



UTILIZAÇÃO DA CINZA DE BAGAÇO CANA-DE-AÇÚCAR COMO “FILLER” EM COMPOSTOS DE FIBROCIMENTO

**Anderson Maciel Zardo (1); Eduardo Marcelo Bezerra(2); Luciane Silva Martello (3);
Holmer Savastano Jr.(4)**

- (1) Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), amz_zoo@hotmail.com.br
(2) ITA/CTA, edumarcel@fzea.usp.br
(3) FZEA/USP, martello@usp.br
(4) FZEA/USP, holmersj@usp.br

RESUMO

Este estudo tem como finalidade avaliar o potencial das cinzas provenientes da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar como adição mineral em compósitos de matriz cimentícia. As cinzas foram submetidas a diferentes tempos de moagem (1,5 e 3 h) e caracterizadas quanto à distribuição granulométrica das partículas. Foram determinadas a composição química da cinza moída e a sua atividade pozolânica. A cinza moída foi incorporada em matriz de cimento juntamente com fibras vegetais e sintéticas, para produção de placas prensadas de fibrocimento em escala laboratorial. Os compósitos foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado por imersão-secagem. A composição química da cinza e o ensaio de difração de raios-X indicaram teor de SiO_2 igual a 77% na forma cristalina. Os compósitos com cinza moída apresentaram resultados de resistência à tração na flexão superiores aos dos compósitos com cinza não moída. A resistência mecânica dos tratamentos manteve-se praticamente inalterada depois dos 50 ciclos de imersão-secagem. Após o ensaio de envelhecimento, observou-se queda dos valores de tenacidade e de absorção de água do compósito, e aumento dos valores do módulo elástico, o que pode ser explicado principalmente pela hidratação continuada da matriz.

1 - INTRODUÇÃO

A agroindústria de cana-de-açúcar no Brasil tem como objetivo a produção de açúcar para os mercados interno e externo e de álcool combustível para atender a demanda nacional de combustíveis. A implementação do projeto PROALCOOL no Brasil (CORTEZ, 1991) impulsionou a indústria sucro-alcooleira, com a conseqüente geração de resíduos. A cultura da cana no país foi introduzida sem a devida preocupação com o aproveitamento comercial dos subprodutos. Os principais subprodutos das usinas de açúcar e álcool são o vinhoto, a torta de filtro e o bagaço. A otimização dos processos para viabilizar a melhor utilização desses subprodutos e o desenvolvimento de outros processos que aumentem o seu valor tem sido objeto de atenção de indústrias do setor. O bagaço é um resíduo sólido composto de lignina e celulose proveniente da extração do caldo da cana-de-açúcar. O bagaço de cana-de-açúcar “in natura” é composto por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente constitui-se de celulose, hemicelulose e lignina, com 41%, 25% e 20%, respectivamente, com base na massa seca de bagaço. A queima do bagaço excedente da cana-de-açúcar possibilita o seu uso em substituição ao óleo combustível e outros energéticos. Porém, a pirólise do bagaço gera uma espécie de cinza composta em sua maior parte de materiais inorgânicos e com aspecto grosseiro. A incorporação de resíduos sólidos em matriz cimentícia é uma das possíveis soluções para viabilizar a utilização desse material.

Vários subprodutos industriais e agrícolas apresentam características pozolânicas, com destaque para as cinzas volantes provenientes da queima do carvão em usinas termoeletricas. Pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante hidráulica, entretanto quando preparados adequadamente (moídos), exibem a propriedade de reagirem em meio aquoso e a temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), proporcionando a formação de novos compostos, com propriedades aglomerantes (cimentíceas) e, portanto insolúveis em água. FERREIRA et al. (1997) enfatizaram a utilização da cinza da casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland, como adição mineral em concretos e na fabricação de outros tipos de material de construção. GEYER et al. (2000) demonstraram que a utilização da cinza da queima de lodo altamente poluente proveniente de esgoto urbano, pode ser uma alternativa segura e econômica, em substituição parcial de até 20% do cimento.

BILBA et al. (2003) observaram que os compósitos com bagaço-de-cana em sua formulação exibiram temperaturas de hidratação inferiores ao material de referência (sem a presença de açúcar). Os açúcares solúveis em água, hemicelulose e lignina provocam aumento do tempo de hidratação da pasta de cimento (YOSHIMOTO et al., 1976 e ZHENG TIAN & MOSLEMI, 1986) acarretando a redução da resistência mecânica inicial dos compósitos. O mecanismo de interação química entre o cimento e o açúcar ainda foi pouco explorado e aceita-se que o aumento do tempo de hidratação ocorre por meio dos seguintes mecanismos: (1) adsorção de açúcar na superfície das partículas de cimento que estão hidratando e/ou (2) formação de uma barreira temporária que dificulta a hidratação das partículas de cimento (JUENGER & JENNINGS, 2002). A adsorção pode ocorrer por meio de um processo denominado quelação, em que as moléculas orgânicas formam um complexo com os íons metálicos em fases do cimento. TAPLIN (1960) mostrou que a ligação entre as moléculas de açúcar e as partículas de cimento ocorre em razão da presença do grupo HO-C=O . Uma característica deste grupo é que as moléculas de água podem ser aproximadas umas das outras, um requisito necessário para ocorrer a quelação.

A taxa de hidratação da pasta de cimento também é afetada pela distribuição granulométrica dos materiais (AIQIN et al., 1999). A moagem ou cominuição é uma etapa do processamento dos materiais utilizada com a finalidade de promover o aumento da superfície específica de materiais sólidos particulados, conduzindo ao aumento da superfície de reação. A energia necessária para efetuar os processos de cominuição é consumida em deformações elásticas ou plásticas, as quais são transformadas em outras formas de energia, sem produzir trabalho útil necessariamente. Desta forma, quando as partículas são carregadas com energia muito superior àquela necessária para provocar a fratura, uma proporção significativa de energia aplicada é dissipada na forma de atrito e até na compactação de fragmentos. Outro aspecto que deve ser considerado em moinhos é o cálculo da parcela de energia dissipada sem realizar trabalho útil, o que envolve colisões entre os corpos moedores e dos corpos moedores com as paredes internas no moinho. O processo de moagem consiste de um determinado número de estágios, N . Em cada um destes estágios, partículas compreendidas em um intervalo estreito de tamanhos são submetidas uma a uma, a sucessivos impactos seguidos de classificação granulométrica em peneiras. A distribuição granulométrica do produto, após cada impacto é dada pela equação (1).

$$P_i^{(j)} = P_i^{(j-1)} + B_{ij}(1 - P_j^{(j-1)}) \text{ para } i \geq j \quad (1)$$

Onde $P_i^{(j)}$ é a fração mássica de material menor que o tamanho i , $P_i^{(0)}$ é a distribuição granulométrica acumulada da alimentação, e $i=1$ representa a classe mais graúda da alimentação. B_{ij} é a função de quebra, a qual representa a distribuição granulométrica resultante de um impacto entre partículas individuais de tamanho j , e portanto depende da energia de impacto aplicada $E_{k,m}$ (TAVARES, 2003). As letras i e j são designadas para determinar as faixas de distribuição granulométrica.

Uma alta densidade de empacotamento depende diretamente da distribuição de tamanho das partículas componentes da matriz. Para uma mistura de dois componentes de partículas grossas e finas, a densidade de empacotamento ideal é prevista pelo modelo de Furnas (FURNAS, 1931). De acordo

com este modelo, a máxima eficiência de empacotamento teórico, PE_{\max} , de uma mistura de partículas grossas e finas pode ser prevista pela Equação 2.

$$PE_{\max} = PE_g + (1 - PE_g)PE_f \quad (2)$$

onde PE_g e PE_f são as respectivas eficiências de empacotamento das frações de partículas grossas e finas, respectivamente, e $\phi = 1 - PE$, é a fração de poros intersticiais de partículas empacotadas de um único tamanho (finas ou grossas). O mecanismo de empacotamento do modelo de Furnas é tal que as partículas menores são introduzidas e distribuídas nos interstícios formados pelo empacotamento de partículas maiores, de tal forma que a porosidade seja reduzida. O cálculo da densidade de empacotamento ideal é baseado na hipótese que a razão de tamanhos entre as partículas grossas e finas é infinitamente grande. Várias equações empíricas têm sido desenvolvidas para prever a densidade de empacotamento de partículas de um sistema binário. ZHENG et al. (1995) desenvolveram equações (Equações 3 a 5) para calcular a densidade de empacotamento de um sistema binário baseado no modelo de Furnas, considerando outros dois fatores: (1) F_1 – uma função da fração volumétrica de partículas finas $F_1(X_f)$ e (2) $F_2(R)$ – uma função que governa a razão entre o tamanho das partículas grossas e finas.

$$PE_{\text{mis}} = PE_G + (1 - PE_G)PE_f F_1(X_f)F_2(R) \quad (3)$$

$$F_1(X_f) = |e^{-X_f} \ln X_f| \quad (4)$$

$$F_2(R) = \exp\left(\frac{-C_2}{R}\right) \quad (5)$$

Onde F_1 é uma função da fração volumétrica de partículas finas, X_f e F_2 é uma função da razão entre tamanhos das partículas grossas e finas, R .

A adição de partículas com granulometrias distintas pode promover o aumento da densidade de empacotamento por meio de dois mecanismos. Partindo de uma distribuição unimodal, a densidade do compacto pode ser aumentada pela substituição de uma porção volumétrica ocupada por partículas finas e poros, por um volume igual de partículas sólidas grosseiras. De forma similar, a densidade pode ser aumentada pelo preenchimento do espaço entre as partículas grossas por partículas finas. Basicamente, a estrutura com empacotamento denso é composta por partículas grandes cujos interstícios são preenchidos por partículas menores, criando novos interstícios que serão preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Este estudo tem como finalidade avaliar o potencial das cinzas provenientes da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compósitos de matriz cimentícia, bem como as características dessa matéria-prima submetida a diferentes tempos de moagem e incorporada em matriz cimentícia juntamente com elementos de reforço.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se amostras de cinzas de bagaço de cana retiradas diretamente das caldeiras de uma usina de cana-de-açúcar localizada na região de Araras, SP. As cinzas foram moídas pelos períodos de 1,5 e 3 h em moinho com cargas esféricas de aço e, a seguir, submetidas a ensaio de granulometria. O teor de óxidos da cinza foi determinado por meio do ensaio de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) contra uma amostra padrão. A determinação da atividade pozolânica foi baseada nos estudos de RAVERDY et al. (1980), que consiste em manter em ebulição, durante 16 h, uma mistura de 1 g de óxido de cálcio e 1 g de material supostamente pozolânico em água. O resultado é expresso pela quantidade em miligramas de óxido de cálcio consumido por grama do material ensaiado. A caracterização da cinza incluiu ainda difração de raios-X (DRX) e determinação da área superficial específica pelo método de Brunauer, Emmel e Teller (BET) após moagem em moinho com cargas esféricas de zircônia pelo período de 48 h.

2.1 - Produção do fibrocimento

As cinzas moídas por 1,5 e 3 h, bem como a cinza antes da moagem (controle – 0 h), foram utilizadas, de acordo com a formulação apresentada na Tabela 1, para produção dos compósitos fibrosos. Essa formulação foi definida com base em desenvolvimentos anteriores de fibrocimento para uso em escala comercial (SAVASTANO Jr. et al., 2002). Foram assim obtidos três tratamentos experimentais, que diferiam entre si apenas pela intensidade de moagem da cinza. Os compósitos foram produzidos em escala laboratorial pela mistura das matérias-primas em solução aquosa contendo 20% de sólidos, seguida da drenagem do excesso de água por sucção e compactação das placas em prensa uniaxial (prensagem de 3,2 MPa por 5 min). Esse procedimento foi descrito detalhadamente por SAVASTANO Jr et al. (2000). A Figura 1 apresenta a seqüência correta de moldagem utilizada neste experimento. Para cada tratamento foram produzidas cinco placas planas com dimensões de 200 x 200 mm e espessura aproximada de 5 mm. As amostras foram submetidas a cura úmida durante sete dias e posteriormente cura ao ar em laboratório até completar 28 dias de idade.

Tabela 1 –Formulação padrão das placas de fibrocimento, para todos os tratamentos.

Matérias-primas	Composição (% em massa)
Cimento Portland CP IIF	75,20
Cinza de bagaço de cana	12,72
Sílica ativa	6,68
Fibra plástica PVA	1,40
Polpa celulósica refinada	1,20
Papel jornal reciclado	2,80

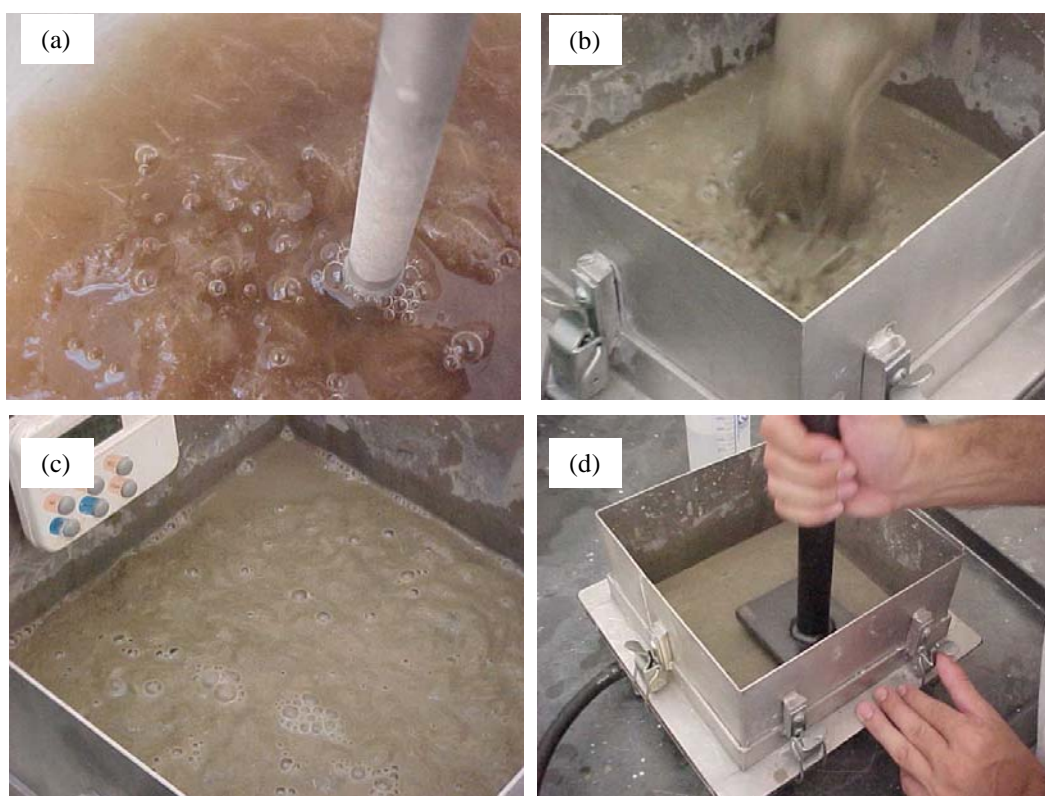


Figura 1 – Moldagem das placas de fibrocimento em escala laboratorial, sendo: a) preparação da mistura. (b) alimentação da câmara de vácuo. (c) sucção do excesso de água. (d) compactação manual da placa.

As Tabelas 2 a 5 apresentam as características das matérias-primas utilizadas: cimento Portland CP IIF, sílica ativa, fibra de álcool polivinílico (PVA), polpa de celulose nacional de Pinus não-branqueada refinada e papel jornal reciclado.

Tabela 2 – Cimento CPIIF – Propriedades físico-químicas.

Características do material	CPIIF
Diâmetro médio (μm)	13,81
Área específica (m^2/g)	0,5975
Densidade (g/cm^3)	2,65
Fases identificadas	$\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$, MgO , CaCO_3 $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Ca_2SiO_4

Fonte: Laboratório de Microestrutura/PCC-Escola Politécnica –USP, Brasil

Tabela 3 - Propriedades morfológicas da polpa de celulose e jornal.

Amostra	Coarseness^a (mg/100m)	Nº de fibras/g (milhões)	Comprimento médio (mm)	Teor de finos^b (%)
Polpa de celulose	11,56	6,99	1,24	25,28
Jornal	15,00	14,18	0,47	52,37

Fonte: Departamento de Engenharia Florestal/UFV

a – quantidade de massa por unidade de comprimento

b – percentagem de fibras com comprimento abaixo de 0.07mm.

Tabela 4 – Características das fibras de PVA.

Características	
Comprimento de corte (mm)	6
Diâmetro (μm)	14
Razão de aspecto	428,6
Tenacidade (GPa)	1,47
Módulo de Young (GPa)	32,5
Elongação na ruptura (%)	8,5
Densidade (20°C) (g/cm^3)	1,3
Resistência a álcalis	Excelente

Fonte: Kuraray-Japão

Tabela 5 - Características da sílica ativa.

Características do Material	
Diâmetro médio (μm)	0,5
Área específica (m^2/g)	22,5
Atividade pozolânica (mg/g)	814
Densidade (g/cm^3)	2,65
Fases Identificadas	Amorfo

Fonte: Laboratório de Microestrutura/PCC-Escola Politécnica –USP, Brasil

Para os ensaios físicos e mecânicos, as placas produzidas foram cortadas em serra circular refrigerada à água após completar-se o período de cura em água. Os corpos-de-prova prismáticos assim obtidos mediam 150 x 50 mm e tinham a mesma espessura da placa original (5 mm). Para cada um dos tratamentos, dez corpos-de-prova (repetições) foram submetidos aos ensaios físicos e mecânicos aos 28 dias de idade. Os outros dez corpos-de-prova foram submetidos ao teste de envelhecimento acelerado, com 50 ciclos de saturação e secagem, conforme norma européia EN-494. Este teste consiste em submergir os corpos-de-prova em água por 18 h e, em seguida, colocá-los em estufa a 60°C, durante mais 6 h, o que corresponde a um ciclo. Após os 50 ciclos, os corpos-de-prova foram submetidos aos mesmos ensaios físicos e mecânicos, conforme descrito a seguir.

2.2 - Ensaios físicos

As propriedades físicas foram determinadas de acordo com a NBR-9778. As propriedades determinadas foram densidade aparente (Equação 6), absorção de água (Equação 7) e porosidade aparente (Equação 8). As médias e os respectivos desvios-padrão foram determinados para cada um dos três tratamentos.

$$\text{Densidade aparente} = \frac{M_s}{M_s - M_I} \quad (6)$$

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{M_{Sa} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (7)$$

$$\text{Volume aparente permeável (\%)} = \frac{M_{Sa} - M_s}{M_{Sa} - M_I} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde M_s é a massa seca, M_I é a massa imersa e M_{Sa} é a massa saturada.

2.3 - Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas em análise foram: módulo de ruptura (MPa), tenacidade (kJ/m^2) e módulo elástico (GPa). Utilizou-se um dispositivo de flexão com quatro cutelos, com vão de 350 mm entre os apoios e taxa de deformação de 0,5 mm/min. A tenacidade se define como a energia absorvida (área sob a curva no gráfico de carga x deformação) dividida pela área da seção transversal do corpo-de-prova. A finalização do ensaio ocorreu ao se constatar redução de 50% da carga máxima de ruptura. O presente procedimento de ensaio foi detalhado por SAVASTANO JR. et al. (2000).

3 - RESULTADOS

3.1 - Caracterização da cinza

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise granulométrica da cinza de bagaço de cana após dois períodos diferentes de moagem. O aumento do tempo de moagem provocou a redução do tamanho médio das partículas do material, uma vez que as concentrações em massa retidas em peneiras com menor abertura aumentaram após 3 h de moagem.

Tabela 6 - Análise granulométrica da cinza de bagaço de cana após moagem por dois períodos diferentes (1,5 e 3 h).

Malha da peneira (μm)	% em massa retida	
	1,5 h de moagem	3 h de moagem
300	6,01	1,31
150	34,57	6,59
74	33,69	36,61
45	18,35	43,20
Fundo	7,38	12,26

De acordo com a Figura 2, pode-se observar que a queima do bagaço de cana-de-açúcar na temperatura de 1000°C durante 4 h promoveu a formação de SiO_2 cristalino (quartzo). A atividade pozolânica é diretamente proporcional à área específica e depende da composição química do material. Desta forma, materiais com estrutura desordenada (amorfa) apresentam maior reatividade em comparação com materiais cristalinos. A Tabela 7 apresenta os resultados da atividade pozolânica da cinza moída por 1,5 e 3h. Apesar do teor elevado de SiO_2 , encontrou-se baixa reatividade pozolânica, o que é compatível com a cristalinidade apontada no ensaio de difração de raios-X (DRX). De acordo

com a Tabela 8, pode-se verificar o teor relativamente elevado de ferro. Este resultado encontrado na composição química pode ser atribuído a possível contaminação da cinza durante moagem em moinho contendo esferas de aço. Tal contaminação não foi detectada no ensaio de DRX, uma vez que a cinza foi preparada em moinho com esferas de zircônio até atingir a área específica BET de 5.298 m²/g

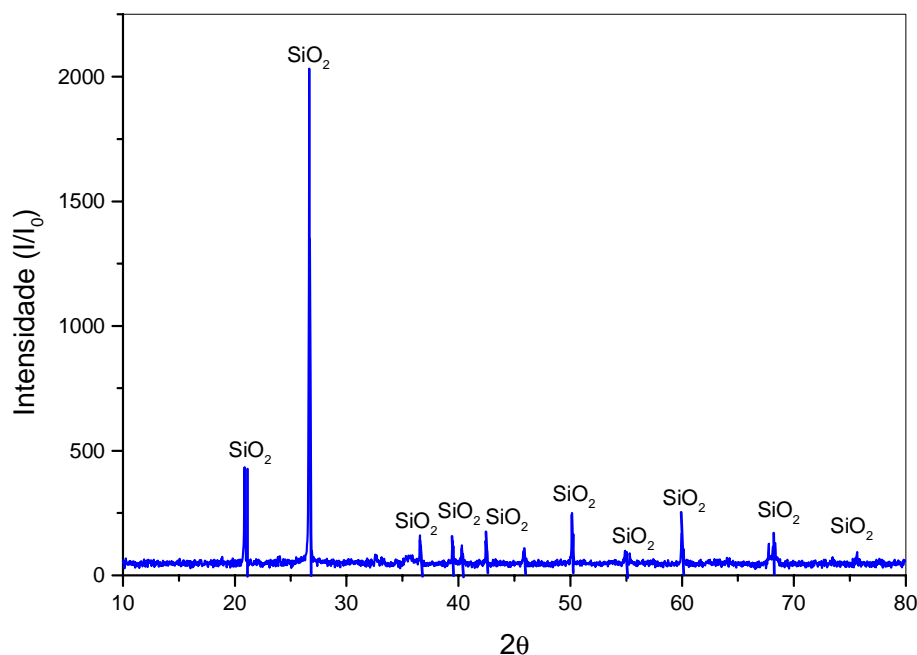


Figura 2–Espectro de difração de raios-X da cinza de bagaço de cana-de-açúcar pirolisada.

Tabela 7– Determinação da Atividade Pozolânica (Chapelle)

Tempo de moagem(h)	Atividade pozolânica (mg/g de CaO)
1,5	58,03
3,0	68,56

Tabela 8 – Determinação da Composição de Óxidos - EDS

Composição de óxidos (% em massa)						
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
1,4	5,4	77,3	4,0	1,6	2,2	8,1

As Figuras 3 a 5 mostram que o aumento do tempo de moagem da cinza de 1,5 para 3 h não alterou significativamente as propriedades físicas dos compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e álcool polivinílico (PVA). Após os ciclos de saturação e secagem, ocorreu redução dos valores médios de absorção de água e de porosidade aparente ($p > 0,05$). Essa redução pode estar associada aos processos de hidratação da matriz cimentícia (18 h de imersão em água por ciclo) e reação de carbonatação na superfície dos compósitos.

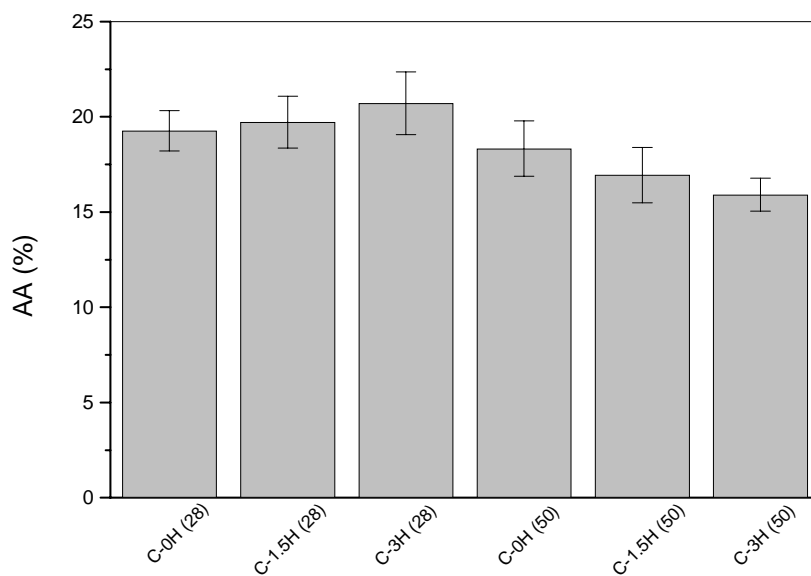


Figura 3 – Absorção de água dos compósitos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

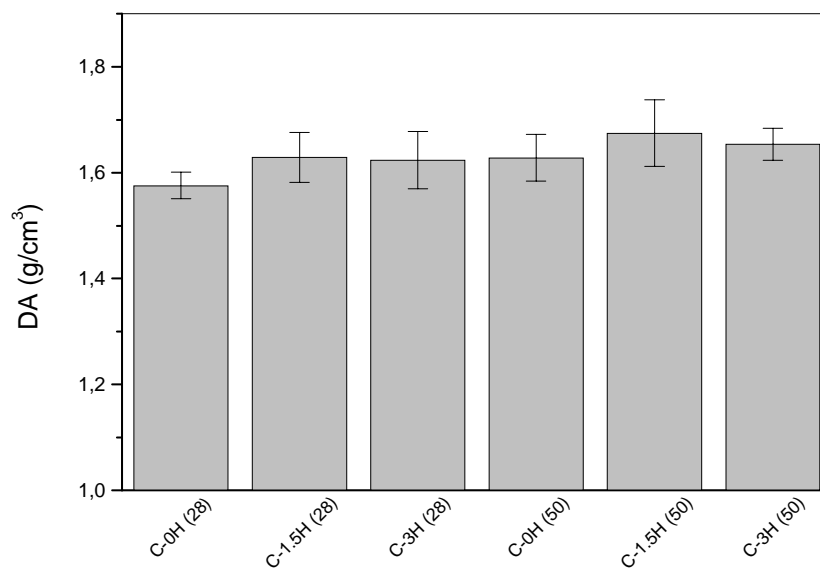


Figura 4 – Densidade aparente dos compósitos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

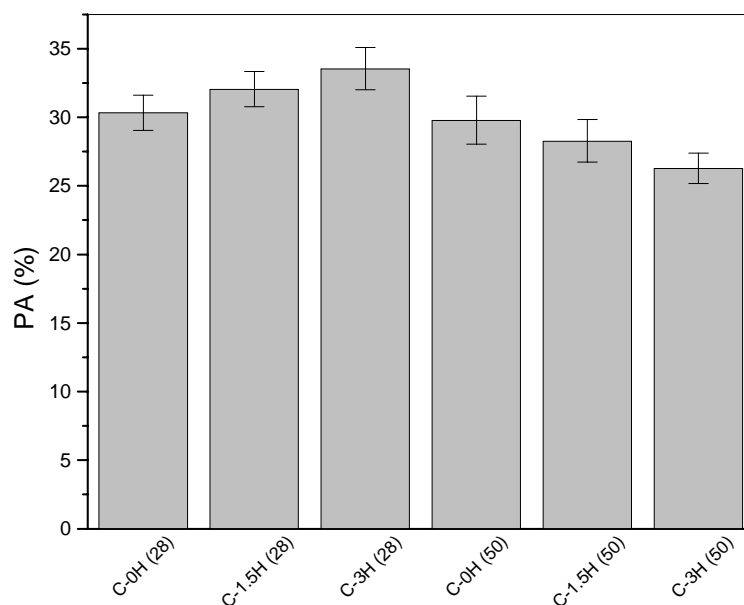


Figura 5 – Porosidade aparente dos compósitos aos 28 dias de idade e pós 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

A Figura 6 apresenta o módulo de ruptura do material para os três tratamentos aos 28 dias e após 50 ciclos de imersão-secagem. Os compósitos com cinzas moídas por 1,5 e 3 h mostraram módulo de ruptura superior em relação aos compósitos contendo a cinza sem moagem. A moagem da cinza gera maior quantidade de finos, que preenchem as cavidades formadas pelo contato entre as partículas maiores e das partículas maiores com as fibras. Contudo, não foi observada diferença ($p < 0,05$) entre a formulação com cinza moída por 1,5 h em relação à formulação com cinza moída por 3 h.

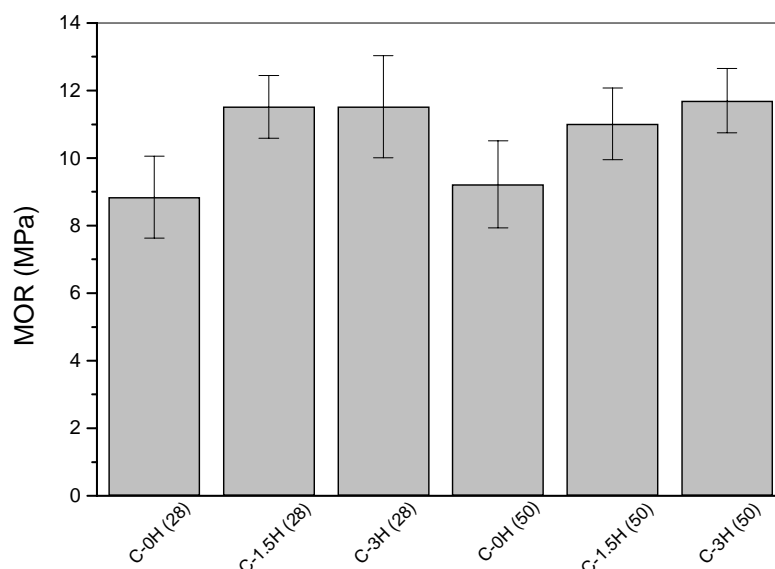


Figura 6 – Módulo de ruptura na flexão dos compósitos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

De acordo com a Figura 7, o módulo de elasticidade dos compósitos aumentou após cinquenta ciclos de saturação-secagem para todos os tratamentos. A imersão em água durante o ensaio de envelhecimento acelerado promove a hidratação da matriz cimentícia, e pode ter acarretado o aumento da ligação entre as fibras e a matriz cimentícia. A maior ancoragem das fibras com a matriz cimentícia dificulta o escorregamento dessas fibras durante a aplicação de carga, com o conseqüente aumento da tensão necessária para promover a primeira fissuração e o aumento do módulo de elasticidade.

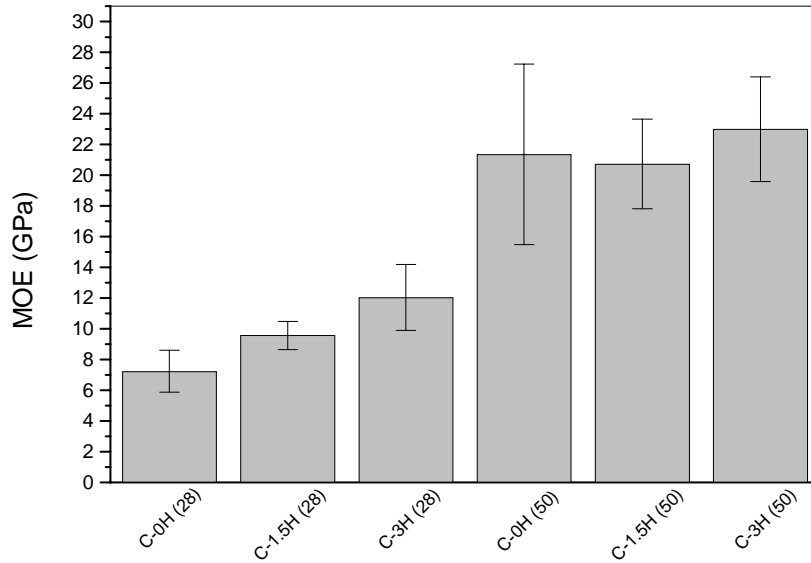


Figura 7 – Módulo elástico na flexão dos compósitos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

A Figura 8 mostra que a tenacidade diminuiu após 50 ciclos de saturação-secagem. Essa redução está diretamente associada com o aumento da aderência das fibras com a matriz cimentícia, que reduz o arrancamento das fibras e resulta na redução da absorção de energia no regime elasto-plástico (KATZ, 1996). A queda de tenacidade também pode ser parcialmente entendida pela degradação das fibras vegetais (polpa de celulose refinada e papel jornal) após os ciclos de envelhecimento acelerado (TOLÊDO FILHO et al. 2000).

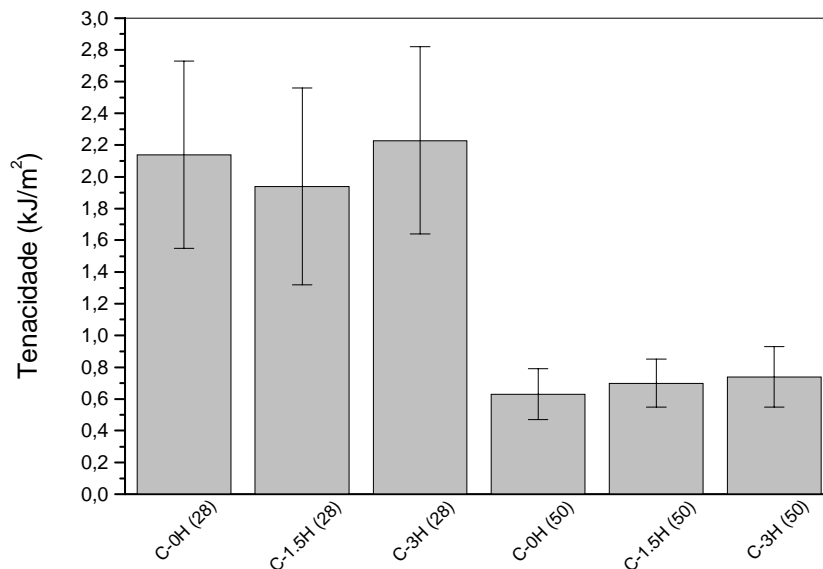


Figura 8 – Tenacidade na flexão dos compósitos aos 28 dias de idade e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

De acordo com a Figura 9, s compósitos contendo cinza moída apresentaram propriedades mecânicas superiores ao compósito contendo cinza sem tratamento. Este resultado esta diretamente associado com o efeito do preenchimento efetivo dos espaços vazios em decorrência da redução da granulometria do material.

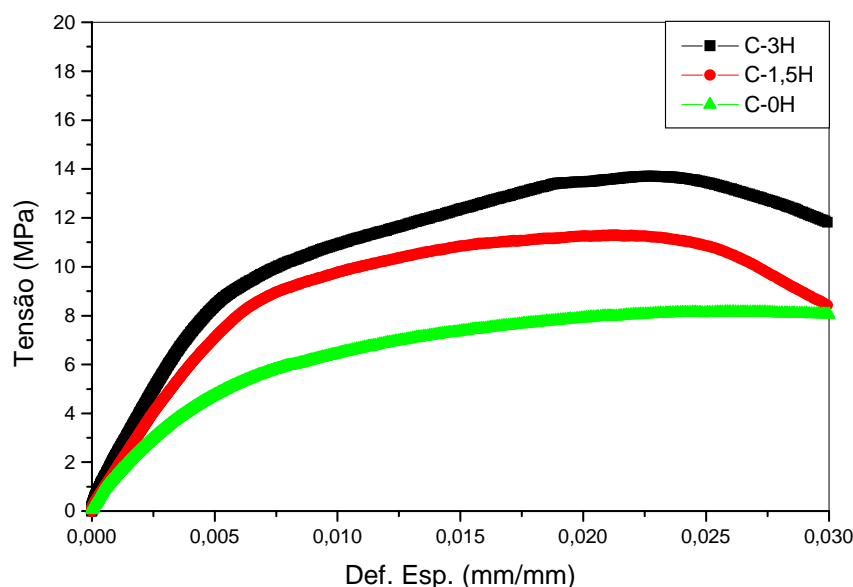


Figura 9 – Tensão versus deformação específica para compósitos de matriz cimentícia aos 28 dias de idade, para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

Após 50 ciclos de saturação-secagem, houve uma queda acentuada da tenacidade dos compósitos em comparação com a tenacidade aos 28 dias. Esta redução pode estar associada à degradação das fibras de celulose sensíveis ao ataque de álcalis.

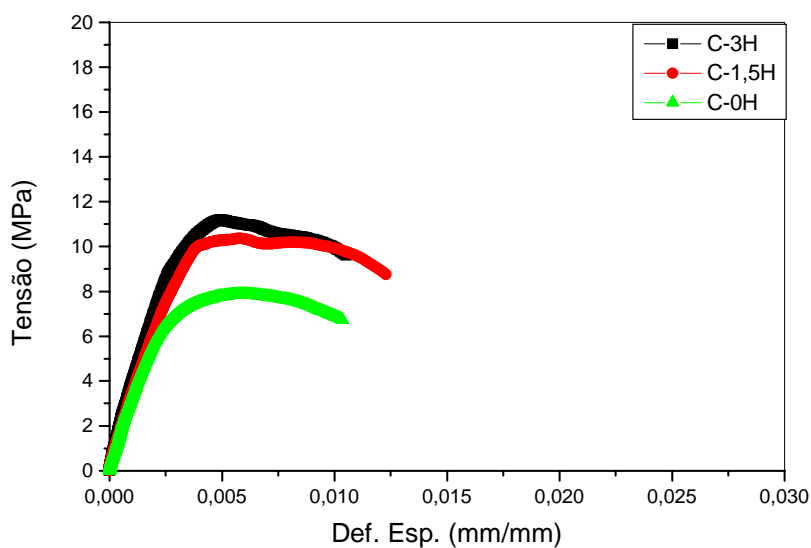


Figura 10 – Tensão versus deformação específica para compósitos de matriz cimentícia após envelhecimento acelerado, para tratamentos com três tempos de moagem da cinza (0; 1,5 e 3 h).

5 – CONCLUSÕES

A cinza de bagaço-de-cana apresenta alto teor de sílica (SiO_2) igual a 77,3% em massa. Contudo, essa sílica encontra-se na forma de cristais e apresenta baixa área superficial. Desta forma, a baixa atividade pozolânica desse material permite o seu emprego apenas como enchimento em compósitos à base de cimento Portland curados ao ar.

Os compósitos com cinza moída após 1,5 ou 3 h apresentaram módulo de ruptura superior aos compósitos com cinza sem moagem. Esse resultado justifica a operação de moagem, para alcance de maior homogeneidade granulométrica da cinza, bem como melhor empacotamento do compósito. O aumento do módulo elástico e a redução da tenacidade dos compósitos, após os ciclos de

envelhecimento, estão diretamente associados à otimização da hidratação da matriz cimentícia, que promove o aumento da aderência das fibras com a matriz, mas que reduz o arrancamento das fibras nos estágios pós-fissuração. Esses estudos estão ainda em andamento e deverão incluir processos de queima mais adequados, que permitam a obtenção de fases amorfas de sílica, reativas com o hidróxido de cálcio livre presente do cimento Portland hidratado.

6 – BIBLIOGRAFIA

Aiqin, W., Chengzhi Z, Ningsheng, Z. (1999). The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. **Cement & Concrete Research** 29 (1999) 1721-1726.

Cortez L., Potential for burning stillage-industrial fuel oil emulsions in Brazil. **International Symposium on Alcohol Fuels**, 9, Florença, Itália, novembro (1991).

Ferreira, A.A.; Silveira, A.A.; Dal Molin, D.C.C. A cinza da casca de arroz: possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: Encontro Nacional Sobre Edificações E Comunidades Sustentáveis, 1., 1997, Canela. **Anais...** Canela, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1997. p. 293-298.

Furnas, C.C., Grading aggregates, I-mathematical relations for beds of broken solids of maximum density, **Industrial and Engr. Chem.**, 23[9] (1931) 1052-8.

Garci Juenger, M.C., Jennings, H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. **Cement & Concrete Research** 32 (2002) 393-399.

Geyer, A.L.B.; Molin D.D.; Consoli, N.C. Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as a addition in concrete. In: International Conference on Sustainable Construction Into The Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa, 2000. **Proceedings...** João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 464-473.

Katz, A. Effect of fiber modulus of elasticity on the long term properties of micro-fiber reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 389-399, (1996).

K. Bilba, M-A. Arsene, A. Ouensanga. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement & Concrete Composites** 25 (2003) 91-96.

Raverdy, M., Brivot, F., Paillère, A.M., Dron, R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituents secondaires. 7TH CONGRÉS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CIMENTS VOLUME III 36. Paris, 1980.

SAVASTANO Jr., H.; Warden, P.G.; Coutts, R.S.P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement based composites. **Cement & Concrete Composites** v22, n5, p379-384.

Savastano JR., H.; John, V.M.; Agopyan, V. PVA and cellulose pulp as substitutes of asbestos in fibre-cement for water tanks production. In: 2002 Inorganic International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference: Opportunities for the new Millennium, 2002, Sun Valley. **Proceedings...** Moscow, University of Idaho, 2002. v. 8, p. 143-149.

Taplin, J.H. Discussion of H.E. Vivian, "Some chemical additions and admixtures in cement paste and concrete", Proceedings of the 4TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT VII US Department of Commerce Washington, DC(1960) 924-925.

Tavares, L.M., Single-particle fracture under impact loading; **Int. J. Miner. Process.**, 54, 1-28, 2003

Tolêdo Filho, R.D.; Scrivener, K.; England, G.L.; Ghavami, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, n. 2, p. 127-143, 2000.

UNE EN-494, Fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing. **Product specification and test methods.**

Yoshimoto T, Hinami K. Mokuzai Gakkaishi 1976; 22(1):63-4.

Zheng, J., Carlson, W.B., Reed, J.S., The Pecking Density of Binary Powder Mixtures, **Journal of the European Ceramic Society** 15 (1995) 479-483.

Zhengtian L, Moslemi AA. **Forest Prod J** 1986; 36(1): 53-4.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, ao Departamento de Óptica do Instituto de Física de São Carlos da USP, ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), à Usina São João/Araras, ao CNPq, concessão de bolsa PQ, (processo 305999/2003-6), ao Capes Procad (processo n. 0125/01-6), ao Coseas-USP (concessão de bolsa trabalho). Aos alunos de graduação Zaqueu Dias de Freitas (FEAP) e Leandro Cunha (CUML) pela ajuda no trabalho laboratorial.