

Adição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal

Addition of sugarcane bagasse ash in cementitious composites reinforced with sisal fibers

¹Maicon Secchi, ²Alex Neves Junior

¹Mestre em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367 (maiconsecchi@hotmail.com)

²Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, (alexnevesjr@gmail.com)

RESUMO: O cimento Portland é o segundo material mais utilizado pelo ser humano, sua fabricação demanda elevado consumo de energia e gera grandes quantidades de gás carbônico. O Brasil tem hoje um fator de emissão de aproximadamente 610 kg CO₂/ton cimento produzido, gerando mais de 10 milhões de toneladas de CO₂ somente no ano de 2017. Como forma de diminuir o consumo energético e diminuir a emissão do gás carbônico na atmosfera, tem-se como alternativa a incorporação de materiais pozolânicos ao cimento, que geram benefícios tanto tecnológicos, mas também econômicos e ecológicos. Assim, objetivou-se nesse trabalho avaliar, tanto por termogravimetria quanto mecanicamente, a influência da incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material pozolânico em compósitos a base de cimento Portland, reforçados com fibras curtas de sisal. Produziram-se pastas com substituição de cimento por CBC nos teores de 5, 10 e 15%, sendo que estas pastas foram produzidas atingindo o Índice de Consistência Normal determinando o fator água/material cimentante ideal para o nível de consistência requerido. As pastas foram ensaiadas por meio de Termogravimetria e Termogravimetria Derivativa (TG/DTG), bem como avaliada a sua resistência à compressão. Foram produzidas placas de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de sisal, com e sem a presença de CBC, as quais foram rompidas à tração na flexão aos 28 dias de idade. Os resultados indicaram que a pasta com teor de 5% de CBC não apresentou diferença significativa de resistência à compressão em relação à referência, porém diminuiu em 30% a quantidade de hidróxido de cálcio aos 28 dias. Os compósitos apresentaram comportamento denominado *strain-softening* e o mesmo teor de substituição de 5% manteve a carga de primeira fissura e máxima resistência à tração, quando comparado à referência.

Palavras Chave: Materiais compósitos. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Fibras naturais.

ABSTRACT: The Portland cement is the second most worldwide used material by the mankind. Your manufacturing process demands a huge energy consumption and generates huge amount of carbon dioxide. Brazil has an emission factor of 610kg CO₂/ton for cement production, have generated more than 10 millions tons of CO₂ only in the year 2017. As an alternative to drop the energy consumption and decrease the carbon dioxide emission in the atmosphere, as alternative, there is an option of addition of pozzolanic materials in cement-based materials, which generates technological, economic and environmental benefits. Thus, the aim of the present work was to evaluate, by thermogravimetry and mechanical, the influence of the addition of sugarcane bagasse ash as pozzolanic material in cement-based composites, reinforced with short sisal fibre. It was produced pastes with cement replacement by sugarcane bagasse ash in percentages of 5, 10 e 15%, considering pastes produced with the same normal consistence index, determining the ideal water to cementitious materials factor for the required consistence. The pastes were tested by thermogravimetry, derivative thermogravimetry and compressive strength. It was produced composites plates from the cementitious matrix reinforced with sisal fibre, with and without sugarcane bagasse ash, which were tested by 4 bending test at 28 days of age. The results have shown that the paste with 5% of sugarcane bagasse ash did not presented significant difference regarding the compressive strength comparing to the reference, with a decrease in 30% of the calcium hydroxide at 28 days. All the composites presented strain softening behavior and the 5% substitution percentage keep the first crack load and the maximum tension strength, comparing to the reference.

Keywords: Composite materials. Sugarcane bagasse ash. Sisal fibers.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o segundo material mais utilizado na humanidade, sendo formado a partir da mistura de até 80% de calcário e 20% de argila. Para suprir a demanda do

mercado de construção civil, em plena expansão, grandes grupos fabricantes de cimento foram criados no mundo todo. O resultado deste investimento foi o aumento da produção de cimento mundial em 100% nos últimos dez anos, principalmente em países emergentes, como China e Índia (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2005).

A fabricação de cimento Portland implica em elevado consumo de energia térmica e elétrica, devido ao processo ser realizado em altas temperaturas. A matéria-prima principal para a fabricação de cimento é rica em carbonato de cálcio (CaCO_3), assim, na obtenção do cimento, a geração de CO_2 (gás carbônico) não é proveniente unicamente da queima de combustíveis, mas também da própria etapa de descarbonatação. A produção nacional de cimento, em 2017, foi na ordem de 65 milhões de toneladas, emitindo no referido ano 36,6 milhões de toneladas de gás carbônico para a atmosfera.

Como forma de diminuir o consumo energético, iniciou-se a incorporação de materiais na fabricação do cimento, tanto inertes quanto pozolânicos, que geram benefícios tecnológicos, econômicos e ecológicos. Tecnicamente aumentam a durabilidade dos concretos, argamassas e pastas. Economicamente possibilitam reduzir a quantidade de energia e matéria prima utilizada na produção de alguns tipos de cimento Portland, como é o caso dos cimentos de classe CII, CIII, CIV e CV (KANNING, 2013).

Nesse sentido, estudos mostram que existe a possibilidade de utilização das cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana em matrizes a base de Cimento Portland, sendo que o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, produzindo cerca de 630 milhões de toneladas anuais. Estas ao serem processadas, geram como subproduto o bagaço, utilizado posteriormente como combustível para abastecer as caldeiras, gerando como resíduo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC). A composição química das cinzas geradas evidencia a grande presença de sílica, tanto em estado amorfo como em estado cristalino, e por possuírem granulometria fina, podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de materiais pozolânicos (quando amorfas) ou (quando cristalinas). Desta forma, estes materiais podem ser utilizados em argamassas e concretos, que apresentam comportamento frágil quando submetidos a esforços de tração, ou seja, rompem com pequenas deformações. Na maior parte das aplicações, para melhorar a capacidade de deformação das matrizes cimentícias, são utilizadas fibras como reforço, formando materiais compósitos.

O uso de fibras beneficia o comportamento pós-fissuração da argamassa ou do concreto e funciona como ponte de transferência de tensões. Por sua vez, as fibras, quando adicionadas à mistura, contribuem para o aumento da capacidade resistente, da capacidade de deformação e da tenacidade. Elas beneficiam o comportamento pós-fissuração da argamassa ou do concreto e funcionam como ponte de transferência de tensões. Podem ser de origem natural, como é o caso das fibras de sisal, coco e bananeira, ou ainda artificial, como é o caso das fibras de aço, as quais são mais utilizadas, graças à sua facilidade de obtenção, segurança na utilização e padronização (BENTUR e MINDESS, 2007).

Matrizes cimentícias convencionais são naturalmente meios alcalinos, com pH variando de 12 a 14. No interior das peças de concreto armado, a alta alcalinidade origina a formação de um filme passivante de óxidos, resistente e aderente à superfície das barras de armadura existentes, que protege a armadura contra a corrosão (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Quando fibras vegetais entram em contato com o meio alcalino, proporcionado pelo cimento Portland, ocorre a degradação das fibras vegetais devido à reação da água de poro com a lignina e a hemicelulose da lamela média das fibras e devido à migração do Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), que enfraquece a ligação individual das células (BENTUR e MINDESS, 2007).

Um dos principais efeitos buscados na elaboração de compósitos é a continuidade da resistência à tração pelas fibras após o rompimento da matriz. Segundo Lima e Toledo Filho

(2012), as matrizes com fibras curtas apresentam comportamento denominado “*strain-softening*”, pelos baixos valores que apresentam na tensão de aderência fibra-matriz e comportamento de amolecimento e rompimento do compósito. Este comportamento pode ser notado no início da redução da resistência logo após a abertura da primeira fissura na matriz, diminuindo até não existir mais transferência de esforços (BENTUR e MINDESS, 2007).

Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar, tanto por análise térmica quanto mecanicamente, a influência da incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material pozolânico em compósitos a base de cimento Portland, reforçados com fibras curtas de sisal, visando à obtenção de um material mais sustentável, que possibilite a diminuição de CO₂ gerado na produção do cimento, bem como o estímulo ao desenvolvimento das cooperativas de extração de sisal, para obtenção de materiais mais vantajosos do ponto de vista de sustentabilidade.

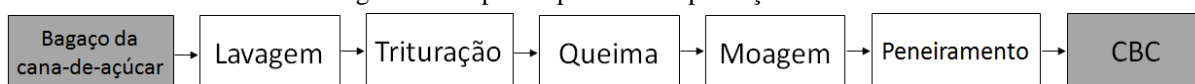
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: cimento Portland CP-II F 32; em virtude da sua disponibilidade na cidade de Cuiabá; bagaço da cana-de-açúcar doado pela usina Itamarati, localizada na zona rural de Jaciara, Mato Grosso; fibras de sisal, providas da empresa de fornecimento de fibras naturais Sisalsul, localizada no estado de São Paulo; a areia quartzosa lavada; água da rede de abastecimento do município de Cuiabá; e o superplastificante BASF MasterGlenium 304.

2.1 Produção da CBC

Em laboratório, foram produzidas as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em condições de queima e moagem controladas. O procedimento foi conduzido objetivando a obtenção de CBC com a máxima atividade pozolânica para o emprego em argamassas reforçadas com fibras de sisal. A Figura 1 apresenta de forma simplificada as etapas do processo de produção.

Figura 1 - Etapas do processo de produção da CBC



O primeiro passo do processo para a obtenção das cinzas foi a lavagem, que se deu de forma manual com água limpa e corrente, para retirar qualquer impureza oriunda da lavoura, ainda presentes após a moagem na usina, ou impregnada durante o transporte. Após a lavagem, o bagaço permaneceu isolado e em temperatura ambiente para secagem por 24h, com posterior trituração em engenho da marca Pinheiro, modelo PP-35, em dois ciclos de trituração, para redução do volume de material, facilitando desta forma a queima.

O bagaço triturado foi colocado por 24h em estufa de secagem e esterilização da marca FANEM, modelo 320-SE, a 120°C, para secagem. Retirado da estufa, o material foi imediatamente colocado no Forno Mufla LINN Elektro Therm AK-MODEL, aquecido à taxa de 1,67°C.min⁻¹, permanecendo durante seis horas no patamar de queima de 600°C. Para moagem, utilizou-se o moinho de bolas em cascata, marca Bender, modelo S295, com carga de 6,805kg (17 esferas) durante 90 minutos, totalizando 3000 rotações. A cinza proveniente da moagem passou por classificação por peneiramento a seco na peneira de malha de 75µm (peneira mesh 200), por meio de agitador de peneiras Solotest, durante 60 minutos, em agitação máxima. O material passante foi o utilizado para elaboração da pesquisa.

2.2 Produção das Pastas

As pastas com as cinzas foram produzidas com cimento, água e CBC, com teores de 5, 10 e 15% de CBC substituindo parcialmente o cimento Portland. Produziu-se também uma pasta sem adição, a qual serviu de referência. Para cada uma das misturas estabeleceu-se uma relação água/material cimentício (a/mc) própria, conforme indicado na Tabela 1, determinadas através da consistência normal de pastas, segundo NBR NM 43.

Tabela 1 - Nomenclatura, composição das pastas e fatores a/mc das misturas

Pasta	Cimento (%)	CBC (%)	a/mc
P_Referência	100	0	0,308
P_CBC_05%	95	5	0,366
P_CBC_10%	90	10	0,435
P_CBC_15%	85	15	0,510

As pastas foram preparadas de forma padronizada: colocou-se toda a água na cuba do misturador e, logo em seguida, adicionou-se toda a massa de cimento, aguardando 30s até se ligar o misturador em velocidade baixa por mais 30s. Então, o misturador foi desligado por 60s, sendo que nos próximos 30s efetuou-se a raspagem das paredes da cuba. Na sequência, ligou-se o misturador em velocidade alta por 60s, finalizando o processo.

A moldagem foi manual, em moldes plásticos de PVC sobre base acrílica, feita com o auxílio de uma espátula que também foi utilizada para adensamento em duas camadas, com 20 golpes por camada. Os moldes cilíndricos, com 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura, respeitaram a proporção 2:1 indicada pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Uma vez realizada moldagem, os corpos de prova foram colocados em uma caixa de isopor com panos úmidos, formando um ambiente saturado. Os mesmos foram desmoldados após 24 horas e mantidos imersos em água em temperatura ambiente até a idade de ensaio para avaliação da resistência à compressão simples e para ensaio de Termogravimetria, ambos aos 28 dias de idade.

2.2 Preparação das Fibras de Sisal

Para a produção dos compósitos, foram utilizadas as fibras de sisal, provinientes da empresa de fornecimento de fibras naturais Sisalsul, localizada no estado de São Paulo, fez-se opção de utilizar o superplastificante BASF MasterGlenium 304, visando a diminuição da necessidade da quantidade de água no compósito.

Em laboratório, foram processadas as fibras de sisal em condições controladas. Antes de serem utilizadas na fabricação dos compósitos, as fibras passaram pelos procedimentos de beneficiamento: lavagem, secagem, escovação e corte. Primeiramente, as fibras foram lavadas em água a 80°C, para a retirada de restos de resina natural que poderiam estar aderidas à superfície das fibras e posteriormente deixadas ao ar livre, para secagem, durante 48h. Com as fibras secas, passou-se ao desembaraço, de modo que as fibras ficassem com aspecto alisado. O último passo, foi o corte manual com o auxílio de tesoura, com comprimento de 50mm.

2.3 Produção dos Compósitos

Foram fabricadas argamassa no traço 1:3 (cimento:areia), mantendo-se os teores de substituição estudados nas pastas, de 5%, 10% e 15% de substituição de cimento por CBC, além de uma referência somente com cimento, conforme indicado na Tabela 2. Visando a diminuição da necessidade de água na mistura dos compósitos, utilizou-se superplastificante na dosagem de 1,0% da massa de material cimentício, conforme recomendação técnica do fabricante. Os compósitos foram reforçados com as fibras de sisal, com comprimento de 50 mm, distribuídas aleatoriamente na matriz no teor de 0,5% do volume de argamassa.

Para o Índice de Consistência (espalhamento), utilizou-se a mistura pronta para preencher o tronco de cone, sendo colocada em 3 camadas, aplicando-se 15, 10 e 5 golpes em cada camada, respectivamente, conforme procedimentos da NBR NM 68 (ABNT, 1998). Posteriormente, retirou-se o molde e a amostra foi submetida a 30 quedas no intervalo de 30 segundos, sendo que o resultado expresso por meio da média entre duas medidas transversais da amostra espalhada.

Tabela 2 - Nomenclatura, composição e espalhamento dos compósitos

Compósito	Material Cimentício		Superplastificante (%)	Volume de Fibras (%)	a/mc	Espalhamento (cm)
	Cimento (%)	CBC (%)				
C_Referência	100	0	1	0,5	0,500	25,90
C_CBC_05%	95	5	1	0,5	0,500	25,35
C_CBC_10%	90	10	1	0,5	0,500	25,75
C_CBC_15%	85	15	1	0,5	0,530	25,15

Foram utilizadas formas com laterais metálicas e fundo de madeira com dimensões de 250mm x 400mm x 20mm (L x C x H). Moldou-se uma placa para cada teor de substituição, acrescentando-se mais uma de referência. Posteriormente à cura e desmolde do compósito, os corpos de prova foram cortados nas medidas de 50 mm x 200 mm x 20 mm (L x C x H). Foram confeccionados três corpos-de-prova de referência e mais três para cada teor de substituição indicados anteriormente.

2.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Para a determinação da composição química das matérias-primas, utilizou-se o equipamento Shimadzu EDX 720, no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA) do Departamento de Recursos Minerais (UFMT), com a análise das amostras de cimento Portland e de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar sendo feita por meio dos canais Na-Sc e Ti-U. Os resultados foram apresentados na forma de percentual de óxidos constituintes, com correção do percentual pela perda ao fogo medida por análise térmica (Termogravimetria).

2.5 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio foi realizado nas cinzas (CBC), para verificação da existência de halos amorfos, que é um dos indícios de atividade pozolânica nas cinzas. Foi utilizado o difratômetro Bruker, modelo D8 Focus, com alcance de do raio de varredura de 15 a 90°, do presente no no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas.

2.6 Termogravimetria e Termogravimetria Derivativa (TG/DTG)

A termogravimetria foi realizada com o equipamento de análise térmica Shimadzu modelo DTG-60H Simultaneous DTA-TG Aparattus. As pastas e o cimento Portland foram analisados em ambiente inerte (nitrogênio), ao passo que a CBC foi analisada na presença de oxigênio. Utilizou-se 2±1mg de material, com rampa de aquecimento de 20°C/min e vazão de gás em 50ml/min, finalizando a medição ao se chegar em 1000°C. Deve-se ressaltar que foi neste ensaio onde se encontrou a porcentagem de perda ao fogo utilizada para corrigir a composição química (FRX) do cimento e da CBC.

Foi determinada também a curva de Termogravimetria Derivativa (DTG), obtida pela derivação da TG feita com o auxílio do *software Origin Graphing & Analysis*.

O ensaio foi desenvolvido para se encontrar a quantidade da água total combinada, água combinada da Tobermorita e Etringita, quantidade de Ca(OH)₂ e a quantidade do

CaCO₃. Por padrão, os resultados apresentados nas curvas de TG foram baseados na massa inicial das amostras. A quantidade de Hidróxido de Cálcio foi determinada pela utilização da Equação 1, que leva em consideração as perdas teóricas estequiométricas:

$$M_{Ca(OH)_2} = PM_{bic,Ca(OH)_2}/24,32 \quad (1)$$

onde $M_{Ca(OH)_2}$ é a massa (%) de Hidróxido de Cálcio; e $PM_{bic,Ca(OH)_2}$ é a perda de massa no processo de decomposição do Hidróxido de Cálcio. A mesma consideração foi feita para o cálculo da quantidade de Carbonato de Cálcio, pela Equação 2:

$$M_{CaCO_3} = PM_{bic,CaCO_3}/44 \quad (2)$$

onde M_{CaCO_3} é a massa (%) de Carbonato de Cálcio; e $PM_{bic,CaCO_3}$ é a perda de massa no processo de decomposição do Carbonato de Cálcio.

2.7 Resistência Mecânica à Compressão Simples

Os corpos-de-prova das pastas cilíndricos tiveram suas extremidades faceadas para garantir planicidade e paralelismo entre as bases e perpendicularidade às laterais. A máquina de ensaios universais utilizada para o teste foi a EMIC modelo DL30T do Laboratório de Estruturas do Curso de Engenharia Civil (FAET/UFMT), com carga máxima de 300 kN e velocidade da célula de carga ajustada em 1 mm/min.

A resistência foi calculada dividindo a carga de ruptura pela área bruta, sendo expressa em MPa. Determinou-se a área bruta da seção dos CP, calculada como o valor médio do diâmetro em cada extremidade e no meio, com posterior tratamento estatístico. Buscou-se a Resistência Média pela equação 3:

$$\mu = \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (3)$$

onde μ é resistência média do grupo; x é a resistência do corpo-de-prova e N o número de corpos-de-prova. Por meio da Equação 4, derivou-se o desvio padrão da amostragem:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (4)$$

onde σ significa o desvio-padrão da resistência. Com a Equação 5, calculou-se Δ , o coeficiente de variação:

$$\Delta = \sigma / \mu \quad (5)$$

O teste t foi aplicado em pares para verificar se as duas amostras possuíam médias equivalentes, sempre em comparação com a referência. Esta verificação permite testar a hipótese de que duas médias populacionais foram extraídas de um mesmo universo de parâmetros. Para tal, foram consideradas duas hipóteses: H0 (em média, as populações são iguais) e H1 (em média, as populações são diferentes). O teste t foi aplicado com a utilização da Equação 6 e o nível de significância adotado foi de 0,05 (5%), ou seja, o nível de confiança dos resultados é de 95% entre a comparação das amostras:

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)} \quad (6)$$

onde \bar{X}_1 é a Média do Grupo 1; \bar{X}_2 é a Média do Grupo 2; μ_1 a Média da População do Grupo 1; μ_2 a Média da População do Grupo 2 e $S_{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}$ é o Erro Padrão da Diferença entre as duas médias.

2.8 Resistência à Tração Na Flexão

Neste trabalho, o ensaio consistiu na aplicação de carga em dois pontos sobre o CP biapoiado, rompendo-o conseqüentemente à flexão por 4 pontos. A máquina de ensaios universais utilizada para o teste para foi a EMIC modelo DL30T. A velocidade da célula de carga foi ajustada para 1 mm/min e o deslocamento limitado eletronicamente em 5mm. Para o ensaio, adotou-se o valor do vão (L) 12cm, de acordo com as dimensões do corpo-de-prova.

A carga de primeira fissura foi determinada no momento do rompimento da matriz, por se tratar de um material frágil, no entanto o ensaio foi conduzido até o momento de ruptura das fibras ou deslocamento máximo, o que acontecesse primeiro. O resultado da aplicação das cargas foi compilado por meio de uma curva de deslocamento (eixo das abcissas) x carga aplicada (eixo das ordenadas). Foram ensaiados 12 corpos-de-prova, sendo três para referência e outros três para cada teor de substituição de CBC pesquisado, sendo todos utilizados para cálculo da resistência máxima e de primeira fissura. Porém, apenas quatro curvas selecionadas para compor as análises, um para cada teor: aqueles que apresentavam o comportamento mediano do compósito no ensaio.

A resistência do compósito à tração foi determinada pela Equação 7:

$$f = F.l/(d.b^2) \quad (7)$$

onde f é resistência à tração na flexão em MPa; F é a força aplicada em N; l é a distância entre apoios; b é largura do corpo-de-prova e d é a altura do corpo-de-prova. O tratamento estatístico adotado para interpretação dos resultados foi o mesmo explicitado no item 2.7.

3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

Na Tabela 3 - Composição química do Cimento Portland e da CBC, são apresentadas as composições químicas do cimento e da CBC, obtidas pela técnica de FRX. No cimento, destaca-se que o principal óxido presente é o de Cálcio, constituindo mais de 67 % da massa. Destaca-se, também, o dióxido de Silício, representando aproximadamente 11% da constituição. A composição química da CBC demonstra que sua composição básica é Sílica (SiO_2), representando 48,51% da massa total, chamando a atenção para a presença de Ferro, que compõe 12,18% da massa do material.

Tabela 3 - Composição química do Cimento Portland e da CBC

Composto	Cimento (%)	CBC (%)
MgO	3,21	3,08
Al ₂ O ₃	2,57	6,39
SiO ₂	10,72	48,51
P ₂ O ₅	0,13	1,9
SO ₃	3,25	2,27
Cl	-	0,33
K ₂ O	0,63	5,92
CaO	67,78	4,4
Fe ₂ O ₃	5,44	12,18

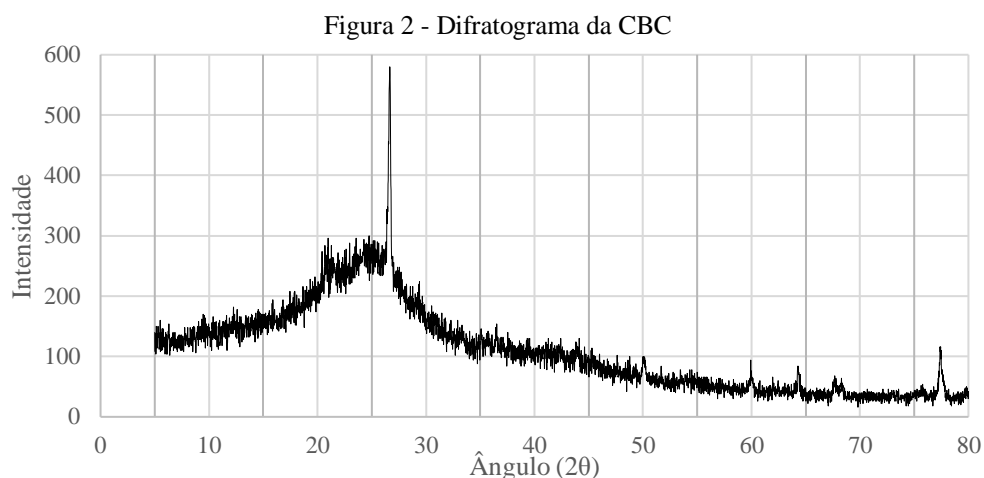
continua

Tabela 3 - Composição química do Cimento Portland e da CBC

continuação

Composto	Cimento (%)	CBC (%)
ZnO	0,36	0,22
SrO	0,51	-
ZrO ₂	-	0,18
Perda ao Fogo	5,5	14,62

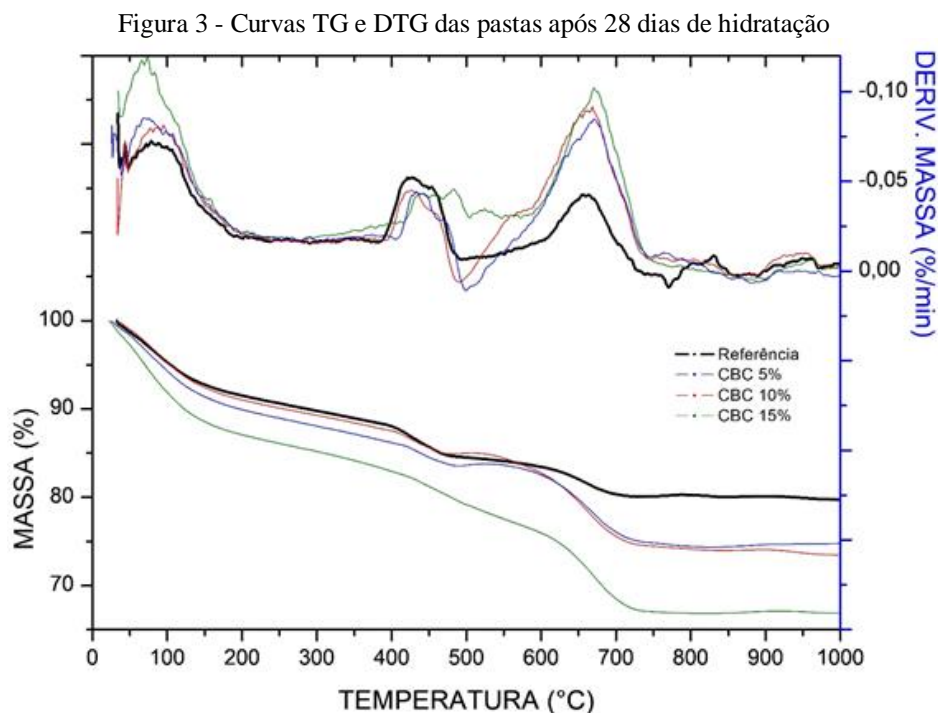
A Figura 2 retrata o padrão de difração de raios X apresentado pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que mostra sensível desvio da linha de base entre os ângulos de Bragg de 10° e 35°, o que aponta para a existência de sílica no estado amorfo. Destaque para a fase cristalina existente no ângulo de 27°, identificada como quartzo (Dióxido de Silício – SiO₂).



Na Figura 3 são apresentadas as TG/DTG's das pastas P_Referência, P_CBC_5%, P_CBC_10% e P_CBC_15%, baseadas nas leituras das massas iniciais das amostras inseridas no equipamento. Analisando o comportamento, tem-se que a primeira perda de massa é originada pela eliminação da água da gipsita, etringita e tobermorita (Silicato de Cálcio Hidratado, C-S-H), até os 400°C, sendo maior a quantidade eliminada quanto maior o teor de substituição. Isso se deve à maior quantidade de água usada na mistura (Tabela 1) e pelo efeito da sílica em estado amorfo que aumenta a quantidade de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) gerado, oriundo da reação desta com o Hidróxido de Cálcio (CH).

A segunda perda de massa, entre 400 e 500°C, é superior nas pastas com CBC e corresponde ao consumo do CH. Este se apresenta em menor quantidade nas pastas com substituição uma vez que elas contêm menos cimento, mas também porque ele é consumido nas reações pozolânicas para formação de C-S-H, comprovando que a CBC possui sílica em estado amorfo, como identificado em sua DRX.

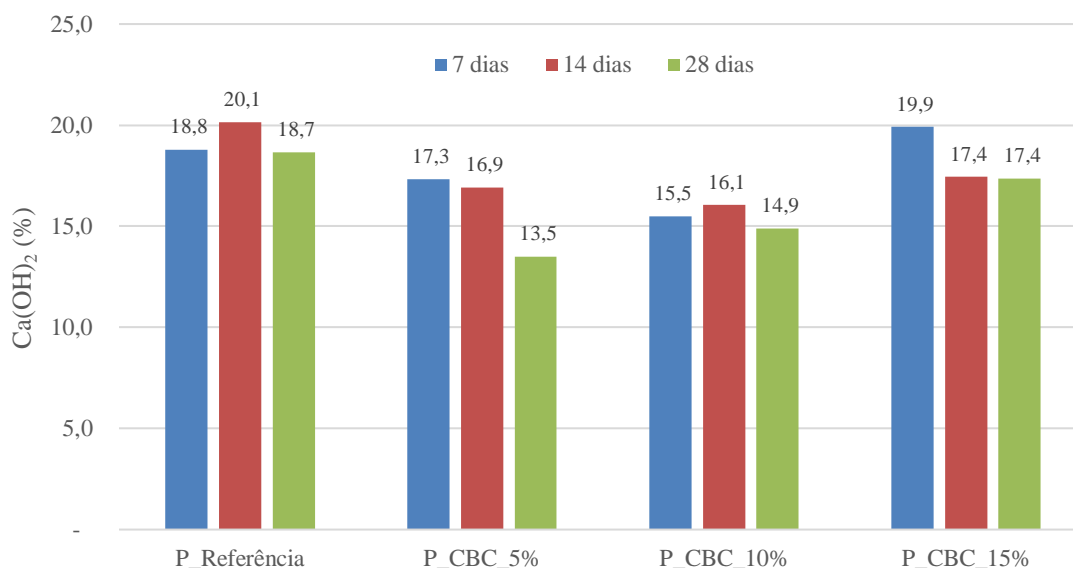
A presença de Carbonato de Cálcio (CaCO₃) é identificada pela terceira perda de massa, até os 750°C, apresentando-se em maior concentração quanto mais alto o teor de CBC. Essa elevação é motivada pelo acréscimo de água na mistura, com respectivo aumento da porosidade da pasta, favorecendo as reações de carbonatação.



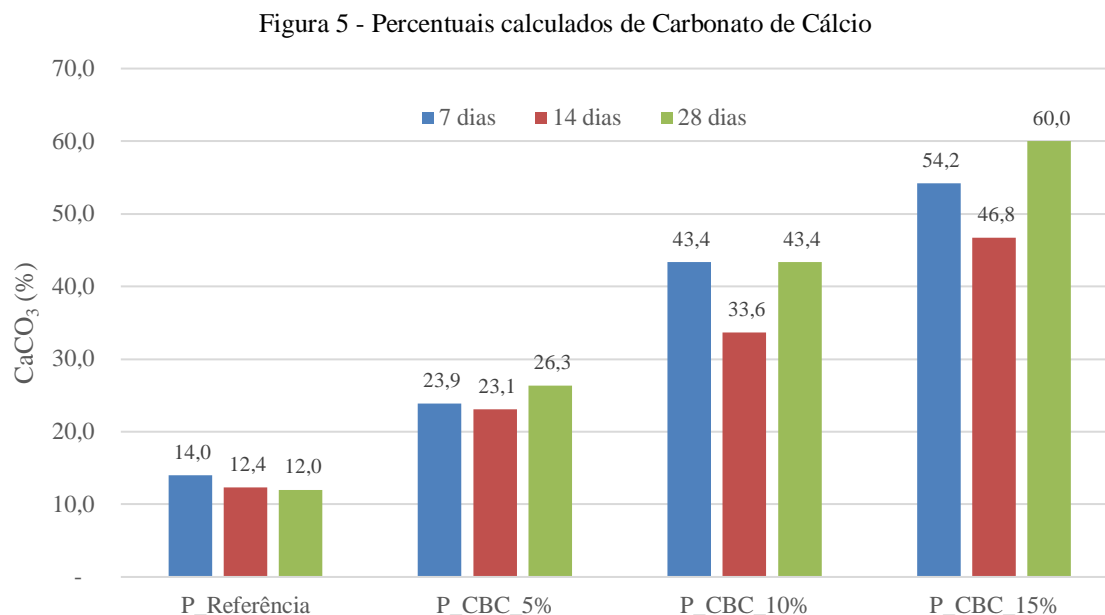
Baseados nos valores obtidos nas leituras de TG/DTG, calcularam-se as quantidades de produtos hidratados das pastas, com histogramas comparativos sendo apresentados na Figura 4 e Figura 5.

A Figura 4 apresenta o comportamento da evolução do CH para todas as pastas estudadas até os 28 dias. Nota-se que com o aumento da idade (tempo de hidratação) ocorre redução no teor de CH para as pastas contendo CBC, para todos os teores. Aos 28 dias de hidratação, a pasta de referência apresenta 18,7% de CH ao passo que a pasta P_CBC_5% possui 13,5%, representando uma diminuição de quase 30% em sua concentração. A quantidade de CH é menor em vista à diminuição da quantidade de cimento na mistura, bem como em virtude das reações pozolânicas que o consomem. Reações, estas, só existentes pela atividade da sílica amorfa da CBC.

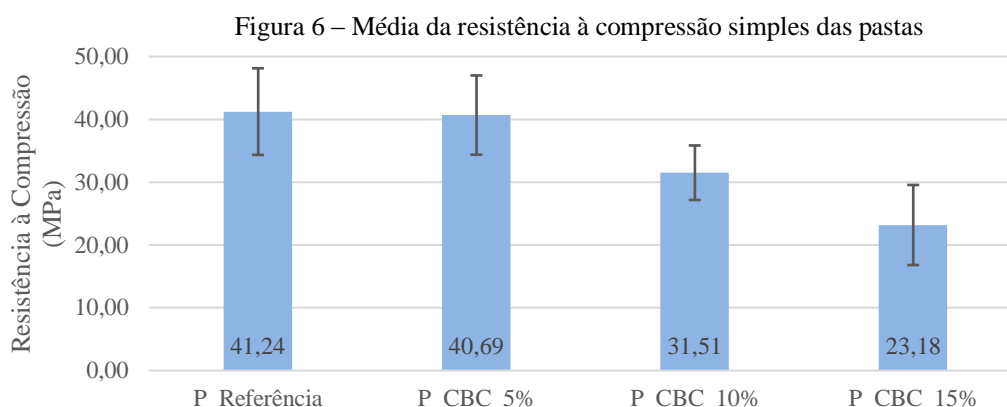
Figura 4 - Percentuais calculados de Hidróxido de Cálcio nas pastas



Ao se analisar a Figura 5, percebe-se que a pasta de referência apresenta menor concentração de CaCO_3 nas 3 idades. Atenta-se para o fato de a P_Referência possuir a maior quantidade de cimento, o que gera uma matriz com menor porosidade, dificultando reações de carbonatação com ar, originando o carbonato. Conforme o teor de substituição de cimento por CBC aumenta (e conseqüentemente aumenta a quantidade de água na mistura), a porosidade e as reações de carbonatação se elevam. A pasta P_CBC_15% chega a apresentar 60% de CaCO_3 aos 28 dias, 5 vezes maior que a P_Referência.



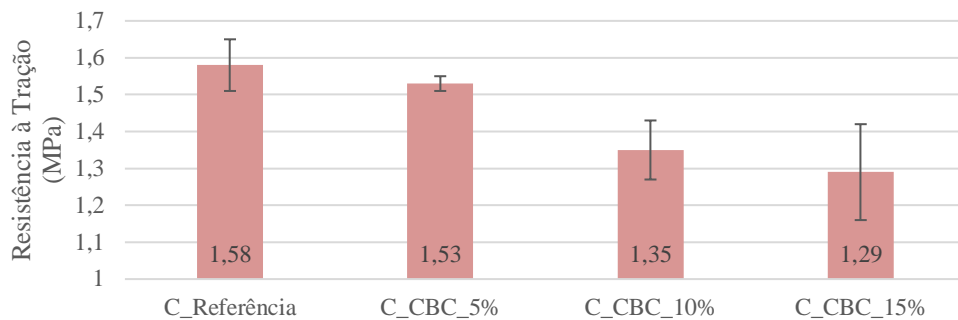
Os resultados do ensaio de compressão simples dos corpos de prova de pastas estão indicados na Figura 6.



Com auxílio do teste estatístico t-student, pode-se afirmar que a resistência média das pastas P_Referência e P_CBC_5% não apresentam diferenças estatísticas. Há de se exaltar o fato que estas pastas apresentam diferenças em sua composição, com a pasta P_CBC_5% apresentando menor quantidade de cimento e maior quantidade de água, o que usualmente resultaria em menor resistência mecânica, fato este que não aconteceu na mistura. No entanto, comprovou-se estatisticamente perdas de resistência nas pastas P_CBC_10% e P_CBC_15%, com redução na ordem de 23% e 44%, respectivamente.

A Figura 7 mostra os resultados da resistência à tração na flexão dos compósitos.

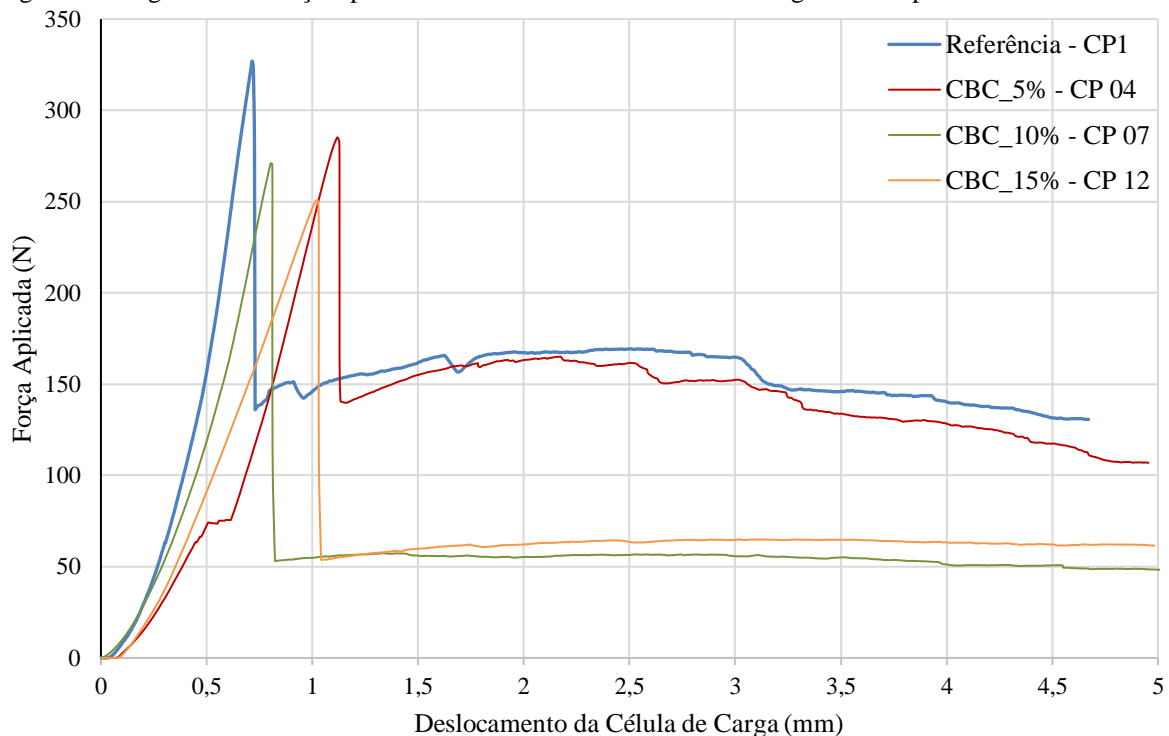
Figura 7 – Resistência média máxima à tração e de primeira fissura da matriz dos compósitos



Por meio do teste t-student, pode-se afirmar que os compósitos C_Referência e C_CBC_5% não apresentam diferenças estatísticas, apesar de suas composições diferentes, visto que a segunda possui menor quantidade de cimento (Tabela 2). Porém, a análise estatística das pastas C_CBC_10% e C_CBC_15% indicou valores de resistência menores que a referência em 15% e 18%, respectivamente. Este comportamento foi semelhante ao resultado de resistência à compressão das pastas apresentados na Figura 6.

Com os diagramas Força Aplicada x Deslocamento da Célula de Carga no ensaio de flexão em quatro pontos fornecidos pelo equipamento, foram selecionadas as curvas representativas do comportamento mediano de cada compósito (Figura 8). Por meio da análise, concluiu-se que nos casos selecionados o C_Referência expôs mais fragilidade na fratura da matriz, rompendo-se com menor deslocamento da célula de carga, justificado pela maior quantidade de cimento e ausência de CBC.

Figura 8 - Diagramas de Força Aplicada x Deslocamento da Célula de Carga nos compósitos ensaiados à flexão



O comportamento dos compósitos após o rompimento das matrizes foi uniforme, com aumento do deslocamento da célula de carga mantendo a força resistida aproximadamente constante até a ruptura completa, graças à ação de transferência de esforços proporcionado pelas fibras de sisal. O C_CBC_5% comportou-se de maneira muito parecida ao C_Referência, porém exigiu deslocamento maior da célula para rompimento. Já a força resistida pelo C_CBC_10% e pelo C_CBC_15% diminuiu consideravelmente, mas não devido ao rompimento das fibras, e sim pelo escorregamento delas na interface com a matriz, conforme pode ser evidenciado na Figura 9. Tal acontecimento ocorre pela menor quantidade de cimento nas misturas e, conseqüentemente, menor quantidade de produtos hidratados, que leva à maior porosidade e prejudica a área de interação entre a fibra e a matriz, conforme apontado pela análise das pastas por TG/DTG. A Figura 9 também evidencia o surgimento de apenas uma fissura na matriz, durante todo o período do ensaio de tração na flexão. Desta forma, pode-se considerar que no período avaliado não houve comprometimento das fibras pelo contato com o CH presente e levou os compósitos ao comportamento denominado *strain-softening*.

Figura 9 - Corpo-de-prova do C_CBC_15% rompido à flexão



4. CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cinzas produzidas em laboratório, a partir da calcinação do bagaço da cana-de-açúcar a 600°C, foram constituídas basicamente por sílica em estado amorfo, ou seja, apresentam atividade pozolânica, confirmado por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X e Difração de Raios-X. A Análise Térmica também comprovou a reatividade das cinzas.

Nas pastas, as cinzas influenciaram na cinética das reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, na formação dos produtos hidratados. Com o aumento do teor de substituição de cimento por CBC, geraram-se maiores quantidades de água total combinada, de água da tobermorita e etringita, reduzindo a quantidade de CH nas pastas.

A pasta P_CBC_5% apresentou redução de 30% da quantidade de CH na idade de 28 dias, em relação à de Referência, não apresentando diferença estatística de resistência à compressão simples em relação a mesma, sendo, portanto, definida como teor ideal para utilização. As pastas P_CBC_10% e P_15% apresentaram diminuição da resistência, provocado principalmente pela maior quantidade de água necessária na mistura, o que levou também ao aumento da porosidade e da quantidade de CaCO₃, confirmado por Termogravimetria.

Os compósitos apresentaram comportamentos semelhantes entre si no ensaio de tração na flexão, denominados *strain-softening*. O compósito C_Referência e o C_CBC_5% apresentaram resistência máxima e de primeira fissura sem diferenças estatísticas. Porém, o

primeiro mostrou-se mais frágil na ruptura da matriz. Os compósitos com CBC mostraram capacidade de maior deformação até a fratura das fibras, provocado principalmente pelo escorregamento da interface fibra x matriz. Com isso, não houve verificação da desmineralização da fibra, mostrando ser viável o uso do CBC em compósitos à base de cimento Portland.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 68**: Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 43**: Determinação das pastas de consistência normal, Rio de Janeiro, 2003.

BENTUR, MINDESS. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2º Edition, E. & F.N. Spon, 2006. p.624.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Profile: Cement Raw Materials**. Londres: Natural Environmental Research Council. 2005. 20p.

DWECK, J. B. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, v. 346, p. 105-113, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00369-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00369-X)

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. Tese (Doutorado). 192 f. Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, 2013.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto – Estrutura, propriedades e materiais**. 1ª. Edição. São Paulo: Editora Pini. 1994. 673p

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO2 em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. Tese (Doutorado). 179p. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.