

Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: Revisão

Application of residual ash and sisal fiber in the production of mortar and concrete: Review

Indara Soto Izquierdo*

Marcio Antonio Ramalho**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP)

*Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Departamento de Engenharia de Estruturas, Brasil. Engenheira Civil, M.Sc. Estudante de doutorado. Áreas de atuação: Estrutura do concreto e alvenaria. indara@sc.usp.br

**Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Departamento de Engenharia de Estruturas, Brasil. Engenheiro Civil, M.Sc., Ph.D. Professor titular. Áreas de atuação: Estrutura do concreto e alvenaria, Mecânica das estruturas. ramalho@sc.usp.br

Correspondência: Indara Soto Izquierdo. EESC/USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13566-590 / São Carlos - SP / Brasil. +55 16 996044118.

Resumo

O desenvolvimento industrial, associado ao crescente vício de consumo, à obsessão pelos combustíveis fósseis, e o desejo massificado pelo lucro a curto prazo, causam uma certa insensibilidade à alternativas mais sustentáveis. A indústria da construção civil é um setor no qual a incorporação dos vários tipos de resíduos apresenta-se como favorável. Três tipos de resíduos com características e origens diferentes têm se mostrado atraentes e vantajosos para muitos países em desenvolvimento. Eles são resíduos sólidos urbanos incinerados, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e fibra de sisal. O artigo apresenta como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das características, uso e importância desses resíduos como aplicação na construção civil. O interesse na reutilização desses materiais rejeitáveis como matéria prima em argamassas e concretos permite uma destinação adequada e redução de sua geração, além disso, deixariam de ser causa primária dos problemas ligados à saúde pública e ao meio ambiente. Felizmente, verifica-se que maior é a tendência dos pesquisadores de estimular a busca de novas matérias-primas que sejam provenientes de fontes renováveis e menos poluentes. Todas as pesquisas referenciadas no artigo mostraram a viabilidade da utilização da fibra de sisal e das cinzas residuais para a fabricação de concretos e argamassas.

Palavra-chave: resíduos sólidos urbanos incinerados, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, fibra de sisal, concreto, desempenho mecânico.

Abstract

The industrial development linked to the growing addiction to consumption, obsession with fossil fuels, and general desire for short term profit, cause a certain insensitivity to more sustainable alternatives. The construction industry is a sector in which the incorporation of various types of waste presents as favorable. Three types of waste with different characteristics and origins have proved attractive and advantageous for many developing countries. They are incinerated municipal solid waste, bagasse ash from sugar-cane and sisal fiber. The aim of the paper was to realize a literature review of the characteristics, use and importance of these residues as application in construction. The interest in the re-use of these waste materials as raw material in mortar and concrete allows for proper disposal and minimizing the generation of waste, moreover, would no longer be the primary cause of problems relating to public health and the environment. Fortunately, there is a tendency among researchers to stimulate the search for new raw materials that come from cleaner and renewable sources. All studies referenced in the article showed the feasibility of using sisal fiber and residual ash for the manufacture of concrete and mortar.

Keywords: municipal solid waste incinerated, ash of the bagasse of cane sugar, sisal fiber, concrete, mechanical performance.

Fecha de recepción: 22 de enero de 2014
Fecha de aceptación: 25 de junio de 2014

1. INTRODUÇÃO

A construção civil transforma 50 % dos recursos naturais extraídos no planeta, sendo a segunda indústria responsável pela emissão de dióxido de carbono [1]. Dessa forma, há a necessidade do desenvolvimento de materiais alternativos como um novo caminho para sustentabilidade. Assim, é necessário fomentar a cultura da sustentabilidade na indústria da construção civil através da sensibilização e da divulgação do conhecimento, capaz de contribuir para a formação da opinião do público consumidor, investidor público e privado, do projetista e do construtor.

O interesse em mostrar diversas pesquisas sobre o uso de resíduos sólidos urbanos incinerados, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e fibra de sisal na construção civil é devido aos resultados satisfatórios obtidos pelos pesquisadores, que atestam a viabilidade do uso em substituição parcial ou total em matrizes cimentícias. Também pela necessidade em se pesquisar tecnologias alternativas na construção civil, com melhor desempenho ambiental, social, econômico e tecnológico, favorecendo o alcance desse serviço a todos os seguimentos da sociedade.

2. METODOLOGIA

O seguinte trabalho faz uma revisão bibliográfica das pesquisas mais atuais sobre a utilização de resíduos sólidos urbanos incinerados, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e fibra de sisal na construção civil. A questão norteadora da revisão científica é se estes materiais não convencionais apresentam um potencial significativo como alternativa ecológica para seu uso em concretos e argamassas.

O período em que ocorreu a busca dos artigos científicos foi de julho a outubro de 2013 e as bases de dados utilizadas foram Science Direct, ISI Web of Knowledge e Scopus. As palavras chaves que ajudaram a localizar os trabalhos foram resíduos sólidos urbanos incinerados, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, fibra de sisal, desempenho mecânico, construção civil e reciclagem.

O número de artigos encontrados foram 49, dos quais 37 são no idioma inglês e o resto em português. Os critérios utilizados para a seleção dos

artigos foram apresentação de alternativas viáveis e ecológicas para o uso dos resíduos e fibra de sisal na construção civil e o melhoramento das propriedades mecânicas e físicas dos concretos e argamassas. É importante esclarecer que houve respeito aos aspectos éticos relativos à realização de pesquisas científicas por parte dos autores de este trabalho.

3. DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR E FIBRA DE SISAL

Resíduos sólidos urbanos

Zanta et al. [2] definem resíduos sólidos urbanos (RSU) como sendo os materiais resultantes das inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas, abrangendo resíduos de várias origens, como residencial, comercial, de estabelecimentos de saúde, industriais, da limpeza pública, da construção civil, os agrícolas, incluindo os resíduos orgânicos.

Segundo Li et al. [3], uma solução viável no gerenciamento do lixo nos países desenvolvidos e industrializados é a incineração de resíduos sólidos urbanos. Assim, dito processo é considerado uma forma moderna, cara e racional de reduzir o volume de lixo em cerca de 90 %, eliminar as emissões de metano, diminuir a demanda de espaço para aterramento e gerar energia elétrica.

A percentagem de RSU incinerado na Europa tem crescido cerca de 15 % em 1995 para 20 % em 2009 [4]. No Japão, cerca de 80 % dos RSU é incinerado e reutilizado [5]. Na China, a cada ano são construídas plantas de incineração de resíduos sólidos em cidades, como Shenzhen, Pequim e Xangai para a geração de energia elétrica [6]. Países como Bélgica, Holanda, Alemanha e França estabeleceram critérios para a utilização do resíduo urbano incinerado na construção civil, através de leis e regulamentos [7]. Em países altamente povoados, como a Índia, Turquia e México, a maioria dos resíduos sólidos é geralmente destinada à aterros e lixões [8].

No Brasil, atualmente, a incineração é utilizada somente para resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos e parte dos resíduos hospitalares. No entanto, essa tecnologia utilizada não faz uso do aprovei-

tamento energético. Para isso seriam necessários alguns aprimoramentos tecnológicos para permitir esse aproveitamento de forma economicamente viável e ambientalmente correta.

O processo de incineração gera um novo resíduo que são as cinzas. É por isso que vários pesquisadores dos países industrializados têm desenvolvido pesquisas sobre o uso desse material como matéria prima. Segundo Ferreira et al. [9], existem nove possíveis aplicações para as cinzas provenientes da queima de resíduo sólido urbano, que são agrupadas em quatro categorias principais. São elas: materiais para a construção civil (cimento, concreto, cerâmica, vidro e vidro-cerâmica), aplicações na geotecnia (estradas pavimentadas e aterros), agricultura (alteração do solo) e diversos (absorventes e condicionamento de lodo).

Em geral, a caracterização química e física das cinzas dependerá das composições do resíduo sólido. O mesmo varia ao longo do tempo e de país para país devido às diferenças no estilo de vida e nos processos de reciclagem do resíduo [10]. A composição química mais comum mostra que os elementos principais são silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg), cálcio (Ca), potássio (K), sódio (Na) e cloro (Cl). Além disso, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O são os óxidos mais representativos. O CaO e SiO_2 representam 46 e 49%, respectivamente, resultando nos compostos mais abundante nas cinzas volantes [11].

Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta nativa das regiões tropicais cujo cultivo se estende atualmente aos dois hemisférios [12]. Em 2009, a produção total de cana no mundo foi estimada em cerca de 1.661 milhões de toneladas. O Brasil é hoje o principal produtor de cana-de-açúcar do mundo, respondendo sozinho por 45 % de todo o produto comercializado como açúcar e álcool, sendo seguido pela China, Índia e Tailândia [13].

O bagaço é o resíduo sólido gerado durante a extração do caldo da moagem de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool. Sua composição química varia conforme a espécie de cana-de-açúcar cultivada, os tipos de herbicidas e de fertilizantes e os fatores naturais, como o clima, solo e água [14].

Desde o início do século XX o bagaço tem sido historicamente empregado como combustível nas usinas e destilarias do Brasil, quando passou a substituir a lenha nas caldeiras. Na safra de 2010/2011, a produção total de bagaço foi estimada em 163 milhões de toneladas, das quais aproximadamente 93 % foram destinadas à queima em caldeiras para geração de vapor, enquanto o restante foi empregado como matéria-prima industrial na produção de papel e celulose, de álcool e aglomerados [15].

Há algum tempo, as usinas sucroalcooleiras queimam o bagaço e a palha da cana para geração de energia elétrica. O potencial de geração de energia a partir do bagaço é da ordem de 15 % de toda demanda nacional, patamar que pode ser atingido até 2020. A Revista Fapesp [16] destaca que a geração de eletricidade com a queima do bagaço e da palha poderá superar, já em 2013, a capacidade de maior hidrelétrica do Brasil, a usina de Itaipu.

Como resultado da queima do bagaço de cana-de-açúcar para a geração de energia tem-se a produção da cinza, em volume menor, porém, não menos expressivo. Segundo Cordeiro [17], para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida e processada na indústria sucroalcooleira são gerados aproximadamente 26 % de bagaço e 0,62 % de cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar. Dessa forma, para os 600 milhões de toneladas de cana produzidas na safra 2012/2013 foi gerado 3,72 milhões de toneladas de cinza de bagaço de cana (CBC).

Ao final da queima, geralmente, as cinzas residuais do bagaço são lançadas no meio ambiente de forma inadequada, sem um manejo eficiente (figura 1). Trate-se de um material de difícil degradação, passível de permanecer em depósitos ao ar livre por longos períodos [18]. Uma parte é utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, apesar de apresentar poucos nutrientes minerais.



Fonte: Referencia [49].

Figura 1. Disposição final da cinza de bagaço de cana

Diante disso, é de grande interesse procurar um destino ambientalmente adequado para esse material. A cinza pode também vir a ser um importante insumo na fabricação de concretos substituindo parte da areia utilizada na preparação do concreto.

Fibra de sisal

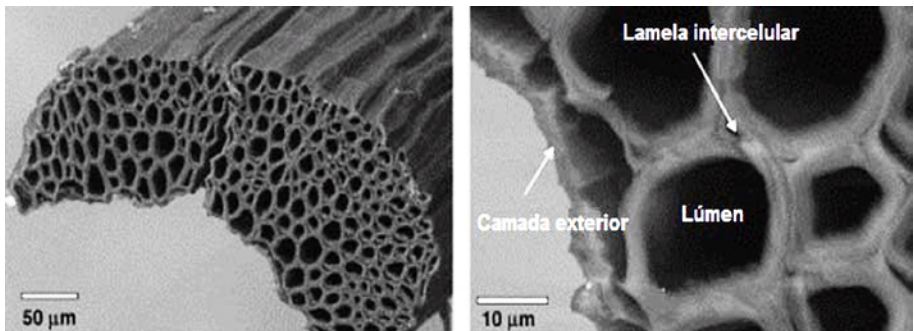
O sisal (*Agave sisalana*, família Agavaceae) é uma planta originária do México que se espalhou rapidamente para outras regiões do mundo, como a África, Europa e Ásia. Essa planta é resistente ao clima seco, ao sol intenso e é cultivada em regiões tropicais e subtropicais (figura 2). A fibra de sisal é extraída das folhas que, após o beneficiamento, é destinada majoritariamente à indústria de cordoaria e artesanato [19]. Cerca de 4,5 milhões de toneladas de fibra de sisal são produzidas a cada ano em todo o mundo sendo a Tanzânia e o Brasil os principais países produtores [20].

Com relação à microestrutura da fibra, a mesma é formada por várias células individuais (microfibras) unidas umas às outras por meio de lamelas intermediárias, constituídas de hemicelulose e lignina, conforme ilustra a figura 3 [21].



Fonte: <http://www.sisalrugs.co.uk>.

Figura 2. Planta do sisal



Fonte: Silva et al. [22].

Figura 3. Morfologia da fibra de sisal: (a) fibra composta por células individuais ligadas pela lamela intercelular e (b) detalhe da célula individual

No meio da célula existe o lúmen, um espaço vazio que influencia no desempenho mecânico das fibras. Dessa forma, em compósitos com matriz cimentícia, substâncias agressivas costumam penetrar causando degradações

dos componentes da fibra. Esses compostos podem ainda sofrer cristalização nessa cavidade central e nos demais vazios das fibras, causando enrijecimento desse reforço e sua consequente fragilização [23].

O sisal é uma fibra natural que apresenta várias vantagens, entre elas sua facilidade de cultivo, o fato de ser um material biodegradável que provém de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico. Esses fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, tornam o sisal uma das fibras naturais mais estudadas e utilizadas [24].

Esse tipo de fibra é usado principalmente na indústria naval e agrícola em cordas e fios; e também no artesanato para confeccionar tapetes, redes de pesca, bolsas, sacos e alguns tipos de tecidos. Recentemente tem sido aplicado na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões; e na indústria aeroespacial, esporte e embalagem, constituindo um mercado em expansão [25].

Durante as duas últimas décadas, as fibras de sisal também têm sido usadas como reforço em compósitos à base de cimento e de polímeros, como relatam os trabalhos de Silva et al. [26], Oksman et al. [27], Toledo et al. [28], Savastano et al. [29], entre outros. Tais compósitos são considerados atualmente um dos materiais estruturais mais promissores em tecnologias de engenharia sustentável.

A fibra de sisal apresenta módulo de deformação e resistência à tração em torno de 9-19 GPa, e 344-577 MPa, respectivamente [30]. Com esses valores, o sisal apresenta menor rigidez e maior resistência em comparação com as fibras de vidro, jute e algodão. Dessa forma, a fibra de sisal permite nos compósitos reforçados uma maior absorção de energia, maior tenacidade, maior ductilidade e capacidade de absorver carregamentos após a fissuração. Ditos materiais poderão ser utilizados em estruturas para resistir intensas forças do vento, terremotos, impactos de objetos e em paredes de alvenaria sem reforço do aço.

4. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS INCINERADOS, CINZA DE BAGAÇO-DE-CANA E FIBRA DE SISAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como foi comentado anteriormente, vários investigadores têm desenvolvido pesquisas sobre o uso da fibra de sisal e das cinzas provenientes da queima de resíduo sólido urbano e do bagaço de cana como matéria prima na construção civil. A continuação é apresentada como estes materiais não convencionais influenciaram nas propriedades físicas e mecânicas do concreto e argamassa.

Porosidade e absorção de água

Al-Amoudi et al. [31] fabricaram concretos com substituição, em peso, do cimento pelas cinzas provenientes da incineração do lixo urbano. Os teores de substituição foram 0, 10, 20, 30 e 40 e a relação a/c variou entre 0,35, 0,45, 0,50 e 0,55. As datas dos ensaios foram depois dos 28, 90, 180 e 360 dias. Segundo os resultados obtidos, a porosidade e permeabilidade do concreto de referência foi menor do que o concreto com adição da cinza no período de 50 a 75 dias. Depois desse período, as amostras com cinzas foram menos permeáveis que o concreto padrão em 30 %.

Muller et al. [32] estudaram a microestrutura do concreto usando como agregados as cinzas do resíduo urbano e determinaram as reações que ocorrem com a matriz cimentícia. As cinzas foram coletadas em uma usina de incineração no norte da Alemanha. Ela estava constituída por 80 % de vidro, metais, cerâmica e madeira e 20 % de resíduos orgânicos. Os componentes principais eram silicatos cristalinos, aluminatos e óxidos. A reação do alumínio com a pasta de cimento foi expansiva, dando lugar ao hidróxido de alumínio e provocando a danificação da superfície do concreto. A análise microestrutural das amostras indicou uma clara formação de gel sílico-alcálico que preencheu os poros e espaços vazios do concreto sem exercer pressão sobre o material. Dessa forma, o concreto teve menor absorção de água com relação ao concreto de referência.

Ganesan et al. [33] estudaram os efeitos da aplicação da CBC como material substituto do cimento Portland em concretos. Foram produzidos sete traços com 5 a 30 % de CBC, em volume. O teor a/c ficou em 0,53. Os concretos

tiveram redução na permeabilidade à água e melhor comportamento no ensaio de penetração de cloretos.

Faria et al. [34] investigaram a cinza de bagaço de cana-de-açúcar com o objetivo de fornecer matéria-prima para a fabricação de tijolos de barro através da substituição de argila natural pelas cinzas até 20 %. O tijolo com adição das cinzas foi testado de modo a determinar a densidade, porosidade e absorção de água. Verificou-se que a CBC pode ser utilizada como um material de enchimento na fabricação de tijolos, aumentando assim a possibilidade da sua reutilização de modo seguro e confiável.

Lima et al. [35] tiveram como objetivo analisar o efeito da adição de CBC em blocos de terra comprimida. Dois conjuntos de blocos foram preparados com 6 e 12 % de cimento, além da terra com adição de cinza em proporções de 0, 2, 4 e 8 % em cada um. Foram realizados ensaios de absorção nos blocos. Os resultados mostraram que a adição de CBC não afetou a absorção de água dos blocos feitos com terra e cimento. Dessa forma, concluiu-se que a série produzida com 12 % de cimento Portland e 8 % de CBC, em peso, pode ser utilizada na fabricação de componentes não estruturais de alvenaria, o que comprova a viabilidade técnica desse material.

Metais pesados nos resíduos

Wu et al. [36] avaliaram a substituição das cinzas incineradas na produção de cimento Portland através da difração de raios X, espectrometria de fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados experimentais mostraram que o clínquer de boa qualidade pode ser obtido por aquecimento das misturas em bruto a 1200 °C durante 2 h com substituição da cinza provenientes da incineração dos resíduos sólidos urbanos em um 30 %. Foi observado também que os metais pesados tais como cromo, chumbo, cádmio, zinco e níquel são presos no clínquer e bem fixados pelos produtos de hidratação, e não apresentam um risco de lixiviação para o meio ambiente.

Sales et al. [13] avaliou o uso de CBC em substituição ao agregado miúdo na fabricação de argamassas e concretos por meio da caracterização química, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e lixiviação/solubilização das cinzas. Todas as amostras de CBC apresentaram uma es-

trutura cristalina, permitindo assim a substituição da areia por um material inerte. Vários metais pesados foram encontrados nas cinzas, o que indica a necessidade de restringir seu uso como fertilizante.

Resistência à compressão

A partir do ano 2000, a reutilização de resíduos urbanos como matérias-primas na fabricação de concretos tem sido investigada substancialmente por Lin et al. [37], Singhal et al. [38], Chen et al. [39] Rodriguez et al. [40], entre outros.

Al-Amoudi et al. [31], que avaliaram as cinzas de resíduos sólidos incinerados no concreto substituindo o cimento, obtiveram valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de referência maiores até 180 dias. No entanto, uma reversão dessa tendência foi observada após este período para os concretos com adição da cinza provenientes da queima de resíduo sólido urbano com um aumento de 7 %. Os autores atribuem essa melhoria devido à reação pozolânica que deve ter ocorrido na matriz cimentícia. Dessa forma, o comportamento físico e mecânico do concreto analisado durante o tempo foi otimizado devido a maior formação de silicatos de cálcio hidratados (S-C-H). O melhor desempenho foi observado no concreto com 20 % de substituição do cimento pelo resíduo.

Al-Rawas et al. [41] utilizaram cinzas provenientes da incineração por areia e cimento na produção de concretos. Foram empregados teores de substituição de 0, 10, 20 e 30 % e uma relação a/c constante igual a 0,70. Os resultados mostraram que os exemplares com 20 % de substituição de areia por cinzas apresentaram o maior valor de resistência à compressão aos 28 dias (36,4 MPa), um aumento de 17 % em relação às amostras de referência. O concreto produzido com substituição de 30 % mostrou um aumento pouco significativo em relação ao exemplar com 20 %, o que levou os autores a concluir que, economicamente e tecnicamente, o valor de 20 % é o mais indicado para o traço utilizado.

Ferraris et al. [42] também estudaram o pó proveniente da incineração do resíduo sólido urbano na produção de concretos e argamassas. Como pré-tratamento, a cinza foi aquecida a uma temperatura de 1450 °C e transformada em cinza volante vitrificada (CVV). Esse resíduo foi utilizado como

fíler (<50 μm ou <90 μm), substituindo parte do cimento, e como agregado fino (5-10 mm e 10-20 mm), substituindo parte da areia. Os teores utilizados foram 0, 25, 50, 75 e 100 %, em volume, com relação a/c igual a 0,60 para produção de argamassas e concretos. Os resultados mostraram que o fíler com substituição de até 20 % em peso não afetou a resistência à compressão do concreto depois de 150 dias. Por outro lado, a CVV como agregado fino pôde substituir à areia entre 50-75 %, devido ao fato da coesão entre a superfície do vidro plano e da matriz de cimento não afetar significativamente o comportamento mecânico das amostras de concreto contendo CVV.

Ganesan et al. [33] estudaram os efeitos da aplicação da CBC como material substituto do cimento Portland em concretos. Foram produzidos sete traços com 5 a 30 % de CBC, em volume. Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostraram que o concreto com até 20 % de CBC obtiveram os melhores valores nas três idades analisadas, superando o concreto de referência.

Macedo et al. [43] substituíram o agregado miúdo pela cinza de bagaço de cana em argamassas, no traço 1:3 (em massa) e relação água/cimento de 0,48. Os teores de substituição foram de 0, 3, 5, 8 e 10 %, com cinco corpos-de-prova para cada traço. Pelos resultados do ensaio de resistência à compressão, aos 56 dias, todos os traços com CBC obtiveram resistência superior ao traço controle, o que pode ser atribuído ao efeito físico de preenchimento dos vazios pelos grãos finos da cinza e à ação do aditivo plastificante, presente nos traços com 5, 8 e 10 % de substituição por CBC. Houve um acréscimo de 23 % na resistência à compressão, aos 56 dias, do traço controle em relação ao traço com 10 % de CBC.

Sales et al. [13], como foi citado anteriormente, mostraram que as amostras produzidas com 20 e 30 % de CBC em substituição a areia tiveram valores de resistência à compressão de 56,2 MPa e 58,7 MPa, respectivamente. Tais resultados foram mais elevados que a amostra de referência em 25 %.

Resistência à tração

Sales et al. [13] avaliaram o uso de CBC em substituição ao agregado miúdo na fabricação de argamassas e concretos. A resistência à tração do concreto com as cinzas teve resultados próximos ao concreto de referência. De for-

ma geral, os exemplares com cimento CP II E 32 e 30 % de adição de CBC tiveram melhor comportamento mecânico que as amostras com cimento CP V ARI RS e CP III 40 RS.

A pesquisa realizada por Silva et al. [44] demonstrou as vantagens das fibras de sisal como reforço no concreto. Segundo eles, os elementos compósitos com esse tipo de fibra constitui uma nova classe de materiais sustentáveis para a construção, apresentando elevadas resistências à tração e alta ductilidade. O sisal atua como ponte de transferência dos esforços para a matriz cimentícia, diminuindo a propagação de fissuras, controlando suas aberturas e podendo retardar a ruptura dos elementos de concreto.

Nessa pesquisa foi estudada a resistência à tração e à flexão de corpos-de-prova de concreto com medidas de $400 \times 50 \times 12$ mm (comprimento \times largura \times espessura) e adição de 10 % de fibras em volume de concreto. A formação e abertura das fissuras foram estudadas utilizando imagens de alta resolução. Os resultados mostraram que a resistência à tração máxima foi de 12 MPa e o módulo de elasticidade foi de 34,17 GPa, valores superiores em 1,53 % em relação aos corpos-de-prova de referência. A elevada capacidade de absorção de energia do sistema se refletiu nos elevados valores de tenacidade de 45 e 22 kJ/m² para tração e flexão, respectivamente. Dessa forma foi demonstrado o papel das fibras, que foram capazes de unir as faces das fissuras, conferir certo carregamento após a fissuração e aumentar a energia absorvida, incrementando a tenacidade e ductilidade dos compósitos.

Durabilidade da fibra de sisal nos concretos e argamassas

Por outro lado, a principal desvantagem das fibras de sisal é a degradação da celulose, seu principal constituinte, na presença do meio alcalino, provocando a redução da resistência mecânica e da tenacidade dos compósitos. Tal fragilização pode ser associada principalmente com a mineralização das fibras devido à migração de produtos de hidratação, especialmente de hidróxido de cálcio, para os vazios da fibra.

Sobre esse aspecto de deterioração muitas pesquisas tiveram como objetivo estudar e melhorar a durabilidade da fibra vegetal em ambiente agressivo.

Toledo et al. [45] desenvolveram um programa experimental para avaliar a durabilidade do sisal exposto à soluções alcalinas de cálcio e hidróxido de sódio na argamassa. Os corpos-de-prova reforçados foram expostos ao ar livre e aos ciclos controlados de molhagem e secagem. O desempenho de durabilidade dos compósitos foi avaliado utilizando os resultados dos ensaios de flexão. Com base nos resultados pode-se concluir que as fibras vegetais de sisal são altamente sensíveis à alcalinidade da matriz de cimento. As fibras imersas em solução de hidróxido de cálcio com um pH de 12 durante 300 dias perderam completamente a sua flexibilidade. Isso pode ser atribuído, principalmente, à cristalização da cal no lúmen, nas paredes e vazios da fibra. A extensão do ataque alcalino foi menor quando as fibras foram acondicionadas em solução de hidróxido de sódio com pH 11.

A partir dessa pesquisa, Toledo et al. [28] estudaram diversos tratamentos para melhorar o desempenho e a durabilidade do sisal como reforço no concreto. Eles incluem alterações na matriz, como a carbonatação da matriz através de cura inicial dos compósitos em um ambiente rico em CO_2 , substituição de uma parte do cimento Portland por sílica de fumo e escória de alto forno, imersão das fibras em sílica de fumos antes da sua incorporação no cimento Portland, e por último, a combinação da imersão das fibras nas sílicas e do cimento substituído por adições. As amostras foram expostas a ciclos de umedecimento e secagem e os resultados de durabilidade foram avaliados através de ensaios de flexão e observações da matriz em um microscópico eletrônico de varredura. Com base nos resultados, pôde-se concluir que em longo prazo a fragilização das fibras de sisal incorporadas na argamassa foi marcadamente reduzida com os tratamentos realizados. O ataque alcalino e o transporte dos produtos de hidratação do cimento para os vazios da fibra, mecanismos fundamentais que produzem a degradação, foram minimizados. Isso foi possível tornando a matriz menos alcalina com um pH baixo e menor formação de hidróxido de cálcio.

Em anos anteriores, Bergström et al. [46] tinham usado a técnica de selar os poros da matriz misturando cera e zinco na argamassa fresca e impregnando as fibras com enxofre. Os resultados obtidos foram promissores devido à redução da absorção de água e da porosidade, retardando, assim, a fragilização das fibras.

A redução da alcalinidade da matriz através da utilização de materiais pozolânicos foi objeto de estudo de vários autores, como Bergström et al. [46], Berhane [47] e Lima et al. [48]. O cimento era modificado com adições de sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, pedra-pomes e diatomita. Foram observadas melhorias da durabilidade das fibras nos compostos produto da presença do meio alcalino menos agressivo.

Em estudos mais atuais, Silva et al. [22] produziram um compósito reforçado com sisal que apresentou durabilidade e elevadas resistências à compressão e à tração. Foram empregadas fibras longas para a fabricação de telhas delgadas. Foram produzidos dois tipos de matrizes reforçadas com sisal: na primeira o cimento Portland foi substituído por 30% de metacaulim (MK) e 20 % de argila de tijolos calcinada e esmagada, e a segunda foi feita com cimento Portland sem adições. Através da substituição de 50 % de cimento pelas argilas calcinadas foi possível desenvolver uma matriz livre de hidróxido de cálcio (CH). O objetivo foi avaliar a durabilidade do sisal nos dois tipos de argamassas por meio de envelhecimento acelerado usando o teste de imersão em água quente. Os resultados mostraram que os elementos livres de hidróxidos de cálcio tiveram uma resistência à tração duas vezes superior que os compostos com cimento Portland sem adição. Por outro lado, os compósitos livres de CH submetidos a um envelhecimento acelerado, apresentaram resistência máxima à flexão 3,8 vezes maior e uma tenacidade 42,4 vezes maior do que o compósito com cimento Portland, mostrando, assim, a durabilidade da fibra nesse tipo de matriz.

Como se pôde observar, as pesquisas que tratam sobre o melhoramento da durabilidade da fibra de sisal apresentam duas vertentes. A primeira consiste em modificar a composição da matriz a fim de reduzir ou eliminar os compostos alcalinos. Para isso são usadas adições pozolânicas para precipitar o hidróxido de cálcio da matriz, como o silicato de cálcio hidratado, ou os tratamentos com uma concentração mais elevada de CO_2 para precipitar o hidróxido de cálcio como carbonato de cálcio. Essas modificações é uma forma eficaz para garantir a durabilidade dos concretos, mas a dosagem dos materiais de cimento deve ser cuidadosamente analisada a fim de obter um desempenho semelhante ou superior aos compósitos preparados apenas com cimento Portland comum. A segunda maneira de melhorar a durabilidade dos materiais compósitos é modificar a superfície das fibras com tratamentos químicos ou físicos para aumentar a sua estabilidade na matriz cimentícia.

Alguns desses tratamentos implicam a utilização de reagentes químicos e pode ser complexa, tornando os processos industriais mais caros.

5. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL E DAS CINZAS DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO INCINERADO E BAGAÇO-DE-CANA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil tem apresentado um crescimento significativo no Brasil nos últimos anos. A volta da classe C ao mercado consumidor de imóveis e o empenho da engenharia nacional em se fortalecer no mercado são alguns dos motivos que estão alavancando esta indústria. É por essa razão que o correto uso dos materiais alternativos, como cinzas residuais e fibra de sisal no concreto será certamente uma solução eficiente, objetiva e economicamente viável.

A seguir são apresentados alguns impactos previstos no âmbito científico, tecnológico, social, econômico e ambiental. O objetivo é comprovar a relevância dos estudos que já foram realizados e os futuros a serem investigados, que podem contribuir para o aprimoramento da tecnologia de uso das cinzas residuais e fibra de sisal no concreto.

Impactos científicos e tecnológicos

É essencial a produção de conhecimento científico relacionado a novos materiais alternativos na construção civil para alcançar uma efetiva contribuição e transferência tecnológica. Assim, devem ser abarcados desde aspectos macroestruturais até aos relacionados à durabilidade e a comparação com outros materiais convencionais.

Cinza originada do resíduo sólido urbano incinerado

Uma das grandes vantagens da cinza do resíduo sólido é constituir um material fino que pode ser utilizado como fíler no concreto. Dessa forma, os vazios deixados pelos grãos de cimento são preenchidos pelo material fino contribuindo para um adequado empacotamento do concreto e melhorando as propriedades mecânicas. Por outro lado, pode existir reação pozolânica no concreto produto da presença de sílica no resíduo. É por essa razão que o material tem potencial para atuar na substituição de cimento contribuindo para a sustentabilidade da construção civil.

Cinza das usinas sucroalcooleiras

A cinza de bagaço de cana (CBC) é predominantemente siliciosa, a qual no estado amorfo e com finura adequada pode ser utilizada como adição mineral em substituição aos agregados em matrizes cimentícias. Dessa forma, podem ser melhoradas as características do concreto provocando um ganho da resistência a compressão nas unidades estruturais.

Os estudos que utilizam cinzas de resíduos agroindustriais em substituição ao agregado miúdo são menos correntes do que os que pesquisam a viabilidade das cinzas em substituição ao cimento Portland. Portanto, a CBC tem se mostrado um subproduto viável para aplicação em materiais de construção, desde que sejam observadas suas características intrínsecas, como alto teor de sílica em forma de quartzo, um dos principais elementos presentes na areia natural [49].

Fibra de sisal

A introdução de fibras como reforço no concreto melhora o desempenho mecânico do material. Dessa maneira, a função das fibras existentes no concreto é de reforço, permitindo as transferências dos esforços à tração, diminuindo a propagação de fissuras, controlando suas aberturas e retardando a ruptura das unidades.

Impactos ambientais

A reciclagem é fundamental para diminuir os impactos ambientais no planeta. Ao reciclar são economizados recursos naturais não renováveis e energia, são gerados empregos diretos ou indiretos e é evitado o depósito de materiais tóxicos e/ou de difícil decomposição no ambiente.

Resíduo sólido urbano

Atualmente, o lixo urbano é considerado poluente e quando acumulado pode tornar-se altamente perigoso. Assim, caso não haja um mínimo de cuidado com o armazenamento desses resíduos cria-se um ambiente propício ao desenvolvimento de micro-organismos que podem ser agentes causadores de doenças.

Os resíduos urbanos devem ser depositados em aterros sanitários, seguindo todas as normas de saneamento básico e tratamento de lixo. Entretanto, a cada dia que passa, a disponibilidade de espaço para os aterros sanitários é menor pela grande área necessária. Isso se constitui em um grande problema porque implica numa maior distância dos centros urbanos, aumentando consideravelmente o custo de transporte.

Por outro lado, a preocupação em reduzir o consumo de cimento justifica-se não somente por questões ambientais, técnicas ou econômicas, mas também por questões de sustentabilidade e viabilidade do negócio do cimento. No Brasil, a expectativa de massivos investimentos devido a grandes eventos esportivos e programas governamentais de infraestrutura e habitação, demandará um aumento do consumo de cimento. A abertura de novas unidades fabris exige não somente grandes investimentos em instalações e equipamentos, mas também a concessão e exploração de novas reservas de matérias-primas, cada vez mais difíceis e onerosas devido às crescentes exigências ambientais.

Cinza residual das usinas sucroalcooleiras

Segundo Lima [49], uma construção com baixo impacto para o meio ambiente que fomenta o crescimento das cidades apresenta-se como uma tendência que vem se consolidando como importante prática de sustentabilidade. Com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo pretende-se diminuir o uso de areia retirada dos rios, e também reduzir o volume desses resíduos destinados inadequadamente.

Impactos econômicos e sociais

Considerando-se os fatores que incidem diretamente na composição dos custos dos materiais de construção (transporte, combustível e produção), os quais elevam consideravelmente o valor unitário da construção, a utilização de materiais alternativos produzidos por meio de resíduos disponíveis em grande quantidade e diversidade mostra-se uma alternativa econômica no mercado da construção.

Além disso, com a proposição de um novo valor agregado ao lixo orgânico, cinza do bagaço e fibra de sisal pode-se gerar a expectativa de novos postos de trabalho e a criação de um novo nicho econômico para esses resíduos.

CONCLUSÕES

Após a realização do levantamento bibliográfico sobre o tema pode-se concluir que são cada vez mais as pesquisas que estudam materiais alternativos como um novo caminho para a sustentabilidade a nível mundial. Lamentavelmente ainda é escassa a integração do setor industrial (as empresas e o mercado) com o setor acadêmico (a universidade e os institutos de pesquisa), constituindo o principal problema no Brasil. Para isso é necessário a disposição por ambas as partes, assim, as empresas devem procurar as universidades para desenvolver certo tipo de tecnologia e por outra parte, a instituição universitária deve buscar mecanismos para garantir sua integração à sociedade como um todo e também com o mundo corporativo.

De forma geral, entre os desafios para o desenvolvimento de construções mais sustentáveis existe a necessidade da aliciação de todos os agentes envolvidos e o aumento de investimentos em pesquisas. Merece destaque a adoção de regulamentações, a ampla disseminação de novos paradigmas nos centros de formação técnica e a disponibilização de recursos para os trabalhos científicos.

Por outro lado, o concreto tornou-se o alvo de grande volume de estudos e pesquisas devido a sua facilidade de produção, liberdade na escolha da forma e relativo baixo custo comparado com outros materiais estruturais. Aos materiais básicos gradualmente foram adicionados outros, como as adições minerais, aditivos, fibras e materiais especiais. A incorporação de resíduos de diversas origens também tem sido amplamente estudada. O comportamento do concreto nas suas diversas fases de vida é avaliado tanto do ponto de vista estrutural macroscópico, como do ponto de vista microscópico. Todas estas investigações procuram desvendar os mistérios que se escondem atrás do comportamento do cimento Portland e dos produtos baseados nele, e podem ser sintetizadas sob o nome de “tecnologia do cimento e do concreto”.

Como pode-se notar, todas as pesquisas referenciadas no artigo mostraram a viabilidade da utilização da fibra de sisal e das cinzas residuais para a fabricação de concretos e argamassas. Dessa forma a fibra vegetal mostra potencial significativo como alternativa ecológica aos reforços convencionais, assim como as cinzas residuais, as quais apresentam viabilidade

expressiva na substituição de cimento e areia na produção de concretos. Os benefícios do uso desses materiais alternativos podem-se resumir em três grandes vantagens como: uso de matéria prima de custo zero, conservação de recursos naturais e melhorias no comportamento mecânico do concreto.

REFERÊNCIAS

- [1] C. F. Fioriti and J. L. Akasaki, "Fabricação de Blocos Estruturais de Concreto com Resíduos de Borracha de Pneus", *Holos Environment*, vol. 4, n° 2, pp. 145-156, 2007.
- [2] V. M. Zanta and C. F. A. Ferreira, "Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos", *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte*, vol. 1, 2003, pp. 1-16.
- [3] M. L. I. Xiang, S. Hu, S. L. Sun, S. Su, P. S. Li, and X.X. Sun, "Characterization of Solid Residues from Municipal Solid Waste Incinerator", *Fuel*, vol. 83, n° 10, pp. 1397-1405, July 2004.
- [4] M. Gori, B. Bergfeldt, J. Reichelt, and Sirini P, "Effect of Natural Ageing on Volume Stability of Msw and Wood Waste Incineration Residues", *Waste Management*, n° 0, 2012.
- [5] C. H. Jung, T. Matsuto, N. Tanaka, and T. Okada, "Metal Distribution in Incineration Residues of Municipal Solid Waste (Msw) in Japan", *Waste Management*, vol. 24, n° 4, 2004, pp. 381-391. DOI: 10.1016/S0956-053X(03)00137-5
- [6] H. Cheng and Y. Hu, "Municipal Solid Waste (Msw) as a Renewable Source of Energy: Current and Future Practices in China", *Bioresource Technology*, vol. 101, n° 11, pp. 3816-3824, 2010.
- [7] T. Van Gerven, D. Geysen, L. Stoffels, M. Jaspers, G. Wauters, and C. Vandecasteele, "Management of Incinerator Residues in Flanders (Belgium) and in Neighbouring Countries. A Comparison", *Waste Management*, vol. 25, n° 1, pp. 75-87, 2005. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.09.002
- [8] F. A. M. Lino and K. A. R. Ismail, "Analysis of the Potential of Municipal Solid Waste in Brazil", *Composites Science and Technology*, vol. 4, n° 0, pp. 105-113, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.040
- [9] C. Ferreira, A. Ribeiro, and L. Ottosen, "Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 96, n° 2-3, pp. 201-216, Jan. 2003. DOI: 10.1016/S0304-3894(02)00201-7
- [10] P. J. He, H. Zhang, C. G. Zhang, and D. J. Lee, "Characteristics of Air Pollution Control Residues of Msw Incineration Plant in Shanghai", *Journal*

- of *Hazardous Materials*, vol. 116, n° 3, pp. 229-237, Dec. 2004. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.09.009
- [11] H. Zhang, P. J. He, and L. M. Shao, "Fate of Heavy Metals During Municipal Solid Waste Incineration in Shanghai", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 156, n° 1-3, pp. 365-373, 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.025
- [12] R. Cesnik, *Melhoramento da Cana-de-Açúcar: Marco Sucro-Alcooleiro No Brasil*. Brasília: EMBRAPA: Informação Tecnológica, 2004.
- [13] A. Sales and S. A. Lima, "Use of Brazilian Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Sand Replacement", *Waste Management*, vol. 30, n° 6, pp. 1114-1122, June 2010.
- [14] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. M. R. Fairbairn, "Pozzolanic Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars", *Cement & Concrete Composites*, vol. 30, n° 5, pp. 410-418, 2008.
- [15] U. Rodríguez Zúñiga, C. Farinas, V. Neto, S. Couri, and S. Crestana, "Produção de celulases por *aspergillus niger* por fermentação em estado sólido", *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (Brasília), vol. 46, n° 8, pp. 912-919, 2011.
- [16] FAPESP, *Cardápio Energético*, 2009.
- [17] G. C. Cordeiro, *Utilização das cinzas ultrafinas do bagaço de cana de açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos*, tese doutorado Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- [18] M. W. de Oliveira MW, Freire FM, Macêdo GAR, and Ferreira JJ, "Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar", *Informe Agropecuário* (Belo Horizonte), vol. 28, n° 239, pp. 30-43, 2007.
- [19] II. Soto and M. A. Ramalho, "Blocks of Concrete Reinforced with Natural Sisal Fibres for Use in Masonry", in *8th Rilem International Symposium On Fibre Reinforced Concrete: Challenges And Opportunities-Befib*, Guimarães. Proceedings Eight RILEM International Symposium-BEFIB, Guimarães", Portugal, 2012.
- [20] Y. Li, Y. M. Mai, and L. Ye, "Sisal Fibre and Its Composites: A Review of Recent Developments", *Composites Science and Technology*, vol. 60, n° 11, pp. 2037-2055, 2000.
- [21] M. S. Picanço, *Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Curauá*, 2005.
- [22] F. D. Silva, R. D. Toledo, J. D. Melo, and E. D. R. Fairbairn, "Physical and Mechanical Properties of Durable Sisal Fiber-Cement Composites", *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 5, pp. 777-785, May 2010.

- [23] K. Persson, *Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties*, Lund University, Department of Mechanics and Materials, 2000.
- [24] J. M. L. Reis, "Sisal Fiber Polymer Mortar Composites: Introductory Fracture Mechanics Approach", *Non Destructive Techniques for Assessment of Concrete*, vol. 37, n° 0, pp. 177-180, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.088
- [25] E. C. Ramires, J. D. Megiatto, C. Gardrat, A. Castellan, and E. Frollini, "Biobased Composites from Glyoxal-Phenolic Resins and Sisal Fibers", *Bioresource Technology*, vol. 101, n° 6, pp. 1998-2006, Marh 2010.
- [26] F. Silva and R. Toledo Filho, "Sisal Fibre Reinforcement of Durable Thin-Walled Structures-a New Perspective", in *CBM-CI International Workshop*, 2008.
- [27] K. Oksman, L. Wallström, L. A. Berglund, and R. D. T. Filho, "Morphology and Mechanical Properties of Unidirectional Sisal - Epoxy Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 84, n° 13, pp. 2358-2365, 2002.
- [28] E. D. Toledo, K. Ghavami, G. L. England, and K. Scrivener, "Development of Vegetable Fibre-Mortar Composites of Improved Durability", *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, n° 2, pp. 185-196, Feb. 2003.
- [29] H. Savastano, S. F. Santos, M. Radonjic, and W. O. Soboyejo, "Fracture and Fatigue of Natural Fiber-Reinforced Cementitious Composites", *Cement & Concrete Composites*, vol. 31, n° 4, pp. 232-243, April 2009.
- [30] J. L. Thomason, J. Carruthers J Kelly, and G. Johnson, "Fibre Cross-Section Determination and Variability in Sisal and Flax and Its Effects on Fibre Performance Characterisation", *Composites Science and Technology*, vol. 71, n° 7, pp. 1008-1015, May 2011.
- [31] O. S. B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, and I. M. Asi, "Performance and Correlation of the Properties of Fly Ash Cement Concrete", *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 18, n° 2; 1996.
- [32] U. Muller and K. Rubner, "The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 8, pp. 1434-1443, Aug. 2006.
- [33] K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, "Evaluation of Bagasse Ash as Supplementary Cementitious Material", *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, n° 6, pp. 515-524, July 2007.
- [34] K. C. P. Faria, R. F. Gurgel, and Holanda JNF, "Recycling of Sugarcane Bagasse Ash Waste in the Production of Clay Bricks", *Journal of Environmental Management*, vol. 101, pp. 7-12, June 2012.
- [35] S. A. Lima, H. Varum, A. Sales, and V. F. Neto, "Analysis of the Mechanical

- Properties of Compressed Earth Block Masonry Using the Sugarcane Bagasse Ash,” *Cons. and Building Materials*, vol. 35, pp. 829-837, Oct. 2012.
- [36] K. Wu, H. S. Shi, D. De Schutter, X. L. Guo, and G. Ye, “Preparation of Alinite Cement from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, n° 3, pp. 322-327, Marh 2012.
- [37] K. L. Lin, K. S. Wang, T. Y. Lee, and B. Y. Tzeng, “The Hydration Characteristics of Mswi Fly Ash Slag Present in C3s”, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 7, pp. 957-964, July 2003.
- [38] A. Singhal, V. K. Tewari, and Prakash S, “Utilization of Treated Spent Liquor Sludge with Fly Ash in Cement and Concrete”, *Building and Environment*, vol. 43, n° 6, pp. 991-998, June 2008.
- [39] H. X. Chen, X. W. Ma, and H. J. Dai, “Reuse of Water Purification Sludge as Raw Material in Cement Production”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 32, n° 6, pp. 436-439, July 2010.
- [40] N. H. Rodriguez, S. Martinez-Ramirez, M. T. Blanco-Varela, M. Guillem, J. Puig, E. Larrotcha, and J. Flores, “Evaluation of Spray-Dried Sludge from Drinking Water Treatment Plants as a Prime Material for Clinker Manufacture”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 33, n° 2, pp. 267-275, Feb. 2011.
- [41] A. A. Al-Rawas, A. W. Hago, R. Taha, and K. Al-Kharousi, “Use of Incinerator Ash as a Replacement for Cement and Sand in Cement Mortars”, *Building and Environment*, vol. 40, n° 9, pp. 1261-1266, Sep. 2005.
- [42] M. Ferraris, M. Salvo, A. Ventrella, L. Buzzi, and M. Veglia, “Use of Vitrified Mswi Bottom Ashes for Concrete Production”, *Waste Management*, vol. 29, n° 3, pp. 1041-1047, Mar. 2009.
- [43] P. C. Macedo, V. N. Castaldelli, J. L. Akasaki, J. L.P. Melges, C. F. Fioriti, M. M. Tashima, and J. J. P. Bernabeu, “Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil”, in *51º Congresso Brasileiro do Concreto*, IBRACON, Curitiba. Anais: 51º IBRACON, Curitiba, Brasil, 2009.
- [44] F. D. Silva, B. Mobasher and R. D. Toledo, “Cracking Mechanisms in Durable Sisal Fiber Reinforced Cement Composites”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 31, n° 10, pp. 721-730, Nov. 2009.
- [45] R. D. Toledo, K. Scrivener, G. L. England, and K. Ghavami, “Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut Fibres in Cement Mortar Composites”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 22, n° 2, pp. 127-143, Apr. 2000.
- [46] S. G. Bergström and H. E. Gram, “Durability of Alkali-Sensitive Fibres in Concrete”, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 6, n° 2, pp. 75-80, 1984.

- [47] Z. Berhane, "Performance of Natural Fiber-Reinforced Mortar Roofing Tiles", *Materials and Structures*, vol. 27, n° 170, pp. 347-352, July 1994.
- [48] P. R. L. Lima, R. D. T. Filho, K. J. Nagahama, and E. M. Fairbairn, "Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 11, n° 6, pp. 644-651, 2007.
- [49] S. A. Lima, *Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana*, 2011.