ar livre. Tal procedimento teve por objetivo reduzir o teor de açúcar residual do bagaço de cana-de-açúcar e eliminar as impurezas. A adição de NaOH (hidróxido de sódio) a 5% na água de fervura não resultou em maior eficiência do processo de simples lavagem.

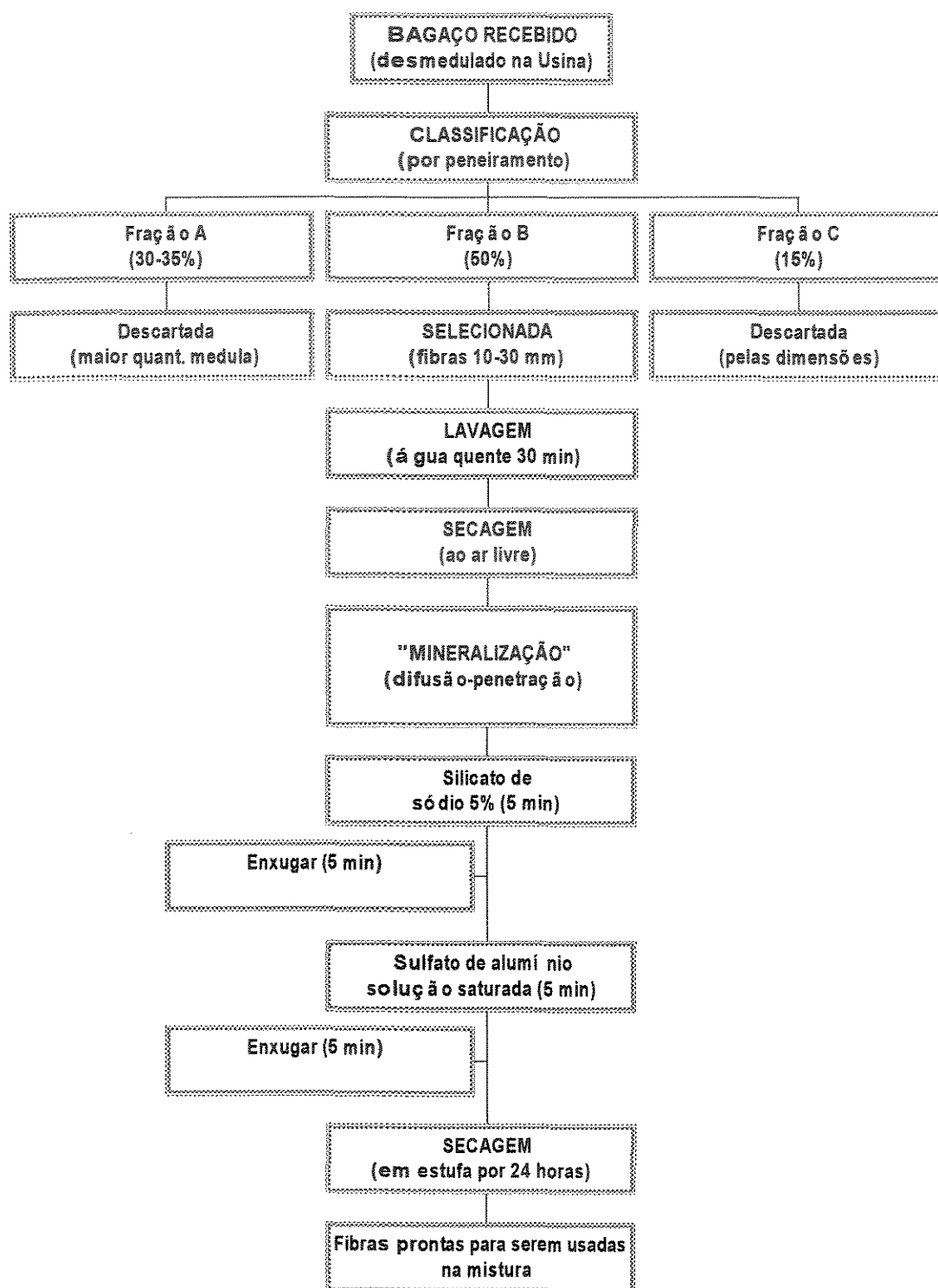


FIGURA 1 - Fluxograma da preparação das fibras

Do bagaço assim preparado foram obtidas as fibras, as quais se apresentavam fragmentadas em consequência do severo esmagamento do bagaço, após moagem da cana-de-açúcar.

3.2.2. Determinação do Teor de Açúcar Residual do Bagaço de Cana-de-açúcar

Após a lavagem a quente do bagaço de cana-de-açúcar, foram tomadas 4 amostras e encaminhadas aos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, para a determinação do teor de açúcar residual pelo método de Antrona.

As amostras foram preparadas para serem comparadas com um padrão de sacarose (1 mg/ml), utilizando-se, para tal, de um espectrofotômetro, no qual a leitura é feita num regulador que seleciona o comprimento de onda correspondente ao padrão de sacarose, calibrando-o e zerando-o. A unidade de leitura é dada em absorbância de luz, e os valores, depois de calculados, são expressos em porcentagem. O ensaio foi conduzido com 3 repetições.

3.2.3. Tratamento Químico das Fibras

As fibras de bagaço de cana de açúcar passaram por um tratamento químico à base de silicato de sódio em combinação com sulfato de alumínio, com a finalidade de: a) “mineralizar” as fibras, protegendo-as contra a agressão do meio alcalino proporcionado pelo cimento; b) imobilizar a matéria orgânica constituinte e diminuir sua capacidade de absorção de água, de modo a evitar

possíveis variações dimensionais; c) reduzir ao mínimo a interferência nas reações de pega e endurecimento do cimento; d) proporcionar melhores qualidades ao compósito produzido, tais como durabilidade, resistência ao fogo e resistência ao ataque de microrganismos.

Aplicou-se às fibras o “diffusion-penetrating-process”, proposto por FORUNO *et al.* (1991) e desenvolvido inicialmente para o tratamento de partículas de madeira. O processo de difusão-penetração foi empregado primeiramente da forma preconizada pelos autores e, posteriormente, ligeiramente modificado para atender às características próprias das fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

Assim, de acordo com o processo original, preparou-se uma solução de silicato de sódio a 5% na qual foram imersas as fibras durante 24 horas; após este tempo, as fibras foram retiradas, enxutas superficialmente e deixadas a secar ao ar durante 1 hora. As fibras, já impregnadas de silicato de sódio, foram imersas agora numa solução saturada de sulfato de alumínio (30 %) durante outras 24 h, retiradas, enxutas superficialmente e postas a secar ao ar durante outra 1 h, após o que foram levadas à estufa para secagem à temperatura de 60 °C, por mais 24 h. Resfriadas durante 1 h, as fibras foram acondicionadas em um recipiente hermeticamente fechado, em ausência de oxigênio, ambiente este conseguido com o auxílio de pentóxido de fósforo, por pelo menos 24 h antes de serem submetidas a quaisquer ensaios.

As modificações introduzidas nesta metodologia consistiram na redução do tempo de imersão de 24 h para 1 h e, posteriormente, a 5 minutos,

tempo suficiente para que os produtos químicos fossem absorvidos pelas fibras, e na redução do tempo de secagem das fibras ao ar, de 1 h para 5 minutos; testou-se, também, uma redução a 10 % da concentração do sulfato de alumínio, além da solução saturada, baseado no fato de que estes produtos são utilizados como aceleradores de pega e que, dependendo da quantidade absorvida e liberada posteriormente pelas fibras, interferem positivamente nos tempos de início e fim de pega do cimento.

Estes procedimentos foram adotados em função dos resultados obtidos após a realização dos ensaios preliminares de absorção de água por fibras quimicamente tratadas e não tratadas.

3.2.4. Determinação do Diâmetro e Comprimento das Fibras

As dimensões das fibras de bagaço de cana-de-açúcar foram medidas com o auxílio de um microscópio e de um paquímetro e foram realizadas no laboratório de Microbiologia da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP.

Foram feitas 30 medições para a determinação do diâmetro e do comprimento das fibras, para cada fração denominada A, B e C, calculando-se, também, o índice de enfiamento, que é a relação entre o comprimento e o diâmetro, e dá idéia da maior ou menor aderência da fibra/matriz quanto maior ou menor for o seu valor, respectivamente.

3.2.5. Determinação do Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade, tanto das fibras como do bagaço, foi feita pesando-se uma amostra seca ao ar, a qual, depois de levada à estufa a 70 °C, durante 24 h, teve seu peso seco anotado. O teor de umidade foi calculado utilizando-se a expressão:

$$h = \{ (P_u - P_s) / P_s \} \times 100$$

onde: h = teor de umidade, em porcentagem;

P_u= peso úmido da amostra, em g;

P_s= peso seco da amostra, em g.

3.2.6. Determinação da Massa Específica Aparente das Fibras

A massa específica foi determinada introduzindo-se uma quantidade de fibras, previamente pesada, no interior do tubo de ensaio contendo álcool, medindo-se, em seguida, o volume de álcool deslocado, que é igual ao volume de fibras introduzido.

A substituição da água por álcool deve-se ao fato deste ter menor densidade do que a água, evitando que o bagaço bóie na superfície do líquido.

Dificuldades inerentes a este processo estão relacionadas ao fato de as fibras, tão logo sejam imersas no meio líquido, começarem a absorvê-lo e, conseqüentemente, se incharem, sofrendo assim uma variação volumétrica. Tal problema pôde ser reduzido deixando as fibras o mínimo tempo possível em contato com o líquido (alguns segundos).

3.2.7. Determinação da Massa Específica Aparente das Fibras Secas e Soltas

A massa específica aparente das fibras do bagaço de cana de açúcar, na condição solta seca, foi determinada de acordo com a norma NBR - 7251-82 da ABNT.

3.2.8. Ensaio de Absorção de Água das Fibras

Uma certa quantidade de fibras secas, previamente pesadas, foi imersa em água, retirando-as após decorrido um determinado intervalo de tempo, enxugando-as superficialmente e imediatamente pesando-as em uma balança eletrônica de 0,0001 g de precisão.

As pesagens foram feitas inicialmente a cada minuto até o décimo, depois a intervalos de 10 minutos, até o sexagésimo, daí para diante a intervalos de 24 h até o quinto dia.

O ensaio foi conduzido com 3 repetições e aplicado a cada fração A, B e C sem tratamento químico, e à fração B, com tratamento químico.

A quantidade de água absorvida foi calculada por diferença de pesagem entre o peso úmido e o peso seco da amostra, e expressa em porcentagem.

3.2.9. Determinação da Água da Pasta de Cimento de Consistência Normal

Tentou-se, inicialmente, aplicar este ensaio à pasta de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, não sendo possível levá-lo a

efeito em virtude da imprecisão da leitura, nos aparelhos de medição, produzida pelas fibras; portanto, o ensaio foi aplicado apenas à pasta de cimento.

O ensaio foi conduzido de acordo com a norma NBR - 11580-90 da ABNT, a qual prescreve o método para a determinação da água que confere consistência normal à pasta de cimento Portland, e foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

A pasta é considerada normal quando seu índice de consistência for igual a 6 ± 1 mm; enquanto não se alcançar este resultado, diversas pastas são preparadas e ensaiadas fazendo-se variar a quantidade de água e utilizando-se nova porção de pasta para cada vez. Várias tentativas foram feitas até chegar-se ao valor permitido.

3.2.10. Determinação dos Tempos de Pega da Pasta de Cimento

O ensaio foi conduzido de acordo com a norma NBR - 11581-90 da ABNT com o objetivo de se determinar os tempos de início e fim de pega da pasta de cimento.

Utilizou-se, como água de amassamento, a água na qual as fibras quimicamente tratadas tinham sido previamente mergulhadas, com a intenção de se verificar possível interferência dos aditivos químicos cujo excesso seria liberado por exudação na água de amassamento.

Após a preparação da pasta de consistência normal, fez-se a leitura deixando-se descer a agulha de Vicat ao molde tronco-cônico que continha a pasta. O início de pega é constatado no momento em que a agulha de Vicat,

descendo sobre a pasta, estaciona a 1 mm do fundo do molde, sendo o tempo de início da pega o intervalo decorrido entre o lançamento da água e o instante em que se constatou o início da pega. O fim de pega é constatado no momento em que a agulha de Vicat penetra 38 mm, sendo o tempo de fim de pega o intervalo decorrido entre o instante em que se lançou a água de amassamento à pasta e o instante em que se constatou o fim da pega.

Os resultados são expressos em “horas-minutos” com aproximação de 5 minutos.

3.2.11. Ensaio de Expansibilidade da Pasta de Cimento

A expansibilidade da pasta de cimento foi determinada de acordo com a norma NBR - 11582-90 da ABNT.

As pastas de cimento foram preparadas da forma descrita no item 3.2.10, moldando-se os corpos-de-prova no aparelho de Le Chatelier e medindo-se a abertura das agulhas com o auxílio de um paquímetro de 0,01 mm de precisão. Sete dias após, novas medições foram feitas com a finalidade de se verificar qualquer alteração na posição das agulhas; a pasta de cimento terá se expandido se a abertura entre as agulhas de Le Chatelier for maior de 5 mm.

3.2.12. Escolha dos Traços para a Confecção dos Corpos-de-prova

Foram selecionados dois traços em massa para a argamassa de cimento e areia, a saber, traços 1:2 e 1:3. Da mesma forma, foram selecionados quatro teores de fibras de bagaço de cana-de-açúcar para serem incorporados às

argamassas de cimento e areia, ou sejam, 0, 10, 20 e 30 % em massa à do cimento.

Para cada traço foi determinado o fator água/cimento correspondente, tendo sido os ensaios conduzidos com quatro repetições.

3.2.13. Determinação do Índice de Consistência Normal da Argamassa de Cimento : Areia : Fibras

O ensaio foi conduzido de acordo com o Anexo da Norma NBR - 7215-90 da ABNT, utilizando-se da mesa de consistência ("flow table").

O índice de consistência, expresso em milímetros, é dado pela média aritmética das médias dos diâmetros ortogonais da base do tronco de cone da argamassa, tendo sido a medida tomada com o auxílio de um paquímetro de precisão de 0,1 mm.

3.2.14. Moldagem dos Corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, seguiu os procedimentos indicados pela norma NBR - 7215-90 da ABNT.

Na preparação da argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, levou-se em conta a trabalhabilidade da argamassa e a capacidade de absorção de água das fibras. Em função disso, a proporção de água determinada para a pasta de cimento de consistência normal,

foi aumentada em 74, 153 e 216 % para o traço 1:2, quando à argamassa foram adicionadas 10, 20 e 30 % de fibras, respectivamente; no que se refere ao traço 1:3 de cimento e areia, os aumentos foram de 50, 120 e 166 % para adições de 10, 20 e 30 % de fibras, respectivamente.

A mistura dos componentes foi feita com o auxílio de um misturador mecânico de laboratório, exceto para os traços que incluíam 20 e 30 % de fibras, quando então a mistura era feita manualmente. Primeiramente, foram misturados o cimento e areia; após, foram adicionadas as fibras e, posteriormente, a água.

A moldagem dos corpos-de-prova procedeu-se logo após o amassamento, vedando-se o molde previamente com cera virgem, ao longo de toda a extensão da fenda vertical, e untando-o internamente com óleo mineral desmoldante.

A cura, após a desmoldagem, foi feita em câmara úmida e não por imersão completa em água, devido à presença de fibras vegetais; dada sua alta capacidade de absorção de água, não se recomenda este tipo de procedimento.

3.2.15. Ensaio de Compressão Simples

A determinação da resistência à compressão simples foi feita de acordo com a norma NBR - 7215-90 da ABNT.

Os corpos-de-prova, depois de capeados com a mistura de enxofre a quente, foram rompidos aos 7 e 28 dias de idade, em máquina de compressão, sob velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. A resistência média foi calculada pela média aritmética das resistências individuais de 4 corpos-de-prova, ensaiados na mesma idade.

3.2.16. Ensaio de Tração na Compressão Diametral

Corpos-de-prova cilíndricos, iguais àqueles utilizados nos ensaios de compressão simples, foram moldados e submetidos à compressão diametral, segundo o método Lobo Carneiro, ou “método brasileiro”.

A tensão principal de tração, distribuída no plano diametral e normal ao plano da seção, é dada por:

$$F_t = 2P / \pi \cdot D \cdot L$$

onde F_t = resistência à tração (MPa)

P = carga linear aplicada (N)

D = diâmetro do corpo-de-prova (mm)

L = comprimento do corpo-de-prova (mm)

3.2.17. Escolha do Tratamento.

Uma vez definido o teor de fibras (20 %, em massa), foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de acordo com o item 3.2.14, empregando-se argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida e ensaiados aos 7 dias. O ensaio foi conduzido com 3 repetições sendo os resultados analisados estatisticamente. Tanto a resistência à compressão como a massa específica aparente dos corpos-de-prova, serviram para definir a técnica utilizada para a moldagem das placas. Os tratamentos aplicados às fibras de bagaço de cana-de-açúcar foram os seguintes:

- 1) Não lavagem (bagaço natural);
- 2) Lavagem;
- 3) Lavagem + acelerador na mistura;
- 4) Lavagem + “mineralização” (com silicato de sódio e sulfato de alumínio);
- 5) Lavagem + “mineralização” + lavagem;
- 6) Lavagem + “mineralização” + lavagem + acelerador;
- 7) Lavagem + “mineralização” + acelerador.

3.2.18. Moldagem das Placas

O traço escolhido de cimento e areia, o teor de fibras e o melhor tratamento em termos de resistência à compressão simples, foi o escolhido para a preparação da mistura de traço 1 : 2 : 0,20 : 0,78 de cimento : areia : fibras : água, e para a moldagem das placas de 2 x 50 x 50 cm.

A mistura dos componentes foi feita em uma betoneira do tipo tradicional (Figura 2), observando-se, numa primeira tentativa, o mesmo procedimento empregado para os corpos-de-prova quanto à ordem de colocação

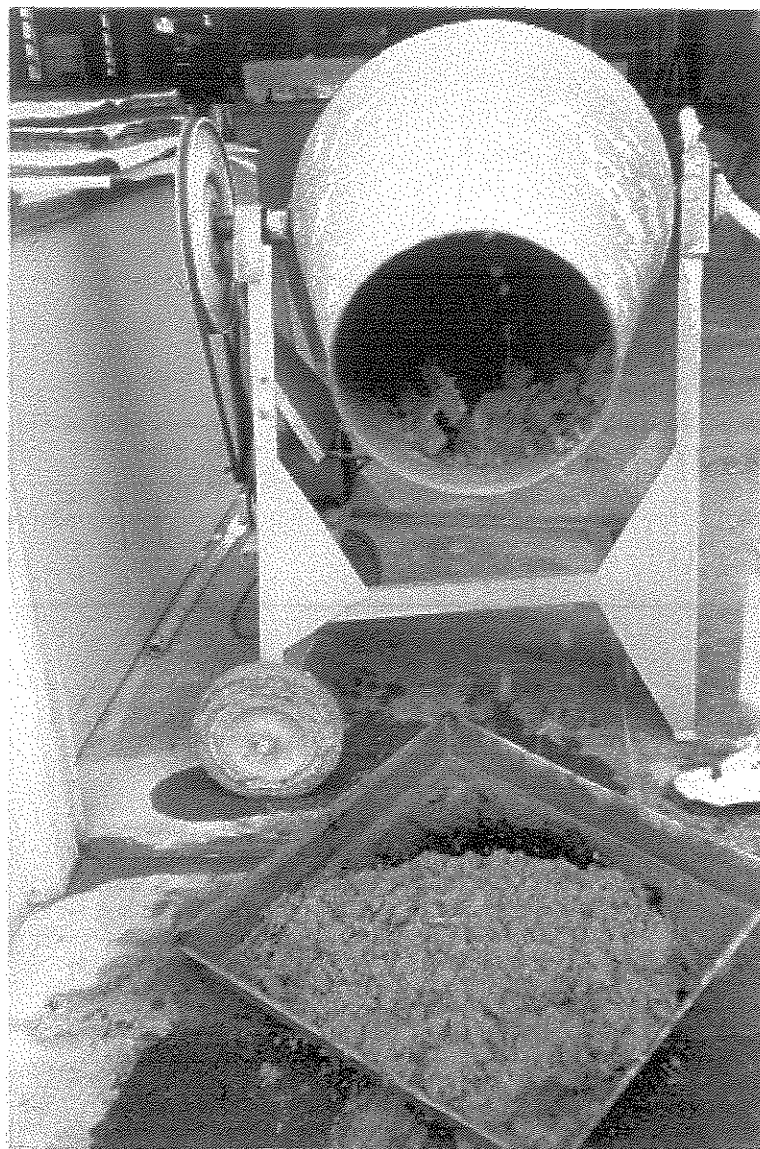


FIGURA 2 - Preparação da mistura, em betoneira, utilizada para a confecção do compósito

dos componentes (cimento, areia, bagaço e água); por motivos de trabalhabilidade, que torna mais complicada a mistura quando realizada com maior volume de componentes, optou-se pela forma descrita por AGOPYAN e JOHN (1990), que estabelece o seguinte procedimento: primeiramente foram misturados o cimento e areia, após o que foi adicionada a água; ao se apresentar homogênea a argamassa, foram, então, acrescentadas as fibras “mineralizadas” (secas), lentamente.

A moldagem das placas procedeu-se logo após o amassamento em fôrmas previamente preparadas, revestindo-as internamente com uma lâmina de plástico e untando-as, em seguida, com óleo mineral (Figura 3); as placas foram compactadas e igualadas com a ajuda de um soquete de madeira e de uma mesa vibratória (Figura 4), dando-se, finalmente, acabamento à superfície. A cura, após desmoldagem, foi feita em câmara úmida (Figura 5), molhando-se as placas, por meio de aspersão por uma semana, com o objetivo de manter umidade necessária para a completa hidratação do cimento, após o que foram postas a secar por uma semana, antes de serem ensaiadas aos 28 dias (Figura 6).

Foram, também, moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, juntamente com as placas, empregando-se a mesma mistura, procedimento, compactação e cura; tais corpos-de-prova foram submetidos à ensaios de compressão simples aos 7, 28 e 56 dias, com 3 repetições para cada idade (Figura 7).



FIGURA 3 - Moldagem das placas sobre mesa vibratória

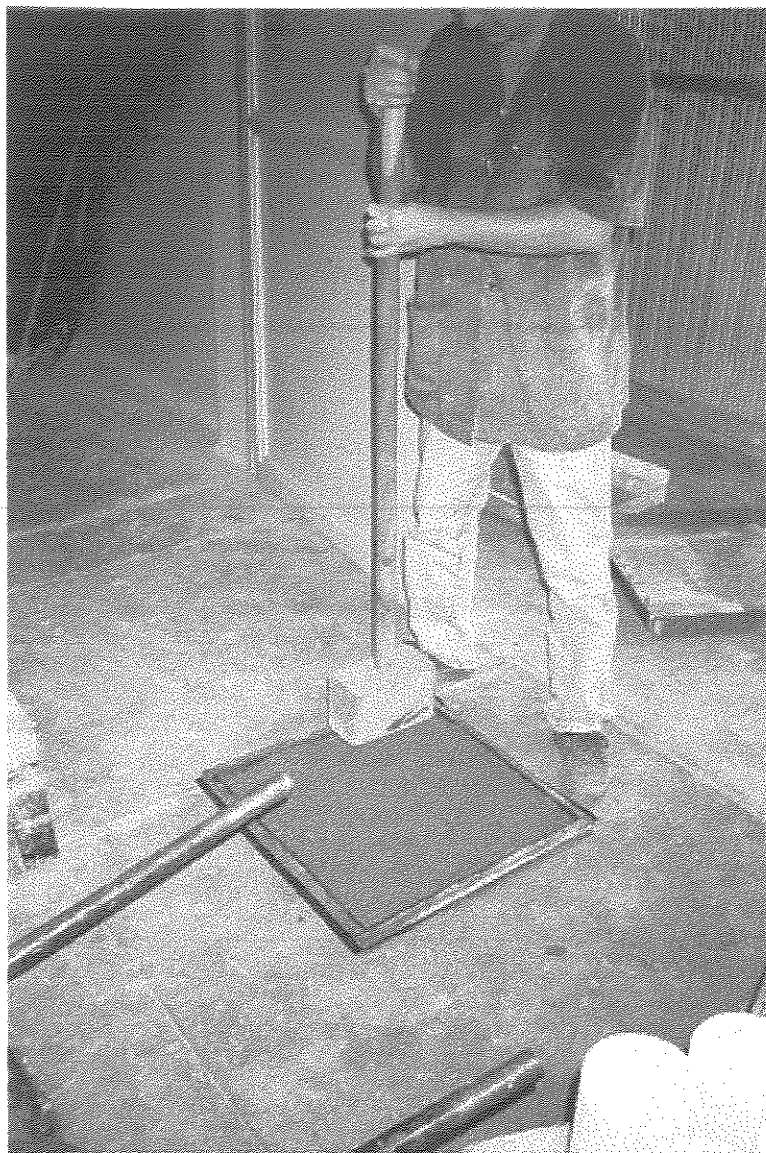


FIGURA 4 - Compactação da mistura na fôrma



FIGURA 5 - Cura das placas e corpos-de-prova em câmara úmida

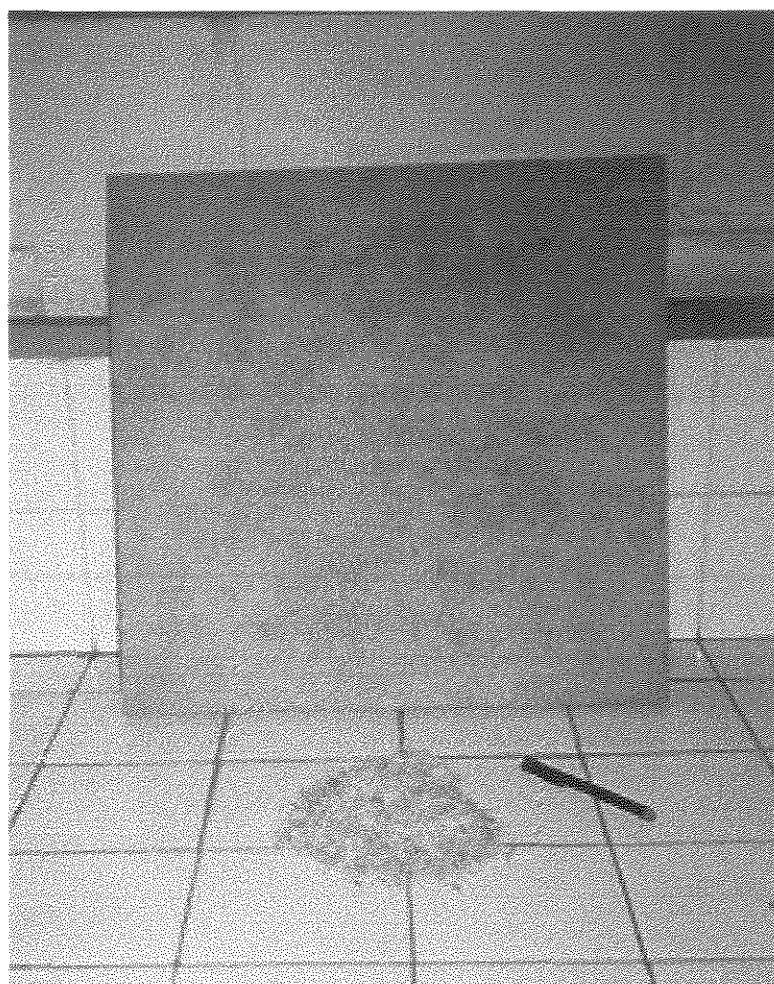


FIGURA 6 - Placa acabada

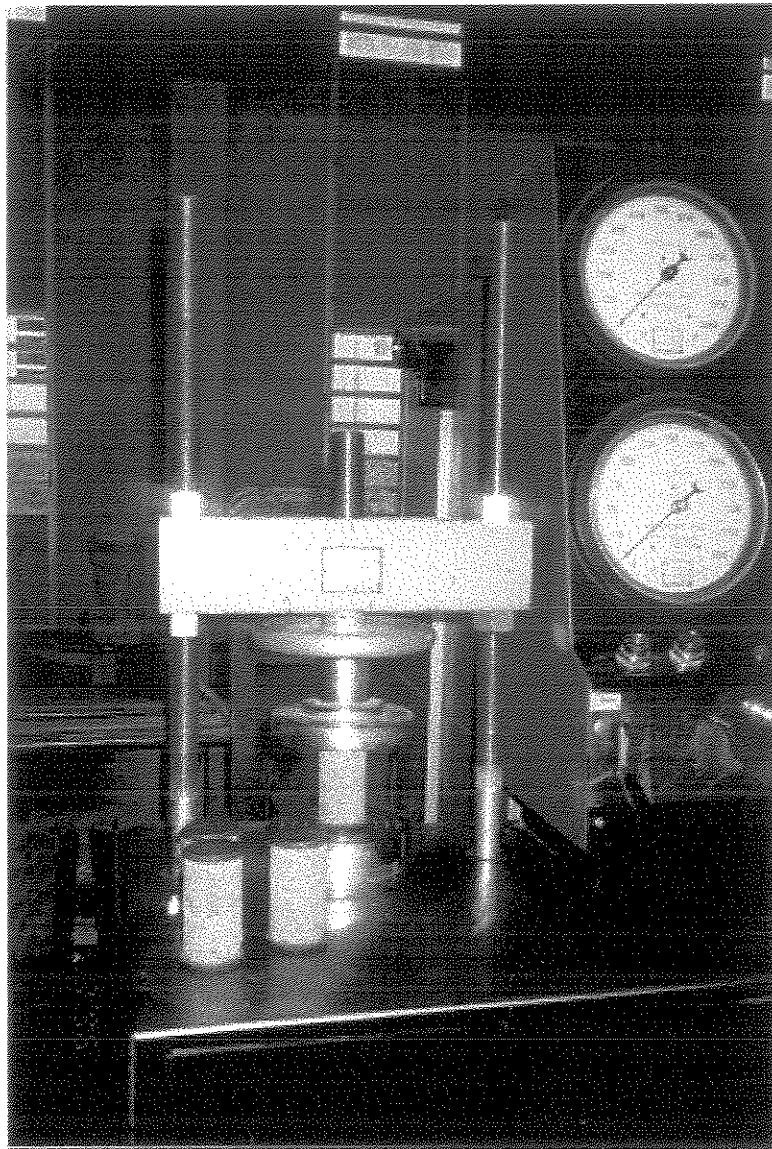


FIGURA 7 - Ruptura à compressão simples de corpos-de-prova

3.2.19. Ensaio à Flexão

O ensaio à flexão foi realizado de acordo com a Norma C 209 - 72, da ASTM, utilizando-se corpos de prova de 76 x 380 e 20 mm de espessura, cortados das placas confeccionadas anteriormente, com idade de 28 dias, rompidos em uma máquina universal de ensaios, segundo as especificações da norma e dimensões da amostra, de maneira que o ponto de aplicação da carga fosse centralizado no meio da placa apoiada, pelos dois extremos, em suportes distanciados 300 mm um do outro.

Com o auxílio de um relógio comparador (precisão de 0,001 mm), mediu-se o deslocamento vertical da placa, causado pelo carregamento; o relógio foi instalado num dos extremos do eixo central, paralelamente aos apoios da amostra. O contato entre a superfície da placa e o dispositivo de carregamento da máquina foi feito através de uma peça de aço, de mesmas dimensões que as da placa (Figura 8).

A carga transversal corresponde à carga máxima aplicada, no ensaio, até à ruptura, sendo a média de 3 repetições; é expressa em Newtons. O Módulo de Ruptura foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$MOR = 6 P / t^2 \text{ (MPa)}$$

onde: P = carga transversal (N)

t = espessura (mm)

A deflexão foi registrada no relógio, para cada repetição, sendo expressa em mm.

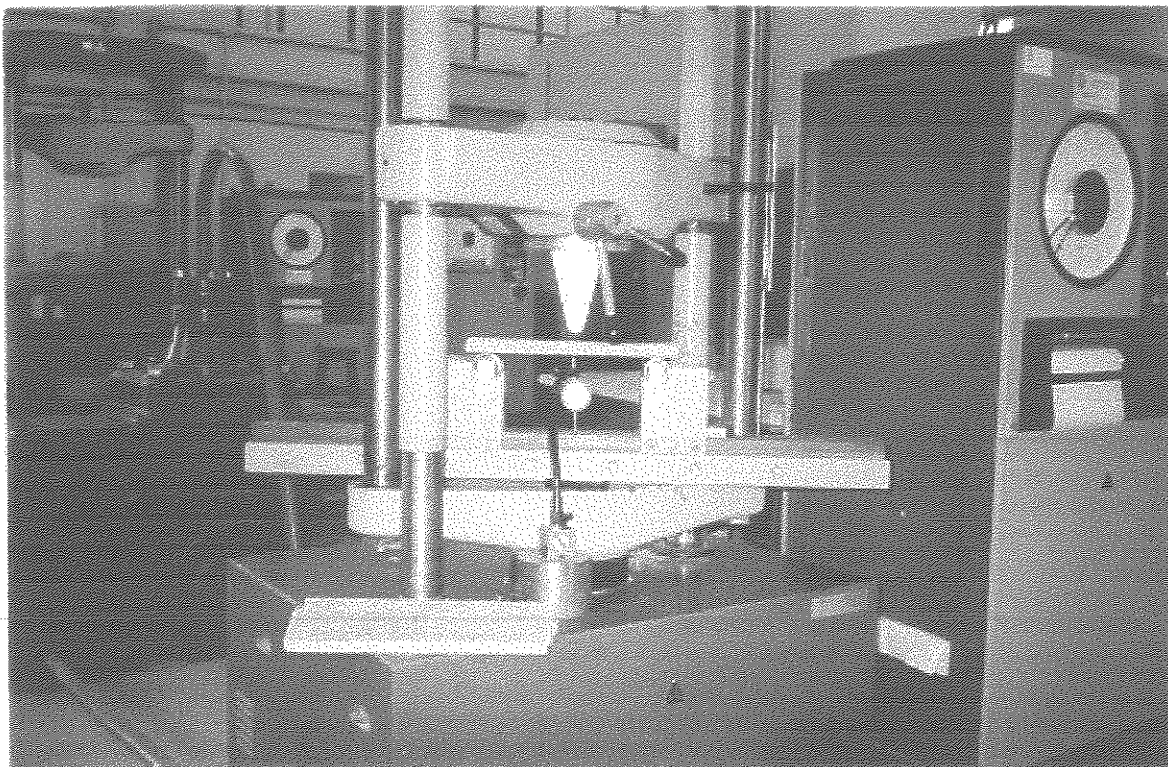


FIGURA 8 - Ensaio à flexão de corpos-de-prova cortados das placas

3.2.20. Ensaio de Condutibilidade Térmica

O ensaio de condutibilidade térmica foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Medidas do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. O coeficiente de condutibilidade térmica, definido como o fluxo de calor que passa através de uma área com uma espessura unitária, foi calculado por meio do Método de Regime Permanente. O medidor utilizado foi montado no mesmo Laboratório e consiste, basicamente, em duas placas: uma superior, quente, e a outra inferior, fria, no meio das quais é colocada a amostra de 260 x 295 x 20 mm (Figura 9), cortada da placa moldada com argamassa de cimento reforçada com fibras de cana-de-açúcar.

O sistema é completamente isolado para evitar a influência da temperatura ambiental. As temperaturas são registradas em 5 canais que indicam a leitura dos termopares colocados nas placas (quente e fria), na entrada e nas duas saídas da água. O procedimento consiste em esquentar a placa quente por meio de uma resistência elétrica, ao mesmo tempo que a placa fria é resfriada por um sistema de circulação de água. Quando a variação de temperatura é constante ($\Delta T \pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), em um intervalo de 15 a 20 min, pode-se afirmar que o sistema encontra-se em “regime permanente”; nesse instante, são tomadas as leituras para realizar os cálculos correspondentes utilizando as seguintes equações (Lei de Fourier):

$$q/A = K (\Delta T_{\text{amostra}} / L)$$

onde: q = calor

L = espessura da amostra

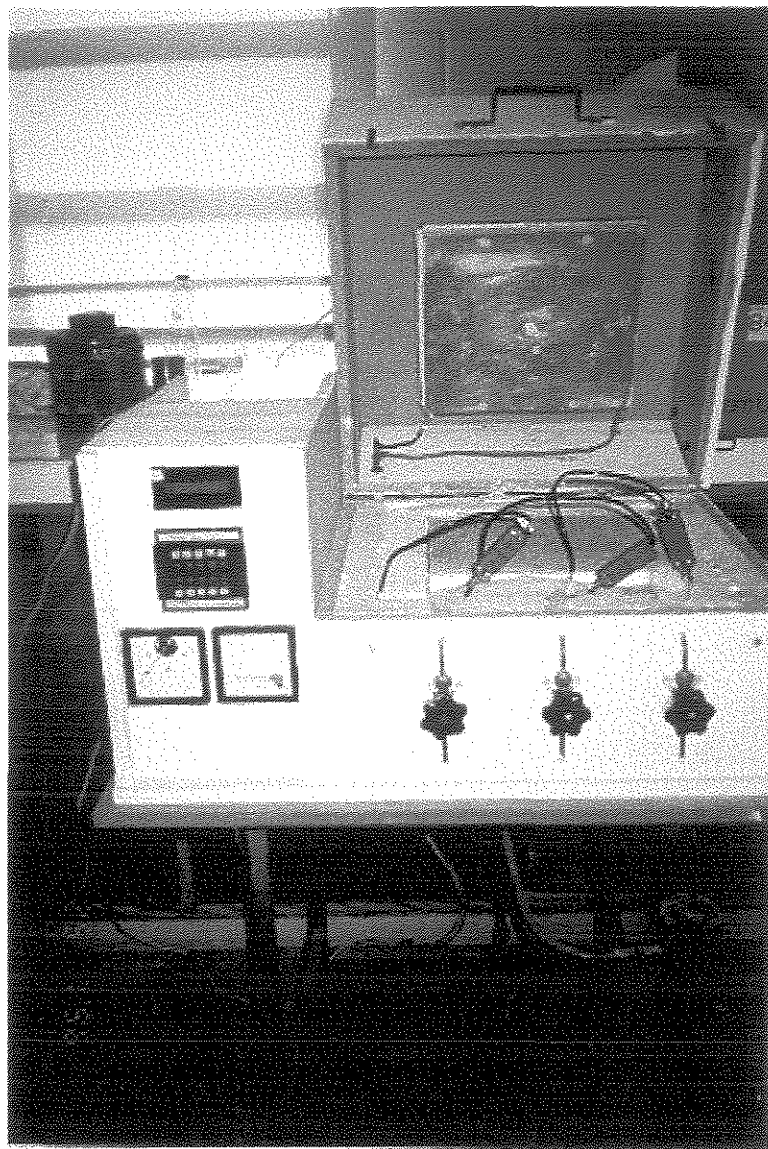


FIGURA 9 - Amostra de placa sendo preparada para o ensaio de condutibilidade térmica

A = área da amostra

K = condutibilidade (W/m K)

e a equação de transporte de energia:

$$q = \dot{m} C_p \Delta T_{\text{água}}$$

onde: C_p = calor específico da água

ΔT = diferença de temperatura de entrada e saída da água

\dot{m} = vazão mássica

3.2.21. Ensaio de Absorção Acústica

A absorção acústica foi determinada de acordo com a Norma C 384-85, da ASTM, sendo o ensaio realizado no Laboratório de Física da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, empregando-se o método do tubo de ondas estacionárias, conhecido, também, como tubo de impedância. O aparelho para determinar o coeficiente de absorção, montado no mesmo laboratório, consiste, basicamente, de um tubo que contém, numa de suas extremidades, um alto-falante, enquanto que, na outra, é fechado com uma tampa provida de isolamento acústico (Figura 10), na qual é colocada a amostra de aproximadamente 4,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, a ser estudada. O alto-falante é conectado a um gerador de sinais senoidais e a um amplificador, de modo a produzir, dentro do tubo, uma onda estacionária. Também é usado um microfone, como sonda, que permite o deslocamento, ao longo do tubo de impedância, proporcionando assim a leitura do nível de pressão acústica. O sinal do microfone é filtrado em faixas de frequências, amplificado e registrado.

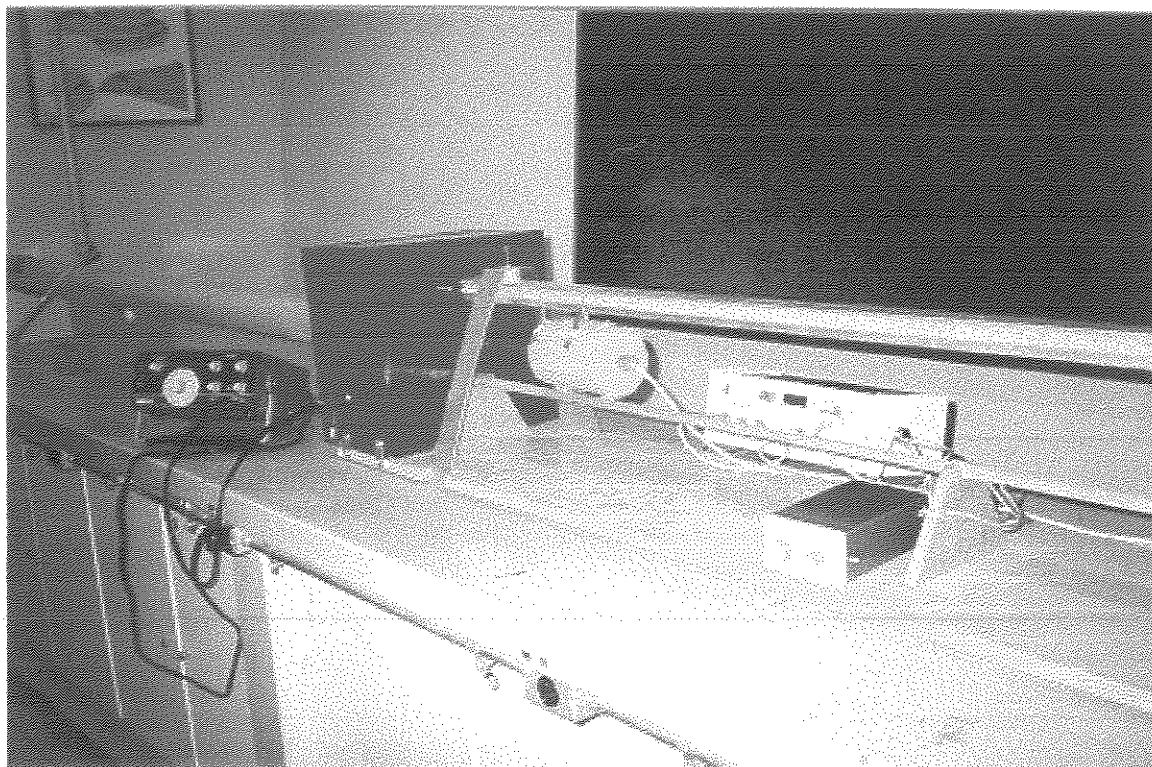


FIGURA 10 - Tubo de ondas estacionárias utilizado no ensaio de absorção acústica

Segundo GERGES (1992), para calcular o coeficiente de absorção (α_n) no tubo de impedância, recomenda-se os seguintes passos:

1) Medir a primeira pressão sonora máxima (P_{max}) mais perto da superfície da amostra e a primeira mínima (P_{min});

2) Com os valores de P_{max} e P_{min} calcula-se L :

$$L = 10 \log (P_{max}^2 / P_{min}^2)$$

3) Com L calcula-se o valor de ROE , que é a razão da onda estacionaria, usando-se a equação :

$$ROE = (A_1 + B_1) / (A_1 - B_1) = 10^{L/20}$$

onde: $A_1 + B_1$ = amplitude máxima

$A_1 - B_1$ = amplitude mínima

4) Com ROE , calcula-se o valor de α_n , usando-se a seguinte equação:

$$\alpha_n = 1 - [B_1/B_2]^2 = 4 ROE / (ROE + 1)^2$$

Foram determinados os coeficientes de absorção na bandas de freqüências de : 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, que são valores utilizados em Acústica Arquitetônica, sendo os resultados expressos em porcentagem.

3.2.22. Ensaio de Absorção de Água

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma D 1037-72, da ASTM. foram utilizados, neste ensaio, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e amostras quadradas, cortadas das placas moldadas com argamassa de cimento e fibras de cana-de-açúcar, de lado aproximadamente igual a 28 cm.

Tanto os corpos-de-prova como as placas foram pesados e, após, submersos em água, segundo especificações da Norma. Decorrido duas horas, foram os mesmos retirados da água e postos a secar por 10 min, sendo em seguida pesados e anotados os valores. Novamente foram imersos em água, por mais 22 horas, retirados e enxutos durante 10 min, para então serem pesados, constituindo-se este último valor o incremento de peso causado pela absorção de água, expresso em porcentagem.

Os corpos-de-prova e as amostras das placas foram colocados, posteriormente, em uma estufa, a 105 °C, por 24 horas, para se determinar seus teores de umidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O bagaço de cana-de-açúcar, tal como recebido da Usina, passou inicialmente por um pré-tratamento que incluiu lavagem em água fervente, com ou sem a adição de NaOH a 5%, com a finalidade de eliminar o açúcar residual.

No Quadro 7 estão apresentados os resultados desse pré-tratamento, observando-se que adição de hidróxido de sódio à água de lavagem não resultou em diferença significativa na redução do teor de açúcar residual em comparação com a lavagem só com água, passando este a ser o procedimento adotado.

O tratamento químico das fibras de bagaço de cana-de-açúcar com silicato de sódio e sulfato de alumínio provocou uma redução na sua capacidade de absorção de água, em função do tempo, como registrado no Quadro 8. Especificamente no caso da fração B, escolhida como reforço da argamassa de cimento e areia, a Figura 11 permite acompanhar, de forma mais nítida, a marcha de absorção de água, constatando-se que a máxima quantidade de água foi absorvida pelas fibras logo nos primeiros instantes de imersão, estabilizando-se em seguida.

QUADRO 7 - Redução do teor de açúcar residual em função da lavagem a quente do bagaço de cana-de-açúcar

| Amostras do bagaço | Determinação do teor de açúcar residual pelo método Antrona (%) |
|-------------------------------|--|
| Não desmedulado e sem lavagem | 2,6 |
| Desmedulado e sem lavagem | 1,9 |
| Lavagem só com água | 0,54 |
| Lavagem com água + NaOH a 5 % | 0,52 |

QUADRO 8 - Porcentagem de absorção de água por fibras de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo

| Amostras de fibra de bagaço | Tempo decorrido a partir da imersão em água | | | | |
|------------------------------------|--|------------|------------|-------------|---------------|
| | 1' | 10' | 60' | 24 h | 5 dias |
| Fração A | 441 | 485 | 488 | 506 | 550 |
| Fração B | 202 | 271 | 280 | 314 | 350 |
| Fração C | 172 | 245 | 256 | 291 | 350 |
| Fração B + tratamento químico | 129 | 132 | 132 | 136 | 143 |

Fração A : \varnothing 0,230 mm, comprimento 7,83 mm

Fração B : \varnothing 0,247 mm, comprimento 17,63 mm

Fração C : \varnothing 0,267 mm, comprimento 30,60 mm

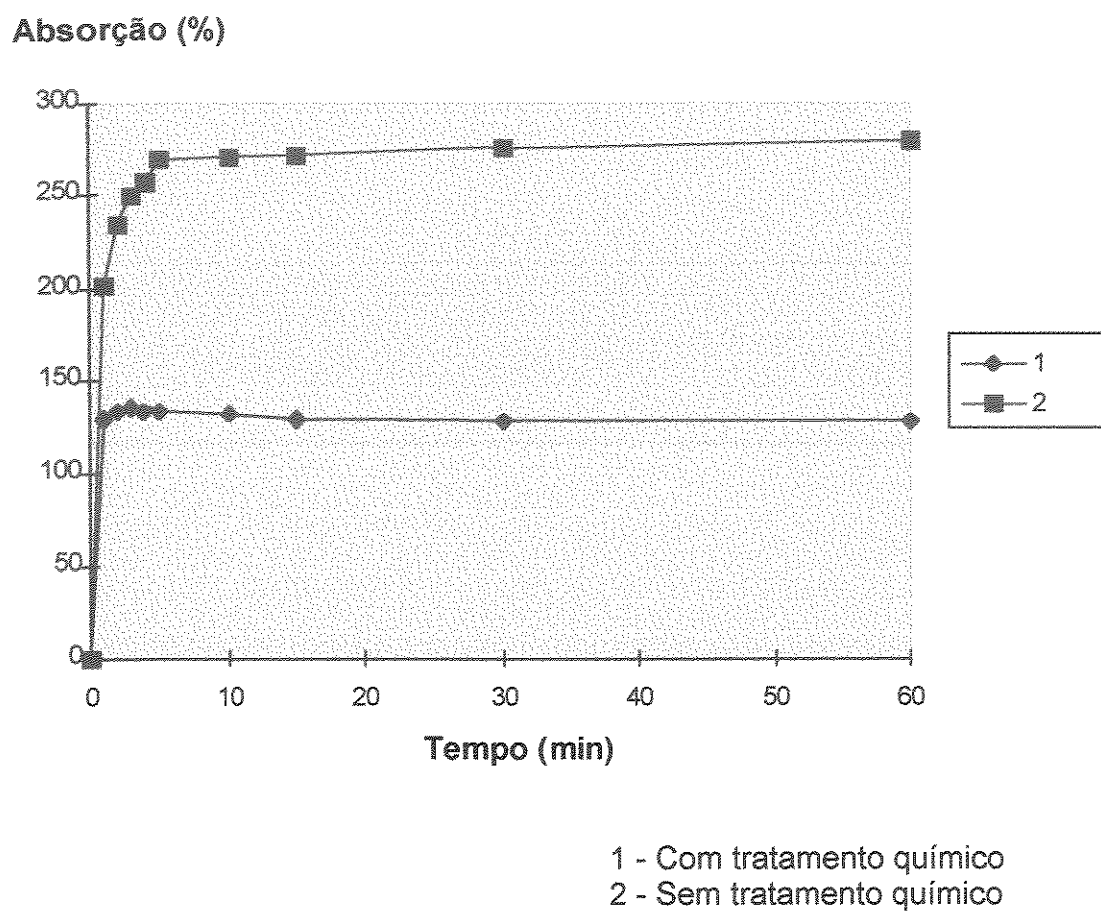


FIGURA 11 - Curva de absorção de água por fibras de bagaço de cana-de-açúcar (fração B)

A redução da absorção de água em função do tratamento químico, em até 50 a 60 %, leva a supor que, em consequência disso, a própria variação dimensional do compósito, confeccionado com argamassa de cimento e fibras de bagaço de cana-de-açúcar, seja reduzida, uma vez que sua principal causa reside exatamente na variação do teor de umidade.

No Quadro 9 estão apresentadas as principais características físicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar, determinadas para cada uma das três frações inicialmente estabelecidas. Como se pode observar, as características das fibras são muito variáveis em função da fração de tamanho considerada; embora se trate de um material que apresenta grandes vantagens associadas ao seu alto índice de enfiamento e baixa massa específica aparente, por outro lado possui alta capacidade de absorção de água, o que pode inviabilizá-lo para uso em compósitos, justificando-se desta forma quaisquer tratamentos que visem superar estas limitações.

Depois de quimicamente tratadas com solução de silicato de sódio a 5% e solução saturada de sulfato de alumínio, as fibras passaram a apresentar massa específica média de $1,565 \text{ g/cm}^3$.

Os tempos inicial e final de pega da pasta de cimento determinados em laboratório foram, respectivamente, 3 e 7 horas. Quando este ensaio foi aplicado a pastas de cimento amassadas com água na qual tinham sido previamente mergulhadas fibras de bagaço de cana-de-açúcar (10, 20 e 30% de fibras) quimicamente tratadas com solução de silicato de sódio a 5% e soluções de sulfato de alumínio saturada ou concentrada a 10%, os valores obtidos para os

tempos iniciais e finais de pega são aqueles constantes no Quadro 10. Os números apresentados indicam que houve uma grande variação nos valores dos tempos iniciais e finais de pega quando se usou água de amassamento na qual previamente foram mergulhadas fibras tratadas com silicato de sódio e solução saturada de sulfato de alumínio; os valores foram tanto menores quanto maior foi o teor de fibra considerado, indicando assim que o sulfato de alumínio, exudado pelas fibras na água de amassamento, agiu como acelerador de pega do cimento e foi liberado em maior quantidade quanto maior era o volume de fibras. O mesmo não ocorreu quando a solução de sulfato de alumínio utilizada era concentrada a 10 %, os valores dos tempos iniciais e finais de pega foram mais uniformes e praticamente independentes dos teores de fibra considerados, indicando que não houve exudação em excesso de sulfato de alumínio na água de amassamento em quantidades suficientes para interferir nos tempos de pega do cimento.

Baseados nesses resultados, inicialmente passou-se a adotar o sulfato de alumínio concentrado a 10%, ao invés da solução saturada, no tratamento das fibras, representando esta opção não apenas uma modificação no "diffusion-penetrating process", proposto por FORUNO *et al.* (1991), como também uma simplificação no procedimento e uma economia no custo de aquisição do produto em questão.

Posteriormente, de acordo com a opinião de alguns autores, e após constatar que a presença de fibras de bagaço de cana-de-açúcar por conter substâncias inibidoras, retarda a pega do cimento, optou-se por usar a solução de

QUADRO 9 - Principais características físicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

| Características | Frações de tamanho | | |
|--|--------------------|-------|--------|
| | A | B | C |
| Diâmetro (mm) | 0,230 | 0,247 | 0,267 |
| Comprimento (mm) | 7,83 | 17,63 | 30,60 |
| Índice de enfiamento | 34,04 | 73,64 | 117,88 |
| Massa específica aparente, solta (kg/m ³) | 80 | 95 | 105 |
| Massa específica por volume deslocado em álcool (g/cm ³) | 0,59 | 0,63 | 0,65 |
| Teor de umidade (%) | 15 | 15 | 15 |
| Absorção de água após 5 dias de imersão (%) | 550 | 350 | 350 |

QUADRO 10 - Tempos inicial (TIP) e final (TFP) de pega da pasta de cimento, em horas-minutos, preparada com água de amassamento de diferentes composições.

| Teores de fibras quimicamente tratadas, previamente mergulhadas na água de amassamento | Fibras tratadas com silicato de sódio e solução de | | | |
|--|--|---------|----------------------|---------|
| | Sulfato de Al. saturada | | Sulfato de Al. a 10% | |
| | TIP (h) | TFP (h) | TIP (h) | TFP (h) |
| 10 % | 2:35 | 4:30 | 3:10 | 5:15 |
| 20 % | 1:00 | 1:45 | 3:30 | 5:25 |
| 30 % | 0:57 | 1:37 | 3:20 | 5:20 |

sulfato de alumínio saturada para superar o efeito retardador sobre a pega do cimento, uma vez que a solução a 10% de concentração não foi suficiente, para tal fim.

Os resultados dos ensaios de expansibilidade da pasta de cimento estão registrados no Quadro 11, com os dados indicando que a pasta de cimento ensaiada não é expansiva.

No Quadro 12 estão mostrados os valores dos índices de consistência das argamassas de cimento e areia de traços 1:2 e 1:3, reforçadas com 10, 20 e 30% de fibras de bagaço de cana-de-açúcar; o fator água / cimento foi definido para cada traço. Os valores dos índices de consistência sugerem que a presença das fibras fez com que, após o abatimento, a média dos diâmetros ortogonais da base do tronco de cone da argamassa fôsse, em todos os casos, inferior ao da testemunha (argamassa de cimento e areia não reforçada com fibras), indicando a ocorrência de menor escorregamento da argamassa ou por outro lado, maior consistência.

Nos valores de resistência à compressão simples e de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar apresentados, se pode observar, que a presença das fibras na argamassa de cimento e areia provocou decréscimos acentuados nos valores da resistência à compressão simples e da resistência à tração na compressão diametral, valores tanto menores quanto maiores foram os teores de fibra estudados; a mesma tendência foi observada no caso da massa específica aparente do compósito.

QUADRO 11 - Ensaio de expansibilidade da pasta de cimento preparada com água de amassamento na qual foram previamente mergulhadas fibras quimicamente tratadas

| Amostra | | Medida logo após a moldagem (mm) | Medida aos 7 dias (mm) |
|----------------|-------|----------------------------------|------------------------|
| 10 % de fibras | A | 4,3 | 4,7 |
| | B | 4,5 | 4,7 |
| | C | 4,9 | 5,0 |
| | Média | 4,5 | 4,9 |
| 20 % de fibras | A | 4,9 | 5,3 |
| | B | 4,3 | 4,8 |
| | C | 4,4 | 4,7 |
| | Média | 4,6 | 4,8 |

A, B, C = Repetições

QUADRO 12 - Índices de consistência da argamassa de cimento e areia reforçada com diferentes teores de fibras de bagaço de cana-de-açúcar

| Traço, em massa (cimento : areia : fibra : água) | Índices de consistência (mm) |
|--|------------------------------|
| 1 : 2 : 0,00 : 0,38 | 192,0 |
| 1 : 2 : 0,10 : 0,66 | 132,5 |
| 1 : 2 : 0,20 : 0,96 | 125,5 |
| 1 : 2 : 0,30 : 1,20 | 125,0 |
| 1 : 3 : 0,00 : 0,48 | 177,0 |
| 1 : 3 : 0,10 : 0,72 | 141,0 |
| 1 : 3 : 0,20 : 1,05 | 128,0 |
| 1 : 3 : 0,30 : 1,28 | 150,0 |

Como o objetivo principal do trabalho é a produção de chapas de argamassa de cimento e areia reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, para possível uso como material adequado para a construção de forros e de paredes internas não-portantes, interessa que as placas apresentem menor massa específica aparente sem prejuízo da resistência mecânica.

Sendo assim, e baseado nos resultados dos ensaios de resistência mecânica, tais como relatados no Quadro 13, escolheu-se o traço 1:2:0,20:0,96 de cimento : areia : fibra : água para a moldagem das placas, por ser aquele que, à exceção do traço 1:2:0,30:1,20, apresentou menor massa específica e satisfatória resistência à compressão (2,4 MPa), esta aumentando com o decorrer do tempo, como pode se observar no Quadro 14. Tomou-se o cuidado de reduzir o fator água-cimento de 0,96 para 0,78 uma vez que, por ocasião da moldagem das placas sob compactação, o teor de umidade inicialmente determinado mostrou-se excessivo. Os traços 1:2:0,30:1,20 e 1:3:0,30:1,28 foram abandonados por apresentarem enormes dificuldades de moldagem, associadas ao maior volume de fibras utilizado.

Uma vez definido o traço com a porcentagem de fibras a ser utilizada, 20 % em massa, foi escolhido o tratamento a ser aplicado às fibras de bagaço de cana-de-açúcar tomando-se por base a resistência à compressão e a massa específica aparente, que foram analisadas estatisticamente, estando os resultados apresentados no Quadro 15.

QUADRO 13 - Resistência mecânica de corpos-de-prova de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras tratadas de bagaço de cana-de-açúcar, aos 7 dias de idade

| Traços, em massa (cimento : areia : fibra : água) | Resistência à compressão simples (MPa) | Resistência à tração na compressão diametral (MPa) | Massa específica aparente (kg/dm³) |
|--|---|---|--|
| 1 : 2 : 0,00 : 0,38 | 38,19 | 3,74 | 2,17 |
| 1 : 2 : 0,10 : 0,66 | 4,75 | 1,09 | 1,78 |
| 1 : 2 : 0,20 : 0,96 | 2,4 | 0,46 | 1,47 |
| 1 : 2 : 0,30 : 1,20 | 1,46 | 0,38 | 1,39 |
| 1 : 3 : 0,00 : 0,48 | 24,85 | 2,93 | 2,22 |
| 1 : 3 : 0,10 : 0,72 | 3,20 | 0,70 | 1,81 |
| 1 : 3 : 0,20 : 1,05 | 1,72 | 0,51 | 1,61 |
| 1 : 3 : 0,30 : 1,28 | 1,15 | 0,31 | 1,49 |

QUADRO 14 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, ao longo do tempo

| Traços, em massa (cimento : areia : fibra : água) | Resistência à compressão simples (MPa) | | |
|--|---|----------------|----------------|
| | 7 dias | 28 dias | 56 dias |
| 1 : 2 : 0,10 : 0,66 | 4,75 | 6,8 | 8,5 |
| 1 : 2 : 0,20 : 0,96 | 2,4 | 3,8 | 4,8 |

QUADRO 15 - Tratamentos aplicados à fibra de bagaço de cana-de-açúcar em relação à resistência à compressão simples e à massa específica aparente de corpos-de-prova moldados com traço 1:2:0,20:0,78

| Tratamento aplicados às fibras de bagaço de cana-de-açúcar | Resistência à compressão simples, aos 7 dias (MPa) | Massa específica aparente (kg/dm³) |
|---|---|--|
| 1 - Não lavagem (bagaço natural) | 0,25 | 1,37 |
| 2 - Lavagem | 0,64 | 1,40 |
| 3 - Lavagem + acelerador | 1,23 | 1,65 |
| 4 - Lavagem + "mineralização" | 2,97 | 1,66 |
| 5 - Lavagem + "mineralização" + lavagem | 1,50 | 1,68 |
| 6 - Lavagem + "mineralização" + lavagem + acelerador | 2,50 | 1,70 |
| 7 - Lavagem + "mineralização" + acelerador | 2,81 | 1,64 |

A análise de variância dos dados da resistência à compressão simples indicou alto grau de significância estatística em relação aos tratamentos adotados.

Dos sete tratamentos experimentados, o Teste de Tukey indicou, ao nível de 5 % de probabilidade, que o melhor deles foi aquele em que o bagaço foi lavado e “mineralizado”, seguido do tratamento: bagaço lavado, “mineralizado” e usando os produtos químicos como aceleradores de pega, na mistura, conforme os procedimentos relatados por BIRAULT (1992) e SOLÓRZANO (1992); o uso de silicato de sódio e sulfato de alumínio, como aceleradores de pega, todavia, não conferiu melhoria ao compósito, quando as fibras já estavam “mineralizadas”.

Em seguida vêm os tratamentos que compreenderam lavagem, “mineralização” e novamente lavagem, visando reduzir a higroscopicidade da fibra; os resultados, no entanto, mostraram que a resistência foi reduzida em até 50%, se comparada com a do melhor tratamento.

O tratamento que incluiu lavagem do bagaço mais adição de aceleradores de pega na mistura, produziu resultados melhores que os da testemunha, mas não muito melhores que os dos outros tratamentos; por último, o tratamento no qual o bagaço utilizado foi somente lavado a quente, apresentou resistência 50% superior à da testemunha. O baixo resultado exibido pela testemunha, utilizando bagaço natural, confirma e concorda com o que a literatura relata, ou seja, existe interferência do açúcar residual na pega do cimento, e, portanto, na resistência dos compósitos, motivo pelo qual é recomendável utilizar-se das técnicas relatadas por WIENHAUS (1979), além de outros.

No que se refere à massa específica aparente dos compósitos, a análise de variância mostrou altos níveis de significância estatística para os diferentes tratamentos.

O Teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade, indicou que não existe diferença significativa entre os tratamentos com relação à massa específica aparente dos compósitos, a exceção do tratamento que compreendeu apenas lavagem do bagaço, além da testemunha, que se mantiveram estatisticamente iguais entre si, apresentando menores valores de massa específica aparente (Quadro 15).

A moldagem das placas, empregando-se a mistura de fibras de bagaço de cana-de-açúcar com argamassa de cimento e areia, resultou numa argamassa seca, tal como retratada pelos valores dos índices de consistência. RACINES e PAMA (1978) haviam prevenido, que para evitar a diminuição da resistência do compósito, o procedimento ideal seria moldar as placas sob prensagem, o que não foi possível devido às limitações dos laboratórios.

As placas permaneceram nas fôrmas por 48 h, mantida úmidas, na câmara úmida, e assim continuaram, para tal sendo molhadas por aspersão, com a finalidade de facilitar a hidratação do cimento.

No Quadro 16 estão apresentados alguns resultados obtidos dos diferentes ensaios aplicados às placas, como, por exemplo, o ensaio de flexão, realizado aos 28 dias, comparando os valores obtidos com os valores das exigências físicas estabelecidas pela norma C 208-72, da ASTM, para a fabricação de chapas de isolamento térmico para fins de cobertura e painéis de

parede. Pode-se notar, no referido Quadro, que os valores alcançados para placas de 20,0 mm de espessura, se comparados com os valores interpolados para placas de espessura de 1,27 e 2,54 cm, referidos na Norma, são aceitáveis, enquanto que, para uso em paredes, tais valores não satisfizeram as exigências físicas da Norma mencionada.

Quanto ao ensaio de condutibilidade térmica, os resultados obtidos foram ótimos (Quadro 16), situando-se dentro das exigências da norma ASTM C 208-72, para isolamento térmico; pode-se notar que o compósito de argamassa de cimento e areia reforçada com bagaço de cana-de-açúcar alcançou apenas 22% do valor máximo permitido, o que confirma ser este material um bom isolante térmico, mesmo quando comparado com outros materiais, mostrados por FROTA e SCHIFFER (1995), a exemplo da argamassa de cimento, que apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica igual a 0,85 W/mK; do cimento-amianto, 0,65; do painel de fibras de madeira aglomerada e compensada, 0,20, e do painel de madeira aglomerada mole de isolamento térmico, 0,05, contra os 0,012 W/mK apresentados pelas placas em estudo.

Corpos-de-prova, moldados juntamente com as placas, foram ensaiados à compressão simples aos 7, 28 e 56 dias. Os resultados mostraram uma diminuição da resistência em comparação com os resultados anteriores, devido às modificações introduzidas no processo de moldagem e de compactação, as quais, segundo AZIZ *et al.* (1986), são fatores relevantes a serem considerados na confecção dos compósitos.

Quadro 16 - Resultados dos ensaios das placas de argamassa de cimento e areia reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

| Exigências físicas | Valores da Norma ASTM | | Valores obtidos dos ensaios |
|---|---|---------------------|-----------------------------|
| | Chapas de cobertura (valores interpolados) | Chapas para paredes | |
| Condutibilidade térmica média máxima (W/m.K) | 0,055 | 0,055 | 0,012 |
| Carga transversal em qualquer direção, média mínima (N) | 48,9 | 53,4 | 50,5 |
| Absorção de água em volume, máximo (%) | 10 | 7 | 16 |
| Massa específica aparente (kg/dm ³) | --- | --- | 1,72 |
| Módulo de ruptura à flexão, média mínima (MPa) | 0,72 | 1,65 | 0,83 |
| Umidade (%) | --- | --- | 0,54 |
| Deflexão sob carga mínima especificada, média máxima (mm) | 24 | 22 | 21 |

O aumento da resistência, ao longo tempo, pode ser comprovado pelos dados registrados no Quadro 17, nele podendo-se observar que em relação ao valor da resistência à compressão simples apresentado pelos corpos-de-prova aos 56 dias, tomado como referência, aos 7 dias a resistência a compressão alcançou apenas 33,7%, evoluindo para 80% aos 28 dias.

A média da massa específica aparente dos corpos-de-prova foi igual a $1,65 \text{ kg/dm}^3$, enquanto que a das placas foi $1,72 \text{ kg/dm}^3$, revelando que houve diferença na energia de compactação aplicada por ocasião da moldagem.

No Quadro 18, estão apresentados os coeficientes de absorção acústica, obtidos para o compósito de argamassa de cimento com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, e confirmam a opinião de muitos autores, de que os compósitos são materiais que têm a propriedade de serem bons absorventes acústicos. Pode-se, ainda, comparar os valores calculados com os valores representativos de alguns materiais, tais como os relatados por GERGES (1992), especialmente na frequência de 1000 Hz, que produziu os melhores resultados, a saber: parede de tijolo: 4 %; concreto aparente: 2 %; reboco: 4%; madeira: 10 %, enquanto que o compósito de argamassa de cimento reforçada com bagaço de cana-de-açúcar apresentou coeficiente de absorção acústica igual a 60,2 %.

Este valor pode ser comparado com aqueles apresentados por materiais de recobrimento acústico de uso em locais públicos, com maiores exigências acústicas, tais como espumas, mantas de lã mineral ou vidro, entre outros.

QUADRO 17 - Resistência à compressão e massa específica aparente de corpos-de-prova moldados com a mesma mistura com que foram moldadas as placas

| Corpos de prova | Massa específica aparente (kg/dm ³) | Resistência à compressão simples (MPa) | | |
|-----------------|---|--|---------|---------|
| | | 7 dias | 28 dias | 56 dias |
| 1 | 1,64 | 0,76 | 1,78 | 2,30 |
| 2 | 1,69 | 0,77 | 1,90 | 2,14 |
| 3 | 1,63 | 0,76 | 1,65 | 2,30 |
| Média | 1,65 | 0,76 | 1,78 | 2,25 |

QUADRO 18 - Resultados do ensaio de absorção acústica

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------------------------------|------|-------|------|------|------|------|
| Coefficiente de absorção acústica (%) | 9,56 | 17,09 | 34,6 | 60,2 | 49,7 | 37,3 |

Mesmo nas outras frequências consideradas, seu desempenho, em termos de absorção acústica, é considerado bastante satisfatório e superior aos materiais mais comuns de revestimento de paredes.

O ensaio de absorção de água, por sua vez, apresentou os resultados mostrados no Quadro 19, nele podendo-se observar que a porcentagem de água absorvida, após 2 horas de imersão, não foi muito diferente daquela obtida após 24 h de imersão, o que significa que, num período de duas horas, 95 % do total de água tinha sido absorvida, tanto pelas amostras (placas cortadas) como pelos corpos-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura), cujas médias foram 16 % e 15%, respectivamente; essa pequena diferença foi atribuída ao fato de que, tendo sido as amostras cortadas das placas, seu interior, de estrutura mais porosa do que a superfície, ficou exposto, resultando em maior absorção de água.

Estes resultados podem ser melhorados de acordo com RACINES e PAMA (1978), aplicando-se um tratamento superficial nas placas, com pinturas e outros tipos de acabamento.

De um modo geral, e em função dos resultados obtidos, pode-se admitir que as fibras de bagaço de cana-de-açúcar, depois de previamente tratadas da forma descrita neste trabalho, são viáveis para a obtenção de compósitos de boa qualidade.

Os problemas relacionados com sua alta capacidade de absorção de água e indesejável presença de açúcar residual, podem ser contornados de formas

QUADRO 19 - Resultados do ensaio de absorção de água

| Amostras | | Umidade (%) | Absorção de água (%) após decorrido | |
|---------------------|-------|-------------|--|----------|
| | | | 2 horas | 24 horas |
| Corpos de prova | 1 | 0,60 | 15,0 | 16,2 |
| | 2 | 0,67 | 14,7 | 15,5 |
| | 3 | 0,78 | 15,2 | 15,9 |
| | Média | 0,68 | 15,0 | 15,86 |
| Amostras das placas | 1 | 0,58 | 16,2 | 16,8 |
| | 2 | 0,59 | 14,8 | 16,56 |
| | 3 | 0,44 | 14,67 | 15,1 |
| | Média | 0,54 | 15,2 | 16,1 |

simples, mediante lavagem a quente e posterior “mineralização” com produtos químicos apropriados.

As placas, confeccionadas com argamassa de cimento e areia reforçada com tais fibras de bagaço de cana-de-açúcar, mostraram-se adequadas para uso em construção civil, não havendo limitações quanto à sua resistência mecânica e outras características físicas importantes, como absorção acústica e a condutibilidade térmica.

Estudos posteriores, visando seu apuramento técnico e viabilidade econômica, deverão necessariamente ser desenvolvidos.

CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados alcançados, pode-se concluir que:

- A pré-lavagem do bagaço de cana-de-açúcar com água quente diminuiu consideravelmente o teor de açúcar residual;
- Dentre as técnicas experimentadas, visando a diminuição da incompatibilidade química entre as fibras de bagaço de cana-de-açúcar e o cimento, a que deu melhor resultado foi aquela pela qual o bagaço foi “mineralizado”, após lavagem, utilizando silicato de sódio a 5 % e sulfato de alumínio em condição saturada;
- A “mineralização” das fibras de bagaço de cana-de-açúcar diminuiu a capacidade de absorção de água em até 50 %, dificultando, desta forma, as trocas de umidade, assim como a exudação de açúcar residual;
- Nos ensaios preliminares aplicados à pasta de cimento, os produtos químicos utilizados para a “mineralização” das fibras não interferiram nas características

do cimento (expansibilidade, início e fim de pega); pelo contrário, favoreceram sua hidratação, atuando como aceleradores de pega;

- O índice de consistência da argamassa reforçada com fibras apresentou um valor inferior ao da testemunha, por isso mesmo conferindo as fibras maior consistência à argamassa;
- Dos traços ensaiados (1:2 e 1:3) para a argamassa de cimento e areia, e das três porcentagens diferentes de fibra empregadas (10, 20 e 30 %), o que melhor satisfaz as condições do projeto foi o traço 1:2:0,20:0,78, de cimento: areia: fibra: água, no que se refere à resistência à compressão simples e massa específica aparente;
- A incorporação de 30% de fibras, em massa, na matriz de cimento e areia, resultou em dificuldades na trabalhabilidade e em baixa resistência do compósito;
- A resistência à compressão simples dos compósitos de argamassa de cimento e areia, reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, aumentou ao longo do tempo;
- Os resultados obtidos dos ensaios de flexão (carga transversal mínima, módulo de ruptura e deflexão) atenderam às exigências da Norma C 208 - 72,

da ASTM, apenas no que se refere à fabricação de chapas de isolamento térmico para fins de cobertura, mas não para a utilização como paredes;

- As placas produzidas apresentaram boas características de isolamento térmico, com valores de condutibilidade térmica inferiores ao valor máximo permitido pela Norma mencionada anteriormente, e inferior ao de muitos materiais utilizados na construção civil;

Tendo em vista os resultados experimentais obtidos, pode-se afirmar que placas pré-moldadas, com argamassa de cimento e areia de traço 1:2 reforçada com 20% de fibras “mineralizadas” de bagaço de cana-de-açúcar, podem ser usadas como material de construção no recobrimento interno de paredes e para fins de cobertura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, L. K. - Bagasse - Reinforced Cement Composites. In: Cement and Concrete Composites. nº 17, p. 107-112, 1995.

AGOPYAN, V. e JOHN, V.M. - Construindo com fibras vegetais. Encarte técnico IPT - PINI. In: Construção. São Paulo, 1990. 4 p.

AGOPYAN, V. - O emprego de materiais fibrosos na Construção Civil. In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil, EPUSP, p. 11-25, 1993.

ABNT - NBR - 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 7 p.

_____ - NBR - 7251: Agregado em estado solto. Determinação da massa unitaria. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982. 3 p.

_____ - NBR - 11580: Cimento Portland - Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 3 p.

_____ - NBR - 11581: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 3 p.

_____ - NBR - 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. 2 p.

ASTM - Standard Specification for Insulating Board (Cellulosic Fiber), Structural and Decorative, ASTM C 208-72. Annual Book of ASTM Standards, Part 18. p. 64-69, 1972.

_____ - Standard Methods of Testing Insulating Board (Cellulosic Fiber), Structural and Decorative, ASTM C 209-72. Annual Book of ASTM Standards, Part 18. p. 70-75, 1972.

_____ - Standard Evaluating the Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, ASTM D 1037. Annual Book of ASTM Standards, Part 22, 1972.

- ____ - Impedance Absorption of Acoustic Materials by Impedance Tube Method, ASTM C 384. Annual Book of ASTM Standards, 1985.
- AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P. e LEE, S. L. - Natural Fibre Reinforced Concretes in Low-Cost Housing Construction. Housing Science 10 (4): 267-278, 1986.
- BERALDO, A. L. - Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis à vis des variations de l'humidité, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Nancy, France, 222 p. 1994.
- BIRAULT, A. C. - Plant experience with wood-cement particleboard in France, In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, p.80-82, 1992.
- CASTRO, J. e NAAMAN, A. E. - Cement Mortar Reinforced with Natural Fibres. Journal of Ferrocement 2 (4): 285-301, 1981.
- CEPED - Utilização de Fibras Vegetais na Construção Civil. Camaçari, Bahia, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Relatório nº 94/84, 61 p., 1984.
- CEPED - Utilização de Fibras Vegetais no Fibro-Cimento e no Concreto-Fibra. Camaçari, Bahia, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 72 p. 1982.
- COOK, D. J.; PAMA, R. P. e WEERASINGHE, H. L. S. D. - Coir Fibre Reinforced Cement as a Low Cost Roofing Material. Building and Environment 13: 193-198, 1978.
- FORUNO, T.; UEHARA, T. e JODAI, S. - Combinations of Wood and Silicate I. Impregnation by water glass and applications of aluminium sulfate and calcium chloride as reactants. 40th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society in Tsukuba, p. 462-472, 1991.
- FREIRE, W. J. - Materiais Alternativos de Construção. In: Beraldo, A.L. et al., Construções Rurais: Materiais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, p. 105-161, 1991.
- FROTA, A. B. e SCHIFFER, S. - Manual de Conforto Térmico 2ª Edição, revista atualizada. 1995
- GEPLACEA - Manual de los derivados de la caña de azúcar. Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar. 1990, 447 p.
- GERGES, S.N.Y. - Ruido, fundamentos e controle, p. 306-313; 582-583; 1992.

- GRAM, H. E. - Durability studies of natural organics fibres in concrete, mortar on cement, In: RILEM Symposium on developments in fibre reinforced cement and concrete, Vol 2, p. 13-17, 1986.
- HESS, A. A. e BUTTICE, M. L. - Composite materials from vegetable fibers as agglomerated irregular micro-reinforcement and Portland cement used in pieces for low-cost housing. In RILEM. Symposium on Vegetable Plants and Their Fibres as Building Materials. Salvador, Bahia 1990 p. 69-75.
- ICIDCA - Manual de los derivados de la caña de azucar. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azucar. 1988, 198 p.
- JOHN, V. M. e AGOPYAN, V. - Materiais reforçados com fibras vegetais, In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil, EPUSP, p. 29-38, 1993.
- LEE, A. W. C. - The latest developments in the cement-bonded wood excelsior (wood wool) board industry. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Vol 2, p. 103-107, 1990.
- LEE, A. W. C. e SHORT, P. H. - Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board, Forest Products Journal, 39 (10) p. 68-70, 1989.
- MOSLEMI, A. A. - Particleboard. USA, Southern Illinois University Press, Vol 1, 1974.
- MOUGEL, E. - Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, EESSTIB, 160 p. 1992.
- MOUGEL, E.; BERALDO, A. L. e ZOULLIAN, A. - Compósito Madeira-Cimento, XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campinas, SP 23 p. 1994.
- PATURAU, J. M. - By-Products of the Cane Sugar Industry. Sugar Series n^o 3, 2nd Ed. Amsterdam, Elsevier. 366 p. 1982.
- PNDU - RLA - La diversificación de la agroindustria de la caña de azucar en América Latina y el Caribe 1986.
- RACINES, P. G. e PAMA, R. P. - A Study of Bagasse Fiber-Cement Composite as low Cost Construction Material. In: International Conference on Materials of Construction for Developing Countries. Proceedings: Bangkok, Thailand, p. 191-206, 1978.
- SANDERMANN, W.; PREUSSER, H. J. e SCHWIENS, W. - The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. Holzforschung, 14 (3), p. 70-77, 1960.

- SAVASTANO, JR. H. e AGOPYAN, V. - Transition zone of hardened cement paste and vegetable fibers. In: International Symposium on fibre reinforced cement and concrete, 4, 1992, Sheffield. Proceedings...London: E & FN spon, 1992. p. 1110-9. (RILEM Proceedings, 17).
- SAVASTANO, Jr. H.; SOUSA, F. A. e AGOPYAN, V. - Materiais reforçados com fibras - correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas, IPT, Boletim 67, 58 p. 1994.
- SCHUBERT, B.; WIENHAUS, O. e BLOBFELD, O. - Untersuchungen zum System Holz-Zement. Einfluss Unterschiedlicher Zementarten auf das Abbindeverhalten von Holz-Zement-Mischungen, Holz als Roh-und Werkstoff, 48, p. 185-189, 1990.
- SCHWARZ, H. G. e SIMATUPANG, M. H. - Eingnung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerkstoffe. Holz als Roh-und Werkstoff, 42, p. 265-270, 1984.
- SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, H. G. e BRÖKER, F. W. - Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites, In: 8th World Forestry Congres, Vol 6, Jakarta, October, p. 98-120, 1978.
- SIMATUPANG, M. H. - Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebundener Holzspanplatten, Holz als Roh-und Werkstoff, 37, p. 379-382, 1979.
- SIMATUPANG, M.H. - Abbaureaktionen von Glucose, Cellobiose und Holz unter dem Einfluss von Portlandzementmörtel. Holzforschung. 40(3), p. 149-155.
- SOLÓRZANO, R. A. G. - Experience of manufacturing wood-cement particleboard in México, In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference p. 84-87, 1992.
- TEIXEIRA, D. E. e GIMARÃES, T. L. - Tratamento de partículas de *acacia mearnsii de wild.* para produção de chapas de cimento-madeira, LPF- Serie Técnica N 11, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Interior, 9 p. 1989.
- VALENZUELA, W. A. - Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 135 p. 1989.
- VENUAT, M. - Des fibres pour alléger et renforcer le béton. Cahiers Techniques du Bâtiment, 58, p. 59-70, 1983.
- VIROC - Cement Bonded Particleboard. Technical Information, 19 p. 1986.

WEATHERWAX, R. C. e TARKOW, H. - Effect of wood on setting of Portland Cement. Forest Products Journal, 14 (2), p. 567-570, 1964.

WIENHAUS, O. - Werkstoffe aus Holz und Zement, Holztechnologie, 20(4), p. 207-215, 1979.