



**LÍVIA DE MELO SALGADO**

**BLOCOS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO PRODUZIDOS COM  
REJEITO DE MINERAÇÃO E CINZAS DE  
BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**LÍVIA DE MELO SALGADO**

**BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO PRODUZIDOS  
COM REJEITO DE MINERAÇÃO E CINZAS DE BAGAÇO DE CANA  
DE AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
**Orientador**

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
**Coorientador**

**LAVRAS – MG  
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Salgado, Lívia de Melo.

Blocos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito  
de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar / Lívia de Melo  
Salgado. - 2018.

88 p. : il.

Orientador(a): Lourival Marin Mendes.

Coorientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Pavimentos intertravados. 2. Compósitos Material  
alternativo.. 3. Resíduo agroindustrial. I. Mendes, Lourival Marin.  
II. Mendes, Rafael Farinassi. III. Título.

**LÍVIA DE MELO SALGADO**

**BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO PRODUZIDOS  
COM REJEITO DE MINERAÇÃO E CINZAS DE BAGAÇO DE CANA  
DE AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de junho de 2018.

Profa. Dra. Luciana Barbosa de Abreu	UFLA
Profa. Dra. Margarete Marin Volpato	EPAMIG

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
**Orientador**

**LAVRAS – MG  
2018**

*Á Deus por me permitir vivenciar mais essa experiência.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir concluir, com muita sabedoria, mais um ciclo de aprendizado.

A minha família que sempre esteve ao meu lado, em especial a minha mãe e avó, que nunca deixaram que eu desistisse desse propósito e sempre acreditaram em minha capacidade.

Ao Manoel, agora meu noivo, por ter sido “mão de obra” e companheiro durante todo esse período.

Ao meu orientador professor Lourival Marin Mendes, por ter aberto as portas da UEPAM para mim com todo o carinho de sempre.

Ao Rafael Farinassi Mendes, meu coorientador, que muitas vezes foi mais do que isso. Obrigada por toda a orientação, dedicação e cuidado com o meu trabalho e minhas “barreiras” de arquiteta.

Aos grandes companheiros da UEPAM, Nayra, Carol, Adriele, Alan e Tony. A vocês devo toda a minha gratidão! Obrigada pelas inúmeras ajudas, pela paciência e empenho ao meu trabalho, que no fim é de todos nós.

À Tamires e Camila, que se tornaram amigas e exemplos de persistência e determinação.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, juntamente com seus professores, técnicos e funcionários, por me propiciarem momentos de aprendizado agregando a minha evolução espiritual e profissional.

Todos, de alguma maneira, foram essenciais para que eu concluísse esse trabalho.

## RESUMO

O rejeito de mineração, proveniente do beneficiamento de minério, é considerado um problema para as empresas mineradoras, sendo o tratamento, armazenamento e o gerenciamento desses resíduos sólidos são fatores que demandam atenção. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da utilização de rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana (CBC) sobre as propriedades de blocos de concreto para pavimentação (*Pavers*). Os materiais componentes da mistura (cimento, areia média, rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar) foram caracterizados quanto às propriedades físicas, morfológicas e granulométricas. O traço utilizado para o tratamento controle foi de 1:2, 98:3, 49:2, 21 (cimento: areia: pó de pedra: brita). Foi avaliada a eficiência de substituição de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do agregado miúdo, a areia, pelo rejeito de mineração, sendo também avaliado o efeito da substituição de 1% cimento por cinzas do bagaço de cana de açúcar. Os pavers foram produzidos em uma máquina de vibro compressão e passaram por processo de cura por 28 dias em temperatura ambiente, sendo posteriormente avaliados quanto suas propriedades físicas e mecânicas por meio de ensaios de densidade, absorção de água (NBR 9781), resistência à compressão (NBR 9781) e microscopia eletrônica de varredura antes e após o envelhecimento acelerado (NBR 13554). Os resultados dos testes realizados comprovam a viabilidade de substituição da areia pelo rejeito de mineração totalmente na produção dos pisos, o mesmo não podendo ser considerado para o uso das cinzas de bagaço de cana de açúcar, que comprometeram as propriedades avaliadas.

**Palavras-chave:** Pavimentos intertravados. Compósitos. Material alternativo. Resíduo agroindustrial.

## ABSTRACT

Mining waste from ore beneficiation is considered a problem for mining companies, although it is not harmful, the treatment, storage and management of this solid waste are factors that demand attention. The objective of this work was to evaluate the effect of the use of mining tailings and cane bagasse ash (CBC) on the properties of concrete pavers (*Pavers*). The composite materials of the mixture (cement, medium sand, mining tailings and sugarcane bagasse ash) were characterized as the physical, morphological and granulometric properties. The trait used for the control treatment was 1: 2.98: 3.49: 2.21 (cement: sand: stone powder: gravel). The efficiency of the replacement of 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of the sand aggregate by the mining tailings was evaluated, and the effect of replacing 1% cement with ash sugar cane bagasse. The pavers were produced in a vibro compression machine and were cured for 28 days at room temperature, after which their physical and mechanical properties were evaluated by means of density, water absorption (NBR 9781), compressive strength (NBR 9781) and scanning electron microscopy before and after accelerated aging (NBR 13554). The results of the tests carried out prove the feasibility of replacing 100% of the sand by the mining tailings in the production of the floors, which can not be considered for the use of sugarcane bagasse ashes, which compromised the evaluated properties.

**Key-words:** Interlocking floors. Composites. Alternative material. Agroindustrial waste.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Via Ápia que ligava Roma ao sul da Itália.....	18
Figura 2	Rua do Porto, Piracicaba – SP.....	19
Figura 3	Ruas de Itajaí – SC.....	19
Figura 4	Rua XV de Novembro, Blumenau – SC.....	20
Figura 5	Diversas maneiras de se utilizar os <i>pavers</i> .....	22
Figura 6	Tipologias de blocos de concreto intertravados segundo a ABCP.....	23
Figura 7	Tipologias de blocos de concreto intertravados segundo a ABCP.....	24
Figura 8	Seção típica de um pavimento intertravado.....	25
Figura 9	Arranjo de assentamento dos <i>pavers</i> tipo espinha de peixe 45°.....	26
Figura 10	Arranjo de assentamento dos <i>pavers</i> tipo espinha de peixe 90°.....	26
Figura 11	Arranjo de assentamento dos <i>pavers</i> tipo fileira.....	27
Figura 12	Arranjo de assentamento dos <i>pavers</i> tipo trama.....	27
Figura 13	Barragem de rejeito de mineração.....	38
Figura 14	Rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG.....	39

### SEGUNDA PARTE

Figura 1	Processo de fabricação dos blocos <i>pavers</i> .....	62
Figura 2	Difratograma da amostra de CBC.....	65
Figura 3	Porcentagem de rejeito de mineração retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.....	66
Figura 4	Porcentagem de cinzas de bagaço de cana retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.....	66
Figura 5	Porcentagem da areia retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.....	67
Figura 6	Zonas utilizáveis e zonas ótimas, segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009).....	68
Figura 7	Efeito da porcentagem de resíduo de mineração sobre a hidratação do cimento na produção dos <i>pavers</i> .....	69
Figura 8	Índice de hidratação em função da porcentagem de rejeito de mineração utilizado para a produção dos <i>pavers</i> .....	70
Figura 9	Resistência à compressão no ensaio de pozolanicidade.....	71
Figura 10	Efeito da utilização da cinza de bagaço de cana sobre a densidade dos <i>pavers</i> .....	73
Figura 11	Efeito da utilização de resíduo de mineração sobre a densidade dos <i>pavers</i> .....	75
Figura 12	Micrografias dos tratamentos sem resíduo de mineração.	76

Figura 13	Micrografias dos tratamentos com substituição total da areia por resíduo de mineração.....	76
Figura 14	Absorção de água dos paver sem função da utilização de cinzas de bagaço de cana.....	77
Figura 15	Microscopias dos tratamentos com 0% de RM e 1% de CBC com cura de 28 dias (A) e após o envelhecimento acelerado (B).....	78
Figura 16	Absorção de água dos pavers em função da porcentagem de substituição da areia por resíduo de mineração.....	79
Figura 17	Tratamentos com 100% de RM e 1% de CBC com cura de 28 dias e após o envelhecimento acelerado.....	80
Figura 18	Valores médios de compressão dos pavers em função da utilização de cinzas de bagaço de cana.....	81
Figura 19	Valores médios de compressão dos pavers em função da utilização de diferentes porcentagens de substituição da areia por resíduo de mineração.....	83
Figura 20	Microscopia dos tratamentos com 100% de RM com envelhecimento acelerado.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.....	60
Tabela 2	Traço usado na confecção dos pavers.....	61
Tabela 3	Propriedades físico-químicas do rejeito de mineração.....	64

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	12
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1	<b>Pavimentos intertravados</b> .....	17
3.1.1	Características do pavimento intertravado com peças de concreto ( <i>pavers</i> ).....	21
3.1.2	Normas técnicas nacionais e internacionais sobre pavimentos intertravados.....	29
3.1.3	Processo de fabricação dos <i>pavers</i> .....	31
3.2	<b>Minérios de ferro</b> .....	35
3.2.1	Extração de minérios e geração de resíduos em Minas Gerais.....	35
3.2.2	As barragens de contenção de rejeitos de mineração e o acidente de Mariana.....	37
3.3	<b>Cinzas de bagaço de cana de açúcar</b> .....	40
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43
	<b>SEGUNDA PARTE – ATIGOS</b> .....	52
	<b>ARTIGO 1 - POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO E CINZAS DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO</b> .....	53
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	56
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	58
2.1	Obtenção e caracterização dos materiais.....	58
2.2	Produção e avaliação dos <i>pavers</i> .....	60
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	64
3.1	Caracterização da matéria prima utilizada na produção dos <i>pavers</i> .....	64
3.2	Caracterização física e mecânica dos <i>pavers</i> .....	72
4	<b>CONCLUSÃO</b> .....	85
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86

**PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora no Brasil é conhecida desde o século XVII quando grupos de origem portuguesa ou mista de indígenas e portugueses, denominados “Bandeirantes”, adentravam o sertão brasileiro em busca de indígenas para serem escravizados e de metais preciosos, como ouro, prata, cobre e pedras preciosas, como diamantes e esmeraldas.

Desde o período colonial até os dias atuais, a mineração tem grande importância para o setor financeiro e econômico do país. Segundo o Portal Brasil (2017), em 2016 o país exportou cerca de US\$ 36,6 bilhões em bens minerais, acometendo 20% do total das exportações da balança comercial.

Porém, para que se obtenha o minério e o comercialize, é necessário que estes sejam extraídos de solos e de rochas que os contenham e passem por processos de beneficiamento, onde são gerados rejeitos inertes ou não, que são depositados no meio ambiente, acarretando danos, como a destruição de paisagens, contaminação de solos, comprometimento da fauna e da flora local e prejuízos à população que está diretamente relacionada com a atividade mineradora, como a transferência destas para outras áreas.

Outro resíduo resultante de indústrias é a cinza de bagaço de cana de açúcar. Calcula-se que a produção de bagaço de cana de açúcar nas indústrias de álcool e açúcar no Brasil seja de aproximadamente 1.200.000 ton/ano, em que a quantidade de cinzas gerada corresponde à cerca de 5% em peso em relação a massa inicial do bagaço (BORLINI et al. 2006). As cinzas, provenientes da queima do bagaço de cana para a produção de vapor são também um fator preocupante para a indústria.

A busca por projetos que diminuam os impactos provenientes do desenvolvimento industrial e o consumo exacerbado de recursos naturais é algo muito presente na sociedade atual, que aliada às indústrias buscam

possibilidades mais viáveis economicamente e ambientalmente para o descarte de rejeitos.

Uma alternativa praticável para o descarte adequado dos rejeitos é utilizá-lo como matéria prima para a fabricação de outros produtos, como os compósitos cimentícios, aliando o uso de um material sem valor econômico para a indústria e solucionando o problema do grande volume desse rejeito que é disposto no meio ambiente.

Pesquisas utilizando cinzas de bagaço de cana de açúcar em matrizes cimentícias já vêm sendo desenvolvidas e apresentando resultados satisfatórios, por ser considerado um material pozolânico (apresentam altos teores de sílica) e por apresentar granulometria similar à do cimento e da areia, sendo capaz de preencher espaços vazios, diminuindo a porosidade do material.

O setor da construção civil é uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais e segundo Fecomercio (2010), cerca de 40% a 75% dos recursos naturais existentes no mundo são consumidos por este setor.

Os compósitos cimentícios, produtos que podem ser concebidos utilizando resíduos agroindustriais, são boas opções para substituírem os produtos tradicionais utilizados na construção civil, como blocos de vedação, estruturais, para pavimentação, telhas e painéis cimento madeira.

A pavimentação utilizando blocos de concreto intertravados (denominado como *pavers*) apresenta inúmeras vantagens, podendo citar o baixo custo de produção e manutenção, uso de mão de obra não especializada e os diferentes formatos e cores que permitem que o piso assumam características singulares.

Diante dos fatos sobre a degradação causada ao meio ambiente pela atividade mineradora e da geração de rejeitos desse setor, o presente trabalho buscou aliar o uso desse material como matéria prima para confecção de blocos

de concreto destinados a pavimentação intertravada em associação com cinzas de bagaço de cana de açúcar.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho foi realizado com o objetivo de produzir blocos de concreto para pavimentação com rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar.

### **2.2 Objetivos específicos**

Especificamente, os objetivos foram os seguintes:

- a) avaliar a viabilidade de substituição do agregado miúdo (areia) por rejeito de mineração;
- b) avaliar a viabilidade de substituição do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana de açúcar;
- c) avaliar o comportamento desses resíduos na matriz cimentícia após o envelhecimento acelerado.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

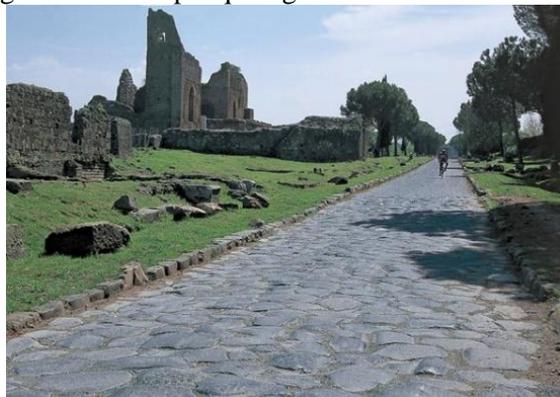
#### **3.1 Pavimentos intertravados**

A prática de caminhar é o mais rudimentar e antigo meio de locomoção existente. Dados históricos são capazes de nos mostrar que com o passar dos séculos, os povos começaram a sentir necessidade de criar e construir caminhos, trilhas e atalhos com o objetivo de vencer grandes distâncias existentes entre os povoados e suas colônias, estabelecendo assim algum tipo de comunicação entre eles (FIORITI, 2007).

As trilhas de terras no meio das vegetações são a primeira manifestação do homem sobre a pavimentação. Com o tempo foram sendo utilizadas pedras em seu estado natural sobre o terreno e mais tarde, a fim de conseguir um melhor ajuste entre elas e permitir o tráfego de veículos de tração animal, essas pedras começaram a ser talhadas garantindo uma superfície mais uniforme (CARVALHO, 2011).

Na história da pavimentação Romana, o uso de pedras talhadas manualmente é de grande relevância. A via Ápia, uma importante via construída por pedras basálticas de dimensões relevantes que, ligava a cidade de Roma ao sul da Itália, é um exemplo deste tipo de via que perdura até os dias de hoje e é considerada por Knapton (1996) umas das vias mais célebres construídas em Roma e que persiste até os dias atuais. (GLOBO, 1995).

Figura 1 – Via Ápia que ligava Roma ao sul da Itália.



Fonte: SHACKEL (1990).

A descoberta do material conhecido na época como “puzzolana”, em 150 a.C. na cidade Italiana de “Puzzeoli”, possibilitou utilizá-lo juntamente com cal e areia formando uma argamassa de considerável resistência mecânica ao longo do tempo que evoluiu para o que se conhece hoje como cimento Portland.

As peças segmentadas, primeiramente concebidas através do talhamento das pedras foram sofrendo modificações até os dias atuais, onde são conhecidas atualmente em quatro tipos de materiais: blocos de tijolos de argila, pedras talhadas e aparelhadas manualmente, blocos de tijolos de madeira e peças pré-moldadas de concreto (SHACKEL, 1990).

Foi no final do século XIX, nos Estado Unidos, que surgiram os primeiros blocos de concreto, tendo como finalidade a construção de hospitais, armazéns, depósitos e quartéis. A chegada desses blocos no Brasil foi, na década de 50, quando uma máquina para produção dessas peças foi importada dos Estados Unidos, porém apenas na década de 70 é que esses blocos se consolidaram no mercado brasileiro (MEDEIROS, 1993).

Em 1963, Stuttgart, na Alemanha, teve ruas pavimentadas por blocos intertravados, sendo a primeira cidade no mundo a usufruir dessa tecnologia.

Pouco tempo após a instalação dos blocos nessa cidade, o calçamento se espalhou por toda a Europa e Ásia, começando por Inglaterra, Itália, Áustria e Nova Zelândia, hoje um dos maiores consumidores de blocos intertravados (FERNANDES, 2013).

Existem hoje no cenário nacional alguns projetos que utilizaram o pavimento intertravado e se destacam, podendo citar alguns como: Projeto de requalificação da Rua do Porto, em Piracicaba, SP; remodelamento da Praça Central de Formiga, MG; pavimentação de mais de 16 mil m<sup>2</sup> de vias e a instalação de um piso permeável em Itajaí, SC e em Santa Fé do Sul, SP; aproximadamente 30 mil m<sup>2</sup> de pavimentação já foram realizadas com um custo médio de R\$ 28,00/m<sup>2</sup> (SIMIELI et. al., 2007).

Figura 2 – Rua do Porto, Piracicaba – SP.



Fonte: IPPLANP (2017).

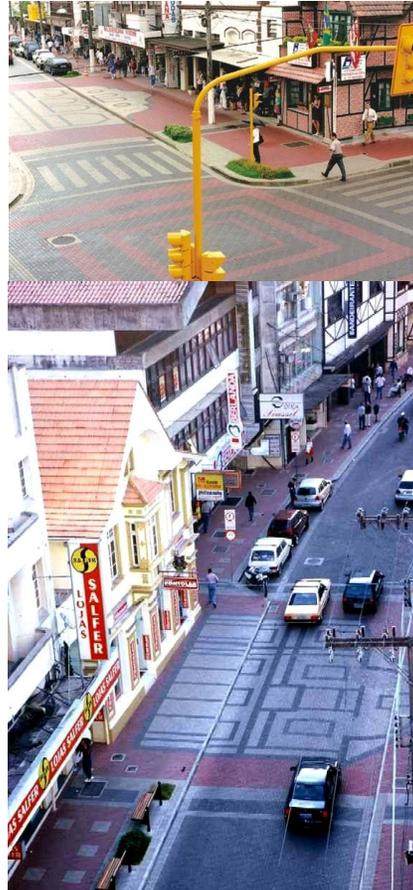
Figura 3 – Ruas de Itajaí – SC.



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2014).

A cidade de Blumenau – SC também tem um desses projetos de grande relevância no uso da pavimentação intertravada. Na cidade foi feita a revitalização da rua XV de Novembro, que tinha como principais objetivos manter as características do patrimônio histórico ali presentes e melhorar o movimento do comércio local, com isso o layout do piso foi inspirado nas fachadas dos edifícios, que tiveram os blocos produzidos em concreto de diferentes cores fazendo com que a identidade arquitetônica da cidade se mantivesse (PREFEITURA DE BLUMENAU, 2017).

Figura 4 – Rua XV de Novembro, Blumenau – SC.



Fonte: Prefeitura de Blumenau.

### **3.1.1 Características do pavimento intertravado com peças de concreto (*pavers*)**

As pedras talhadas manualmente são consideradas o primeiro pavimento intertravado com peças pré-fabricadas, que buscavam melhorar o rolamento do pavimento, antes feito com pedra em seu estado natural (MARCHIONI, 2012).

Com o surgimento do automóvel no século XIX e a urbanização em pleno crescimento, talhar a pedra se tornou inviável e a argila cozida começou a ser utilizada na fabricação das peças para pavimento. Com o fim da Segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de reconstrução da Europa e, com isso, o surgimento de peças pré-moldadas de concreto, um material que se comportava de forma mais durável que a argila para pavimentação. Graças ao desenvolvimento de máquinas de vibro compressão, foi possível a fabricação em série das peças.

A grande variedade de equipamentos de grande produtividade e com elevado grau de precisão dimensional disponíveis no mercado fez com que a indústria de pavimentos de blocos de concreto crescesse e se mantivesse em ascensão em todo o mundo desde a década de 1980 (SANTOS e BORJA, 2007).

O pavimento intertravado, que antes era considerado um material utilizado apenas para atribuir características arquitetônicas ou paisagísticas a um determinado espaço, passou a ser considerado um material eclético, podendo ser utilizado nos mais diferentes ambientes, como praças, espaços de lazer, calçadas, indústrias e rodovias conferindo grande durabilidade devido à elevada resistência do concreto (HALLACK, 2011; ABCP, 2010).

Figura 5 – Diversas maneiras de se utilizar os *pavers*.



Fonte: Catalago Maski (2016); Lar Sírio (2016).

Um dos principais motivos para o aumento do uso da pavimentação intertravada no mundo, pode ser atribuído ao fato da facilidade de instalação e remoção dos blocos que permitem que manutenções sejam feitas de forma simples e rápida. Eles são encontrados com facilidade no mercado, podendo variar de cores e formas e sempre com boa aparência estética (LEE et al., 2005).

A Associação Brasileira de Cimento Portland- ABCP (2009) classifica as tipologias dos blocos de concreto intertravados em três diferentes categorias:

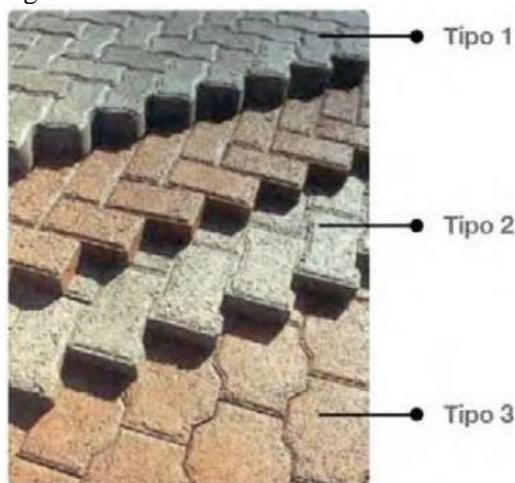
- **Tipo 1:** as peças possuem formatos retangulares, dimensões aproximadas de 20 cm de comprimento e 10 cm de largura, podendo ter suas laterais retas, curvilíneas ou poliédricas. São fáceis de serem produzidas, assentadas e possibilitam a criação de maiores detalhes na pavimentação.

- **Tipo 2:** as peças possuem dimensões de 20 cm de comprimento e 10 cm de largura, onde corriqueiramente possuem o formato de “T” e são assentadas sempre em fileiras.

- **Tipo 3:** as peças possuem dimensões de 20 cm x 20 cm e são mais pesadas.

É muito comum ver blocos diferentes dessas três tipologias, pois as formas podem variar. Na figura 02 é possível observar as três tipologias segundo a ABCP.

Figura 6 - Tipologias de blocos de concreto intertravados segundo a ABCP.



Fonte: ABCP (2009).

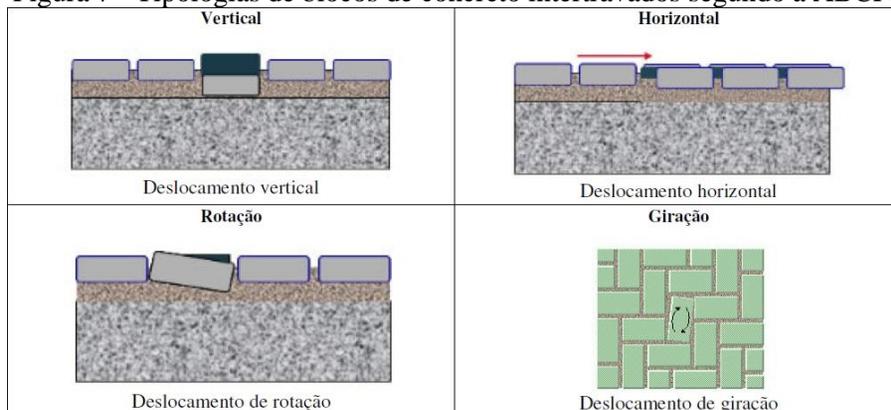
Os pavimentos intertravados também propiciam melhores condições de conforto térmico, pois refletem melhor a luz, dispersando rapidamente no ar o calor do quando comparados a outros tipos de superfícies mais escuras, como o asfalto, que acumulam o calor e liberam lentamente. Essa diferença de temperatura entre os dois tipos de pisos pode chegar a 30% sob as mesmas condições de insolação (BLOCOBRASIL, 2004; ABCP, 2010).

Hallack (2011) afirma que os pavers funcionam como aliados do meio ambiente, pois são totalmente recicláveis ao fim da sua vida útil, causam menor agressão ao solo por exigirem menor espessura (base e sub-base) e pelo fato da produção do concreto ser menos poluente do que a fabricação do asfalto.

Outra característica deste pavimento é a alta permeabilidade. Quando expostos a água não são escorregadios e são capazes de infiltrá-la para o solo sendo uma opção muito interessante para melhorar a permeabilidade das cidades (ABCP, 2010).

Segundo Carvalho (2011), a principal característica do pavimento intertravado é a capacidade das peças, já assentadas, adquirirem resistência a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giração em relação às outras peças que estão ao seu lado. A figura 03 ilustra os possíveis deslocamentos que são resistidos pelo intertravamento das peças.

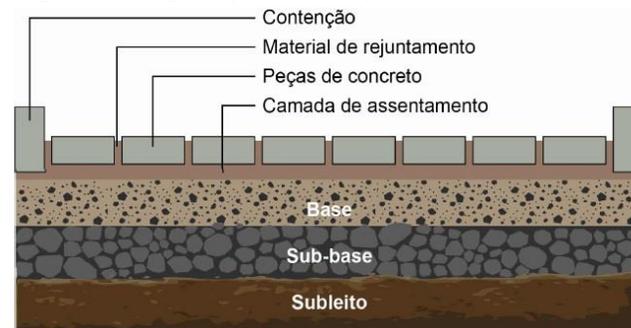
Figura 7 - Tipologias de blocos de concreto intertravados segundo a ABCP.



Fonte: Original Blocos (2009).

Marchioni (2012) define o pavimento intertravado como sendo um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento. A Figura 08 representa uma seção típica do pavimento intertravado.

Figura 8 - Seção típica de um pavimento intertravado.



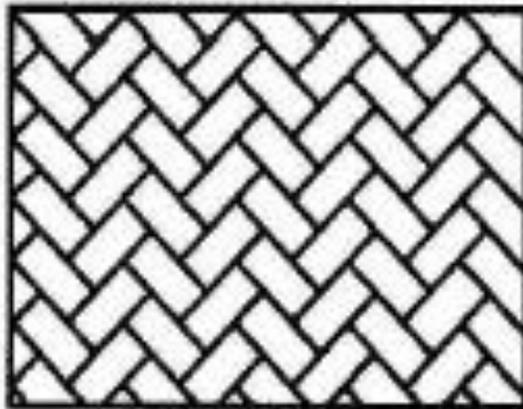
Fonte: ABCP (2016).

A principal característica da pavimentação intertravada é o fato dos blocos serem assentados diretamente sobre uma camada de areia que serve de regularização da base e funciona como acomodações para peças e na distribuição das cargas (NASCIMENTO, 2016).

Outra particularidade deste tipo de pavimentação são as diferentes opções de assentamentos dos blocos. O tipo de arranjo para assentamento escolhido estabelecerá a aparência que o piso terá.

Não existem fatos que comprovem que a geometria dos pavers interfira em seu desempenho, mas pesquisadores concordam que o tipo de arranjo em que se assentam os blocos influenciam em sua durabilidade, como especifica o boletim técnico 4 do ICPI (2003) que sugere que seja utilizado o arranjo tipo espinha de peixe (Figura 09) para áreas onde haja tráfego veicular, pelo fato de apresentar maiores níveis de intertravamento e estrutural.

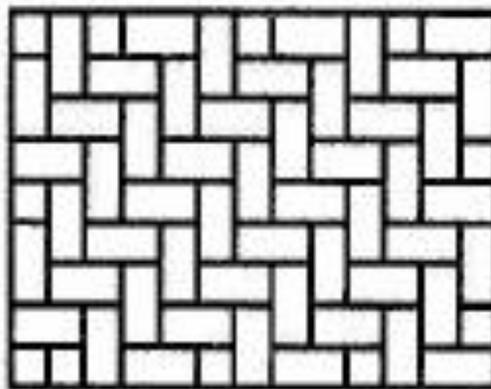
Figura 9 - Arranjo de assentamento dos pavers tipo espinha de peixe 45°.



Fonte: CRUZ (2003).

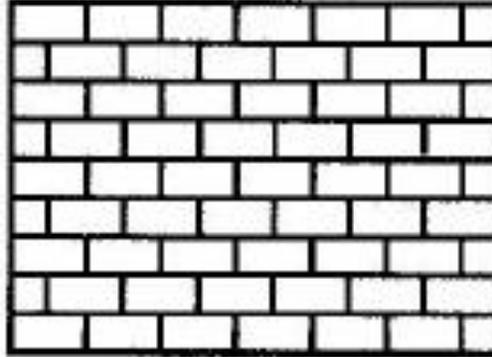
Segundo Cruz (2003), as variações de assentamento mais utilizado para pavimentos intertravados são apresentadas nas figuras a seguir:

Figura 10 - Arranjo de assentamento dos pavers tipo espinha de peixe 90°.



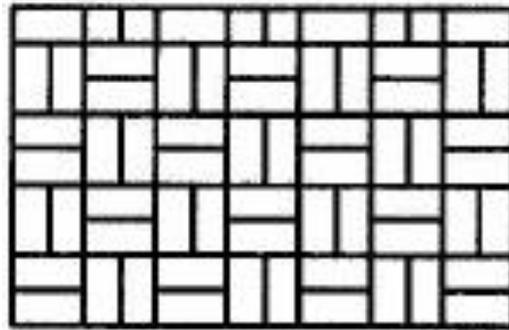
Fonte: CRUZ (2003).

Figura 11 - Arranjo de assentamento dos pavers tipo fileira.



Fonte: CRUZ (2003).

Figura 12 - Arranjo de assentamento dos pavers tipo trama.



Fonte: CRUZ (2003).

Fioriti (2007) realizou um levantamento onde foi possível concluir que os países em desenvolvimento são os que mais utilizam pavimentos intertravados em estradas e citou exemplos como a Nicarágua, Costa Rica e Colômbia. No Brasil, segundo a Funtac (1997), o histórico da aplicação de pavers é conhecido desde 1940, onde eram utilizados blocos de tijolos de argila na pavimentação de ruas em Rio Branco, Acre, na região norte do país.

O pavimento intertravado de concreto se apresenta como uma alternativa viável em se tratando de material e tecnologia, quando comparado com os

convencionais, pois é moderno, viável economicamente, racional e eficaz. Atualmente, é grande o número de pesquisas sobre a produção de blocos de concreto para pavimentação aliando o uso de algum resíduo proveniente de indústrias e atividade agrícola.

Ao agregar esses resíduos na produção dos blocos, é possível diminuir os impactos causados pelo consumo desordenado de matéria-prima e reduzir as áreas de disposição de resíduos, em função do grande volume descartados a cada ano em todo o mundo.

Fioriti, Ino e Akasaki (2010), produziram pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como substituição parcial do agregado, obtendo resultados positivos que viabilizam o uso dos pavers em pavimentação com solicitações leves.

Santos (2017) investigou e comprovou, através de resultados positivos alcançados em testes físicos e mecânicos, a possibilidade de se utilizar rejeito de carvão para a produção de blocos de concreto destinados a pavimentação em substituição ao agregado miúdo.

Freire (2012) propôs a utilização do rejeito do beneficiamento do minério de ferro em substituição ao agregado natural para a produção de blocos de concreto para pavimentação e alcançou resultados satisfatórios para blocos que podem ser usados em calçadas e estacionamentos.

Costa, Guimieri e Brandão (2014) analisaram a viabilidade de uso do rejeito de sinter feed, proveniente da atividade mineradora de ferro, como agregado na produção de peças pré-fabricadas de concreto destinadas a pavimentação. O grande potencial de se utilizar esse rejeito como agregado na produção do concreto está relacionado ao desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil e o descarte desse rejeito de maneira produtiva, que excluiria as pilhas de estocagem e as despesas relacionadas a operacionalização.

Nascimento (2016) produziu blocos intertravados de concreto para pavimentação incorporando resíduo do polimento de porcelanato em substituição ao agregado miúdo, que teve como melhor traço a incorporação de 3% do resíduo, em que a absorção de água foi reduzida, a resistência a abrasão foi mantida e a resistência a compressão foi ligeiramente comprometida, fazendo com que os pisos fossem destinados para onde não haja tráfego de veículos.

Silva et al. (2017) avaliaram a resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS) produzidos com adição de resíduo de borracha de pneus em substituição ao agregado miúdo, onde a substituição de até 10% da areia natural pelo resíduo se mostrou viável, sendo obtidos pisos que podem ser utilizados para tráfegos pesados, de acordo com as recomendações da norma abrasileira.

### **3.1.2 Normas técnicas nacionais e internacionais sobre pavimentos intertravados**

Atualmente existe uma grande diversidade de normas e requisitos técnicos a serem seguidos e alcançados pelos pavers comercializados, como as normas europeia, americana, canadense, africana, australiana e a brasileira.

No Brasil, são duas normas da ABNT que se referem aos pavimentos intertravados:

- NBR 9781 (1987) – Peças de concreto para Pavimentação
- NBR 9780 (1987) – Peças de concreto para Pavimentação (determinação da resistência á compressão).

A NBR 9781 (1987) tem como principal objetivo determinar as condições mínimas para serem aceitos os pavers destinados á pavimentação de

vias urbanas, calçadas, pátios de estacionamento e similares, não podendo ser destinados a rodovias de médio e alto tráfego e aeroportos. A seguir estão algumas considerações encontradas na norma:

- O bloco de concreto é definido como uma peça pré-moldada de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm
- As variações máximas permissíveis nas dimensões são de 3mm, no comprimento e largura das peças e limita 5mm na altura das peças.
- Quando destinados a tráfego de veículos comerciais de linha, os pavers devem ser capazes de resistir a compressão de  $\geq 35$  MPa.
- Quando destinados a tráfego de veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão, os pavers devem ser capazes de resistir a compressão de  $\geq 50$  Mpa.

No cenário internacional, existem a norma europeia EN 1338 (1993) “Concrete Paving Blocks – Requirements and Test Methods”, a norte Americana que é uma revisão das normas Americana ASTM C936 (1996) e canadense CSA A231.1-85 (1995), onde ambas tratam sobre as características requeridas de desempenho e controle de fabricação de pavers.

Shackel (1990) especifica cinco características importantes para se ter o controle dos pavers, que são:

**Materiais:** os tipos de materiais utilizados seguem as mesmas especificações relativas ao concreto de acordo com as normas locais. Às vezes pode-se especificar a faixa granulométrica do agregado graúdo. O intuito em se estabelecerem padrões de qualidade para os materiais está relacionado a garantia de durabilidade dos pavers em condições ambientais e em uso.

**Tolerâncias dimensionais:** Se não houver um controle dimensional dos pavers, o funcionamento do pavimento intertravado pode ser comprometido, causando o desalinhamento horizontal, prejudicando o assentamento e a manutenção e a diferença de espessuras, poderia causar desníveis no pavimento, o que não é desejável.

**Resistência:** um dos ensaios mais frequentes de ser realizados em pavers é o de resistência. É preciso que o bloco tenha resistência suficiente para que não haja problemas no seu manuseio durante a fabricação, na execução do pavimento e garantindo assim também que com o uso, seu deterioramento seja mais lento.

**Durabilidade:** está relacionada diretamente à resistência à abrasão e a capacidade de suportar ciclos de gelo e degelo em países de clima frio, porém, independente do tipo de clima do país, ou mesmo da resistência das peças do pavimento, Shackel (1990) observou várias patologias de desgaste nos pisos, em consequência disso, a maior parte das normas internacionais revisadas têm indicado realizar ensaios de abrasão. A NBR 9781 (1987) não menciona ensaios de abrasão, apenas prescreve os valores mínimos de resistência a compressão para as peças de concreto para pavimentação (SIMIELO, et. al. 2007)

**Aparência:** não existem especificações para o controle das características físicas dos pavers, mas seu aspecto estético deve ter uniformidade, textura e cores especificadas ao critério do fabricante.

### 3.1.3 Processo de fabricação dos pavers

Os blocos de concreto são produzidos por máquinas tipo vibro prensa que podem ser manuais, pneumáticas e hidráulicas, variando em tamanho, especificação do motor, alimentação, quantidade, moldes por matriz entre outros. Estes mesmos equipamentos podem fabricar outros produtos como

blocos de concreto e vedação, blocos de concreto estrutural, meio fio e outros tipos de peças menos convencionais (PURIFICAÇÃO, 2009).

Abaixo estão descritas as principais etapas do processo produtivo vibro prensado:

**Demanda da produção:** segundo Marchioni (2012), é necessário que se tenha definido o tipo de peça a ser produzido para serem determinadas a resistência mecânica, o formato e a cor especificada para o produto, além dos fatores que devem ser considerados na definição das matérias-primas, formulação do concreto seco e as configurações que o equipamento de vibro compressão assumirá.

**Determinação e especificação da matéria prima:** o teor de umidade da mistura é o único fator que vai diferir em relação aos componentes do concreto convencional, que são: cimento, agregados e água (MARCHIONI, 2012).

- **Cimento:** o uso do cimento CP V ARI é muito comum e frequentemente usado pelo fato de se ter maior resistência inicial, garantindo velocidade na produção. O uso de cimentos compostos também pode ocorrer, nesse caso são utilizados cimentos de classe 40 MPa que atingem resistências mecânicas mais altas com menores idades (FERNANDES, 2008).
- **Água:** a água participa da reação de hidratação do cimento e tem fundamental importância na resistência do concreto seco (NEVILLE, 1997).
- **Agregados:** em todo o volume do concreto, cerca de 60 a 80% é ocupado pela estrutura granular dos agregados, sendo considerada de grande importância nas características do concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2008). A NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica em

agregados graúdos, os grãos que passam pela peneira de abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha de 4,75mm e em miúdos, os grãos que passam na peneira de abertura de malha 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m.

- **Aditivos químicos:** segundo a NBR 17768 (ABNT, 1996), quando adicionados em pequenas quantidades nos concretos de cimento Portland, os aditivos podem modificar algumas propriedades do concreto com objetivo de adequá-las as determinadas condições, melhorando as características específicas das misturas.
- **Pigmentos:** usados em forma de pós extremamente finos ou em suspensão aquosa, segundo Levitt (1982) (Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação) são inertes aos materiais constituintes do concreto que, ao serem adicionados, garantem aos produtos uma coloração específica.

**Formulação:** A fim de se conseguir as melhores proporções em se tratando de economia de cada constituinte do concreto e manter a qualidade, a formulação do concreto desempenha esse papel. A maior complicação na formulação é conseguir manter a qualidade do concreto no estado endurecido e a trabalhabilidade e coesão no estado fresco, mantendo a economia do concreto (DOWSON, 1981).

Madeiras (1993), ainda pontua que os traços estão sujeitos a influências de inúmeros fatores, tais como: o tipo de máquina vibro-prensa, as características dos materiais utilizados (cimento, areia e pedrisco), entre outros fatores.

Tango (1994) defende que a melhor maneira de demonstrar as quantidades de materiais empregados é o traço do concreto, sendo que este traço

pode estar nas unidades de massa ou volume relativo à quantidade de cimento ou valores absolutos.

**Controle e recebimento de matéria prima:** Marchioni (2012) afirma que para que haja uma garantia que o produto final atenda as especificações, é necessário que haja um controle no recebimento das matérias-primas assegurando que elas atendam aos requisitos definidos na formulação.

**Proporcionamento:** Essa etapa consiste em fazer as proporções das matérias-primas para serem misturadas e produzirem o concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para garantir que a proporção dos materiais esteja correta, estes com exceção da água e aditivos, que devem ser dosados em volume, devem ser feitos em massa (FERNANDES, 2008).

**Mistura:** A fim de garantir uma perfeita homogeneização, os componentes do concreto com a formulação e o proporcionamento corretos são adicionados à um misturador.

**Processo de vibro prensagem:** Nessa etapa inicia-se o processo de conformação da massa nas peças de concreto através da máquina de vibro compressão, que prensam e vibram simultaneamente (OLIVEIRA, 2004).

**Cura:** As peças de concreto têm cura similar à cura dos demais concretos, que pode ser por meio da cobertura dos blocos por uma lona de plástico, em câmara úmida ou a vapor. Essa etapa tem como objetivo evitar a perda de umidade do concreto garantindo assim a hidratação adequada do cimento resultando em uma peça de concreto com a resistência mecânica e durabilidade esperada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

**Controle de qualidade:** As peças de concreto devem estar dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 9781 (ABNT, 1986) nos quesitos de dimensão, tolerâncias, análise visual e resistência a compressão.

**Paletização e armazenamento:** Na última etapa do processo de fabricação dos blocos de concreto eles são armazenados em pallets a fim de evitar quebras até o destino final, o consumidor.

## **3.2 Minérios de ferro**

### **3.2.1 Extração de minérios e geração de resíduos em Minas Gerais**

As reservas mundiais de minério de ferro totalizam cerca de 180 bilhões de toneladas, das quais 11,3% se encontram no Brasil e se distribuem entre os estados de Minas Gerais (63,1%), Pará (18%) e Mato Grosso do Sul (17,2%) (FREIRE, 2012).

Em Minas Gerais, a maior parte dos minerais está no Quadrilátero Ferrífero, que compreende uma área de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup>, na porção central do Estado e constitui uma das áreas clássicas da geologia pré-cambriana do mundo, devido à sua importância quanto aos ricos depósitos minerais, como os de minério de ferro e manganês, jazidas de ouro, bauxita e pedras preciosas (MAPA, 2006; MATSAMURA, 1999).

Dorr (1969) definiu como Quadrilátero Ferrífero devido os extensos depósitos de formação ferrífera, que ocorrem de forma grosseiramente quadrangular, numa área limitada pelas linhas que ligam Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas do Campo, Casa Branca e Itaúna.

O minério de ferro é uma rocha a partir da qual pode ser obtido o ferro, que é matéria prima essencial para a produção de aço. Cerca de 4,2% da litosfera são constituídos de ferro, sendo que os principais minerais que contêm ferro são: hematite, magnetite, goethite e siderite. Os maiores depósitos de minério de ferro no Brasil são constituídos por formações ferríferas denominadas itabiritos compostos de matita e sílica (SILVA, 2014; QUARESMA, 2001).

A extração de minério não altera apenas a área minerada, mas compromete também áreas próximas a sua exploração, onde são feitos depósitos de rejeitos. Esses rejeitos podem conter substâncias químicas nocivas ao meio ambiente.

A alteração da paisagem, a poeira e ruído gerado por veículos na perfuração de rochas e os rejeitos, que estão sujeitos a derramarem e acometerem populações vizinhas podem ser considerados os principais impactos ambientais negativos. Na maioria das vezes as minerações de ferro, granito de areia e argila, calcário e diamante poluem o meio ambiente com lama (COSTA, 2006; SILVA, 2007).

Segundo Silva (2014) a comercialização do minério de ferro depende de suas características físicas, que nada mais é do que o tamanho das partículas (granulometria), e sua composição química, que condiz com os teores de ferro e outras impurezas encontradas ao minério.

O objetivo de submeter o minério a processos químicos ou físicos é de regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final sem alterar a sua constituição química (ESPÓSITO, 2000).

O tipo de minério que é processado e os tratamentos utilizados permitem a geração de rejeitos com diferentes características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas, que podem ser classificados em lama, quando tem granulométrica finas e regulares quando tem granulométrica acima de 0,074 mm (ESPÓSITO, 2000).

Dados do IPT (2016) apresentam que para cada tonelada de minério de ferro processado, por exemplo, temos cerca de 0,4 toneladas de rejeitos. A projeção para o período 2010-2030 aponta que o beneficiamento de minério de ferro irá contribuir com cerca de 41% do total de rejeitos gerados pelas mineradoras no Brasil.

### **3.2.2 As barragens de contenção de rejeitos de mineração e o acidente de Mariana**

No Brasil há uma grande quantidade de barragens com diferentes dimensões e aplicações, como barragens de infra-estrutura para retenção de água, geração de energia, aterros ou diques para acúmulo de rejeitos de mineração, etc. (DUARTE, 2008).

As empresas mineradoras estão sempre em busca de novas alternativas que sejam mais seguras e econômicas para o tratamento, armazenamento e o gerenciamento dos resíduos sólidos, considerados um dos grandes perturbadores do meio ambiente na atividade mineradora (PASSOS, 2009).

A escolha do método de disposição dos rejeitos vai depender de diferentes fatores, como: a natureza do processo de beneficiamento em que o minério foi submetido, as condições geológicas, a topográfica do espaço, as propriedades mecânicas do material e a capacidade de contaminação ambiental. Os rejeitos podem ser colocados em minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco, em pasta ou em barragens de contenção de rejeitos, método preferido pelas empresas (DUARTE, 2008).

Duarte (2008) sintetiza que as barragens de contenção de rejeitos (Figura 10) são estruturas construídas destinadas a contenção dos rejeitos decorrentes do beneficiamento do minério, realizadas em estágios, de acordo com a necessidade da geração de resíduos, dissolvendo os custos da construção e operação.

Figura 13- Barragem de rejeito de mineração.



Fonte: SAMARCO (2015).

No dia 05 de novembro de 2015 aconteceu o rompimento da barragem de rejeitos (Figura 13) da mineradora Samarco em Minas Gerais, ocasionando a destruição do distrito de Bento Rodrigues, em Mariana. Segundo o Ministério Público e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) de Minas Gerais, 62 milhões de m<sup>3</sup> de lama vazaram, afetando cerca de 679 km de rios, percorrendo uma distância total de 879 km desde a barragem até a foz do Rio Doce em Regência, no Espírito Santo (PRUDENTE, 2016).

Figura 14- Rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG.



Fonte: SAMARCO (2015).

Esse episódio foi considerado por muitos especialistas como o maior desastre ambiental da mineração brasileira e mundial, sendo escrito pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA) um dia após o acidente um documento científico intitulado “Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais (LOPES, 2016).

Neste documento é relatado os “impactos agudos de contexto regional, entendido como a destruição direta de ecossistemas, prejuízos a fauna, flora e socioeconômicos, que afetaram o equilíbrio da Bacia Hidrográfica do rio Doce, com desestruturação da resistência do sistema” (BRASIL, 2015).

Lopes (2016) acredita que os efeitos do “desastre de Mariana”, ocorridos de forma tão dramático e traiçoeiro, por décadas e gerações ainda serão sentidos, especialmente pelas comunidades que estão localizadas dentro da bacia do rio Doce.

### 3.3 Cinzas de bagaço de cana de açúcar

A produção de cana de açúcar no Brasil é conhecida desde o início do século XVI, quando foi introduzida pelos portugueses. Atualmente o país é considerado o maior fornecedor deste produto e tem estimativa para safra de 2017/2018 produzir cerca de 647,63 milhões de toneladas com aumento de 4% em relação à safra anterior. Com faturamento de aproximadamente R\$ 52 bilhões em 2016, o setor emprega em lavouras e usinas mais de 1 milhão de pessoas (IBGE, 2006; CONAB, 2016).

No processo de moagem da cana de açúcar, a fibra é retirada do caldo, dando origem ao resíduo conhecido como bagaço de cana, que apresenta diferentes composições químicas de acordo com a espécie cultivada, os tipos de herbicidas e de fertilizantes utilizados, os fatores naturais como clima, solo e água e as técnicas que foram colhidas (PEDRESCHI, 2009).

Na safra de 2015/2016 a produção desse resíduo foi de 166,40 milhões de toneladas, em que a cada tonelada de cana de açúcar moída na fabricação de açúcar e etanol gera, em média, 350 kg de bagaço e 200 kg de palha e pontas. O bagaço pode ser transformado em bagaço hidrolisado para alimentação animal ou pode ser queimado na caldeira, juntamente com a palha no processo de cogeração de energia elétrica (FIESP/CIESP, 2001; PINTO, 1999; RIPOLI; RIPOLI, 2004; SOUZA, 2007a; CONAB, 2016).

A FIESP/CIESP (2001) considera que para cada tonelada de bagaço de cana colocada nas caldeiras das usinas para geração de vapor, considerando seu percentual de uso de 95%, são gerados aproximadamente 25 kg de cinza de bagaço de cana de açúcar. Essas cinzas, na maioria das vezes, são descartadas sem as devidas práticas e se tornam um grande problema ambiental.

Segundo Cordeiro (2006) a temperatura no interior do salão da caldeira e/ou o tempo de exposição ao calor, são fatores determinantes para a quantidade

de carbono liberada e a coloração das cinzas obtidas, sendo que, quanto mais alta a temperatura e maior foi o tempo de exposição do bagaço de cana ao calor, haverá maior liberação de carbono e as cinzas ficarão em uma tonalidade mais clara.

As cinzas do bagaço de cana (CBC), apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ser utilizadas como pozolanas. O material pozolânico é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis capazes de se aglutinarem, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA et al., 2004)

A composição química das cinzas é baseada praticamente em sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o que faz com que o material se revele com um grande potencial para ser usado como adição mineral em substituição parcial do cimento em argamassas e concreto (CORDEIRO et al., 2008; apud PAULA et al., 2009)

O uso de resíduos gerados em outros setores da economia aplicados na construção civil é de interesse não só apenas das indústrias, que têm a possibilidade de ampliarem sua produtividade, empregando seus resíduos na criação de subprodutos, mas também na criação de materiais alternativos às matérias primas não renováveis utilizadas na construção civil tradicional.

Segundo Savastano (2003), a maior parte dos resíduos gerados podem ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados, de forma a criar novos materiais de construção civil que atendam a crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável.

Pesquisas que utilizam a CBC em substituição parcial ao cimento ou ao agregado miúdo, a areia, vêm sendo desenvolvidas e apresentam resultados satisfatórios, como é o caso de Marques (2015), que avaliou as características e propriedades tecnológicas de tijolos resíduo-cimento maciços e vazados produzidos com cimento Portland, cascalho proveniente da perfuração de poços

de petróleo e com e sem adição de CBC, obtendo resultados que comprovam a eficiência e o elevado potencial do uso da CBC, tornando o tijolo resíduo-cimento com uma maior resistência mecânica e menor absorção de água na melhor formulação encontrada, sendo esta de 85% cascalho, 12% cimento e 2% de CBC.

Em outro trabalho, Paula et al. (2009) avaliaram o uso da CBC em substituição parcial ao cimento Portland alcançando resultados satisfatórios quanto a resistência à compressão, para argamassas com teores de CBC entre 0 e 30%, indicando a substituição de até 20% do cimento pela CBC.

Nascimento (2016) produziu blocos de concreto para pavimentação com cinzas residuais de bagaço de cana de açúcar em substituição parcial ao cimento Portland e constatou uma leve queda na resistência à compressão e nos índices de vazios, fazendo com que os blocos não pudessem ser usados como pavimentos com tráfego de veículos de linha comerciais mas possam ser utilizados em calçadas residenciais e comerciais.

Teodoro et al. (2013) avaliaram o comportamento físico-mecânico do concreto com substituição do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana de açúcar e alcançaram resultados positivos para substituição de 5% do cimento Portland por CBC sem o comprometimento das propriedades físicas analisadas.

Lima et al. (2010) fabricaram blocos de concreto substituindo o agregado miúdo pela CBC e obtiveram os melhores valores em todas as propriedades analisadas para os concretos confeccionados com 30% de CBC em substituição ao agregado miúdo.

Canova, Miotto e Mori (2015) produziram argamassa mista destinada a revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana de açúcar, e concluíram a viabilidade de se usar a CBC em substituição a areia em até 5% sem que as propriedades físicas e mecânicas sejam comprometidas.

## REFERÊNCIAS

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland. **Banco de Pautas**, 2009. Disponível em:  
<http://www.abcp.org.br/conteudo/impresa/pavimentos-intertravado-e-alternativa-sustentavel-para-economia-de-recursos>>. Acesso em Junho 2018.

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de Pavimento Intertravado**. [s.n.]: São Paulo, 2010. Disponível em:  
<[http://www.abcp.org.br/solucoesparacidade/colaborativo/download.purificaphp?set=passeio\\_publico](http://www.abcp.org.br/solucoesparacidade/colaborativo/download.purificaphp?set=passeio_publico)>. Acesso em junho 2018.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. 2016. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/tag/industria-do-cimento/>

BLOCOBRASIL – Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto. 2004. Disponível em:<<http://www.blocobrasil.com.br/>>

BRASIL. **Laudo Técnico Preliminar IBAMA**. Publicado em 26 de novembro de 2015. Disponível em:<  
[http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf)> Acesso em Mai. 2018.

BORLINI, C. M. F. VIEIRA, D. G. PINATTI, et al.. **Análise microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com cinza de lenha de eucalipto**. Anais Cong. Bras. Ceram., Blumenau, SC. 2006.

CANOVA, J., A., MIOTTO, J., L., MORI, L., M., De. Avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de açúcar. **Ciência & Engenharia**. 24 (1): 125 – 134, jan. – jun. 2015.

CARVALHO, Denise Barroso Andrade. **Considerações sobre a utilização de pavimentos intertravados e betuminosos em áreas urbanas**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos SP. 2011.

CATÁLOGO MASKI REVESTIMENTOS. 2016. Disponível em:<  
<https://pt.scribd.com/document/340202920/Catalogo-Maski-2016>>

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. 2016. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/>>.

**CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

**COSTA, F. de A. Capoeiras, Inovações e Tecnologias Rurais Concorrentes na Amazônia.** In: Costa, F. de A., Hurtienne, T. P., Kahwage, C. Inovação e Difusão Tecnológica para Sustentabilidade da Agricultura Familiar na Amazônia. Belém, E. NAEA., 21-60. 2006.

**COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDAO, P. R. G.. Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed.** Rev. IBRACON Estrut. Mater.[online]. 2014, vol.7, n.2, pp.244-259.

**CRUZ, Luiz Otávio Maia. Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento.** 2003, 281p. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

**DORR, J.V.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero,** Minas Gerais, Brazil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1969. 110p.

**DOWSON, A. J. A manufacturer`s perspective of variation within the production process of concrete paving block.** Third International Work on concrete Block paving, Carta Gena de Indias, Colombia, Mai.1988.

**DUARTE, Anderson Pires. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco,** 2008. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2008.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal 363 p.

FECOMERCIO - Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo de São Paulo. 2010. Disponível em: < [www.fecomercio.com.br](http://www.fecomercio.com.br)>

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. 1ª Edição – Editora Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda. São Paulo, 2008.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**, São Paulo: FIESP/CIESP, 90 p. 2001.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIORITI, Cesar Fabiano; INO. Akemi; AKASAKI. Jorge Luís. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. **Acta Scientiarum**. Technology. Maringá, v. 32, n. 3, p. 237-244, 2010.

FIORITI, Cesar Fabiano. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez. 2007.

FREIRE, Carolina Braccini. **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados**. 2012 189 f. Tese (doutorado) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2012.

FUNTAC, 1997. Fundação de Tecnologia do Estado do Acre.

GLOBO. **A Origem de Roma**. Atlas da História Universal – The Times, Editora O Globo, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 60-62. 1995.

HALLACK, A. Pavimento Intertravado: Uma solução universal. **Revista Prisma**, nº 39, Dezembro.2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTADÍSTICA. Disponível em:<  
[https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/anos\\_antiores\\_2016.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/anos_antiores_2016.shtm)>2016.

IPPLANP - INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO. 2017. Disponível em: [www.ipplan.org.br/trabalhe-conosco](http://www.ipplan.org.br/trabalhe-conosco)

KNAPTON, J., “Romans and their Roads – The Original Small Element Pavement Technologists”, Fifth International Concrete Block Paving Conference, pp. 17-52, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

LAR SÍRIO PRO-INFANCIA. Disponível em: < <https://pt.foursquare.com/v/lar-s%C3%ADrio-proinfancia/4e64cce6b61cd780898f5576/photos>>.

LEE, S. J., RUST, J. P., HAMOUDA, H., KIM, Y. R., BORDEN, R. H. **Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete**. Textile Research Journal, vol. 75, n. 2, pp. 123-128. 2005.

LIMA, S. A. et al. Análise de Argamassas Confeccionadas Com a Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar em Substituição ao Agregado Miúdo. **Revista Tecnológica**, v. 18, p. 87-97, 2010.

LEVITT, M. Precast concrete. Proprieties ang usage. **Applied Science**. 1992.

LOPES, Luciano M.N. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais**. Sinapse Múltipla, 5(1), jun 1 - 14, 2016  
Disponível em  
<<http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla>> acesso em Jan. 2018.

MADEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto.** São Paulo. 1993. Dissertação (mestrado em Engenharia) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MAPA, Paulo Sérgio. **Rota de processo para o Underflow da Deslamagem de Minério de Ferro do Concentrador da SAMARCO Mineração S.A.** 2006, 190f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas. 2006.

MARCHIONI, Mariana Lobo. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.** 2012. 111 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2012.

MARQUES, S., K., J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** 2015. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

MATSAMURA, Marcelo da Silva. **Avaliação e estudos da emissão de metais pesados pela barragem de Santarém (Samarco Mineração S.A) no sistema hídrico da Região de Ouro Preto e Mariana: um estudo da qualidade das águas.** 1999. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 1999.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NASCIMENTO, Maria Victória Leal de Almeida. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato.** 2016 97 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru/PE. 2016.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828 p. 1997.

OLIVEIRA, Alexandre de Lima. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ORIGINAL BLOCOS. (2009). Disponível em:<  
<http://originalblocos.com.br/>>

PASSOS, N. C. de S. T. **Barragem de rejeito: Avaliação dos parâmetros geotécnicos dos minérios de ferro utilizando em ensaio de campo – Um estudo de caso**. Universidade Federal do Paraná/UFPR. Curitiba, 2009.

PEDRESCHI, R., **Aproveitamento do Bagaço de Cana da Industria Sucroalcooleira na Produção de Painéis Aglomerados**. Tese (Doutorado) apresentada a Universidade Federal de Lavras – UFLA. 2009.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. São Paulo, 1999, 189p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PORTAL BRASIL. **Índices financeiros brasileiros: Cálculos, informações econômicas e financeiras e consultoria**. 2017. Disponível em:< <http://www.portalbrasil.net/indices.htm>>

PRUDENTE, Thiago Awad. Os processos de alteamento da barragem de rejeitos de fundão da mineradora Samarco em Mariana (MG) foram os responsáveis pelo rompimento? Artigo apresentado e publicado no **IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Cruz das Almas, Bahia 13a 16 de julho de 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJAI – SC, (2014). Disponível em:<  
<https://www.itajai.sc.gov.br/>>

PREFEITURA DE BLUMENAU-SC. Disponível em:<  
<https://www.blumenau.sc.gov.br/>>

PURIFICAÇÃO, E. B. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto.** 2009. 103p. Dissertação (mestrado). Programa Pós-graduação em Construção Civil, UFMG, Belo Horizonte.

TANGO, C. E. de S. **Procedimentos de Dosagem de Concreto para Blocos Estruturais.** 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, pp 21-30, Florianópolis. 1994.

RIPOLI, T.C.C. e RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: Colheita, energia e ambiente.** Piracicaba, T.C.C. Ripoli, 2004. 302p.

SAMARCO. 2015. Disponível em:  
<<https://www.samarco.com/barragens/>>

SANTOS, Altair. **Tragédia em MG gera debate sobre construção de barragens.** Notícia publicada em 22 de dezembro de 2015 disponível em  
<<http://www.cimentoitambe.com.br/tragedia-em-mg-construcao-de-barragens/>>

SANTOS, ANAIARA VARELA DOS; BORJA, EDILBERTO VITORINO DE. Avaliação das propriedades mecânicas de blocos intertravados com resíduo de pneu reciclado. **Holos**, Ano 23, Vol. 3, 2007.

SANTOS, V., R., F., dos. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil: rcc e fibras de aço.** 2014, 145f. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.

SAVASTANO, JR., WARDEN, P. G. **Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites.** Cement & Concrete Composites, v.25, n.5, p.517-624, 2003.

SILVA, V. M. **Ação da Carbonatação em Vigas de Concreto Armado em Serviço, Construídas em Escala Natural e Reduzida**. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, F., M., et all. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Revista Matéria**. vol. 22. N. 01, 2017.

SILVA, F., L., da. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de Minério de Ferro na Produção de Pavers e Cerâmica**. 2014 77 p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG. 2014.

SIMIELO, Daniel; MIZUMOTO, Camilo; DA SILVA SEGANTINI, Antônio Anderson; MOREIRA SALLES, Flávio Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. **Exacta**, vol. 5, núm. 2, julho-dezembro, 2007, pp. 231-241. Disponível em <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81050204>> acesso em Mai. 2017.

SHACKEL, B. Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement. 1st Edition. **Elsevier**, New York and London. 1990.

TEODORO, Paulo Eduardo et al. Comportamento físico-mecânico do concreto com substituição de cimento por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Reec. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. vol.6 n° 2 Fev. 2013.

**SEGUNDA PARTE - ATIGO**

## ARTIGO 1

### POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO E CINZAS DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

Artigo preparado de acordo com as normas da Revista Waste and  
Biomass Valorization

Lívia de Melo Salgado<sup>1</sup>, Tony Matheus<sup>2</sup>, Nayra Diniz Nogueira<sup>3</sup>, Carolina  
Rezende Pinto Narciso<sup>4</sup>, Rafael Farinassi Mendes<sup>5</sup>, Lourival Marin Mendes<sup>6</sup>,  
Universidade Federal de Lavras - Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais

---

<sup>1</sup> liviasalgado1@hotmail.com

<sup>2</sup> tony.matheus@hotmail.com

<sup>3</sup> nayradinizn@yahoo.com.br

<sup>4</sup> carolina.narciso@yahoo.com.br

<sup>5</sup> rafael.mendes@deg.ufla.br

<sup>6</sup> lourival@dcf.ufla.br

## RESUMO

O rejeito de mineração proveniente do beneficiamento de minério e as cinzas de bagaço de cana de açúcar, proveniente da produção do açúcar e etanol, são considera dos grandes problemas para o meio ambiente, onde o tratamento, armazenamento e o gerenciamento desses resíduos sólidos são fatores que demandam atenção. O uso desses subprodutos na produção de concretos como substitutos em porcentagens à areia e ao cimento são grandes tendências afim de reduzir o uso de materiais de fontes não renováveis. Nesse trabalho foram avaliados o efeito de substituição do agregado miúdo, a areia, em porcentagens de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% pelo rejeito de mineração e a associação com a substituição de 1% em massa do cimento pelas cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBC). O rejeito de mineração e as cinzas de bagaço de cana de açúcar tiveram suas propriedades físicas, morfológicas e granulométricas avaliadas. Os blocos de pavimentação/pavers foram avaliados quanto as suas propriedades físicas e mecânicas por meio de ensaios de densidade, absorção de água (NBR 9781), resistência à compressão (NBR 9781) e microscopia eletrônica de varredura antes e após o envelhecimento acelerado. Não é indicada a utilização de cinza de bagaço de cana como matéria-prima para produção de pavers. A areia utilizada na produção dos pavers pode ser totalmente substituída por resíduo de mineração, sendo uma alternativa para destinação adequada e agregação de valor.

**Palavras-chave:** Pavimentos intertravados. Compósitos. Material alternativo. Resíduo agroindustrial.

## ABSTRACT

Mining spoil from ore extraction and bagasse ash from sugarcane used in sugar and ethanol production are both considered to be major environmental problems, in terms of their treatment, storage and management as solid waste. The use of these by-products in the production of concrete as substitutes for a percentage of sand and cement are major trends in attempts to reduce the use of materials from non-renewable sources. In this work, we tested the effect of replacing small-sized aggregate, and sand, mining tailings in percentages of 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%, and of substituting 1% cement mass with sugarcane bagasse ash (SBA). Mining tailings and the SBA had their physical, morphological and granulometric properties evaluated. Paving block/paver physical and mechanical properties (means of density, water absorption [NBR 9781], compressive strength [NBR 9781] and scanning electron microscopy features) were tested before and after accelerated aging. The use of sugarcane bagasse as raw material for the production of pavers is not recommended. However, use of sand paver production can be totally replaced by mining waste, so providing an alternative for proper disposal and also adding value.

**Keywords:** interlocking pavements, composites, alternative material, agroindustrial waste.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por metais preciosos, como prata, ouro e cobre no Brasil é conhecida desde o século XVII, quando os portugueses entranhavam-se pelo sertão do país à procura desses materiais. Desde o período colonial até os dias atuais, a mineração tem grande importância para o setor financeiro e econômico do país. Segundo o Portal Brasil (2017), em 2016 o país exportou cerca de US\$ 36,6 bilhões em bens minerais, acometendo 20% do total das exportações da balança comercial, contribuindo com o PIB e gerando empregos diretos e indiretos (FERNANDES, 2008).

Apesar de a mineração trazer grandes benefícios para a economia do país, ela está diretamente ligada à problemas sócios ambientais. Para que o minério esteja apto a ser comercializado, ele primeiramente precisa ser extraído de solos e rochas e passar por processos de beneficiamento, afim de se obter um material menos irregular e com menos impurezas. Nesses processos de beneficiamento, são gerados grandes volumes de rejeitos, inertes ou não, que são descartados no meio ambiente de forma indevida e sem controle, comprometendo a fauna, a flora local e a população local (SILVA, 2007).

Dimensionar a quantidade de resíduos sólidos gerados pela atividade mineradora é um grande desafio, pois segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2012), a diversidade e complexidade das operações e tecnologias utilizadas nos processos de extração e beneficiamento de minérios é muito grande, mas entre 1996-2005, a produção total de rejeitos foi de 2,179 bilhões de toneladas, sendo o minério de ferro responsável por 35,08% desse valor e estimando-se que entre 2010-2030 passe a representar 41,38%, num total de 11,409 bilhões de toneladas de rejeitos gerados.

O bagaço de cana de açúcar, proveniente da produção do açúcar e de álcool, é outro tipo de resíduo produzido em grande escala no Brasil onde a produção (2015/2016) atingiu 166,4 milhões de toneladas (RAMOS e

NACHILUK, 2017). Essa grande quantidade de bagaço gerada é decorrente da grande produção nacional de cana de açúcar, onde o país produziu 634,8 milhões de toneladas na safra referente a 2014/2015, representando aproximadamente 9 milhões de hectares (CONAB, 2017). A produção, estimada, de cana-de-açúcar no Brasil para a safra de 2018/2019 é de 635,51 milhões de toneladas, aumento de 0,4% em relação à safra do período anterior (CONAB, 2018).

Esse resíduo é atualmente utilizado para queima em caldeiras para geração de energia, o resultado é uma grande quantidade de cinzas de bagaço de cana de açúcar, o que também gera problema para descarte. Segundo Borlini et al. (2006) a quantidade de cinza produzida é de aproximadamente 5% em peso em relação a massa inicial do bagaço da cana.

As empresas mineradoras e do setor sucroalcooleiro, acompanhando a tendência mundial, devem estar aptas a aumentar sua produção, mas em comum acordo com a preservação do ambiente, buscando alternativas que diminuam os efeitos negativos da mineração. Nesse sentido, e aliando o alto consumo de recursos naturais pelo setor da construção civil com o problema do descarte de rejeitos provenientes de atividades industriais, existe hoje uma crescente tendência de pesquisas que buscam desenvolver compósitos cimentícios que substituam os produtos tradicionais usados na construção civil por outros concebidos usando materiais de pouco ou nenhum interesse para as indústrias, como telhas, blocos, caixas d'água, painéis cimento madeira e pisos POGGIALI et. al. 2010; SILVIA et. al 2014).

Nesse contexto de reaproveitamento, destinação adequada e agregação de valor aos resíduos, essa pesquisa objetivou avaliar o potencial de utilização de rejeitos de mineração em associação a cinzas de bagaço de cana de açúcar para produção de blocos de concreto destinados a pavimentação intertravada.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção e caracterização dos materiais

O rejeito de mineração (RM) foi doado pela empresa SAMARCO S/A e as cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBC) obtido da queima do bagaço de cana de açúcar para geração de vapor a uma temperatura aproximada de 495°C, por um alambique situado na cidade de Lavras – MG. O rejeito e as CBC foram secos em estufa a 70°C por 24 horas e logo após pesados e armazenados em sacos plásticos.

A composição mineralógica do RM foi feita a partir de análises químicas quantitativas realizadas no Laboratório químico da Samarco, onde foram determinados os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe e MnO por um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP- OES). Os teores de ferro foram determinados por dicromatometria. Os teores de SiO<sub>2</sub> foram determinados por diferença.

Para detectar os elementos cristalinos presentes nas CBC foi realizada a Difração de Raios X. As amostras foram depositadas em porta amostra e os difratogramas foram obtidos usando um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 600 com radiação Cu-K $\alpha$ , comprimento de onda 1,54x10<sup>-10</sup>m. As condições de medida foram 30kV, 30mA. A taxa de varredura de 1°min<sup>-1</sup>, de 5 a 45°.

Para as análises granulométricas do RM e das CBC foram utilizadas peneiras com as aberturas de 297 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 149 $\mu$ m, 105 $\mu$ m, 74 $\mu$ m, 53 $\mu$ m, 44 $\mu$ m e 37 $\mu$ m. Para o RM, foi realizada uma análise de superfície específica seguindo o método de Blaine sendo obtida por medição de permeâmetro de Blaine e utilizando a densidade do material obtido em análise em picnômetro de hélio. A caracterização do agregado miúdo, areia, foi realizada seguindo a norma

NBR NM 248 (2003), onde foram determinados parâmetros de massa unitária, massa específica e granulometria.

A metodologia de Hofstrand et al. (1984) foi utilizada para a evolução da temperatura de hidratação do cimento (termometria). Por meio deste ensaio, é possível mensurar, de forma sistemática, a evolução da temperatura da mistura de rejeito de mineração com o cimento durante certo período de tempo. O monitoramento dessa temperatura de reação é utilizado como parâmetro para se determinar o índice de inibição da “pega” ou o endurecimento do cimento. A compatibilidade do material adicionado ao cimento foi classificada de acordo com Okino et al (2004), entre baixa (quando o índice de inibição se encontra  $<10$ ), intermediária (índice de inibição  $10 \leq I < 50$ ), alta ( $50 \leq I \leq 100$ ) e muito alta ( $I > 100$ ).

O ensaio de pozolanicidade que tem como objetivo avaliar o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias foi feito para avaliar o potencial pozolânico das CBC e do RM, utilizando a norma NBR 5752 (ABNT, 2014). Os materiais utilizados para a formulação de três argamassas, A, B e C, foram o cimento CPM F32, areia normalizada, CBC, RM e água. A argamassa referência, argamassa A, era composta apenas de cimento, areia normalizada e água. A argamassa B e C eram compostas por areia normalizada, água e se diferiam apenas por conter CBC (argamassa B) e RM (argamassa C) em substituição ao cimento em uma porcentagem de 25% em massa.

As quantidades necessárias de cada material para a formulação das argamassas estão descritas na Tabela 1, onde para cada argamassa foram produzidos 12 corpos de prova, sendo necessários quatro amassamentos com as quantidades apresentadas. Após 24 horas de cura em câmara úmida e temperatura ambiente, os corpos de prova foram imersos em solução de água e cal virgem onde permaneceram até o dia de ruptura, realizada em uma máquina

de ensaio hidráulica elétrica digital, utilizando velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

Tabela 1 - Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.

Material	Massa para mistura (gramas)		
	Argamassa A	Argamassa B	Argamassa C
Cimento Portland CP II F 32	624	468	468
CBC	-	156	-
RM	-	-	156
Água	300	300	300
Areia normal - fração grossa	468	468	468
Areia normal - fração média grossa	468	468	468
Areia normal - fração média fina	468	468	468
Areia normal - fração fina	468	468	468

Fonte: Da autora.

## 2.2 Produção e avaliação dos pavers

Foi avaliado o efeito de substituição do agregado miúdo, a areia, em porcentagens de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% pelo rejeito de mineração e a sua associação com a substituição de 1% em massa do cimento pelas cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBC). A Tabela 1 apresenta o traço, em porcentagem total, com relação água: cimento de 4,6, utilizado para a moldagem de corpos de prova com dimensões aproximadas de 20x10x7cm (Comprimento, Largura e Espessura, respectivamente). A massa total utilizada foi de 30 kg de mistura para cada tratamento. Para cada tratamento foram produzidos 12 corpos de prova.

Tabela 2 – Traço usado na confecção dos pavers.

<b>TRAÇO EM PORCENTAGEM</b>						
<b>Tratamento</b>	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Brita</b>	<b>Rejeito de mineração</b>	<b>CBC</b>
T1	15,00	31,00	31,00	23,00	0,00	0,00
T2	14,00	31,00	31,00	23,00	0,00	1,00
T3	15,00	24,80	31,00	23,00	6,20	0,00
T4	14,00	24,80	31,00	23,00	6,20	1,00
T5	15,00	18,60	31,00	23,00	12,40	0,00
T6	14,00	18,60	31,00	23,00	12,40	1,00
T7	15,00	12,40	31,00	23,00	18,60	0,00
T8	14,00	12,40	31,00	23,00	18,60	1,00
T9	15,00	6,20	31,00	23,00	24,80	0,00
T10	14,00	6,20	31,00	23,00	24,80	1,00
T11	15,00	0,00	31,00	23,00	31,00	0,00
T12	14,00	0,00	31,00	23,00	31,00	1,00

Fonte: Da autora.

Com os materiais já devidamente pesados, foi utilizada uma betoneira com capacidade de 120 litros para a realização da mistura dos componentes (Figura 1A). Primeiramente foi adicionada a brita e uma quantidade pequena de água, apenas o suficiente para limpar qualquer impureza que estivesse presente na superfície da brita e compromettesse a aderência da argamassa. Em seguida os outros materiais secos foram incorporados (areia, pó de pedra, RM, cimento e CBC, de acordo com cada tratamento pré-estabelecido) e por fim o restante da água. Após aproximadamente 3 minutos de homogeneização da mistura na betoneira, esta foi transferida para a máquina de vibro compressão (Figura B) modelo VFP 30 flex da empresa Vibra forma, onde foi distribuído uniformemente pelas formas (Figura C) e permaneceu (Figura D) por cerca de 3 minutos até ser desenformado (Figura E).

Depois de desenformado (Figura F), os pavers foram curados em temperatura ambiente por 28 dias quando então foram submetidos aos ensaios de

densidade, absorção de água e resistência compressão seguindo a norma NBR 9781 (2013), antes e após o envelhecimento acelerado. O envelhecimento acelerado foi realizado baseando-se na norma NBR 13554 (2012), que determina que sejam realizados 6 ciclos de envelhecimento. Cada ciclo de envelhecimento correspondeu a imersão dos corpos de prova por 5 horas em água e posterior secagem em estufa na temperatura de  $71\pm 2^{\circ}\text{C}$  por período de 42 horas.

Figura 1 – Processo de fabricação dos blocos pavers.



Fonte: Da autora.

Para a caracterização da microestrutura dos pavers produzidos foram utilizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), no

equipamento da marca ZEISS, modelo DMS 940. Os ensaios foram feitos em amostras dos pavers antes e após o envelhecimento acelerado, com dimensões aproximadas de 5 mm x 5 mm. As amostras obtidas foram recobertas com banho de ouro.

As propriedades dos pavers foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado, em que os dados foram arrançados em esquema fatorial 6 x 2 (seis porcentagens de substituição de areia por resíduo de mineração - 0, 20, 40, 60, 80 e 100%; e duas concentrações de cinzas em substituição ao cimento - 0 e 1%). A análise de variância e o teste regressão foram realizados ao nível de 5% de significância.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da matéria prima utilizada na produção dos pavers

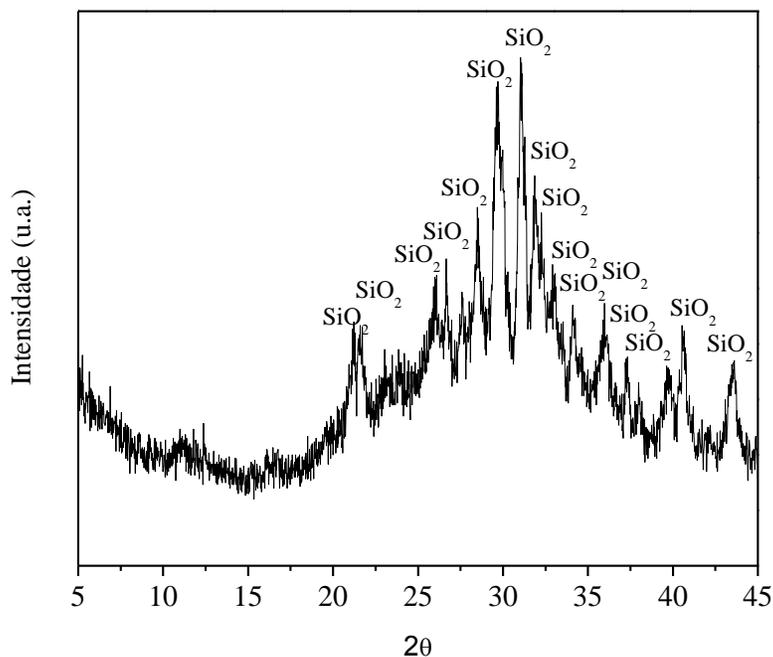
Na Tabela 3 estão apresentados os valores das propriedades físico-químicas do rejeito de mineração. A presença em proporções significativas de Fe e  $Al_2O_3$  na composição do rejeito de mineração são importantes quando relacionados com o cimento, que tem em sua composição ferro aluminato tetracálcio (C4AF), o que aumenta as chances do rejeito apresentar boa interação com a matriz cimentícia. O  $SiO_2$  componente químico encontrado em maior porcentagem na composição do rejeito de mineração (com teor de 79,60%) e também na CBC (Figura 2), caracteriza ambos os resíduos como materiais com potencial para serem incorporados em matrizes cimentícias, uma vez que silicatos de cálcio são as matérias-primas mais importantes encontradas no cimento Portland.

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do rejeito de mineração.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Ph	6,8
Argila (dag/Kg)	52
Silte (dag/Kg)	16
Areia (dag/Kg)	32
Fe	13,63
$SiO_2$	79,60
P	0,011
$Al_2O_3$	0,20
LOI	0,43

Fonte: Da aurora.

Figura 2 – Difratoograma da amostra de CBC



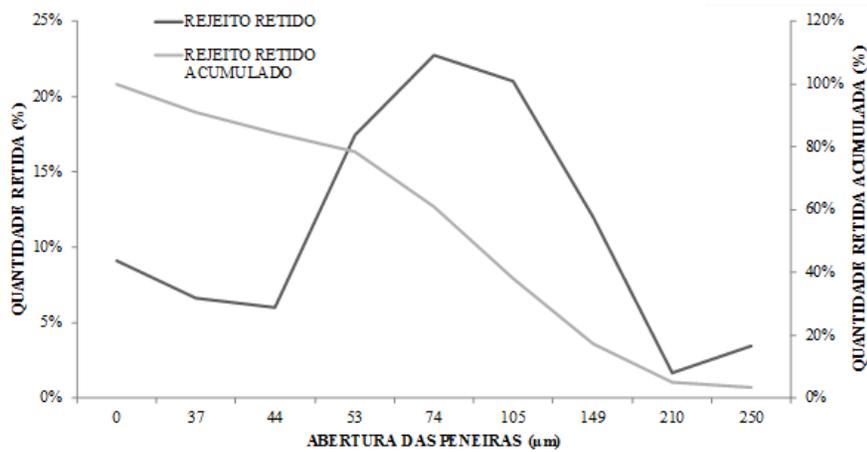
Fonte: Da autora.

A sílica é um dos compostos químicos mais desejáveis e relevantes em pesquisas com compósitos à base de cimento (VILLAQUIRÁN-CAICEDO, DE GUTIÉRREZ, 2018; CARDOSO et al., 2018; JUNG et al., 2018). O hidróxido de cálcio (CaOH), liberado pela hidratação do cimento, em contato com a sílica, produzem silicatos de monocálcicos hidratados, que dão origem a uma massa firme e resistente ao longo do tempo, o que proporciona melhoras significativas na redução do tamanho dos poros pelo fato de melhorarem a qualidade da cristalização do cimento, tornando-o mais resistente à compressão, tração e aumentando a sua durabilidade. (YOUNES, ABDEL-RAHMAN; KHATTAB, 2018; SANTOS et al., 2007; TIAN; ZHANG, 2016).

As curvas granulométricas de porcentagem retida e porcentagem retida acumulada nas peneiras da série normal referentes ao ensaio de granulometria

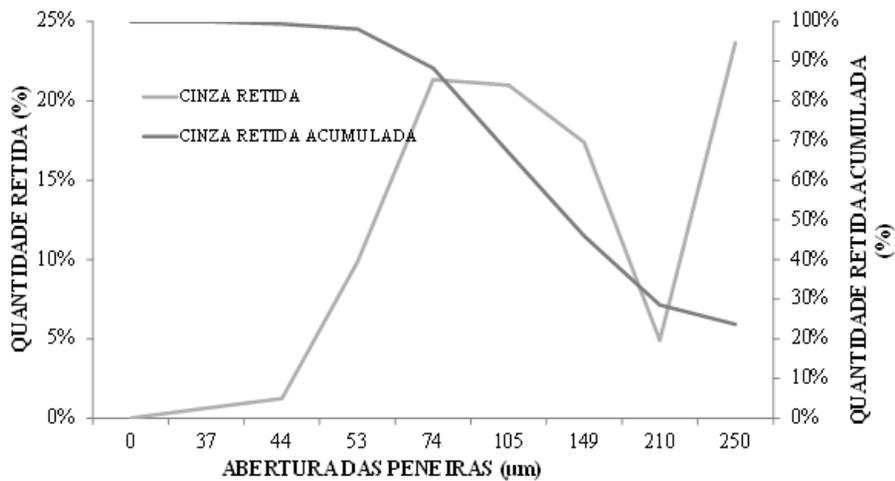
dos agregados miúdos (RM, CBC e areia) estão apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente.

Figura 3 – Porcentagem de rejeito de mineração retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.



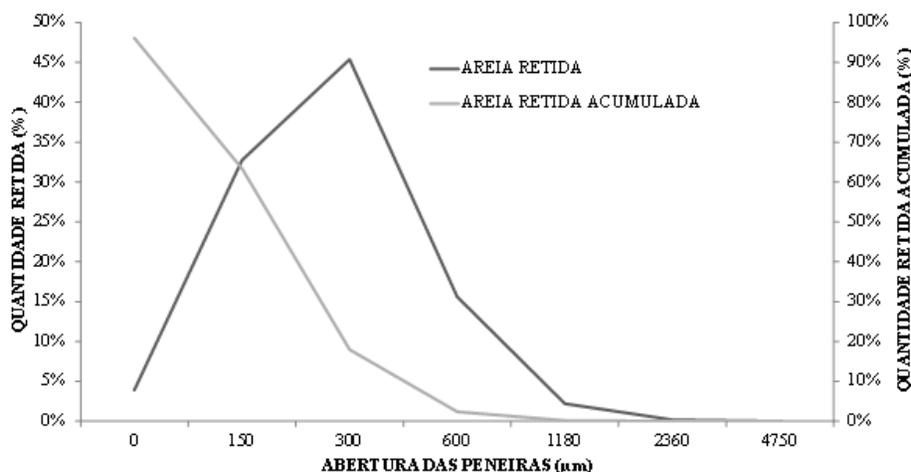
Fonte: Da autora.

Figura 4 - Porcentagem de cinzas de bagaço de cana retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.



Fonte: Da autora.

Figura 5 - Porcentagem da areia retida e retida acumulada nas peneiras da série normal.



Fonte: Da autora.

O RM apresentou módulo de finura de 4,78 mm e dimensão máxima de 0,25 mm, onde 50% das partículas apresentaram 0,064 mm, caracterizando o material como muito fino. A massa específica, obtida pelo frasco de Chapman, foi de 2,703 g/cm<sup>3</sup>. A CBC e o RM apresentaram granulometria semelhantes, tendo a maior quantidade de materiais retidos no intervalo de peneiras com abertura de 0,21 a 0,044 mm. A areia teve maior quantidade retida nas peneiras com aberturas de 0,30 e 0,15 mm.

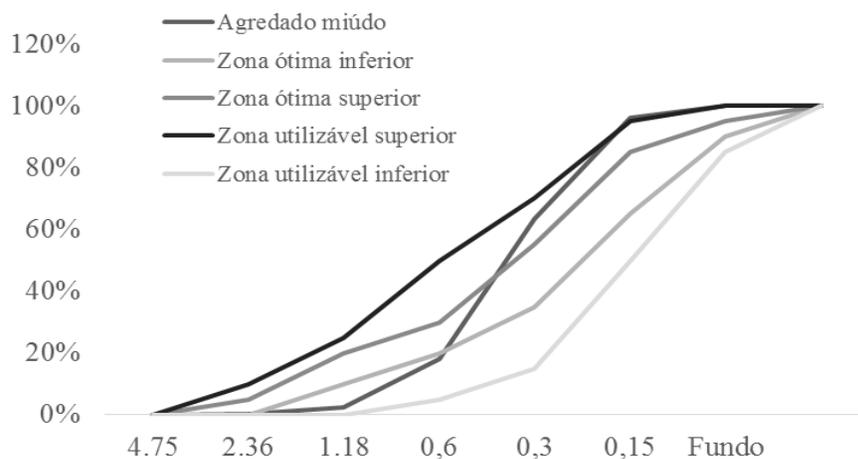
De forma geral, observa-se que o RM e a CBC apresentam dimensões reduzidas quando comparada com a areia. De acordo com Pureza (2007) a granulometria do material influencia diretamente a plasticidade da massa, a porosidade final e a densidade do compósito.

Isaias (2011) relata que areias muito grossa geram misturas de concreto muito áspero e com baixa trabalhabilidade, enquanto as muito finas aumentam o consumo de água, e conseqüentemente, o consumo de cimento para manter uma dada relação água/cimento. Zardo et al. (2004), ao caracterizar as CBC para

utilizar como “filler” em compostos de fibrocimento, utilizou granulometria parecida com a desse trabalho, onde as maiores porcentagens de retenção das CBC foram nas peneiras com aberturas de 0,15, 0,074 e 0,045 mm. Os resultados da pesquisa revelam que as CBC apresentam alto valor de SiO<sub>2</sub> em forma de cristais e baixa área superficial, podendo ser utilizadas apenas como enchimento em compósitos à base de cimento Portland.

A Figura 6 se refere às zonas utilizáveis e as zonas ótimas estabelecidas pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 6 – Zonas utilizáveis e zonas ótimas, segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009).



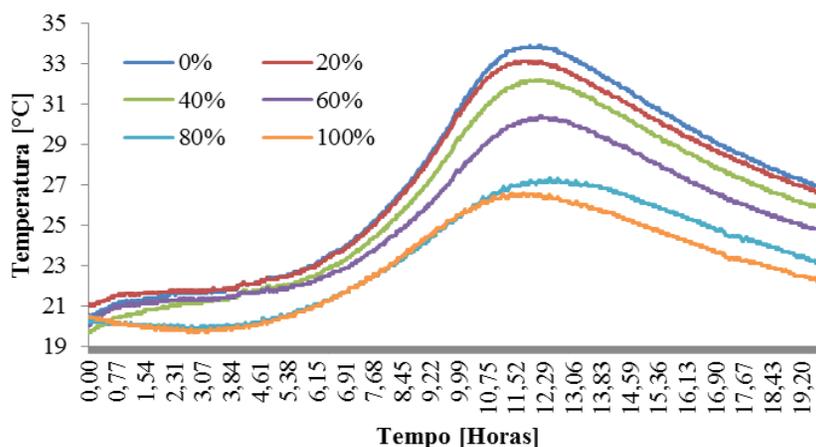
Fonte: Da autora.

Através da curva granulométrica da areia, é possível verificar que ela se encontra dentro dos limites superior e inferior utilizáveis, com módulo de finura de 2,79 e dimensão máxima característica de 1,18 mm, o que faz com que a areia tenha granulometria adequada para a confecção dos blocos de concreto, não comprometendo a trabalhabilidade da massa. Oliveira (2004) afirma que os

fabricantes de blocos de concreto para pavimentação, geralmente utilizam areias classificadas como média (zona 3), segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983), com módulos de finura variando entre 2,5 e 3,2. Estas areias devem apresentar uma distribuição granulométrica contínua e equilibrada, com o propósito de se obter uma mistura mais econômica e com menos poros. Santos e Borja (2007) encontram valores de módulo de finura 2,37 e dimensão máxima de 2,4 mm na caracterização da areia. Costa, Gumieri e Brandão (2014), ao caracterizarem a areia encontraram dimensão máxima igual a 2,4 mm e módulo de finura igual a 2,42.

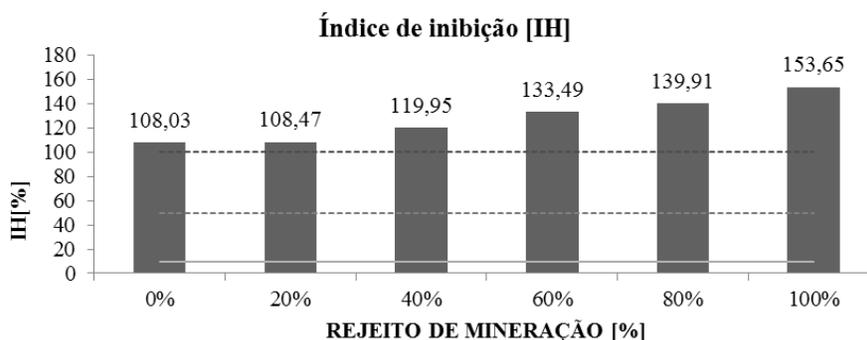
Na Figura 7 estão os resultados do teste de inibição com a substituição da areia pelo rejeito de mineração nas porcentagens de 0, 20, 40, 60, 80 e 100%. As curvas de hidratação da pasta de cimento foram convertidas em índices de inibição segundo a metodologia proposta por Hofstrand et al. (1984) e os valores obtidos para cada tratamento do pavers produzidos estão apresentados na Figura 8.

Figura 7 - Efeito da porcentagem de resíduo de mineração sobre a hidratação do cimento na produção dos pavers.



Fonte: Da autora.

Figura 8 – Índice de hidratação em função da porcentagem de rejeito de mineração utilizado para a produção dos paviers.



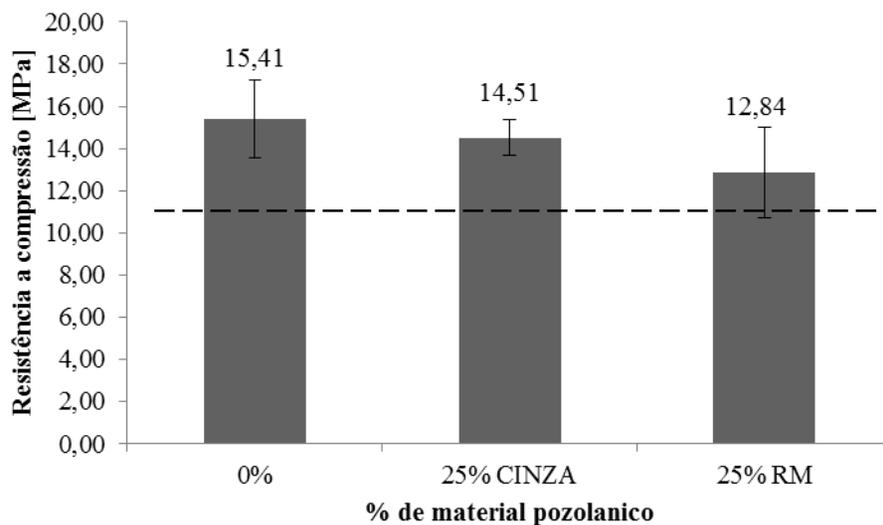
Fonte: Da autora.

É possível observar que o tratamento com 100% de RM foi o que apresentou maior índice de inibição (153,65%) e o tratamento controle foi o que apresentou o menor índice de inibição (108,03%). Não foi observado aumento da inibição quando utilizado 20% de RM. Todos os tratamentos, inclusive o controle, se enquadram no grupo de inibição alta, segundo a classificação de Okino et al. (2004).

O aumento do índice de inibição está relacionado com as menores dimensões dos resíduos de mineração (Figura 3) e por consequência maior área superficial do resíduo (Blaine de  $1932 \pm 58 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) em contato com o cimento, o que devido sua interação química com o cimento pode vir a retardar as reações de hidratação (CONDE SILVA; MILESTONE, 2018); NASSER et al., 2016.

Os dados de índice de atividade pozolânica encontrados no teste de resistência à compressão para a argamassa referência (A), a argamassa com substituição parcial do cimento pelas CBC (argamassa B) e a argamassa com substituição parcial do cimento por RM (argamassa C), estão expressos na Figura 9.

Figura 9 - Resistência à compressão no ensaio de pozolanicidade.



Fonte: Da autora.

O valor de resistência a compressão encontrado para a argamassa referência (A) foi de 15,41 MPa, para a argamassa B foi de 14,51 MPa e para a argamassa C foi de 12,84 MPa. Para que as argamassas com CBC e RM atendessem a norma e se caracterizassem como materiais pozolânicos, o valor mínimo de resistência à compressão alcançado por elas teria de ser de 11,55 MPa (75% da resistência à compressão da argamassa referência). Ambas as argamassas alcançaram 75% do valor da argamassa referência, comprovando a viabilidade de uso das CBC como substituto parcial do cimento Portland e do RM como substituto do agregado miúdo, a areia.

O difratograma das CBC (Figura 2) revela a alta presença de sílica em sua composição química, o que aumenta as chances do material se classificar como pozolânico. Porém, segundo Neville (1997), para que a sílica seja capaz de interagir com hidróxido de cálcio, ela deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando cristalina, sua reatividade é muito pequena. A cristalinidade do

material é influenciada pela temperatura de combustão em que a cinza foi obtida. De acordo com Martinera Hernández et al. (2000) a temperatura de combustão dos resíduos agrícolas deve oscilar entre 400°C e 800°C de modo a evitar a formação de fases cristalinas da sílica, sendo que abaixo de 600°C encontra-se elevado o percentual de sílica amorfa. A temperatura de queima do bagaço de cana de açúcar de onde foram obtidas as cinzas desse trabalho foi de 495°C, estando no limite encontrado na literatura e sendo possível, através da análise de DRX (Figura 2) verificar a presença de fases amorfas.

Ganesam, Rajagopal e Thangavel (2007) obtiveram as CBC por meio de queima controlada à temperatura de 650°C por um período de 1 hora e pelo DRX observaram a presença de sílica amorfa com desvio da linha de base em torno de 22° (2 $\theta$ ), além da presença de pequenas quantidades de fases cristalinas como quartzo e cristobalita.

Paula et al. (2009) investigando a potencialidade de uso das CBC em substituição parcial ao cimento Portland em porcentagens de 0, 10, 20 e 30% obteve valores de 47,8; 48,0; 46,9; 40,7 MPa respectivamente, comprovando a atividade pozolânica.

### **3.2 Caracterização física e mecânica dos pavers**

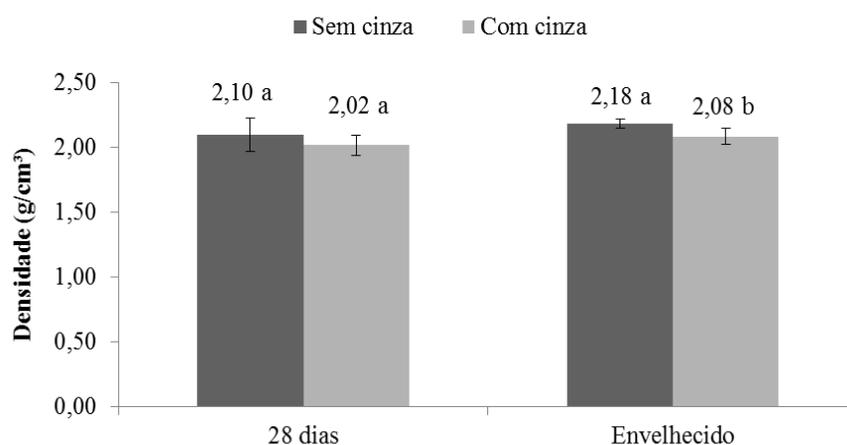
Não foi observada interação entre a porcentagem de RM e a utilização da CBC sobre as densidades dos pavers, aos vinte e oito dias de cura e após o envelhecimento acelerado. Ao analisar o efeito da utilização de CBC (Figura 10) observa-se que houve diferença estatística entre os tratamentos que tiveram utilização das CBC e os tratamentos sem uso das CBC apenas após o envelhecimento acelerado. Os tratamentos que tiveram utilização das CBC apresentaram os menores valores de densidade, fato que pode estar associado

ainda a certo retardamento da cura e a degradação do material na matriz cimentícia com os ciclos de envelhecimento.

Segundo Oliveira et al, 2000, a morfologia das partículas é um dos fatores que pode determinar a densidade de empacotamento, onde quanto menos esféricas essas forem, menor será a densidade de empacotamento, pois há o atrito entre as partículas a partir do contato irregular de suas superfícies e quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica.

Diferentemente do observado nesse estudo, Zardo et. al (2004) ao avaliarem o uso da CBC como “filler” em fibrocimento, observaram que o resíduo preenche os espaços formados entre as partículas grossas, promovendo assim o aumento de densidade dos compósitos. Essa diferença pode ser atribuída às dimensões das partículas utilizadas nos diferentes estudos, além das particularidades de processos de cada tipo de produto.

Figura 10 - Efeito da utilização da cinza de bagaço de cana sobre a densidade dos pavers.



Fonte: Da autora.

Médias seguidas por letras diferentes, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento, diferem estatisticamente pela análise de variância a 5% de significância.

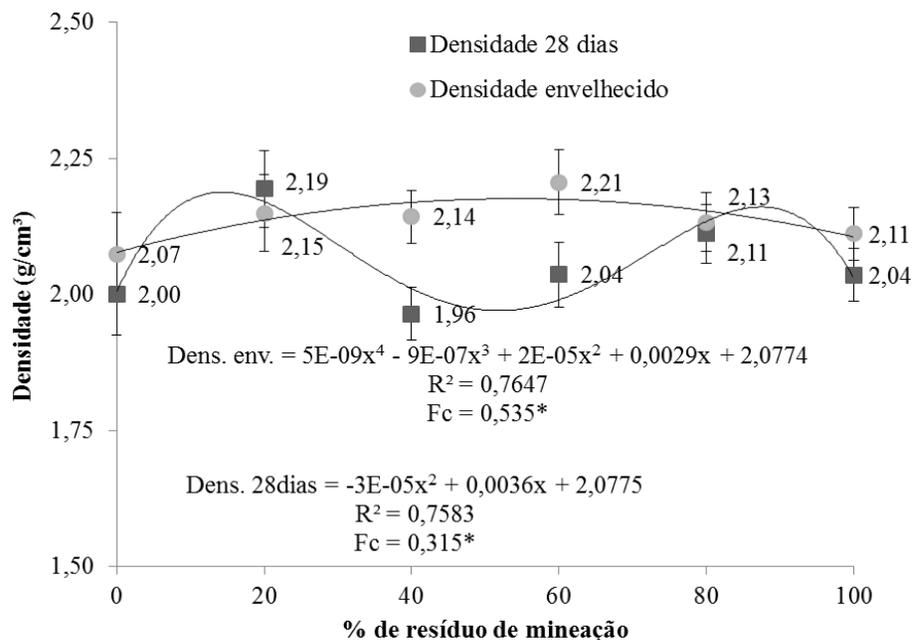
Na Figura 11 observa-se que houve efeito significativo da porcentagem de substituição de areia pelo RM, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, sobre a densidade dos pavers produzidos. Para a densidade aos 28 dias de cura não houve um padrão de variação da propriedade em função da porcentagem de rejeito sobre a densidade dos pisos. Os maiores valores de densidade foram obtidos para os tratamentos com 20 e 80% de rejeito, sendo de  $2,19 \text{ g/cm}^3$  e  $2,15 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

A maior densidade do tratamento com 20% de substituição da areia pelo RM e aos 28 dias cura está associada ao menor resultado no teste de inibição (Figura 9), pois ocorre maior hidratação do cimento e a formação dos silicatos hidratados de cálcio, além ainda da associação com as menores dimensões do rejeito em relação a areia (Figura 3), permitindo preencher os espaços vazios da matriz cimentícia. Contudo, em maiores porcentagens, a relação de inibição do cimento interage com a área superficial do rejeito, o que apesar do rejeito apresentar menor área superficial podendo proporcionar preenchimento dos espaços vazios, esse material também proporciona inibição da hidratação do cimento (Figura 9). Além disso, segundo Castro e Pandolfelli (2009), quanto menor o tamanho das partículas irregulares, menor será a densidade do empacotamento, devido a maior área superficial.

Para os pavers após o envelhecimento acelerado, houve acréscimo da densidade até 60% de RM, seguido da diminuição dos valores. Contudo, mesmo com a substituição total da areia, o valor de densidade se manteve maior que a densidade do tratamento controle. Tal fato se deve a continuidade da hidratação dos pavers, em função de um maior período de tempo e disponibilidade de água durante os ciclos de envelhecimento. Sendo assim, o efeito de inibição do rejeito

passa a ser superado e as menores dimensões do rejeito de mineração passam a atuar de forma efetiva no preenchimento dos espaços vazios.

Figura 11 - Efeito da utilização de resíduo de mineração sobre a densidade dos pavers.

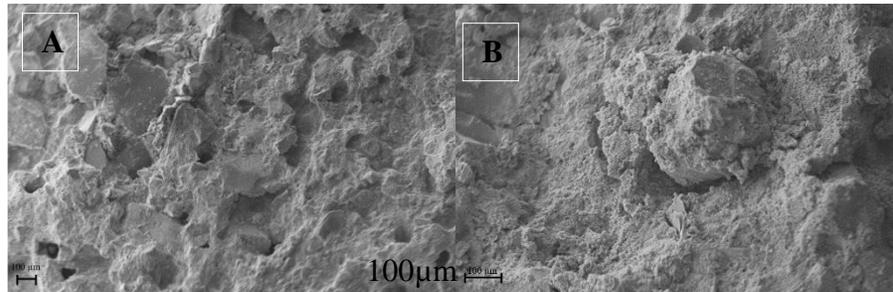


\* Significativo a 5%.

Fonte: Da autora.

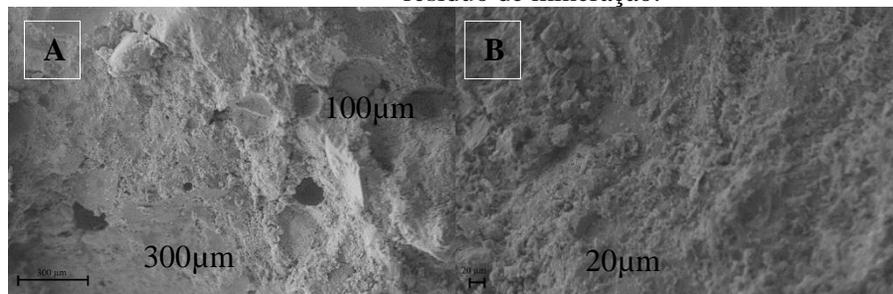
Nas Figuras 12 e 13, estão apresentadas as micrografias obtidas por MEV dos tratamentos com 0% de RM e 100% de RM após 28 dias de cura (A) e após o envelhecimento acelerado (B), onde é possível verificar a diminuição dos poros dos pavers nas formulações com maiores porcentagens de rejeito, justificando o preenchimento dos espaços vazios no compósito. Observa-se que para ambos os tratamentos o envelhecimento acelerado promoveu redução dos poros das amostras, demonstrando a continuidade de cura dos materiais.

Figura 12 - Micrografias dos tratamentos sem resíduo de mineração.



Fonte: Da autora.

Figura 13 - Micrografias dos tratamentos com substituição total da areia por resíduo de mineração.



Fonte: Da autora.

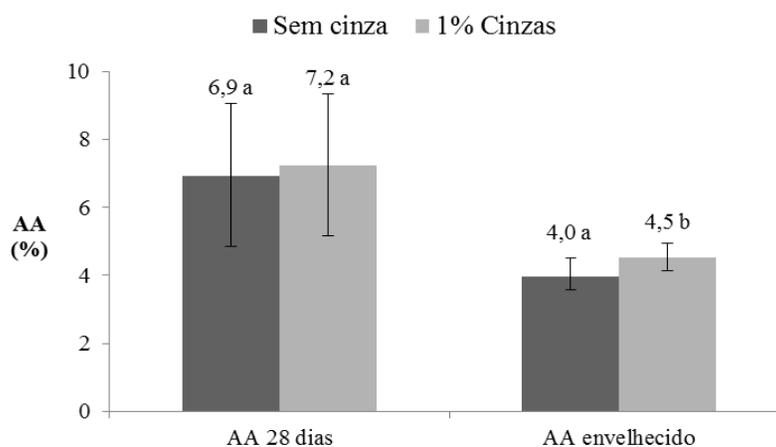
Nas Figuras 14 e 15 estão apresentados os valores médios para o teste de absorção de água dos pavers para os tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado. Não foi observada interação entre a porcentagem de resíduo de mineração e a utilização da cinza de bagaço de cana sobre a absorção de água dos pavers.

Não foi observado efeito da utilização de cinzas em substituição ao cimento para a propriedade de absorção de água dos pavers após os 28 dias de cura. Porém, após o envelhecimento acelerado, observa-se que houve diferença significativa, sendo os pavers com uso de CBC os que obtiveram os maiores

valores médios de absorção de água. O que está diretamente associado com a menor densidade do pavers (Figura 10).

As CBC apresentam maiores valores de módulo de finura e área superficial comparadas ao cimento, podendo estas preencher os poros menores presentes na matriz cimentícia, mas não sendo capazes de preencher os poros maiores. Além disso, ao incorporá-las na mistura, a relação água/cimento é modificada, sendo necessário adicionar mais água para que a trabalhabilidade da massa no estado fresco seja mantida (ALMEIDA et al. 2015). Esse aumento de água pode ter favorecido o aumento da porosidade durante o período de cura dos compósitos e conseqüentemente o aumento dos valores no teste de absorção de água para aqueles que têm CBC em sua composição.

Figura 14 - Absorção de água dos paver sem função da utilização de cinzas de bagaço de cana.

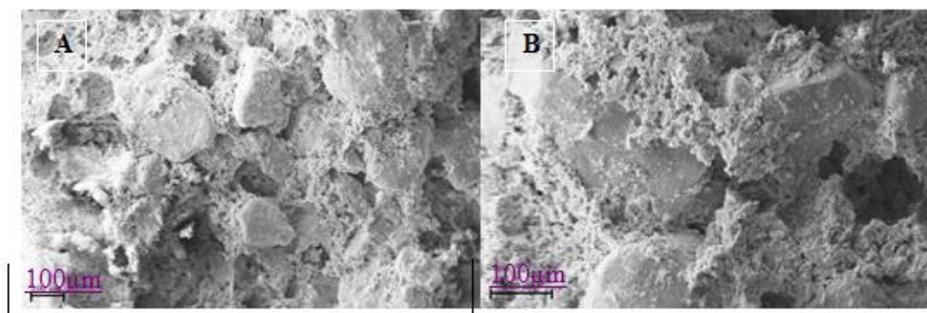


Fonte: Da autora.

Médias seguidas por letras diferentes, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento, diferem estatisticamente pela análise de variância a 5% de significância.

Após os ciclos de envelhecimento acelerado em que os compósitos foram submetidos, houve a redução dos valores de absorção de água, podendo estar associado ao preenchimento dos poros existentes pela hidratação continuada da cura do cimento (Figura 15) e a continuidade de hidratação do cimento.

Figura 15 - Microscopias dos tratamentos com 0% de RM e 1% de CBC com cura de 28 dias (A) e após o envelhecimento acelerado (B).



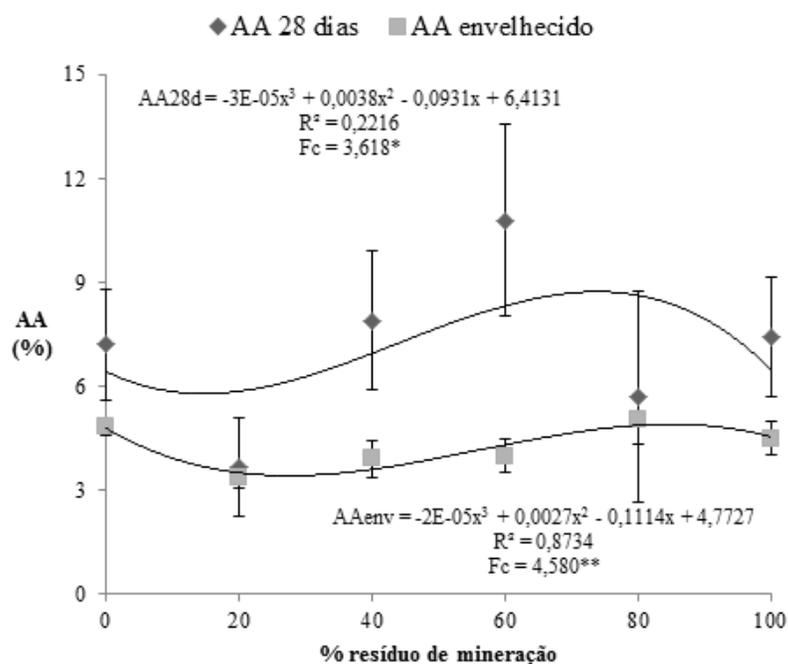
Fonte: Da autora.

Na Figura 16 estão apresentados os valores obtidos no teste de absorção de água para os compósitos antes e após o envelhecimento acelerado, em função da porcentagem de substituição da areia por RM. Observa-se que para os compósitos ensaiados aos 28 dias houve efeito significativo da porcentagem de substituição de areia por RM sobre a propriedade de absorção de água. Verificou-se grande variação dos resultados, sendo os tratamentos com 20 e 80% de substituição de areia por RM os que obtiveram os menores valores, 3,64% e 5,66%, respectivamente, inclusive menores que o tratamento controle (7,19%). Essa tendência apresenta relação direta com a densidade dos compósitos (Figura 11), sendo os pavers com maiores densidades os que apresentam menor quantidade de poros e por consequência a menor absorção de água (Figura 16).

Após o envelhecimento acelerado também foi verificado efeito significativo da substituição de areia por RM. Contudo, a tendência foi diferente

da observada para os pavers ensaiados aos 28 dias de cura, sendo verificada redução dos valores de absorção de água, em relação ao tratamento controle, quando avaliadas as porcentagens de 20,40 e 60% de RM, seguido do aumento dos valores médios de absorção de água. Esse aumento dos valores de absorção de água está associado ao maior efeito de inibição do rejeito em porcentagens maiores de utilização (Figura 8).

Figura 16 - Absorção de água dos pavers em função da porcentagem de substituição da areia por resíduo de mineração.



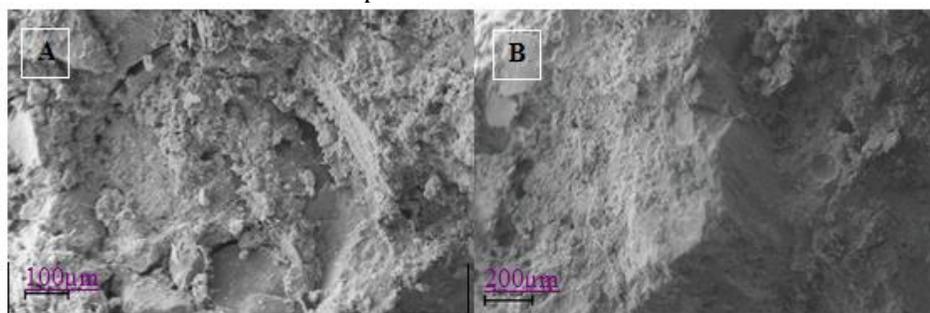
\*\* Significativo a 1%.

Fonte: Da autora.

Os valores de absorção de água para os pavers que sofreram o envelhecimento acelerado foram menores do que aqueles que foram ensaiados após os 28 dias de cura. Esses resultados estão associados ao tempo de cura do cimento, que pode não ter sido suficiente para os 28 dias, mas com os ciclos de

envelhecimento em que eles foram submetidos, a hidratação do cimento foi continuada e a cura completada, indicando a diminuição dos valores de AA, ocorrência relatada também por Zardo et al. (2004), que concluíram que com a hidratação da matriz, houve o aumento de ligação entre as CBC e a matriz cimentícia, o que pode ser observado na Figura 17. Segundo Neville (1997), com a evolução da hidratação do cimento, os poros são gradativamente preenchidos com produtos da hidratação, resultando na diminuição da permeabilidade do compósito.

Figura 17 - Tratamentos com 100% de RM e 1% de CBC com cura de 28 dias e após o envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora.

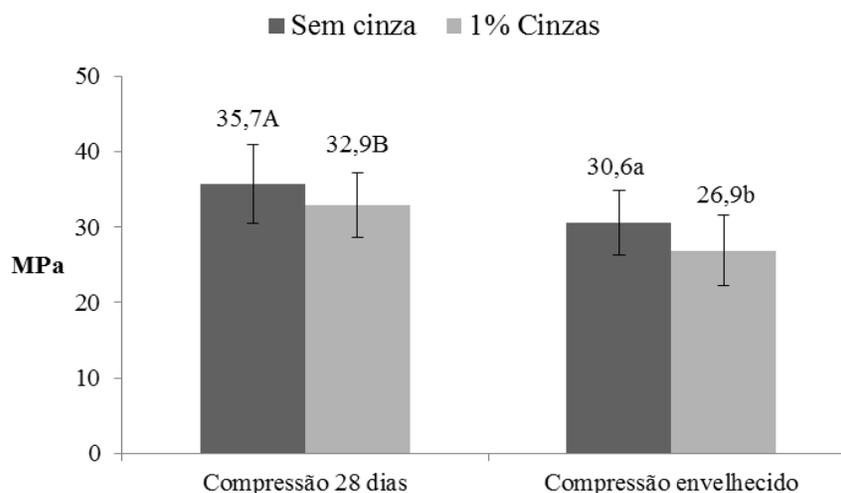
A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) indica que os blocos de concreto devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%. Todos os tratamentos desse trabalho, submetidos ao envelhecimento acelerado atenderam a indicação contida nessa norma. Nenhum tratamento avaliado aos 28 dias de cura obteve valores inferiores ao máximo determinado pela norma de absorção de água para pavers.

Aiqin, Chengzhi e Ningsheng (1999), explicam que dois aspectos devem ser considerados simultaneamente: quando o grau de hidratação é pequeno (primeiras idades), a influência da densidade de empacotamento é principal, e

quando o grau de hidratação é maior (idades mais avançadas), tanto a densidade de empacotamento quanto o grau de hidratação influenciam a porosidade simultaneamente. Nesse caso, o sistema não possui apenas uma maior densidade de empacotamento, mas também um maior grau de hidratação, resultando em uma menor porosidade. Assim, do ponto de vista da porosidade, as influências da densidade de empacotamento e do grau de hidratação devem ser consideradas cooperativamente, o que justifica os dados encontrados nesse trabalho, onde não se deve levar em consideração apenas a porcentagem de RM de cada tratamento, mas também o grau de hidratação alcançado por cada um deles.

Não foi observada interação entre a porcentagem de RM e a utilização da CBC sobre a resistência a compressão dos pavers. A Figura 18 apresenta os valores médios para o teste de compressão dos pavers para os tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado, em função do efeito da utilização de CBC.

Figura 18 - Valores médios de compressão dos pavers em função da utilização de cinzas de bagaço de cana.



Fonte: Da autora.

Médias seguidas por letras diferentes, aos 28 dias de cura ou após o envelhecimento, não diferem estatisticamente pela análise de variância a 5% de significância.

Observou-se que a substituição de cimento por CBC na porcentagem de 1% promoveu redução significativa dos valores de resistência de compressão aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado, mesmo as cinzas apresentando propriedades de pozolanicidade (Figura 9).

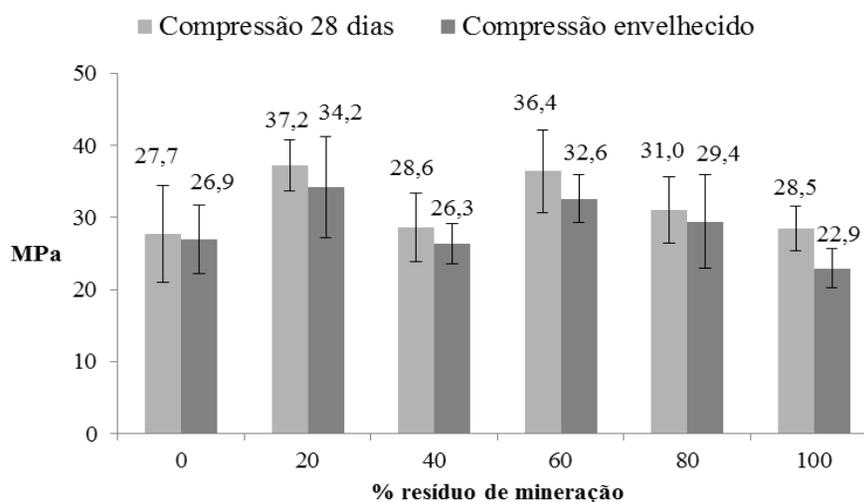
A adição de material pozolânico influencia a densidade de empacotamento do sistema, alterando, assim, a quantidade de água de preenchimento. Como o material pozolânico possui uma área superficial maior que o cimento, ele também influencia a quantidade de água na camada de superfície (ZHAN et al., 1996). Sendo assim, a adição de um material pozolânico influencia a demanda de água de mistura de um sistema e, conseqüentemente, sua resistência, devido a formação de maior quantidade de poros e diminuição da densidade do material (Figura 10).

Rodrigues et al. (2006) ao avaliar compósitos com adição de cinza de casca de arroz e polpa bambu, observaram que a resistência a compressão aos 28 dias das argamassas é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado. Os autores atribuíram ao fato que o material pozolânico começa reagir aos 7 dias de cura, retardando assim o processo total de cura. Essa mesma tendência também foi observada por Paula et al. (2009) ao avaliarem o potencial da cinza de bagaço de cana de açúcar como material pozolânico.

A Figura 19 apresenta os valores médios para o teste de compressão dos pavers para os tratamentos avaliados antes e após o envelhecimento acelerado, em função do efeito da substituição de areia por RM em diferentes porcentagens. Foi possível verificar que não houve efeito da substituição da areia por RM sobre a resistência a compressão dos pavers. Sendo possível a areia ser

completamente substituída pelo RM mesmo após os ciclos de envelhecimento acelerado.

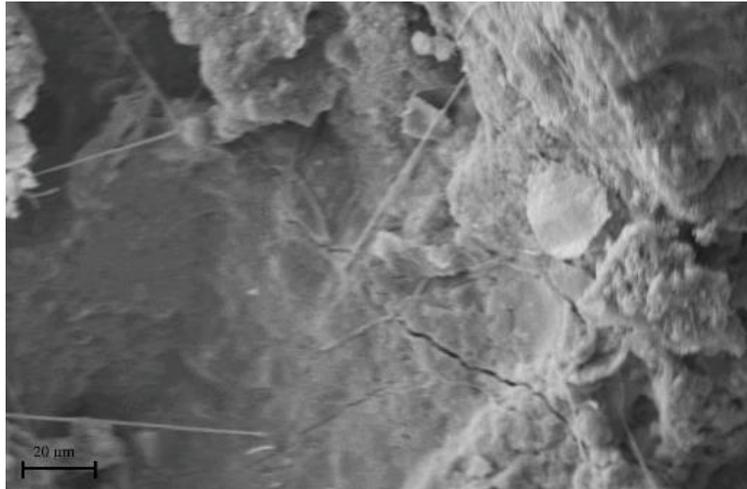
Figura 19 - Valores médios de compressão dos pavers em função da utilização de diferentes porcentagens de substituição da areia por resíduo de mineração.



Fonte: Da autora.

Houve redução dos valores de resistência a compressão com a realização do envelhecimento acelerados dos pavers. Essa redução está associada as microtrincas geradas pelos ciclos de molhagem e secagem dos compósitos (Figura 20). As microtrincas acontecem, pois, a zona de transição entre a pasta de cimento e a pozolana (CBC) é mais fraca que a pasta de cimento puro, influenciando diretamente na resistência à compressão (SUAN-IAM e KANUL, 2014).

Figura 20 - Microscopia dos tratamentos com 100% de RM com envelhecimento acelerado.



Fonte: Da autora.

A norma NBR 9781 (2013) determina que os valores de resistência a compressão dos pavers devem ser maiores ou iguais a 35 MPa quando destinados a tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Nesse sentido, apenas os tratamentos com 20 e 60% de substituição de areia por resíduo de mineração, antes do envelhecimento acelerado, conseguem atender os requisitos determinado pela norma. A relação água/cimento, a quantidade total de material cimentício e ausência do uso de um superplasticante podem ser indicados como fatores que comprometeram os valores de resistência a compressão.

## **4 CONCLUSÃO**

A cinza de bagaço de cana, apesar de ser classificada como material pozolânico proporcionou diminuição significativa da resistência a compressão, além da diminuição da densidade e aumento da absorção de água dos pavers após o envelhecimento acelerado.

A substituição da areia por resíduo de mineração não resultou em efeito significativo sobre a resistência a compressão dos pavers, mesmo quando realizada de forma total. O uso de rejeito de mineração também não resultou em influencia destacadas para a densidade e absorção de água dos compósitos. Sendo assim, a areia tradicionalmente utilizada na produção dos pavers podem ser totalmente substituídas pelo resíduo de mineração, passando a ser uma opção para destinação adequada e agregação e valor ao resíduo.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Financiamento à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## REFERÊNCIAS

AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. The the o reticanalysisoftheinfluenceoftheparticlesizedistributionofcement system on the property of cement, **Cem. Concr. Res.**29, 11 (1999) 1721-1726.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento – Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009b. 9 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Ministério do Meio Ambiente. Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais Brasília, fevereiro de 2012.

BORLINI, M.C., MENDONÇA, J.L.C.C., PINATTI, D.G., et al., **Cerâmica com cinza de bagaço de cana-de-açúcar: avaliação da influência da cinza e da granulometria nas propriedades físicas e mecânicas**. Anais do 17º CBECIMAT, Foz do Iguaçu, pp. 2033-2041, novembro, 2006.

CARDOSO, C. et al. Using foundry slag of ferrous metals as fine aggregate for concrete. Resources, **Conservation and Recycling**, v. 138, p. 130–141, 2018.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C.. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica [online]**. 2009, vol.55, n.333, pp.18-32. ISSN 0366-6913.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil. V. 1. (2017). Brasília, CONAB, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Observatório agrícola. Acompanhamento da safra brasileira. V. 5- safra 2018/19 – n.2- segundo levantamento. Ago/2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites** 30, p. 410 – 418, Elsevier, 2008.

COSTA, A.V; GUMIERI, A.G.; BRANDÃO, P.R.G. Interlocking Concrete Blocks Produced with sinter feed tailings. Piso intertravado produzido com rejeitos de sinterfeed. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. vol. 7 N. 2 abril, 2014 ISSN: 1983-4195.

FREIRE, W.J. Materiais alternativos de construções. In: FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. (Coords). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: Ed. Unicamp, 2003. p.27-54.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. *Forest Products Journal*. Madison, v. 34, n 2, p. 57-61, 1984.

JUNG, S. H. et al. Microstructure Characteristics of Fly Ash Concrete with Rice Husk Ash and Lime Stone Powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

NEVILLE, A. A. **Propriedades do Concreto**, 2º ed. Editora Pini, 1997. OLIVEIRA, IR de et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo arte editorial, v. 224, p. 119-137, 2000.

OLIVEIRA, A., L... **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

OKINO, E.Y.A.; SOUZA, M.R.; SANTANA, M.A.E; ALVES, M.V.; SOUZA, M.E.; TEIXEIRA, D.E. Cement-bom de dwood particle board with a mixture of feucalyptandrubber wood. **Cementand Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. C. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

POGGIALI, F., S., J.. **Desenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adição de cinza de bagaço de cana-de- açúcar.** Dissertação (mestrado em construção civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RAMOS, R.C.; NACHILUK, K. Geração de Bioenergia de Biomassa da Cana-de-açúcnasUsinasSignatáriasaoProtocoloAgroambientalPaulista, Safra 2015/2016. **Análise e Indicadores do Agronegócio** v. 12, p. 7, 2017.

RODRIGUES, C. S.; GHAVAMI, K.; STROEVEN, P. Porosity and water permeability of rice husk ash-blended cement composites reinforced with bamboo pulp. **Journal of Materials Science**, v.41, p.6925-6937, 2006.

SILVA J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista espaço da Sophia**, v. 8, n. 1, 2007.

SANTOS, A.V.; BORJA, E.V. Avaliação das propriedades mecânicas de blocos intertravados com residuo de pneu reciclado. **Holos**, Ano 23, Vol. 3, 2007.

SANTOS, I. et al. Effect of the chemical attack on the properties of cementitious composites with partial substitution of ash from sugar cane bagasse in natura. **Revista Materia**, v. 22, n. 2, 2017.

SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar** - Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2007a.

TIAN, H.; ZHANG, Y. X. The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 237–250, 2016.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A.; DE GUTIÉRREZ, R. M. Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. **Materials Letters**, v. 230, p. 300–304, 2018.

YOUNES, M. M.; ABDEL-RAHMAN, H. A.; KHATTAB, M. M. Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites. **Journal of Building Engineering**, v. 20, n. October 2017, p. 42–50, 2018.

ZARDO, A. M. BEZERRA, E. M; MARTELLO L.S.; JUNIOR, H.S. **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “fuller” em compostos de febrocimento**. Anais da I Conferência Latino- Americana de construção sustentável, São Paulo, ISBN 85-89478-087-4, Julho de 2004.