



NAYHARA CAMILA ANDRADE

**PROPRIEDADES DE PISOS INTERTRAVADOS
PRODUZIDOS COM RESÍDUOS VEGETAIS E INDUSTRIAIS**

LAVRAS – MG

2019

NAYHARA CAMILA ANDRADE

**PROPRIEDADES DE PISOS INTERTRAVADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS
VEGETAIS E INDUSTRIAIS**

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 Lignocelulósicos, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes

LAVRAS – MG

2019

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

Andrade, Nayhara Camila.

Propriedades de pisos intertravados produzidos com resíduos
vegetais e industriais / Nayhara Camila Andrade. - 2019.

98 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Compósitos cimentícios. 2. Pavimentação. 3. Materiais
Pozolânicos. I. Mendes, Rafael Farinassi. II. Título.

NAYHARA CAMILA ANDRADE

**PROPRIEDADES DE PISOS INTERTRAVADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS
VEGETAIS E INDUSTRIAIS**

**PROPERTIES OF INTERLOCKING FLOORS PRODUCED WITH VEGETABLE
AND INDUSTRIAL WASTE**

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 Lignocelulósicos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de agosto de 2019.

Dr. Rafael Farinassi Mendes – UFLA

Dr. Rodrigo Allan Pereira – UFLA

Dr. David Cardoso Dourado – UNIFESSPA

Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes

LAVRAS – MG

2019

*Aos meus pais.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que permite que todas as coisas se concretizem em minha vida, que me concedeu a cada dia sabedoria, saúde, confiança, força e perseverança para seguir e concluir mais esta etapa.

Aos meus queridos e amados pais Geraldo e Célia, que por todos esses anos me deram muito amor e carinho, me ensinando valores e princípios que contribuíram para a minha formação como ser humano. Agradeço por terem acreditado em mim e por não medirem esforços para que eu chegasse até aqui.

Agradeço às minhas irmãs Renata, Márcia e Nayhane, pelo apoio, incentivo e por sempre cuidarem de mim com muito amor e carinho.

À minha avó Maria, pelos conselhos e por tantas orações, que me deram forças para seguir em todos os momentos de dificuldades.

Ao meu namorado Adriano por todo amor e carinho e por sempre estar ao meu lado me incentivando na realização de todos os meus objetivos.

Ao meu sobrinho Pedro, por todo carinho, amor e alegrias.

Aos meus tios e tias, em especial Tia Nem e Dedé, agradeço pelo amor e carinho e por me ajudarem sempre que possível.

Aos meus cunhados, em especial ao Gilvani, por toda ajuda e carinho incondicional.

Ao meu orientador professor Dr. Rafael Farinassi Mendes, obrigada por todos os ensinamentos, todas as conversas, pela paciência, pelo carinho e amizade e por acreditar em meu potencial.

Gostaria, de expressar toda minha gratidão a todos os amigos e colegas que tive a oportunidade de trabalhar durante todo o mestrado, em especial à Nayra, Tony, Ticyane, Carol e Alan. Agradeço muito a vocês não só pela ajuda profissional, mas também pela ajuda pessoal.

Ao Núcleo de Estudos e Inovações em Materiais Compósitos (NEIMAC), obrigada pelos bons momentos de convivência e aprendizagens.

Agradeço também à Universidade Federal de Lavras, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros que compõem a banca, que gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta pesquisa, obrigada pela oportunidade de discussão e enriquecimento deste trabalho.

RESUMO

O piso intertravado (*paver*) é um material que favorece a sustentabilidade e a conservação ambiental, uma vez que há um menor consumo de energia em seu processo de fabricação, uma redução na geração de resíduos e uma maior permeabilidade do pavimento. Além disso, apresenta excelentes propriedades físico-mecânicas e é considerado um produto de baixo custo, versátil e de fácil aplicação. A utilização de resíduos vegetais e industriais na fabricação de blocos de concreto destinados à pavimentação é vista como uma alternativa, que pode influenciar de maneira positiva as propriedades dos pisos e contribuir com a preservação do meio ambiente, uma vez que o emprego desses resíduos na produção de pisos intertravados pode minimizar a quantidade destes no meio ambiente e seus impactos ambientais. O objetivo nesta pesquisa foi verificar a viabilidade de utilização de resíduos agroindustriais e industriais como matéria-prima para a produção de pisos intertravados. Avaliou-se a utilização de cinzas de casca de arroz (CCA), cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), cinzas de borracha de pneu (CPN) e resíduos de ardósia (RA). A substituição de 10% e 20% do cimento pelos resíduos foi realizada, verificando seu efeito sobre as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos pisos. Os materiais utilizados em substituição ao cimento foram caracterizados quanto às suas composições utilizando a difração de raios X. Os agregados foram caracterizados quanto a granulometria. Com o objetivo de verificar a aptidão dos materiais utilizados como substitutos parciais do cimento, realizou-se a análise de aptidão. Os pisos foram confeccionados com formulação controle de 15% de cimento CPV-ARI, 23% de pedrisco, 31% de areia, 31% de pó de pedra, utilizando uma relação água-cimento (A/C) de 0,77%. Posteriormente a confecção, os pisos passaram por 28 dias de cura em temperatura ambiente, e logo após, as propriedades mecânicas de resistência à compressão, as propriedades físicas de absorção de água, densidade aparente e porosidade, as propriedades microestruturais e de durabilidade foram avaliadas. Também foi analisada a viabilidade econômica da modificação na composição dos *pavers*. A substituição do cimento pelos resíduos exerceu efeito significativo sobre as propriedades físicas e mecânicas dos *pavers*. Com relação as propriedades físicas, todos os tratamentos aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado estão de acordo com as especificações da norma. No entanto, nenhum tratamento atendeu aos requisitos mínimos exigidos pela norma, para as propriedades mecânicas. A inclusão dos resíduos RA, CCA, CBC e CPN resultou em redução do custo com matérias-primas em 2,50%.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios. Pavimentação. Materiais Pozolânicos.

ABSTRACT

Interlocking flooring is a material that favors sustainability and environmental conservation, since there is less energy consumption in its manufacturing process, a reduction in waste generation and a higher permeability of the floor. In addition, it has excellent physical and mechanical properties and is considered a low cost product, versatile and easy to apply. The use of vegetal and industrial waste in the manufacture of concrete blocks for paving is seen as an alternative, which can positively influence the properties of the floors and contribute to the preservation of the environment, since the use of these residues in the production. Interlocking floors can minimize the amount of these in the environment and their environmental impacts. The objective of this research was to verify the viability of using agro-industrial and industrial waste as raw material for the production of interlocking floors. The use of rice husk ash, sugarcane bagasse ash, rubber tire ash and slate residues was evaluated. Replacement of 10% and 20% of the cement by the waste was performed, verifying its effect on the physical, mechanical and durability properties of the floors. The materials used in replacement of cement were characterized in their compositions using X-ray diffraction. The aggregates were characterized by grain size. In order to verify the suitability of the materials used as partial cement substitutes, the suitability analysis was performed. The floors were made with control formulation of 15% CPV-ARI cement, 23% gravel, 31% sand, 31% stone dust, using a water-cement ratio (W / C) of 0.77%. After the confection, the floors were cured for 28 days at room temperature, and soon after, the mechanical properties of compressive strength, the physical properties of water absorption, bulk density and porosity, the microstructural and durability properties were evaluated. It was also analyzed the economic viability of the change in floor composition. The replacement of cement by waste had a significant effect on the physical and mechanical properties of floors. Regarding physical properties, all treatments at 28 days of cure and after accelerated aging are in accordance with the specifications of the standard. However, no treatment met the minimum requirements required by the standard for mechanical properties. The inclusion of waste resulted in a reduction in the cost of raw materials by 2.50%.

Keywords: Cement composites. Paving. Pozzolanic Materials.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE – Referencial Teórico

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura típica do pavimento intertravado..... | 18 |
| Figura 2 - Deslocamentos das peças de concreto na pavimentação intertravada. | 20 |
| Figura 3 - Peças de concreto do Tipo I..... | 21 |
| Figura 4 - Peças de concreto do Tipo II. | 21 |
| Figura 5 - Peças de concreto do Tipo III. | 22 |
| Figura 6 - Peças de concreto do Tipo VI..... | 22 |
| Figura 7 - Tipos de assentamento das peças..... | 23 |
| Figura 8 - Rua do Porto, Piracicaba – SP. | 23 |
| Figura 9 - Centro de Convivência (UFLA). | 24 |
| Figura 10 - Rua 15 de Novembro, Blumenau – SC..... | 25 |
| Figura 11 - Etapas do processo produtivo do pavimento intertravado..... | 27 |

SEGUNDA PARTE – Artigo

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Processo de fabricação dos <i>pavers</i> | 54 |
| Figura 2 - Difratogramas dos resíduos utilizados na produção dos <i>pavers</i> | 58 |
| Figura 3 - Porcentagem de areia retida e retida acumulada..... | 60 |
| Figura 4 - Porcentagem de areia retida e limites superior e inferior das zonas ótimas. | 61 |
| Figura 5 - Porcentagem de pó de pedra retida e retida acumulada. | 62 |
| Figura 6 - Porcentagem de brita retida e retida acumulada. | 63 |
| Figura 7 - Índice de atividade pozolânica dos materiais utilizados. | 63 |
| Figura 8 - Curva de inibição do cimento+água e dos tratamentos utilizados na produção dos <i>pavers</i> | 65 |
| Figura 9 - Curva de inibição dos tratamentos utilizados produção dos <i>pavers</i> | 66 |
| Figura 10 - Índice de Hidratação dos tratamentos utilizados para produção dos <i>pavers</i> | 67 |
| Figura 11 - Micrografias dos <i>pavers</i> após o envelhecido acelerado..... | 69 |
| Figura 12 - Micrografias do tratamento com 20% de cinzas de bagaço de cana antes e após o envelhecimento acelerado..... | 70 |
| Figura 13 - Valores médios de densidade aparente em função dos resíduos utilizados na produção dos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 14 - Valores médios de densidade aparente em função das porcentagens de resíduos utilizados na produção dos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado..... | 71 |
| Figura 15 - Micrografias dos <i>pavers</i> produzidos com cinzas de Pneu antes e após e envelhecimento acelerado..... | 73 |
| Figura 16 - Micrografias dos <i>pavers</i> com cinzas de pneu aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado..... | 74 |
| Figura 17 - Defeitos na microestrutura dos compósitos com a inclusão dos resíduos. | 78 |
| Figura 18 - Valores médios de absorção de água em função dos resíduos utilizados na produção dos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado..... | 79 |
| Figura 19 - Valores médios de absorção de água em função das porcentagens de resíduos utilizados na produção dos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado..... | 80 |
| Figura 20 - Micrografia mostrando microtrincas presentes nos <i>pavers</i> com a inclusão de cinzas da casca de arroz..... | 82 |
| Figura 21 - Valores médios de resistência à compressão em função dos resíduos utilizados nos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado..... | 84 |
| Figura 22 - Valores médios de resistência à compressão em função das porcentagens de resíduos utilizados nos <i>pavers</i> antes e após o envelhecimento acelerado. | 84 |
| Figura 23 - Gastos mensais do produto para o tratamento controle e experimentos com utilização dos resíduos. | 91 |

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE - Referencial Teórico

Tabela 1 - Especificações da Norma Brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013). 28

SEGUNDA PARTE - Artigo

Tabela 1 - Índice para determinação da inibição da pega do cimento. 51

Tabela 2 - Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade. 52

Tabela 3 - Traço utilizada para a produção dos *pavers*. 53

Tabela 4 – Variação na relação água/cimento para a produção dos *pavers*. 53

Tabela 5 - Ensaio e normas de execução. 55

Tabela 6 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a densidade aparente dos *pavers*. 68

Tabela 7 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a porosidade aparente dos *pavers*. 73

Tabela 8 - Valores médios de porosidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens dos *pavers* aos 28 dias de cura (%). 75

Tabela 9 - Valores médios de porosidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens dos *pavers* envelhecidos (%). 75

Tabela 10 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a absorção de água dos *pavers*. 76

Tabela 11 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a resistência à compressão dos *pavers*. 81

Tabela 12 - Ficha técnica para o tratamento controle. 86

Tabela 13 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de resíduo de ardósia. 86

Tabela 14 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de resíduo de ardósia. 87

Tabela 15 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas da casca de arroz. 87

Tabela 16 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas da casca de arroz. 88

Tabela 17 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas de pneu. 88

Tabela 18 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas de pneu. 89

Tabela 19 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas do bagaço de cana. 89

Tabela 20 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas do bagaço de cana. 90

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| PRIMEIRA PARTE | 14 |
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 Pavimentação Intertravada | 16 |
| 2.2 Pavimento intertravado com peças de concreto (<i>pavers</i>) | 18 |
| 2.3 Características das peças de concreto pré-fabricadas | 19 |
| 2.4 Utilização do pavimento intertravado..... | 23 |
| 2.5 Processo de fabricação..... | 26 |
| 2.6 Requisitos e Normalização | 27 |
| 2.7 Materiais Pozolânicos | 29 |
| 2.7.1 Bagaço de cana-de-açúcar | 30 |
| 2.7.2 Casca de Arroz..... | 31 |
| 2.7.3 Resíduos de Pneu | 32 |
| 2.7.4 Pó de Ardósia | 34 |
| 3 CONCLUSÃO | 35 |
| REFERÊNCIAS | 36 |
| SEGUNDA PARTE – ARTIGO | 43 |
| 1 INTRODUÇÃO | 46 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 48 |
| 2.1 Obtenção e caracterização dos materiais..... | 48 |
| 2.2 Análise de aptidão..... | 49 |
| 2.3 Teste de pozolanicidade..... | 51 |
| 2.4 Definição do traço e produção dos <i>pavers</i> | 52 |
| 2.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos pisos | 54 |
| 2.6 Envelhecimento acelerado..... | 55 |
| 2.7 Caracterização microestrutural | 55 |
| 2.8 Análise da Viabilidade Econômico-Financeira da produção dos <i>pavers</i> | 55 |
| 2.8.1 Variáveis do Tratamento Controle | 56 |
| 2.8.2 Variáveis dos Tratamentos Modificados com Resíduos de ardósia, cinzas da casca de arroz, cinzas de pneu e cinzas do bagaço de cana. | 56 |
| 2.8.3 Caracterização da Viabilidade Econômica..... | 56 |
| 2.9 Análise dos Dados | 57 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 58 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 3.1 | Caracterização da matéria-prima utilizada na fabricação dos <i>pavers</i> | 58 |
| 3.1.1 | Difração de raios X | 58 |
| 3.1.2 | Análise granulométrica dos agregados miúdos e graúdos | 60 |
| 3.2 | Análise de pozolanicidade dos resíduos utilizados | 63 |
| 3.3 | Análise de aptidão | 65 |
| 3.4 | Caracterização dos pisos intertravados | 68 |
| 3.4.1 | Caracterização física dos <i>pavers</i> | 68 |
| 3.4.1.1 | Densidade antes e após o ensaio de durabilidade | 68 |
| 3.4.1.2 | Porosidade Aparente antes e após o ensaio de durabilidade | 73 |
| 3.4.1.3 | Absorção de Água antes e após o ensaio de durabilidade | 76 |
| 3.4.2 | Caracterização mecânica dos <i>pavers</i> | 81 |
| 3.4.2.1 | Resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade | 81 |
| 3.5 | Análise da Viabilidade econômico-financeira dos <i>pavers</i> | 85 |
| 4 | CONCLUSÃO | 92 |
| | AGRADECIMENTOS | 92 |
| | REFERÊNCIAS | 93 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A utilização de pisos intertravados de concreto na pavimentação tem aumentado nos últimos anos. O piso intertravado, que anteriormente era utilizado em áreas com o objetivo de proporcionar melhores efeitos estéticos ou paisagísticos, atualmente é visto como um material que favorece a sustentabilidade e a conservação ambiental, uma vez que há um menor consumo de energia em seu processo de fabricação quando comparado ao asfalto, há uma redução na geração de resíduos e uma maior permeabilidade do pavimento, o que permite melhor escoamento da água da chuva. Além disso, é um material que reduz a velocidade dos automóveis, proporcionando a harmonia entre motoristas e pedestres.

O piso intertravado de concreto, conhecido comercialmente como *paver*, é considerado um produto de baixo custo, quando comparado à materiais convencionais, como o asfalto. É versátil e de fácil aplicação, possibilitando o escoamento da água por entre suas juntas, evitando ou minimizando problemas de alagamentos. Possui diversas formas, dimensões, cores e texturas, dispondo de um grande potencial de utilização para ornamentação e sinalização dos mais diversos tipos de obras.

O pavimento intertravado de concreto, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2018), é um pavimento flexível, formado por uma camada de base, pela camada de revestimento, composta por peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento, e pelas juntas entre as peças.

Os blocos intertravados são assentados sobre uma camada de areia ou pó de pedra, dispensando o uso de ferramentas diferenciadas. O tráfego pode ser liberado logo após ao assentamento do piso, não necessitando de qualquer tempo de secagem. Existe a possibilidade de reutilização do produto, uma vez que os pisos, após seu assentamento, podem ser retirados e reaproveitados, facilitando sua manutenção.

O aumento na utilização do pavimento intertravado, tem contribuído para o acréscimo no consumo dos materiais empregados na fabricação dos blocos de concreto, dentre esses materiais está o cimento. Na produção do cimento há emissões de dióxido de carbono, o que causa impactos negativos ao meio ambiente.

Desta maneira, para reduzir o consumo de cimento, e conseqüentemente a poluição do meio ambiente, se faz necessário encontrar alternativas para reduzir os danos causados ao meio ambiente, podendo ainda contribuir com a redução dos custos finais de produção.

A incorporação de resíduos vegetais e industriais na produção de blocos de concreto destinados à pavimentação, pode ser vista como alternativa. Os setores agroindustrial e industrial estão entre os que mais geram resíduos no país, dentre os quais se encontram o bagaço de cana, a casca de arroz, a borracha de pneu e os resíduos do beneficiamento da ardósia.

Uma grande quantidade desses resíduos são geradas todos os anos e na maioria das vezes são depositados na natureza sem que haja destinação adequada, causando problemas ambientais e danos à saúde humana. A incorporação desses resíduos vegetais e industriais na produção de pisos intertravados pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos mesmos, gerando um grande interesse econômico e social, além de agregar valor à produtos que seriam descartados, reduzindo o impacto ambiental.

Diante do exposto, o objetivo neste estudo foi avaliar a utilização de cinzas de resíduos vegetais (cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana) e resíduos industriais (cinza de pneu e resíduos de ardósia), como matéria-prima para produção de pisos intertravados, avaliando seus efeitos sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade, além de analisar a viabilidade econômica dos mesmos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentação Intertravada

A humanidade desde o princípio procurou alternativas para tornar sua vida mais fácil. Com o objetivo de se conquistar melhor acesso às áreas cultiváveis e também às fontes de matéria prima (madeira, rochas, minerais e água) e ainda, com o intuito de aumentar sua área ou território de domínio, o homem criou as estradas, da qual a recordação mais antiga provém da China, país que as inventou (SENÇO, 1995).

Historicamente, a pavimentação surgiu através do povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio religioso, comercial e cultural, contribuindo para o desenvolvimento mundial (SILVA; KEMP, 2008). A pavimentação originou-se com as trilhas de terra no interior das matas. Posteriormente, essas trilhas evoluíram com o assentamento de pedras em estado natural sobre o terreno. No entanto, elas não possuíam regularidade, dificultando o transporte de veículos com tração animal. Com isso, as pedras começaram a serem talhadas para se obter um melhor ajuste entre elas, facilitando assim, o tráfego desses veículos (KNAPTON, 1996).

A pavimentação intertravada originou-se na Mesopotâmia há mais de 4.500 anos a.C. Foi também empregada na Roma antiga desde 2.000 anos a.C., e na ilha de Creta na Grécia, desde 2500 a.C. onde seus habitantes já empregavam pedras justapostas apoiadas sobre uma camada de areia, com o objetivo de facilitar a acomodação e fixação dos elementos na formação de caminhos (FERNANDES, 2016; ABCP, 2010).

Os povos Etruscos são considerados os pioneiros na construção de caminhos visando o transporte de pessoas e cargas no período de 800 e 350 a.C.. Eles foram os primeiros povos a ligarem grandes distâncias por meio de trechos pavimentados. Utilizavam pedras-de-mão juntamente com um material mais fino no revestimento, com o objetivo de garantir conforto, resistência e segurança do tráfego quando a superfície do pavimento estivesse molhada. As vias já eram projetadas para possibilitar ultrapassagens dos veículos, podendo chegar aos 15 metros de largura, facilitando também que os mesmos fossem estacionados (CRUZ, 2003).

No decorrer de 200 anos, em um período que se estendeu de 400 a.C. a 200 a.C., os romanos acentuaram a construção de um vasto sistema de caminhos. Esses conhecimentos e técnicas, utilizados pelos romanos nas construções de caminhos, foram herdados dos povos Etruscos. Quando se refere aos pavimentos construídos por esses povos, a Via Ápia é um dos mais conhecidos e importantes, cruzando a Itália, desde a capital Roma até a cidade de Brindisi

no sul do país, com pequenas peças de pedras aparelhadas sob formas octogonais, ligadas por betão, o precursor do concreto (NASCIMENTO, 2016).

No Brasil a pavimentação a partir de pedras justapostas foi empregada pelos índios nos caminhos das trilhas indígenas, trilhas essas que faziam ligação entre diversas aldeias do litoral sul do país a povos de outros países como Bolívia e Peru (FERNANDES, 2016).

A evolução das peças utilizadas em pavimentação intertravada foi marcada basicamente pela utilização de quatro tipos de materiais distintos, como os blocos de argila, as pedras talhadas e aparelhadas manualmente, os blocos de madeira e as peças pré-fabricadas de concreto (CRUZ, 2003).

As peças pré-fabricadas de concreto surgiram durante a reconstrução da Europa após a Segunda Guerra Mundial, em substituição aos blocos de argila que eram empregados na época. Já no Brasil, a técnica de pavimentação com peças pré moldadas de concreto surgiu de forma primária na década de 70, não obedecendo os requisitos mínimos exigidos pelas normas (HALLACK, 2001; SOUTSOS; TANG; MILLARD 2011).

Os blocos intertravados foram patenteados em 1960 pelo alemão Fritz Von Langsdorff. A cidade de Stuttgart, na Alemanha, foi a primeira cidade pavimentada com blocos intertravados no mundo, esse feito aconteceu em 1963. Essa nova tecnologia espalhou-se por toda Europa e Ásia, começando por Inglaterra, Itália, Austrália e Nova Zelândia (FERNANDES, 2016).

Os blocos de concreto destinados à pavimentação são produtos sólidos pré-fabricados, geralmente feitos com cimento *Portland*, água e agregados, que permitem pavimentar completamente uma superfície (KOGANTI; HEMANTHRAJA; SAJJA, 2017; SEMBIRING; HASTUTY, 20017).

De acordo com Smith (2003), a fabricação de *pavers* propagou-se por todo o mundo no final da década de 70. Já no início da década de 80 a produção anual era superior a 45 milhões de metros quadrados. No final dos anos 90, a indústria mundial de *pavers* produziu cerca de 100 metros quadrados por segundo nos períodos úteis de trabalho.

O aumento na utilização de pavimentos intertravados, pode ser explicado por se tratar de materiais não convencionais, que oferecem equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos, uma vez que são materiais sustentáveis promovendo pouca ou quase nenhuma poluição durante o seu processo de fabricação, com boa durabilidade, excelentes desempenhos estruturais e com custos reduzidos quando comparados à materiais convencionais (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007; JÚNIOR; BARROS; NEVES, 2018).

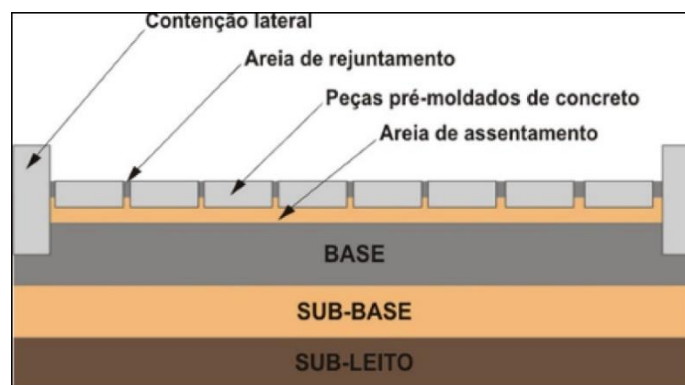
2.2 Pavimento intertravado com peças de concreto (*pavers*)

O pavimento intertravado atualmente não objetiva atender apenas às solicitações mecânicas do tráfego, seja ele de veículos e/ou pedestres, mas integra conceitos importantes como, sustentabilidade e preservação ambiental, gerando menos perdas, sendo 100% recicláveis e mais duráveis, afim de reduzir os impactos ambientais que são causados pelo setor de pavimentação (BHOSALE; MOREY, 2017; KASHIYANI; PITRODA; SHAH, 2013)

Os blocos destinados à pavimentação são definidos como componentes pré- fabricados de concreto, empregados como material de revestimento em pavimento intertravado. Podem ser utilizadas em pavimentos permeáveis, táteis, coloridos e/ou com sinalização horizontal, uma vez que já existem diversos modelos que possibilitam essa diversificação (NBR 9781, 2013; OJURI, 2012; KOGANTI; HEMANTHRAJA; SAJJA, 2017; JEGAN; SRIRAM, 2018).

De acordo com Soutsos, Tang e Millard (2011) e com a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), a estrutura do pavimento intertravado é composta por uma camada de base ou base e sub-base, seguida por uma camada de revestimento integrada por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento, com juntas entre as peças que são preenchidas por material de rejuntamento. A contenção é a responsável pelo intertravamento do sistema. Na Figura 1 é possível observar a configuração típica do pavimento intertravado.

Figura 1 - Estrutura típica do pavimento intertravado.



Fonte: Adaptado de ABCP (2010).

O sub-leito refere-se ao terreno da fundação do pavimento, ele é formado de solo natural ou advindo de outro local e é recomendado que seja compactado para receber as camadas superiores (ABCP, 2010; NBR 15953, 2011).

A sub-base, camada corretiva do subleito ou complementar à base, é na maioria das vezes formada por um material granular. Sua função se assemelha à camada de base, devendo obrigatoriamente elevar a resistência da estrutura com custos reduzidos (BHOSALE; MOREY, 2017; NAMARAK et al., 2018).

A base pode ser formada por um material puramente granular (solos, brita graduada) ou estabilizado (solo-brita, solo-cimento), e é o principal componente estrutural do pavimento. A função da base é receber e distribuir as tensões dos esforços verticais provenientes das solicitações externas e transmiti-las às camadas inferiores com menor intensidade (NBR 15953, 2011; SOUTSOS; TANG; MILLARD, 2011; CRUZ, 2003).

A camada de assentamento é uma superfície de areia que possui a função de receber as peças de concreto permitindo a distribuição correta de carga, além do nivelamento do pavimento. O material de assentamento e de rejuntamento deve apresentar uma distribuição granulométrica que proporcione um teor de vazios adequado, com o intuito de garantir um coeficiente de permeabilidade apropriado para o pavimento (SILVA; MARCHIONI, 2011).

O material de rejuntamento é um material granular, geralmente areia, que possui distribuição granulométrica definida. Ele é utilizado no preenchimento das juntas, transferindo os esforços de cisalhamento para as peças vizinhas àquela que recebe o carregamento (GHORBANI; GHOLIZADEH; DE BRITO, 2018).

O revestimento é composto de peças pré-moldadas de concreto, que são assentadas sobre uma camada de areia. Sua função é suportar as cargas e tensões provocadas pela ação de rolamento do tráfego de veículos e pedestres. Além de proteger a camada de base do desgaste por abrasão e proporcionar uma melhor estabilidade do material (CRUZ, 2003; LEE; LEE; YU, 2003; BOYER, 2002).

Afim de assegurar a estabilidade lateral do sistema, as contenções laterais precisam ser construídas antes do assentamento da camada de revestimento e podem ser fixadas na camada de base. As contenções laterais são formadas por estruturas rígidas de concreto, com o objetivo de impedir o deslocamento lateral dos blocos (ABCP, 2010).

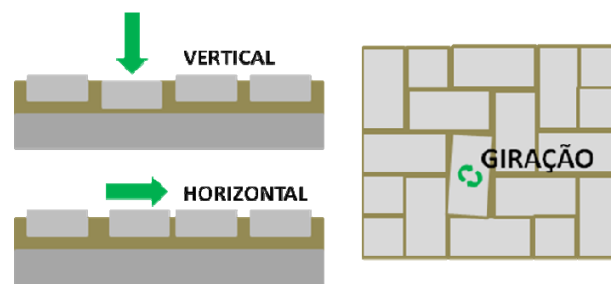
2.3 Características das peças de concreto pré-fabricadas

A forma de assentamento das peças de concreto pré-fabricadas assegura uma das principais características desse tipo de pavimentação, o intertravamento, que é a incapacidade de uma peça do pavimento movimentar-se individualmente e independentemente de seus vizinhos (ICPI, 2011).

De acordo com a ABCP (2010) o intertravamento é também definido como a capacidade que as peças possuem de resistirem a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal ou de rotação em relação às peças vizinhas. Esse sistema de intertravamento é de extrema importância para o bom desempenho e durabilidade do pavimento, e para que haja o intertravamento são necessárias duas condições: a contenção lateral e junta preenchida com areia. As contenções laterais impossibilitam o deslocamento lateral das peças da camada de rolamento, já a areia proporciona a transferência de esforços entre as peças, possibilitando o trabalho em conjunto.

No pavimento intertravado existem três tipos de intertravamento, o vertical, o horizontal e o rotacional ou giratório, que proporcionam as peças a capacidade de resistirem aos movimentos de deslocamentos (CRUZ, 2003) (Figura 2).

Figura 2 - Deslocamentos das peças de concreto na pavimentação intertravada.



Fonte: Adaptado de ABCP (2010).

De acordo com a NBR 15953 (ABNT, 2011), o intertravamento vertical é a capacidade da peça em se manter estática em relação às peças ao redor, sem que ocorra um deslocamento vertical, ou seja, sem que a peça afunde. Esse tipo de intertravamento é conseguido por meio de esforços verticais absorvidos pelo rejuntamento de areia entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores que compõem o pavimento.

O intertravamento horizontal assegura que o deslocamento horizontal entre peças vizinhas não aconteça. O formato e o arranjo de assentamento das peças sobre a camada de areia são os que garantem o intertravamento na direção horizontal do pavimento, além de contribuir na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a atuação do tráfego. O preenchimento das juntas entre as peças é o principal responsável por um intertravamento horizontal satisfatório (SERAFIM, 2010; NBR 15953, 2011).

O intertravamento rotacional ou giratório é definido como a incapacidade da peça em girar em torno do seu eixo vertical. Esse intertravamento é conseguido pela espessura das juntas

entre peças e o confinamento oferecido pelas peças vizinhas, além do tipo e da qualidade da areia utilizada no rejuntamento. Geralmente, a rotação da peça é provocada pela frequência do tráfego, de maneira especial nas áreas de frenagem, acelerações e tensões radiais dos pneus (curvas) (NBR 15953, 2011).

Atualmente, encontram-se no mercado vários formatos para as peças pré-fabricadas de concreto utilizadas na pavimentação intertravada (LING, 2012; HENGL et al., 2018). Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças pré-fabricadas de concreto, são classificadas em quatro grupos, de acordo com o seu formato:

Tipo I- São peças de concreto que possuem formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois. Essas peças podem se arranjar entre si nos quatro lados, podendo ser assentados em fileiras ou em espinha de peixe. Geralmente, suas dimensões são 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas (ABCP, 2010) (Figura 3).

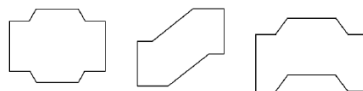
Figura 3 - Peças de concreto do Tipo I.



Fonte: Adaptado de NBR 9781(ABNT, 2013).

Tipo II – Esse tipo de peças de concreto possuem formato singular, diferente do retangular que só podem ser assentadas em fileiras. Suas dimensões também são de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura (Figura 4)

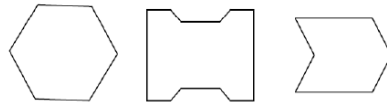
Figura 4 - Peças de concreto do Tipo II.



Fonte: Adaptado de NBR 9781(ABNT, 2013).

Tipo III – Possuem formatos geométricos característicos como trapézios, hexágonos, triédros, com peso superior a 4kg. Já suas dimensões se diferenciam dos demais citados anteriormente, sendo pelo menos 20 por 20 cm (Figura 5).

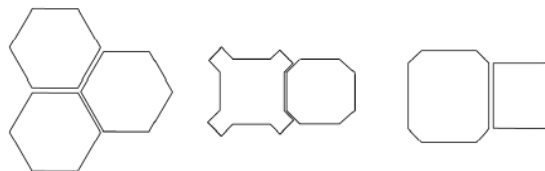
Figura 5 - Peças de concreto do Tipo III.



Fonte: Adaptado de NBR 9781(ABNT, 2013).

Tipo IV – Por fim, esse tipo de peças de concreto podem apresentar tamanhos distintos, ou uma única peça com juntas falsas que são capazes de ser empregadas com um ou mais padrões de assentamento (Figura 6).

Figura 6 - Peças de concreto do Tipo VI.



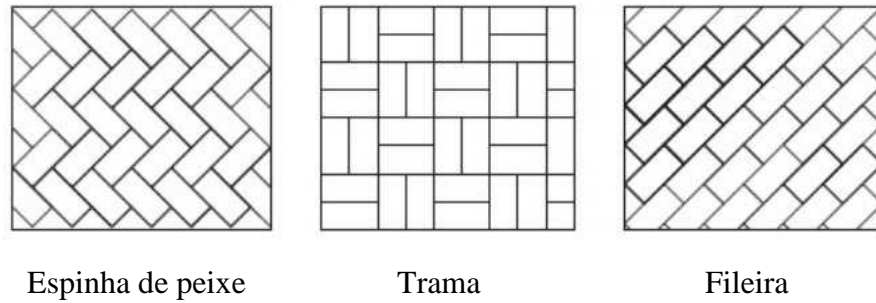
Fonte: Adaptado de NBR 9781(ABNT, 2013).

O projeto de paginação dos blocos no assentamento é outro fator que contribui significativamente para o intertravamento. A diversidade de formas e dimensões das peças existentes possibilita uma variedade de arranjos de assentamento, os quais irão definir a estética final do pavimento.

Não há um consenso entre os pesquisadores sobre a influência do tipo de assentamento das peças no desempenho do pavimento, porém existe uma concordância a respeito de que a disposição das peças no assentamento pode interferir diretamente na durabilidade do mesmo (CRUZ, 2003).

Na Figura 7 estão apresentados os principais tipos de arranjo existentes: espinha-de-peixe (a 45° e a 90°), em trama e em fileira (NAMARAK et al., 2018).

Figura 7 - Tipos de assentamento das peças.



Fonte: Adaptado de Cruz (2003).

2.4 Utilização do pavimento intertravado

Atualmente, o pavimento intertravado com peças de concreto pré-moldadas tem sido utilizado em revestimento de calçadas, ruas, praças, jardins, parques, estacionamentos, pátios, estradas e galpões industriais (SCHEFFER, ANDRADE; REIS, 2018).

De acordo com Simieli et al. (2007), no Brasil são encontrados projetos importantes que empregaram o pavimento intertravado, como em Piracicaba – SP, onde a Rua do Porto, às margens do Rio Piracicaba, foi revitalizada. A princípio, pavimentaram-se cerca de 800m, no entanto estava previsto no projeto a reurbanização de mais de 6km (Figura 8).

Figura 8 - Rua do Porto, Piracicaba – SP.



Fonte: Guia Turístico Piracicaba (2018).

Outra cidade brasileira que utilizou a pavimentação intertravada foi Formiga, no estado de MG, na qual a Praça Central da cidade foi completamente revitalizada. Em Santa-Fé do Sul, cidade do Estado de São Paulo, foram realizadas obras similares, onde a prefeitura realizou cerca de 30 mil m² de pavimentação com custo médio de R\$ 28,00/m².

Na Universidade Federal de Lavras (UFLA) foi realizado um projeto de revitalização na área da cantina central, onde o pátio de convivência foi pavimentado, utilizando-se piso intertravado de diversas cores, requalificando e proporcionando aconchego para o ambiente. Na Figura 9 é possível observar o novo centro de convivência da universidade.

Figura 9 - Centro de Convivência (UFLA).



Fonte: Do Autor (2018).

Outro projeto criativo, funcional e que revitalizou completamente o entorno utilizando o pavimento intertravado foi realizado na rua 15 de novembro em Blumenau, Santa Catarina. Nessa rua encontra-se o principal centro comercial da cidade, além de diversas edificações históricas, por essa razão, o projeto buscou recuperar o movimento comercial e acima de tudo preservar o patrimônio histórico presente ali. Inspirado nas fachadas dos edifícios históricos, o *layout* dos pisos buscou reproduzir com diferentes blocos de concreto de diversas cores a identidade arquitetônica da cidade (VELHO, 2017) (Figura 10).

Figura 10 - Rua 15 de Novembro, Blumenau – SC.



Fonte: Mannrich (2001).

Muitas são as vantagens de aplicação dos *pavers*, dentre elas estão a facilidade de assentamento, que ocorre sobre uma camada de areia ou pó de pedra, dispensando a utilização de ferramentas e máquinas mais elaboradas, a utilização imediata do pavimento, uma vez que após o assentamento do piso intertravado, o tráfego pode ser liberado, sem a necessidade de tempo de secagem, cura do material ou acabamento superficial (NAMARAK et al., 2018).

Os blocos podem ser reutilizados, visto que após seu assentamento, podem ser retirados e reaproveitados em outro local. Essa característica proporciona uma facilidade de manutenção, uma vez que após longo tempo de uso, os mesmos podem ser removidos total ou parcialmente (NAMARAK et al., 2018; AMARAL et al., 2015).

Além das vantagens citadas anteriormente, outras podem ser destacadas, como a coibição de transmissão e aparecimento de trincas das camadas de base para a superfície, a capacidade de manter a continuidade do pavimento, mesmo quando sujeitos a acomodações do subleito, e a alta capacidade estrutural, resistência à abrasão, ao ataque de óleos e ao derramamento de combustíveis. O pavimento intertravado proporciona aos pedestres uma superfície antiderrapante, mesmo que essa superfície esteja molhada e possibilita a drenagem do pavimento, permitindo a infiltração de água no subsolo (NASCIMENTO, 2016; HALLACK, 2001).

O pavimento intertravado também apresenta menor absorção de luz solar, gerando maior conforto térmico para os ambientes, uma vez que refletem melhor a luz, dispersando o

calor de forma mais rápida quando comparados a outros tipos de revestimentos de cores mais escuras, como o asfalto por exemplo, que retém o calor e libera-o lentamente. A diferença de temperatura entre os dois tipos de pavimentos chega a atingir os 30%, estando estes nas mesmas condições de insolação (ABCP, 2010).

Alguns problemas podem ocorrer na produção ou na execução dos pisos intertravados. De acordo com Beaty e Raymond (1995) os defeitos presentes nesse tipo de pavimentos são causados por arranjo geométrico inadequado para o assentamento das peças de concreto; emprego de areia não recomendada para a camada de assentamento; largura incorreta das juntas entre as peças; uso de areia inadequada para o preenchimento das juntas ou processo de preenchimento incorreto; ineficiência da contenção lateral das peças, proporcionando os movimentos laterais e com isso a perda de intertravamento entre as mesmas; emprego de peças com tamanhos e formatos distintos; sistema falho de drenagem e existência de espaços que permitem a movimentação das peças.

Projetos incorretos ou deficiências dos métodos de construção são as maiores causas de falhas nesse tipo de pavimento. Na maioria das vezes, essas falhas poderiam ser evitadas através de uma melhor compreensão dos procedimentos e se as especificações existentes fossem seguidas de maneira correta (DOWSON, 1998).

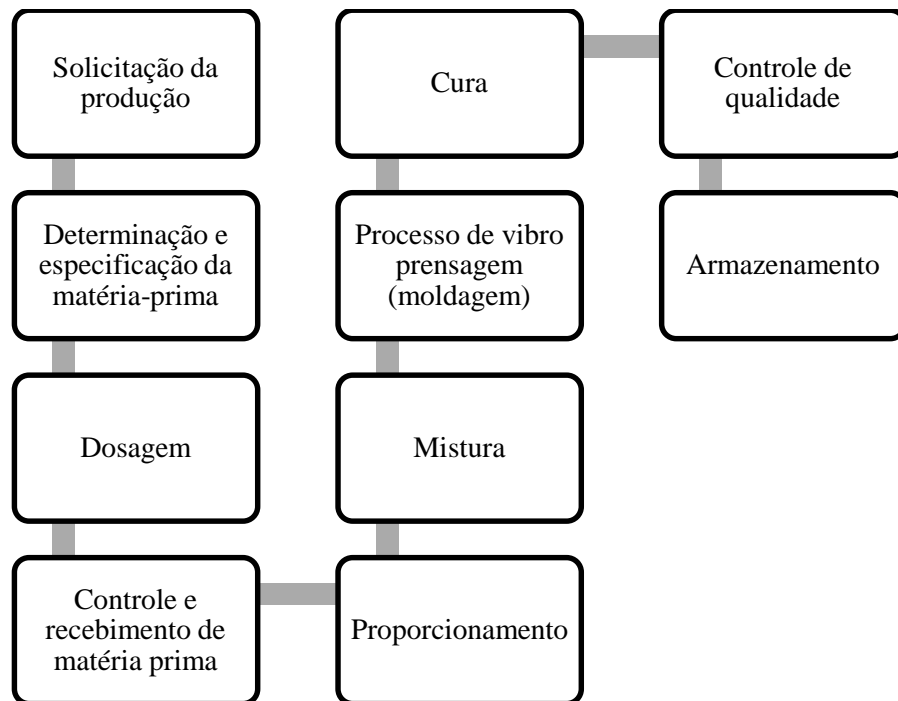
2.5 Processo de fabricação

Na fabricação de pisos intertravados são utilizados os equipamentos e máquinas denominados de vibro prensas multifuncionais. Esse maquinário é assim chamado devido ao seu mecanismo de funcionamento, que faz com que o material penetre e preencha as fôrmas de aço que fazem parte do equipamento. A utilização da vibro prensa apresenta diversos benefícios, como a produção em escala, o controle de homogeneidade, das resistências mecânicas, da textura e das dimensões (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007; PATIL; SHELKE, 2017).

Essas máquinas do tipo vibro prensa podem ser dos tipos: manuais, pneumáticas e hidráulicas, podendo variar em tamanho, especificação do motor, alimentação, quantidade e moldes por matriz. Blocos de concreto de vedação, blocos de concreto estrutural e meio fio, também podem ser fabricados por esse equipamento (LING, 2012).

As principais etapas do processo produtivo vibro prensado das peças de concreto estão apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Etapas do processo produtivo do pavimento intertravado.



Fonte: Adaptado de COPAT (2016).

2.6 Requisitos e Normalização

No Brasil existem duas normas da ABNT voltadas especificamente aos Pavimentos Intertravados, que são a NBR 9781 (ABNT, 2013) - Peças de Concreto para Pavimentação e a NBR 9780 (ABNT, 1987) - Peças de concreto para pavimentação: determinação da resistência a compressão.

O principal objetivo da NBR 9781 (ABNT, 2013) é determinar as condições mínimas necessárias para comercialização das peças utilizadas em pavimentos intertravados destinados à pavimentação de vias urbanas, calçadas, pátios de estacionamento e similares, não podendo ser destinados a rodovias de médio e alto tráfego nem a aeroportos. A norma traz as dimensões e tolerâncias máximas permitidas, os valores limites exigidos para os ensaios de resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão, critérios a serem observados durante a inspeção visual e processo de amostragem, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações da Norma Brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013).

| Requisitos | Limites Aceitáveis | |
|--|---|------------------|
| Tolerâncias dimensionais (mm) | Comprimento | $\leq 250 \pm 3$ |
| | Largura | $\geq 100 \pm 3$ |
| | Espessura | $\geq 60 \pm 3$ |
| Resistência à compressão (MPa) | Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha | ≥ 35 |
| | Tráfego de veículos especiais e efeitos de abrasão acentuados | ≥ 50 |
| Absorção de água (%) * | | ≤ 6 |
| Resistência à abrasão (largura da cavidade em mm) ** | Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha | ≤ 23 |
| | Tráfego de veículos especiais e efeitos de abrasão acentuados | ≤ 20 |

* Não são admitidos valores individuais maiores do que 7 %.

** O ensaio de resistência à abrasão é facultativo

Fonte: Adaptado de NBR 9781 (ABNT, 2013).

Fioriti (2007), afirma que o valor da resistência à compressão determinado pela norma brasileira é elevado quando comparado a outros países. Na Austrália e África do Sul, por exemplo, países que utilizam o piso intertravado há mais tempo que o Brasil, as normas especificam resistência à compressão mínima de 25 MPa dependendo da sua utilização.

Já na norma colombiana NTC 2017 (2004) é empregada a resistência à tração na flexão como requisito para as peças de concreto para pavimentação. De acordo com a norma, nenhum valor individual deve ser menor que 4,2 MPa e o valor médio menor que 5,0 MPa.

De acordo com a norma europeia BS EN 1338 (2003), nenhum resultado individual deve ser menor que 3,6 MPa. Os valores de absorção de água devem ser menores ou iguais a 6%.

A norma norte Americana ASTM C936 (2016) estipula valor para resistência a compressão média maior ou igual a 55 MPa e valor individual maior ou igual a 50 MPa. O valor de absorção média de água deve ser igual ou menor que 5% e para valores individuais menores ou iguais a 7%. Já a norma Canadense CSA A231.2 (1995), apresenta valores para resistência à compressão média e individual de ≥ 50 e ≥ 45 MPa, respectivamente.

Os principais requisitos para a execução do pavimento intertravado estão presentes na NBR 15953 (ABNT, 2011), uma norma nacional que apresenta a atribuição das responsabilidades do processo, passando pelas etapas de projeto, execução e fiscalização. Além disso, estão descritas as exigências referentes à construção das camadas que compõem o pavimento (subleito, base e/ou sub-base e camada de assentamento), como distribuição

granulométrica recomendada, ferramentas e equipamentos necessários. Por fim, também são apresentadas instruções para transporte e recebimento das peças, ajustes e arremates no assentamento, inspeção final para liberação do tráfego, além das condições para boas práticas no cumprimento da limpeza e manutenção do pavimento.

2.7 Materiais Pozolânicos

Materiais pozolânicos são definidos pela NBR 12.653 (ABNT, 2012) e por Kalpokaitė-dičkuvienė et al. (2018), como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade cimentícia, no entanto, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes.

Os materiais pozolânicos podem ter origem natural ou artificial. Os naturais são de origem vulcânica ou sedimentar, já os artificiais, são subprodutos de atividades industriais ou agrícolas sem destinação final adequada (SÁEZ DEL BOSQUE et al. 2018; NBR 12653, 2012; MALINOWSKI; GARFINKEL, 1991; LEA, 1940).

Além de alterar as características do cimento *Portland*, utilizando materiais pozolânicos é possível produzir concretos com menor custo, uma vez que os aditivos minerais são normalmente gerados a partir de resíduos industriais e agroindustriais ou pela possibilidade de substituição parcial do cimento. Além disso, tem-se uma melhoria das propriedades e a possibilidade de redução dos impactos ambientais com a reciclagem desses resíduos (FREIRE; BERALDO, 2003; ABDULMATIN; TANGCHIRAPAT; JATURAPITAKKUL, 2018).

Vários materiais com características pozolânicas vêm sendo utilizados na produção de materiais compósitos, dentre eles estão a cinza do bagaço de cana de açúcar, a cinza da casca de arroz, a cinza da borracha de pneu e resíduos do beneficiamento da ardósia. A composição química desses materiais faz com que os mesmos apresentem grande potencial de utilização como adição mineral na produção de argamassas e concreto.

Esses resíduos estão presentes em abundância no meio ambiente e muitas vezes geram problemas ambientais devido às suas destinações incorretas. Neste sentido, estudos vêm sendo realizados e comprovam que a utilização desses materiais pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios (PATEL; RAIJIWALA, 2015; KUMAR et al., 2015; AL-AKHRAS; SMADI, 2004; SANTOS et al., 2013), contribuindo com a redução da quantidade desses resíduos no meio ambiente, uma vez que serão reutilizados e incorporados na produção de novos materiais mais eficientes e sustentáveis.

2.7.1 Bagaço de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo e esse produto tem grande importância na economia nacional. Cerca de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos são gerados pelo setor industrial, e ainda possui grande importância econômica no que diz respeito às relações comerciais nacionais e internacionais, uma vez que representa 2,4% do produto interno bruto (ALBINO; CRESTE; FIGUEIRA, 2006).

De acordo com a *Food and agriculture organization of the united nations* (FAO) (2018), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido da Índia e da Tailândia. A produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2018/19, é de 635,51 milhões de toneladas, aumento de 0,4% em relação à safra anterior (CONAB, 2018).

O bagaço é o principal resíduo gerado pela indústria da cana-de-açúcar, que é o subproduto da produção de açúcar e álcool. Segundo Berenguer et al. (2018), a produção de açúcar e álcool gera cerca de 270 kg de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar moída, que podem ser empregados na cogeração de energia elétrica, um processo que envolve a queima do bagaço a altas temperaturas, produzindo uma grande quantidade de cinzas. De acordo com Pereira et al., (2016), para cada tonelada de bagaço, são produzidos 25 kg de cinzas, muitas vezes descartadas de maneiras inadequadas no meio ambiente.

Pesquisas recentes têm sido realizadas com utilização dessas cinzas de bagaço de cana como adição mineral em concretos ou argamassas com finalidades pozolânicas, apresentando excelentes resultados. Estudos realizados por Patel e Raijiwala (2015) utilizando 5% de cinzas de casca de arroz em substituição parcial do cimento, apontou um aumento considerável na resistência do concreto, reduzindo assim o consumo de cimento.

Martins Filho e Martins (2017), utilizaram cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto destinados à pavimentação intertravada. Os teores de substituição nos traços foram fixados em 25% de cinza pesada pelo agregado miúdo e em até 10% de cinza leve pelo cimento *Portland*. Os autores verificaram que blocos com substituição de 25% de agregado miúdo por cinza pesada e de 2,5% de cimento *Portland* por cinza leve atende às recomendações da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Outro estudo realizado por Shafiq et al. (2018) empregou cinzas de bagaço de cana em diferentes porcentagens (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50%), em substituição parcial do cimento na produção de argamassas. A resistência à compressão de todas as misturas foram determinadas nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias. Segundo os autores, em todas as idades, o

concreto contendo 5, 10, 15 e 20% de cinzas de bagaço de cana apresentaram maior resistência à compressão quando comparados a argamassa referência, confirmando assim a potencialidade de utilização desse material.

Martins e Altoé (2015), avaliaram a potencialidade de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Foram confeccionados pisos com diferentes porcentagens de cinzas (0, 5, 10, 15, 20 e 25%). Os autores afirmam que a utilização de cinzas de bagaço de cana em substituição parcial do agregado miúdo na fabricação dos *pavers*, melhora as propriedades de resistência à compressão, absorção e abrasão.

2.7.2 Casca de Arroz

Dentre as atividades econômicas agroindustriais que mais geram resíduos, encontram-se as produtoras de arroz. Conforme dados do Ministério da Agricultura e Agropecuária - MAPA (2017), o arroz está entre os cereais mais consumidos no mundo e o Brasil está entre os países que mais consomem arroz, ocupando o 9º lugar no ranking de produção mundial. Os estados do Mato Grosso, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, estão entre os maiores produtores nacionais. Durante o processo de limpeza e separação do arroz, é gerado um grande volume de casca, um resíduo fibroso com grande dificuldade de decomposição, permanecendo por vários anos no meio ambiente (ZHANG; CHEN; XIONG, 2018).

Segundo Pode (2016), 20% do peso do arroz produzido é casca. Atualmente, esse resíduo vem sendo empregado na geração de energia em termelétricas como forma alternativa de combustível. As cinzas são produzidas com a queima da casca, onde, se a combustão for realizada de maneira controlada, com temperaturas entre 500 a 700°C, obtêm-se cinzas com alta pozolanicidade (DAL MOLIN, 2011).

Conforme relatado pelo IBGE (2018), a primeira estimativa de campo para a safra de arroz para o ano de 2018, informou uma área plantada de aproximadamente 2,0 milhões de hectares, sendo 3,6% menor que a do ano de 2017. A produção estimada de 11,7 milhões de toneladas, e o rendimento médio estimado de 5.990 kg/ha, foram menores (respectivamente, em 5,7% e 2,5%) quando comparados à safra do ano anterior.

O Rio Grande do Sul, maior produtor do país e responsável por 70,8% do total a ser colhido em 2018, estimou uma produção de 8,3 milhões de toneladas, em uma área a ser

plantada de 1,1 milhão de hectares e rendimento médio esperado de 7.722 kg/ha (menores, respectivamente, em 2,2%, 4,7% e 2,5%, quando comparadas à safra de 2017 (IBGE, 2018).

Diversos trabalhos têm sido realizados utilizando a cinza da casca de arroz com o objetivo de melhorar as características físico-mecânicas de argamassas e materiais de construção a base de cimento.

Kumar et al. (2015) produziram *pavers* com fibras de nylon, que foram adicionadas em uma porcentagem máxima de 0,5%, em peso de cimento, em intervalo de 0,1%. Após obter a porcentagem ótima de fibra de nylon, o cimento foi substituído por cinza de casca de arroz em porcentagens variando de 10%, 20% e 30%. Os autores concluíram que os blocos produzidos com a quantidade ideal de fibra de nylon e 10% de cinzas de casca de arroz, atingiram a maior resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias.

Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014), analisaram a incorporação de cinza de casca de arroz em diferentes porcentagens (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%) como substituto parcial do cimento, com o objetivo de aumentar a resistência do concreto utilizado na confecção de blocos destinados à pavimentação. Além disso, 0,2% fibra de vidro, 0,5% fibras de aço e 0,3% fibras de sulfeto de polifenileno (PPS) foram usadas para melhorar as propriedades mecânicas do concreto permeável. Os resultados indicaram um aumento significativo nas resistências à compressão, à tração e à flexão dos blocos produzidos com até 10% de cinzas de casca de arroz. Segundo os autores, nesse caso, maiores porcentagens de cinzas reduzem a resistência do concreto.

Estudos realizados por Barbosa et al. (2013), avaliaram a produção de concretos com incorporação de 5% de cinza de casca de arroz como substituto parcial do material aglomerante, e 3% borracha de pneus em substituição parcial do agregado miúdo. Foram avaliadas suas influências sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade. Verificou-se redução da fragilidade através do aumento da capacidade de absorção de energia para os concretos produzidos com cinza de casca de arroz e resíduos borracha de pneu.

2.7.3 Resíduos de Pneu

Os resíduos de pneus causam grandes problemas ao meio ambiente, devido ao aumento do volume de resíduos de borracha nos aterros sanitários a partir do descarte de pneus usados.

No Brasil, de acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2018), no ano de 2016 foram produzidas mais de 70,7 milhões de unidades de pneu. Nesse

mesmo ano, os fabricantes e importadores de pneus novos comercializaram aproximadamente 53.412 unidades de pneus, o equivalente, em peso, a 729.214,03 toneladas (IBAMA, 2017).

Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas por ano no Brasil. Esse descarte na maioria das vezes é realizado de maneiras inadequadas, gerando graves problemas para o meio ambiente, uma vez que para se decomporem na natureza, os pneus levam, em média, 600 anos, e ainda servem de criadouros do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue, da zika e da chikungunya (SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE - SEST, 2018; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE – SENAT, 2018).

Diversos estudos têm comprovado a potencialidade de utilização de resíduos de borracha na produção de materiais compósitos à base de cimento. A utilização desse tipo de material representa um avanço para o setor da construção civil e para o meio ambiente, uma vez que poderá reduzir a quantidade de pneus presentes na natureza, além de criar novos materiais destinados à construção civil (KURZ; PALIGA; TORRES, 2018). No entanto, não foram encontrados estudos na literatura utilizando cinzas de pneu na produção de pisos intertravados.

Senin et al. (2016) realizaram um estudo onde amostras cúbicas de 100 mm foram produzidas com adição de cinzas de borracha de pneu nas porcentagens de 0%, 3%, 5% e 7% em substituição da areia em argamassa de cimento. O resultado mostrou que 5% é o valor ótimo para substituição de areia na argamassa, confirmando assim, aceitabilidade da cinza de borracha como substituto parcial da areia em argamassa cimentícia.

O efeito da utilização das cinzas de borracha de pneus, sobre as propriedades da argamassa de cimento *Portland*, foi estudado por Al-Akhras e Smadi (2004). A cinza de borracha de pneu foi utilizada como substituto parcial da areia em quatro porcentagens (2,5%, 5%, 7,5% e 10% em peso). Os resultados mostraram que essas cinzas melhoram as propriedades das argamassas e podem ser empregadas em substituição parcial de areia.

Silva et al. (2015) produziram blocos de concreto para pavimentação utilizando borracha de pneu reciclado, em substituição a areia nas porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Os autores verificaram um aumento na resistência dos blocos, os resultados alcançados foram superiores a 40 MPa para os blocos de pavimentação com a inclusão de 50% de borracha granulada, valor esse superior ao estipulado pela norma.

2.7.4 Pó de Ardósia

A ardósia é definida como uma rocha dura e inerte, que possui cores que variam do cinza escuro ao preto, as vezes podendo ser verde, amarela, castanha e vermelha. Uma rocha com granulação fina, com excelente propriedade de divisão em lâminas delgadas (DANA, 1978; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2010).

É amplamente utilizada no setor de construção civil como material de revestimento, pisos e decoração. Esse tipo de rocha é explorada a partir da lavra de folhelhos, posteriormente realiza-se os cortes e acabamentos (PALHARES; MOREIRA; PERINI, 2012).

O Brasil ocupa o segundo lugar no ranking mundial de produção e exportação de ardósia, perdendo apenas para a Espanha. O estado de Minas Gerais, possui 90% da produção nacional, e é onde está localizada a maior reserva de ardósia do mundo (RODRIGUES E SILVA, 2015). Kistemann e Chiodi (2014), afirmam que essa região ocupa uma área com aproximadamente 7000 km² e nela são extraídas 580 mil toneladas/ano.

Graves problemas ambientais são causados pela deposição e pelo acúmulo inadequados de material residual de ardósia em locais de descarte. Danos são causados a vegetação do local utilizado como depósito, por consequência do processo de retirada da flora, e ainda impactos da própria extração, como a abertura de grandes cavas que alteram profundamente a paisagem natural (PALHARES; MOREIRA; PERINI, 2012).

O resíduo de ardósia está sendo estudado como material alternativo para a produção de compósitos cimentícios, auxiliando na diminuição do impacto ambiental. Esse material é empregado em argamassas e concretos com o objetivo de melhorar suas propriedades, reduzindo a porosidade e elevando a resistência mecânica (FURQUIM, 2006). Ainda assim, não foram encontrados estudos na literatura utilizando resíduos de ardósia na produção de blocos de concreto destinados à pavimentação.

Santos et al. (2013) avaliaram o desempenho de corpos de prova produzidos com diferentes porcentagens de ardósia moída (5%, 10%, 15% e 50%) em substituição parcial aos agregados. Os autores observaram que as amostras com 15% de resíduo apresentaram os melhores resultados, aumentando de forma significativa a resistência do concreto.

3 CONCLUSÃO

A utilização de resíduos agroindustriais e industriais como substitutos parciais ao cimento na produção de materiais compósitos é resultado de pesquisas desenvolvidas recentemente e vem ganhando destaque em razão dos bons resultados obtidos, porém ainda se faz necessário identificar os melhores materiais para essa aplicação, além da melhor porcentagem a ser utilizada.

Acredita-se que o presente trabalho poderá contribuir com a avaliação de diferentes tipos e porcentagens desses resíduos, agregando valor a esses materiais e associando novas propriedades aos pisos intertravados. Além disso, espera-se que o potencial de utilização de cinzas de bagaço de cana, cinzas de casca de arroz, cinzas de pneu e pó de ardósia, como substitutos parciais do cimento na produção de blocos de concreto para pavimentação, seja comprovado ao comparar os resultados obtidos com as normas de comercialização, antes e após o envelhecimento acelerado.

REFERÊNCIAS

- ABDULMATIN, A.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C. An investigation of bottom ash as a pozzolanic material. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 155-162, 2018.
- AL-AKHRAS, N. M.; SMADI, M. M. Properties of tire rubber ash mortar. **Cement and concrete composites**, v. 26, n. 7, p. 821-826, 2004.
- ALBINO, J. C.; CRESTE, S.; FIGUEIRA, A. Mapeamento genético da cana-de-açúcar: uso de marcadores moleculares no mapeamento genético visando o melhoramento da cana-de-açúcar. **Biotecnologia Ciências & Desenvolvimento**, Brasília, v. 36, p. 82-91, jun. 2006.
- AMARAL, P. S. et al. Avaliação do cascalho de alagoas e a substituição parcial de areia por cascalhona composição de blocos intertravados. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 3, n.1, p. 35-42, nov. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 936**: Standard Specification for solid concrete interlocking paving units. American society of testing and materials. West Conshohocken, PA, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de Pavimento Intertravado**: Passeio Público. São Paulo, 36p. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Pavimento Intertravado**. Disponível em < <https://www.abcp.org.br/cms/tag/pavimento-intertravado/>> Acesso em 12 de setembro 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação - determinação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 3p. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto - Execução. Rio de Janeiro, 13p. 2011.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>> Acesso em outubro de 2018.

BARBOSA, M. B. et al. Impact strength and abrasion resistance of high strength concrete with rice husk ash and rubber tires. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 5, p. 811-820, 2013.

BEATY, A.N.S.; RAYMOND, G.P. Concrete block road Paving. **Concrete International**, Michigan, v.17, n.5, p.36-41, may 1995.

BERENGUER, R. A. et al. A influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 1, p. 30 – 37, abr. 2018.

BHOSALE, A. A.; MOREY, N. N.; STUDENT, M. E. C. M. To Analysis the Effective Use of Sisal Fibers, Fly Ash and Glass Powder in Concrete Paving Block and It's Study on Compressive Strength. **International Journal of Engineering Science**, v. 7, n. 7, p. 1-4, 2017.

BOYER, L. A. Decorative Concrete Has Come a Long Way. **Concrete International**, v. 24, n. 6, p. 62-67, jun. 2002.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, CSA A231.2-95. **Precast concrete pavers**. CSA, Rexdale, Ontario, Canadian, 1995.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra Brasileira de cana-de-açúcar Safra 2018/2019**. 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/uset/Downloads/BoletimZCanaZ2ZLevantamentoZ18-19.pdf>. Acesso em 16 de outubro de 2018.

COPAT, A. I. **Análise da qualidade de peças de concreto para pavimentação produzidas no município de Bento Gonçalves**. 2016. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 2003. 281f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: **ISAIA**, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Ibracon, v1. Cap. 8, p. 261-309. 2011.

DANA, J.D. **Mineralogy Handbook**. Revised by Cornelius S. Hurlburt, translated by: Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1978.

DOWSON, A.J. Paved surfaces and the importance of correct materials specification and detailing. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON CONCRETE BLOCK PAVING**, 3., Cartagena de Índias. **Pave Colômbia 98: proceedings**. Medellín, Instituto Colombiano de Productores de Cimento. p. 34.1 – 34. 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **BS EN 1338: Concrete Paving Blocks - Requirements and Test Methods**. Brussels, 2003.

FARINHA, A. M. P.; SOUZA, F. C. **Pavimento intertravado de concreto com adição de resíduos de óxido alumínio – sínter**. 2011. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade São Francisco, Itatiba, São Paulo, 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Gestão de passivos ambientais na mineração: Plano de ação para a sustentabilidade do setor de rochas ornamentais** – Ardósia Papagaios / Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, 84 p. 2010.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers** – Produção e Controle de Qualidade. 7 ed. Ribeirão Preto, Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.

FIORITI, C. F. INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre. v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 202f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FREIRE, W.J.; BERARDO, A.L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. São Paulo: Editora Unicamp, 2003.

FURQUIM, V. R. P. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2006.

GHORBANI, S.; GHOLIZADEH, M.; DE BRITO, J. Effect of Magnetized Water on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Block Pavers. **Materials**, v. 11, n. 9, p. 1647, 2018.

GUIA TURISTICO PIRACICABA. **Rua do porto**. Disponível em: <<http://guiaturisticopiracicabasp.blogspot.com/p/rua-do-porto.html>> Acesso em 12 setembro 2018.

HALLACK, A. Pavimento intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma – soluções construtivas com pré fabricados de concreto**. São Paulo, v. 1, p. 25-27, dez. 2001.

HENGL, H. L. et al. The performance of paving block structures with mortar filled joints under temperature loading, accessed by means of numerical simulations. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 7, p. 1575-1594, 2018.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680-691, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. INDICADORES (IBGE) – **Produção Agrícola**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/2013-agencia-de-noticias/releases/19942-em-janeiro-ibge-preve-safra-6-0-inferior-a-de-2017.html>>. Acesso em: 19 de abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 2017 (anobase 2016) / Diretoria de Qualidade Ambiental. – Brasília: Ibama. 77 p. 2017.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC) – Adoquines de concreto para pavimentos - **NTC 2017:2004**.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI), **Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Roads and Parking Lots**, 2011.

JEGAN, J.; SRIRAM, B. Replacement of cement by granite powder in paver blocks. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, Turquia, v. 05, n. 06, p. 1-4, jun. 2018.

JÚNIOR, C. M. D.; BARROS, S. V. A.; NEVES, G. A. Utilização de Resíduos de Quartzito para Aplicação em Pavimentos Intertravados. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 3, p.196-200, 2018.

KALPOKAITĖ-DIČKUVIENĖ, R. et al. Utilization of sewage sludge-biomass gasification residue in cement-based materials: effect of pozzolant type. **Environmental technology**, v. 39, n. 22, p. 2937-2950, 2018.

KASHIYANI, B. K.; PITRODA, J.; SHAH, B. K. Innovative addition of polypropylene fibre in interlocking paver block to improve compressive strength. **International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development**, v. 3, p. 17-26, 2013.

KISTEMANN, D. C.; CHIODI, C. F. **Plano de Ação Para Sustentabilidade do Setor Rochas Ornamentais – Ardósia em Papagaios**. Implementação do Plano de Ação. v 1. set. 2014.

KNAPTON, J. **A Design Method for Lightly Trafficked and Pedestrian Pavements**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, pp.339-348, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

KOGANTI, S. P.; HEMANTHRAJA, K.; SAJJA, S. Replacement of Fine Aggregate by using Recyclable Materials in Paving Blocks. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. California, v.1, n. 225, p. 1-8, 2017.

KUMAR, B. et al. Evolution of Properties of Paver Blocks as per IS 15658 : 2006 using Rice Husk Ash and Nylon Fiber. **IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development**. v. 3, n. 10, p. 438-441, 2015.

KURZ, M. N.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. S. Estudo do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de borracha em argamassa de cimento e cal. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2. p. 278- 291, jul./dez. 2018.

LEE, H. S.; LEE, J. Y.; YU, M. Y., Influence of Iron Oxide Pigments on the Properties of Concrete Interlocking Blocks. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1889-1896, nov. 2003.

LEA, F.M. Investigations on pozzolanas. **Building Research**, v. 27, p. 1-63, 1940.

LIMA, M. Novo centro de convivência na área da cantina central - DASCOM (UFLA), 2015. Disponível em <<http://www.ufla.br/dcom/2015/01/27/ufla-construira-novo-centro-de-convivencia-na-area-da-cantina-central/>> Acesso em: 31 de outubro de 2018.

LING, Tung-Chai. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 164-175, 2012.

MALINOWSKI, R.; GARFINKEL, Y. Prehistory of concrete. **Concrete International**, v. 13, p. 62-68, 1991.

MANNRICH, M. Reurbanização da Rua 15. Prefeitura de Blumenau. 2001. Disponível em: <http://csiebert-arq.wixsite.com/blumenau-urbana/form__map> Acesso em 12 setembro 2018.

Ministério da Agricultura Pecuária e abastecimento (MAPA). Disponível em:<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais/tematicas/documentos/camaras-setoriais/arroz/2017/45a-reuniao-ordinaria/app_pia_embrapa_45ro_arroz.pdf/view>. Acessado em 19 de abril de 2018.

MARTINS, C. H; ALTOÉ, S. P. S. Avaliação da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 8, n. Ed. esp., p. 39-54, 2015.

MARTINS FILHO, S. T.; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 4, p. 1205-1224, 2017.

NAMARAK, C. et al. **Development of Concrete Paving Blocks Prepared from Waste Materials without Portland Cement**. Materials science (medžiagotyra), Lithuania, v. 24, n. 1. 2018.

NASCIMENTO, M. V. L. A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, Pernambuco, 2016.

OJURI, O. O. Interlocking Paving Stones Pavement as a Solution to Marshy Roads. **Modern Applied Science**, v. 6, n. 5, p. 91, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Chapter 5. Sugar**. OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/i9166e/i9166e_Chapter5_Sugar.pdf> Acesso em 06 de novembro 2018.

PALHARES, L.; MOREIRA, B.; PERINI, P. Reaproveitamento de resíduos de ardósia na fabricação de peças cerâmicas pela técnica de colagem de barbotinas. **Pós em Revista do Centro Universitário Newton Paiva**, v. 6, p. 157-161, 2012.

PATEL, J. A.; RAIJIWALA, D. B. Experimental Study on Use of Sugar Cane Bagasse Ash in Concrete by Partially Replacement with Cement. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, n. 4, 2015.

PATIL, M. A.; SHELKE, N. L. Paver Block by Using Steel Fiber and Fly Ash in Different Percent. **International Journal of Scientific Research in Science and Technology**. v. 3, n. 8, p. 354-358, 2017.

PEREIRA, A. M. et al. **Análise microestrutural do potencial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico em compósitos cimentícios**, 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, p. 3029-3041, 06-10 nov. 2016.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant, **Renewable Sustainable Energy Ver**, Ireland, v. 53, p.1468–1485, jan. 2016.

RODRIGUES E SILVA, R. K. Propostas de Aproveitamento de Resíduos de Ardósia da Cidade de Pompéu, Minas Gerais. **Revista Intercâmbio**, v. 6, p. pág. 86-95, 2015.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F. et al. Activation temperature-mediated mineralogical transformations in slate quarry sludge: Pozzolanic properties. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 819–829, 2018.

SANTOS, C. G. et al. Adição de rejeitos de extração de ardósia em concreto. **Pós em revista do Centro Universitário Newton Paiva**, Belo Horizonte- MG, n 8, p.100-103, 2013.

SCHEFFER, J. C.; ANDRADE, R. G. M.; REIS, A. S. Experimental evaluation of green coconut fibre reinforced concrete blocks as interlocking paver. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. Paranaguá, PR, v.3, n.2, p. 1-18, mai. 2018.

SEMBIRING, I. S.; HASTUTY, I. P. Sinabung Volcanic Ash Utilization As The Additive for Paving Block Quality A and B. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, v. 180, n. 1, p. 1-7, 2017.

SENÇO, W. Dimensionamento de Pavimentos. Uso de Catálogos. **Revista Pesquisa & Tecnologia**, São Bernardo do Campo, n. 15, p.37-41, fev. 1995.

SENIN, M. S. et al. Properties of Cement Mortar Containing Rubber Ash as Sand Replacement. **Materials Science and Engineering Conference Series**. v. 160, n. 1, p. 1-10, 2016.

SERAFIM, M. A. Estudo e proposição de formas de para áreas e passeios públicos. 2010. 102f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2010.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE – SENAT. Disponível em: <<http://www.sestsenat.org.br/Imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>> Acesso em outubro de 2018.

SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE – SEST. Disponível em: <<http://www.sestsenat.org.br/Imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>> Acesso em outubro de 2018.

SHACKEL, B. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement**. London: Elsevier Applied Science, 1990.

SHAFIQ, N. et al. Effects of sugarcane bagasse ash on the properties of concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability**, v. 171, n. 3, p.123–132, may. 2018.

SILVA, F. M. et al. Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 71-79, 2015.

SILVA, C.O; MARCHIONI, N., **Pavimento intertravado: nova normatização para sua execução - Concreto e Construções**, São Paulo, p.37- 44, 2011.

SILVA, O. V; KEMP, S. R. A. A evolução histórica do turismo: da antiguidade clássica a revolução industrial–século XVIII. **Revista Científica Eletrônica de Turismo**, n. 9, p. 50-67, 2008.

SIMIÉLI, D. et al. Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. **Exacta**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 231-241, jul./dez. 2007.

SMITH, D. R. Grand entrances. **Interlocking Concrete Magazine**, EUA, v. 10, n. 2, p. 4, 2003.

SOUTSOS, M. N.; TANG, K.; MILLARD, S. G. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 25, n. 7, p. 3131-3143, 2011.

VELHO, V. P. **Estudo e análise do pavimento intertravado utilizado na revitalização da rua emiliano ramos**. 2017. 38f. Relatório de Estágio (Bacharel Engenharia Civil), Universidade do Planalto Catarinense, Lages, 2017.

ZHANG, S.; CHEN, T.; XIONG, T. Effect of Washing Pretreatment with Aqueous Fraction of biooil on Pyrolysis Characteristic of Rice Husk and Preparation of Amorphous Silica. **Waste Biomass Valor**, v. 9, n. 5, p. 861–869, may. 2018.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

BLOCOS DE CONCRETO DESTINADOS À PAVIMENTAÇÃO PRODUZIDOS COM RESÍDUOS VEGETAIS E INDUSTRIAIS

RESUMO

Os blocos de concreto destinados à pavimentação (*pavers*) são estruturas sólidas com formatos geométricos regulares, assentados de maneira a cobrir toda a superfície e permitir o intertravamento do pavimento. O crescente uso da pavimentação intertravada, tem provocado um acréscimo no consumo dos materiais empregados na fabricação das peças de concreto. O emprego de resíduos agroindustriais e industriais na produção de pisos intertravados pode, não apenas minimizar a quantidade destes no meio ambiente e seus impactos ambientais, mas reduzir o custo de produção dos pisos intertravados e diminuir a quantidade de carbono do concreto. O objetivo neste estudo foi verificar a viabilidade de utilização de cinzas de resíduos vegetais e resíduos industriais como matéria-prima para a produção de pisos intertravados em substituição parcial ao cimento. Foram avaliadas cinzas de casca de arroz (CCA), Cinza de bagaço de cana (CBC), cinza de pneu (CPN) e resíduos de ardósia (RA). A substituição de 10% e 20% do cimento pelos resíduos foi realizada, verificando seu efeito sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos pisos. Os materiais utilizados em substituição ao cimento foram caracterizados quanto às suas composições utilizando a difração de raios X. Os agregados (miúdos e graúdos) foram caracterizados quanto a granulometria. Com o objetivo de verificar a aptidão dos materiais utilizados como substitutos parciais do cimento, realizou-se a análise de aptidão. Os pisos foram confeccionados com formulação controle de 15% de cimento CPV-ARI, 23% de pedrisco, 31% de areia, 31% de pó de pedra, utilizando uma relação água-cimento (A/C) de 0,77%. Após a confecção, os pisos passaram por 28 dias de cura em temperatura ambiente, e posteriormente as propriedades mecânicas de resistência à compressão, as propriedades físicas de absorção de água, densidade aparente, porosidade e as propriedades microestruturais foram avaliadas. Esses testes foram realizados antes e após envelhecimento acelerado. Também foi analisada a viabilidade econômico-financeira da modificação na composição dos *pavers*. A substituição do cimento pelos resíduos afetou de maneira significativa as propriedades físicas e mecânicas dos *pavers*. Quanto as propriedades físicas, todos os tratamentos apresentaram resultados de acordo com as especificações da norma, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, no entanto

nenhum tratamento atendeu aos requisitos mínimos exigidos pela norma, para as propriedades mecânicas. O tratamento com resíduos de ardósia e cinza de bagaço de cana foram os que apresentaram maior potencial de utilização, com comportamentos semelhantes ao controle. A inclusão dos resíduos CCA, CBC, CPN e RA, resultou em redução do custo com matérias-primas em 2,50%.

Palavras-chave: Pavimento intertravado. Compósitos cimentícios. Cinzas. Materiais Pozolânicos.

CONCRETE BLOCKS FOR PAVING PRODUCED WITH VEGETABLE AND INDUSTRIAL WASTE

ABSTRACT

Concrete blocks for paving are solid structures with regular geometric shapes, laid to cover the entire surface and allow interlocking of the pavement. The increasing use of interlocking paving has caused an increase in the consumption of materials used in the manufacture of concrete parts. The use of agroindustrial and industrial wastes in the production of interlocking floors can not only minimize the amount of these in the environment and their environmental impacts, but reduce the production cost of interlocking floors and reduce the amount of carbon in the concrete. The objective of this study was to verify the feasibility of using ashes from vegetal and industrial residues as raw material for the production of interlocking floors partially replacing cement. Rice husk ash, sugarcane bagasse ash, tire ash and slate residues were evaluated. Replacement of 10% and 20% of the cement by the waste was performed, verifying its effect on the physical, mechanical, microstructural and durability properties of the floors. The materials used in replacement of cement were characterized in their compositions using X-ray diffraction. The aggregates (fine and large) were characterized by grain size. In order to verify the suitability of the materials used as partial cement substitutes, the suitability analysis was performed. The floors were made with control formulation of 15% CPV-ARI cement, 23% gravel, 31% sand, 31% stone dust, using a water-cement ratio (W / C) of 0.77%. After preparation, the floors were cured for 28 days at room temperature, and afterwards the mechanical properties of compressive strength, physical properties of water absorption, bulk density, porosity and microstructural properties were evaluated. These tests were performed before and after accelerated aging. The economic and financial viability of the change in floor composition was also analyzed. The replacement of cement by the waste significantly affected the physical and mechanical properties of the floors. Regarding the physical properties, all treatments presented results according to the specifications of the standard, at 28 days of cure and after accelerated aging, however no treatment met the minimum requirements required by the standard for mechanical properties. Treatment with residues of slate and sugarcane bagasse ash presented the highest potential for use, with behaviors similar to control. The inclusion of waste resulted in a reduction in the cost of raw materials by 2.50%.

Keywords: Interlocked floor. Cementitious composites. Ashes. Pozzolanic Materials.

1 INTRODUÇÃO

O pavimento intertravado tem sido amplamente utilizado desde a Segunda Guerra Mundial e atualmente é considerado um dos materiais de construção mais empregados no mundo (GENCEL et al., 2011; HENGL et al., 2018; MENG; LING; MO, 2018). A facilidade de manutenção e instalação, o baixo custo, a alta resistência, durabilidade e as superfícies esteticamente agradáveis dos blocos de concreto, em comparação com outros pavimentos convencionais, os tornaram mais atraentes para uma variedade de aplicações, como pavimentação de ruas, estradas, áreas de estacionamento, passeios de pedestres, praças e jardins (GAYARRE et al. 2013; GHORBANI; GHOLIZADEH; BRITO, 2018).

Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), os blocos de concreto são blocos sólidos com formatos geométricos regulares, assentados de maneira a cobrir toda a superfície e permitir o intertravamento do pavimento. Os blocos de concreto destinados à pavimentação são produzidos em diversas cores, formas e tamanhos e podem ser assentados em uma variedade de padrões para atender a imaginação dos arquitetos e paisagistas (KASHIYANI; PITRODA; SHAH, 2013).

O crescente uso da pavimentação intertravada, tem provocado um acréscimo no consumo dos materiais empregados na fabricação dos blocos de concreto, dentre esses materiais está o cimento. Quando o cimento *Portland* é produzido, causa um impacto negativo no meio ambiente, em grande parte devido às emissões de dióxido de carbono (GANJIAN; JALULL; SADEGHI-POUYA, 2015).

Dessa forma, para reduzir o consumo de cimento *Portland*, e conseqüentemente a poluição do meio ambiente, é vantajoso utilizar materiais alternativos na produção de blocos de concreto destinados à pavimentação, como resíduos agroindustriais e industriais. A utilização desses resíduos, contribuiria com a redução do impacto ambiental, bem como reduziria o consumo das matérias-primas naturais (NAMARAK et al., 2018), podendo ainda contribuir com a redução dos custos finais de produção.

O crescimento do setor agroindustrial e industrial tem provocado um aumento na produção de resíduos oriundos dessas atividades, e isso tem acarretado problemas ambientais e de saúde pública. No entanto, o aumento na geração desses resíduos permite excelentes oportunidades de negócios, uma vez que esses materiais ainda possuem valor econômico e podem ser incorporados na criação de novos materiais. Aliado às oportunidades de negócios com esses resíduos, estão os significativos ganhos socioambientais em removê-los do meio ambiente, contribuindo com o controle da poluição e melhorando as condições de saúde da

população (COELHO et al., 2001; FILHO; FRANCO, 2015; IPEA, 2013; PANESAR et al., 2016).

Dentre os resíduos oriundos das atividades industrial e agroindustrial, estão o bagaço de cana, a casca de arroz, a borracha de pneu e os resíduos do beneficiamento da ardósia. Esses resíduos, na maior parte, também são descartados na natureza sem os devidos cuidados, provocando impactos negativos no meio ambiente (GURSEL; MARYMAN; OSTERTAG, 2015).

A utilização da cinza bagaço de cana (CBC), da cinza da casca de arroz (CCA), da cinza borracha de pneu (CPN) e dos resíduos do beneficiamento da ardósia (RA) tem apresentado bons resultados na confecção de alguns compósitos cimentícios devido às suas características pozolânicas, além disso apresentam como vantagem a alta disponibilidade (MARTINS; ALTOÉ; 2015; KUMAR et al. 2015; SILVA et al. 2015, SANTOS et al. 2013).

Neste contexto, em vista das emissões gasosas lançadas indiscriminadamente na atmosfera durante a produção do cimento *Portland*, dos grandes impactos ambientais que são causados pela deposição incorreta dos resíduos gerados pela indústria e agroindústria, o objetivo neste estudo foi avaliar o efeito da utilização de diferentes porcentagens de resíduos vegetais (cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana) e resíduos industriais (cinza de pneu e resíduos de ardósia), em substituição parcial ao cimento *Portland*, sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade, além de analisar a viabilidade econômica de utilização desses resíduos, na produção de blocos de concreto destinados à pavimentação intertravada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e caracterização dos materiais

Para confecção dos blocos foram utilizados cimento *Portland* CPV-ARI, agregados miúdos (areia e pó de pedra) e graúdos (brita), adquiridos em lojas de materiais de construção da cidade de Lavras-MG, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de arroz, cinza de borracha de pneu e pó de ardósia. As cinzas do bagaço de cana, obtidas na queima do bagaço a uma temperatura aproximada de 495°C, foram doadas por um alambique situado na cidade de Lavras – MG. Os resíduos de ardósia foram fornecidos por uma empresa de Belo Horizonte - MG. Já as cascas de arroz foram adquiridas em uma beneficiadora de arroz na cidade de Lavras – MG e os resíduos da borracha de pneu foram cedidos por unidades de reformas de pneus também da cidade de Lavras – MG. Todos os materiais foram individualmente secos em estufa a 70°C por 24 horas e logo após pesados e armazenados em sacos plásticos.

As CCA, CBC, CPN e o RA passaram por um processo de peneiramento, utilizando peneiras com aberturas de 200 mesh e 270 mesh, com o objetivo de separar as partículas conforme suas granulometrias. Dessa forma, as partículas que passaram pela peneira 200 mesh e ficaram retidas na de 270 mesh, foram destinadas à produção dos pisos. Posteriormente à classificação, foram armazenadas em sacos plásticos e lacradas até o momento da produção dos *pavers*.

Com o objetivo de identificar os elementos cristalinos presentes nas cinzas de bagaço de cana, cinza da casca de arroz, cinza da borracha de pneu e pó de ardósia, foi realizado ensaio de Difração de Raios X. Para esta análise, as partículas dos resíduos foram processadas mecanicamente em peneira com abertura de 150 mesh. Em um porta amostra de vidro, as amostras foram depositadas e os difratogramas foram obtidos usando um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 600 com Dadição Cu-K α , comprimento de onda $1,54 \times 10^{-10}$ m. As seguintes condições de medida foram empregadas: 30kV, 30mA; taxa de varredura de 1° min^{-1} , de 5 a 45° . As fases cristalinas foram identificadas por meio de picos no difratograma para as amostras por análise qualitativa.

Com o objetivo de estabelecer padrões para a produção de todos os *pavers*, os agregados miúdos e o agregado graúdo foram caracterizados por meio da composição granulométrica, determinando-se dimensão máxima característica do agregado, módulo de finura, curva de composição granulométrica e classificação do agregado.

A análise granulométrica dos agregados foi realizada no Laboratório de Compósitos da Universidade Federal de Lavras, seguindo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a caracterização dos agregados miúdos e graúdos. Amostras das matérias foram colocadas em estufa por 105 ± 5 °C por um período de 24 horas e posteriormente foram peneiradas em um conjunto sobreposto de peneiras com diâmetro de abertura de 6,30 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,600 mm; 0,300 mm; 0,15 mm para os agregados miúdos e outro conjunto de peneiras com diâmetro de aberturas de 19,00 mm; 12,50 mm; 9,50 mm; 6,30 mm; 4,75 mm e 2,36 mm, para os agregados graúdos. As peneiras utilizadas para ambos os agregados foram da série normal e intermediária, com fundo e tampa, dispostas com diâmetro de abertura em ordem crescente da base para o topo.

O processo de peneiramento dos agregados foi realizado colocando-se o material na peneira superior, acoplada as outras peneiras, agitando todo o conjunto por um período de tempo de forma que o material fosse separado e classificado de acordo com sua granulometria. Em seguida, o material retido em cada peneira foi pesado e calculado a porcentagem de partículas de igual dimensão retida em cada peneira, em relação a massa total da amostra peneirada, assim também, as porcentagens retidas acumuladas.

A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), e deve atender aos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados podem ser classificados em miúdos e graúdos. Os agregados miúdos são aqueles cujos os grãos passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,15 mm, já os graúdos são os que passam pela peneira de 75 mm e ficam retidos na peneira de 2,36 mm.

O módulo de finura e a dimensão máxima dos agregados foram calculados em função das porcentagens acumuladas dos materiais. O módulo de finura é a soma das porcentagens acumuladas nas peneiras de série normal, dividida por 100, não sendo considerado o fundo e as peneiras intermediárias. A dimensão máxima característica é determinada pela abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

2.2 Análise de aptidão

Para avaliar a evolução da temperatura da mistura de diferentes tipos de materiais com o cimento, durante determinado período de tempo foi utilizado o método proposto por Hofstrand et al. (1984). Foram utilizados cabos termopares do tipo K acoplados em um coletor de dados, no qual tais dados foram gerados e armazenados, afim de determinar a temperatura. As leituras de temperaturas em cada cabo conectado foram realizadas em intervalo de um minuto, durante 24 horas. Foi projetado um sistema hermético para colocar a mistura de cada tratamento adicionado a água e acoplar o cabo termopar.

As CBC, CCA, CPN, RA, os agregados, o cimento e a água, todos em suas devidas proporções (as mesmas que foram utilizadas para a produção dos pisos), foram misturados separadamente em um Becker por período inferior a 5 minutos. Posteriormente, a mistura foi repassada para caixas de isopor, os cabos termopares introduzidos na mistura e as caixas lacradas. Em seguida os conjuntos foram colocados dentro da caixa térmica muito bem vedada. Então, o equipamento foi ligado, dando início a obtenção dos resultados. Através dessa análise, é possível determinar a quantidade máxima de resíduos que pode ser utilizada na mistura, sem afetar a cura do cimento.

Utilizando a equação 1, proposta por Hofstrand et al. (1984) foi possível calcular o índice de inibição. O mesmo autor, além do tempo de hidratação, associa também na equação, a temperatura máxima da mistura de algum tipo de material - cimento - resíduo - água e cimento - água, e a variação máxima do tempo e da temperatura.

$$I = 100 * t^2 - \left(\frac{t'^2 * T'^2}{t'^2} \right) - \left(\frac{T^2 * S'^2}{T'^2} \right) - \left(\frac{S^2}{S'^2} \right)$$

(1)

$$S'^2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2}$$

$$S^2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2}$$

Em que:

t^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t'^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-adição de material;

T^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T^{22} = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-adição de material;

S^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-adição de material.

Para classificação da compatibilidade do material adicionado ao cimento foi utilizada a classificação proposta por Okino et al. (2004), apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Índice para determinação da inibição da pega do cimento.

| Índice de Inibição (%) | Classificação |
|-------------------------------|----------------------|
| $I < 10$ | Baixa |
| $10 \leq I < 50$ | Intermediária |
| $50 \leq I \leq 100$ | Alta |
| $I > 100$ | Muito Alta |

Fonte: Okino et al. (2004).

2.3 Teste de pozolanicidade

Com o intuito de avaliar o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento *Portland* aos 28 dias, foi realizado o ensaio de pozolanicidade, de acordo com as especificações da norma NBR 5752 (ABNT, 2014). Os materiais utilizados para a formulação de cinco argamassas, foram o cimento CII F32, areia normalizada, cada resíduo individualmente separado em seus respectivos tratamentos e água. Seis corpos de prova foram confeccionados para cinco tipos de argamassas: argamassa 1 contendo apenas água, areia normalizada e cimento; argamassa 2 contendo água, areia normalizada e cimento com substituição de 25% de sua massa por CBC; argamassa 3 contendo água, areia normalizada e cimento com substituição de 25% de sua massa por CCA; argamassa 4 contendo água, areia normalizada e cimento com substituição de 25% de sua massa por CPN e argamassa 5 contendo água, areia normalizada e cimento com substituição de 25% de sua massa por RA. Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades de materiais em massa que foram utilizados para elaboração dos corpos de prova.

Tabela 2 - Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.

| | Massa para mistura (gramas) | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Argamassa 1 | Argamassa 2 | Argamassa 3 | Argamassa 4 | Argamassa 5 |
| Cimento <i>Portland</i> CP II F 32 | 624 | 468 | 468 | 468 | 468 |
| Cinza Bagaço Cana | - | 156 | - | - | - |
| Cinza Casca Arroz | - | - | 156 | - | - |
| Cinza Pneu | - | - | - | 156 | - |
| Pó de Ardósia | - | - | - | - | 156 |
| Água | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Areia normal - fração grossa | 468 | 468 | 468 | 468 | 468 |
| Areia normal – fração média grossa | 468 | 468 | 468 | 468 | 468 |
| Areia normal – fração média fina | 468 | 468 | 468 | 468 | 468 |
| Areia normal - fração fina | 468 | 468 | 468 | 468 | 468 |

Após 24 horas de cura em câmara úmida, os corpos de prova foram imersos em solução de água e cal virgem por 28 dias. A ruptura dos corpos de prova foi realizada em uma máquina hidráulica elétrica digital utilizando uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s (ABNT, 2014).

2.4 Definição do traço e produção dos *pavers*

O processo de fabricação dos pisos intertravados foi realizado no Laboratório de Compósitos, no campus da Universidade Federal de Lavras. A formulação controle para a produção dos *pavers* foi definida diante de formulações comerciais fornecidas por indústrias produtoras de *pavers* localizadas na região. A Tabela 3 apresenta o traço, em massa com relação A/C de 0,77%, utilizado para a moldagem dos corpos de prova do tratamento controle. No entanto, para ajustar a massa do compósito para posterior produção, foi adicionada cuidadosamente mais água na mistura, até atingir o ponto ideal de plasticidade e trabalhabilidade, por isso, a variação na relação A/C (Tabela 4). Foram produzidos 18 corpos de prova para cada tratamento, com dimensões aproximadas de 10x20x6 cm (largura X

comprimento X espessura), sendo confeccionados 6 pisos por vez, quantidade de corpos de prova que a máquina vibro prensa produz.

Tabela 3 - Traço utilizado para a produção dos *pavers*.

| Traço em Massa (%) | | | | |
|--------------------|---------|-------|-------------|-------|
| Tratamento | Cimento | Areia | Pó de pedra | Brita |
| Controle | 15,00 | 31,00 | 31,00 | 23,00 |

Tabela 4 - Variação na relação água/cimento para a produção dos *pavers*.

| Tratamento | Relação A/C |
|--------------|-------------|
| Controle | 0,77 |
| Ardósia 10% | 0,85 |
| Ardósia 20% | 0,90 |
| Cinza CA10% | 0,97 |
| Cinza CA20% | 1,02 |
| Cinza BC 10% | 0,85 |
| Cinza BC 20% | 0,91 |
| Cinza PN 10% | 0,83 |
| Cinza PN 20% | 0,89 |

O experimento foi realizado afim de avaliar a substituição do cimento por 10% e 20% de CCA, CBC, CPN ou RA, na produção de pisos intertravados. Essa substituição foi feita em relação ao volume de cimento.

Após a determinação do traço, a areia foi seca em estufa a 105 ± 5 °C por 24 horas para perder umidade e em seguida, todos os materiais constituintes do concreto foram pesados. A formulação de cada tratamento foi misturada em uma betoneira com capacidade de 120 litros.

Primeiramente foram adicionados a brita e um pouco de água, com o objetivo de retirar qualquer impureza presente na superfície da brita que pode prejudicar a aderência da mistura. Posteriormente, os outros materiais secos (areia, pó de pedra, material de substituição e cimento) foram incorporados e por fim o restante da água. O material foi homogeneizado na betoneira por 3 minutos (Figura 1A), e transferido para a máquina de vibrocompressão modelo VFP 30 flex da empresa Vibraforma (Figura 1B), onde foi distribuído uniformemente pelas formas (Figura 1C) e realizou-se o processo de vibrocompressão por 3 min (Figura 1D), e em seguida foram desenformados (Figura 1E).

Após produção, os pisos foram mantidos em temperatura ambiente por 28 dias para realização da cura (Figura 1F). Realizou-se a pulverização de água na superfície dos pisos duas vezes ao dia, afim de proporcionar melhor cura aos compósitos. Posteriormente os pisos foram submetidos a caracterização das propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade.

Figura 1 – Processo de fabricação dos *pavers*.



A) Material homogeneizado na betoneira durante 3 minutos; B) Mistura transferida para a máquina de vibrocompressão; C) Mistura distribuída uniformemente pelas formas da máquina; D) Realização do processo de vibrocompressão; E) Desenforme dos *pavers*; F) *Pavers* em temperatura ambiente por 28 dias para realização da cura.

2.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos pisos

Os pisos foram ensaiados aos 28 dias de cura, afim de determinar as propriedades físicas e mecânicas. A Tabela 5 apresenta os testes e normas utilizadas para avaliação dessas propriedades. Todos os ensaios foram realizados antes e após envelhecimento acelerado.

Seguindo os requisitos estipulados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), para o teste de compressão foram utilizados seis corpos de prova para cada tratamento, já para os testes físicos foram utilizados três corpos de prova para cada tratamento.

Tabela 5 - Ensaio e normas de execução.

| Ensaio | Norma |
|--------------------------|------------------|
| Resistência a compressão | NBR 9781 (2013) |
| Absorção de água | NBR 9781 (2013) |
| Densidade aparente | ASTM C948 (2001) |
| Porosidade Aparente | ASTM C948 (2001) |

2.6 Envelhecimento acelerado

Esse teste foi realizado com o objetivo de avaliar a resposta e comportamento dos pisos após período de exposição a ação do tempo, seguindo os requisitos descritos pela norma NBR 13554 (ABNT, 2012) que classifica o material por molhagem e secagem. Os pisos passaram por seis ciclos de molhagem e secagem, composto por imersão em água por 5 horas e posterior secagem em temperatura de $71\pm 2^{\circ}\text{C}$ por período de 42h, e em seguida foram avaliados quanto a resistência à compressão (NBR 9781, 2013), absorção de água (NBR 9781, 2013), densidade e porosidade aparente (ASTM C948, 2001), além das análises microestruturais.

2.7 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural dos *pavers* confeccionados com CCA, CBC, CPN e RA foi realizada por meio de ensaios de microscopia digital, no Laboratório de Compósitos da Universidade Federal de Lavras, utilizando um equipamento da marca CoolingTech, modelo U500X. Os ensaios foram produzidos em amostras retiradas de parte do corpo de prova, com dimensões de aproximadamente 5 cm x 5 cm, sem a necessidade de preparo.

2.8 Análise da Viabilidade Econômico-Financeira da produção dos *pavers*

Para a realização deste estudo, utilizou-se da pesquisa quantitativa, com dados obtidos por meio de pesquisas realizadas em empresas do estado de Minas Gerais, onde foram coletados individualmente os valores monetários das matérias-primas utilizadas na elaboração da pesquisa.

2.8.1 Variáveis do Tratamento Controle

Este estudo visa produzir blocos de concreto destinados à pavimentação, classificados como grupo I, possuindo formato retangular, com dimensões de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e faces laterais retas.

Segundo dados de uma empresa local, são fabricados 250 m² por dia (12.500 peças), e uma produção mensal de 5.500 m² (275.000 peças).

Para a produção dos blocos intertravados são utilizados cimento do tipo Portland CPV-ARI, areia, pó de pedra e brita, onde cada piso tem um peso nominal de aproximadamente 2,5 kg, sendo necessário 375g de cimento, 575g de brita, 775g de areia e 775g de pó de pedra para a produção de um piso. Já os preços do quilograma do cimento (comprado em sacos), da areia, da brita e do pó de pedra (comprados em toneladas) são respectivamente R\$0,30, R\$0,038, R\$0,075, R\$0,08.

2.8.2 Variáveis dos Tratamentos Modificados com Resíduos de ardósia, cinzas da casca de arroz, cinzas de pneu e cinzas do bagaço de cana.

De acordo com pesquisas realizadas em empresas de Minas Gerais, o preço do resíduo de ardósia é de R\$25,00 por tonelada (R\$0,025 por kg), das cinzas da casca de arroz é de R\$75,00 por tonelada (R\$0,075 por kg) e das cinzas de pneu de R\$117,00 por tonelada (R\$0,117 por kg). Já as cinzas do bagaço de cana não são comercializadas, esse resíduo é doado por empresas que utilizam o bagaço no aquecimento das caldeiras em alambiques. Este estudo busca a substituição parcial do cimento pelos resíduos em volume de 10 e 20%, dessa forma, foram necessários 23,3g e 50,02g respectivamente do resíduo de ardósia, 15,80g e 33,9g respectivamente de cinzas da casca de arroz, 19,40g e 41,8g respectivamente das cinzas de pneu e 7,10g e 15,2g respectivamente de cinzas do bagaço de cana para produzir uma peça.

2.8.3 Caracterização da Viabilidade Econômica

Para a realização dos cálculos que permite a caracterização da viabilidade econômica utilizou-se as descrições de Wernke (2015), onde as atribuições de custos variáveis aos materiais produzidos podem ser realizadas por meio de fichas técnicas, também denominadas de “árvore dos produtos”, “estrutura física” e “lista de componentes”. Dessa forma, os dados

foram analisados comparando a ficha técnica do piso controle com a ficha técnica dos demais tratamentos, onde foram coletados o custo direto dos produtos (valores estes relacionados à matéria-prima e ao volume de produção) empregados na fabricação dos blocos de concreto destinados à pavimentação. Os salários e encargos, a depreciação do maquinário, a energia elétrica, o aluguel e os gastos com telecomunicações, não foram considerados, já que os mesmos não apresentam variação após a modificação da composição.

2.9 Análise dos Dados

As propriedades dos pisos foram analisadas em um delineamento inteiramente casualizado, em que os dados foram arrançados em esquema fatorial 4x2 (quatro materiais: cinza de bagaço de cana, cinza de casca de arroz, cinza de pneu e pó de ardósia; e duas porcentagens: 10 e 20%), além de um tratamento controle. A análise de variância e teste de Dunnett foram realizados ao nível de 5% de significância.

Posteriormente os dados foram confrontados com as normas de comercialização para compressão simples (NBR 9781, 2013) e absorção de água (NBR 9781, 2013).

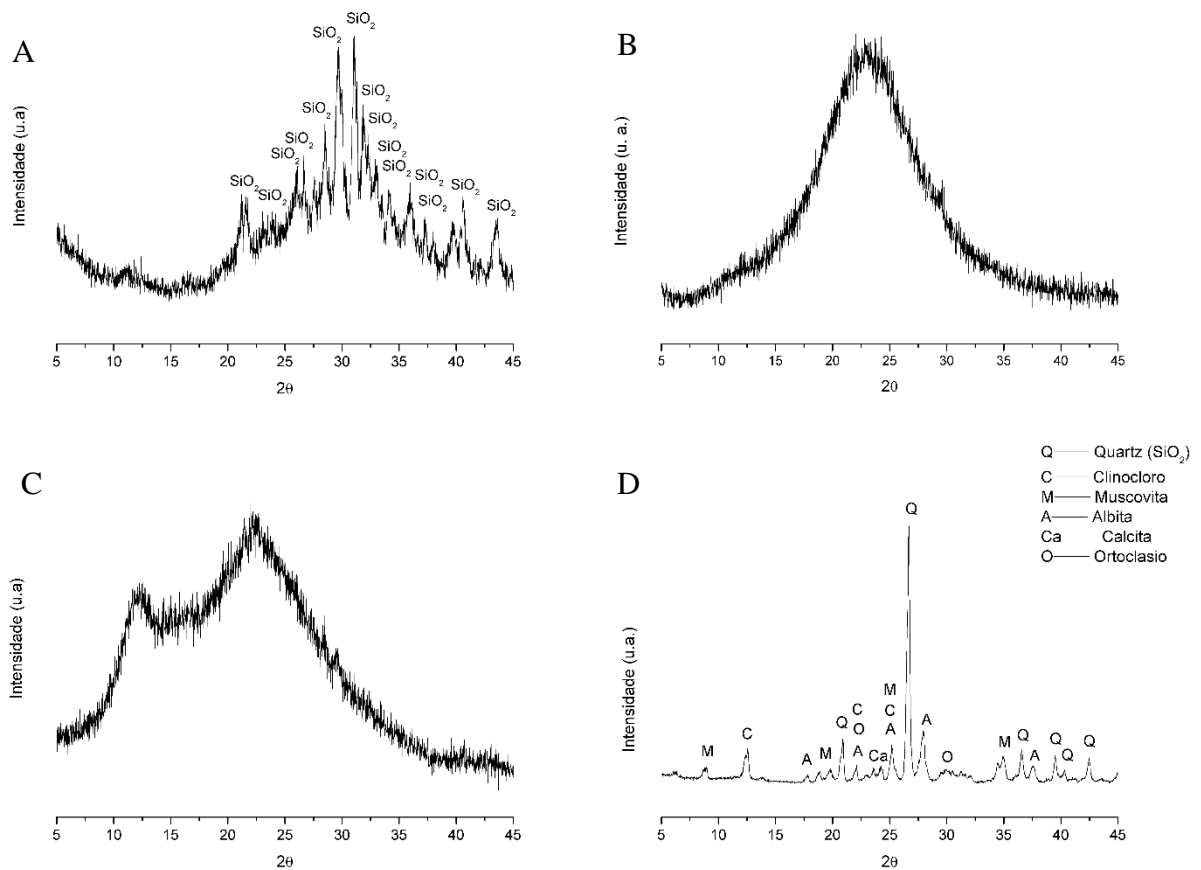
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da matéria-prima utilizada na fabricação dos pavers

3.1.1 Difração de raios X

Na Figura 2 estão os resultados obtidos no ensaio de difração de raios X para as cinzas de bagaço de cana (CBC), cinza da casca de arroz (CCA), cinza de borracha de pneu (CPN) e para o resíduo de ardósia (RA).

Figura 2 - Difratogramas dos resíduos utilizados na produção dos pavers.



A) Difratograma da amostra de cinza do bagaço de cana; B) Difratograma da amostra de cinza da casca de arroz; C) Difratograma da amostra de cinza da borracha de pneu; D) Difratograma da amostra do resíduo de ardósia

O difratograma obtido por meio do ensaio de DRX da CBC (Figura 2A) indicou a presença de dióxido de silício (SiO_2) como fase cristalina principal. No entanto, para que a sílica possa reagir com o hidróxido de cálcio (CaOH) presente no cimento, e formar silicatos monocalcicos hidratados, que proporcionam redução no tamanho dos poros dos materiais

produzidos, possibilitando um aumento na resistência à compressão da matriz cimentícia, é necessária que ela esteja em seu estado amorfo, pois quando está no estado cristalino sua reatividade é menor (CECHIN et al., 2018; YOUNES, ABDEL-RAHMAN; KHATTAB, 2018).

O resultado encontrado mostra a presença de picos que enfatizam a presença de material cristalino e desvios da linha base que evidenciam a presença de material amorfo. O dióxido de silício pode ser encontrado em estado amorfo ou em estado de polimorfos cristalinos nas cinzas do bagaço de cana. Se a queima do bagaço for adequada é possível obter a sílica em estado amorfo, sendo esta, um dos compostos químicos mais importantes e desejáveis na produção de compósitos cimentícios (CORDEIRO; KURTIS, 2017; JUNG et al., 2018).

A Figura 2B apresenta o resultado do ensaio de difração de raios-X, realizado para a amostra de CCA. Como pode ser observado, a CCA se comporta como um material amorfo, referente a sílica, uma vez que não foram observados picos no difratograma. Este resultado é semelhante aos obtidos por Calheiro et al., (2016), Enzweiler, Coutinho e Schwaab, (2013) e Pereira et al. (2015), onde também observaram sílica em estado amorfo para as amostras de cinza da casca de arroz.

Na Figura 2C temos o difratograma da amostra de CPN, onde é possível observar a ausência de fases cristalinas, indicando compostos amorfos de óxido de zinco (ZnO). O óxido de zinco pode retardar a cura do cimento, afetando negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios produzidos (NOCHAIYA et al., 2015). Este resultado corrobora com os obtidos por Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), Kinoshita et al. (2005) e Senin et al. (2016), onde os autores encontraram maiores quantidades de compostos amorfos de óxido de zinco, para as amostras de cinzas de borracha de pneu estudadas.

A difração de raio-X, detectou na amostra de RA a presença de (Q) quartzo, (C) clinocloro, (M) moscovita, (A) albita, (Ca) calcita e (O) ortoclásio (Figura 2D). Devido à elevada quantidade de quartzo (SiO_2) presente na amostra, esse resíduo quando finamente moído e incorporado ao cimento, pode apresentar forte reatividade pozolânica (FRIAS et al., 2013; FRÍAS et al., 2014). A predominância de SiO_2 na forma de quartzo na composição do resíduo de ardósia também foi constatada por Cárdenes et al., (2012), Villa-Córdoba et al., (2012) e Xia et al., (2019).

No entanto, o resíduo de ardósia é formado em sua maior parte por fases cristalinas, característica desfavorável para atividades pozolânicas, uma vez que uma maior cristalinidade

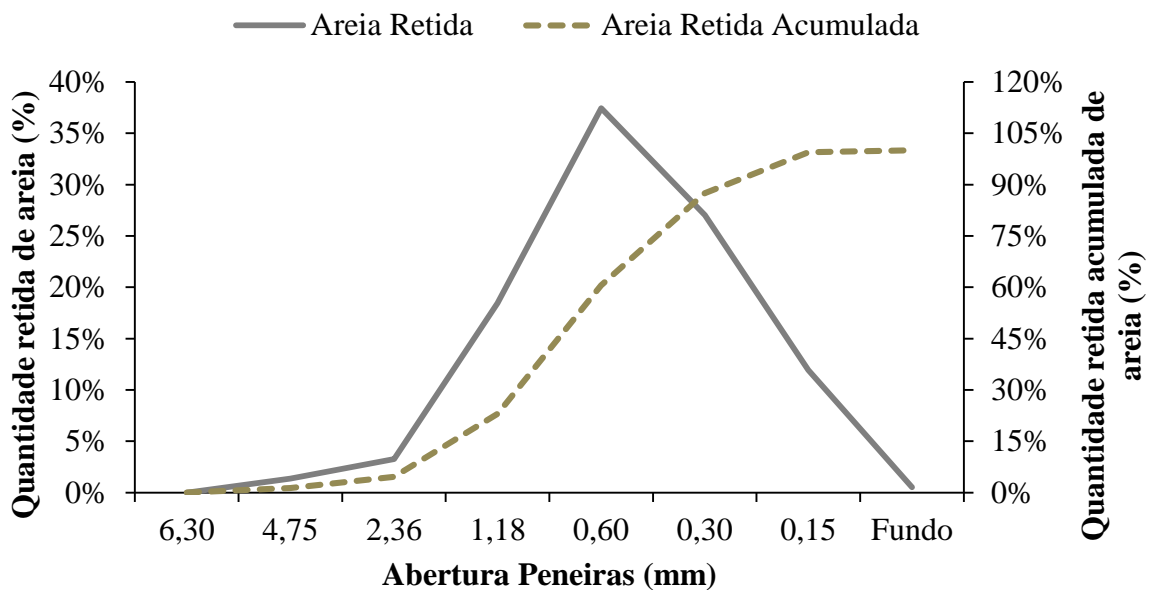
da estrutura pode ser um indicador de baixa reatividade do material (ALMADA et al., 2018; ELYAMANY; ABD ELMOATY; MOHAMED, 2014; SATO; GALINA; TEIXEIRA, 2018).

3.1.2 Análise granulométrica dos agregados miúdos e graúdos

As curvas granulométricas de porcentagens retidas e porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de série normal, conforme à norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), dos agregados miúdos (areia e pó de pedra) encontram-se nas Figuras 3 e 5, respectivamente e do agregado graúdo (brita) na Figura 6. A Figura 4 apresenta as zonas utilizáveis e zonas ótimas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

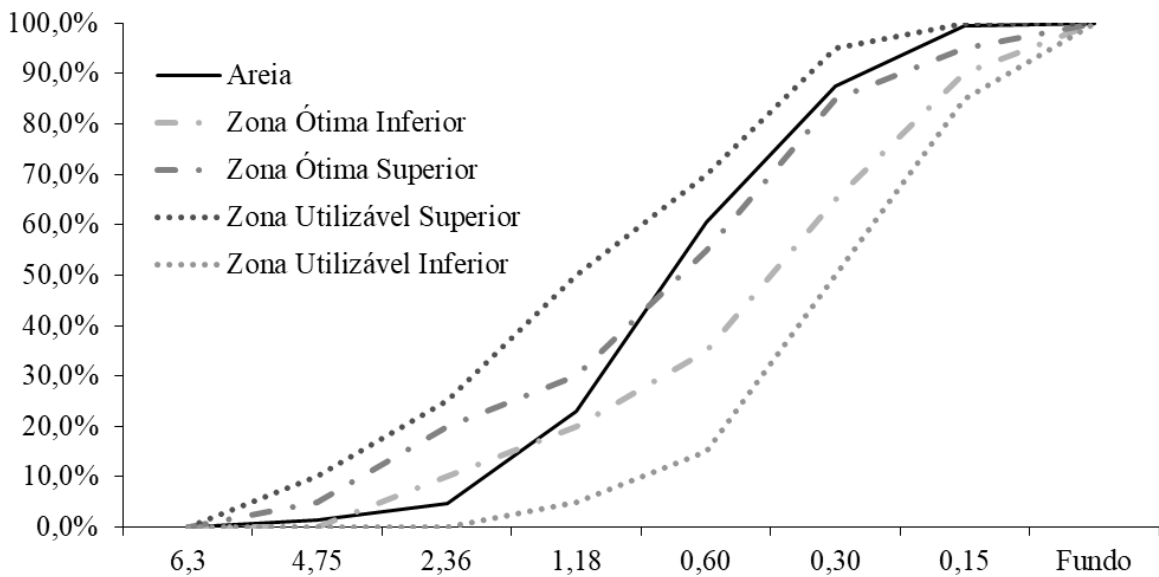
Na Figura 3 é possível observar que a maior parte das partículas de areia ficaram retidas e retidas acumuladas entre as peneiras com abertura entre 2,36 e 0,15 mm, sendo observada a maior porcentagem de material retido na peneira de 0,6 mm. Dessa forma, atende as exigências da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), que especifica que os agregados miúdos devem passar pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficarem retidos na peneira com abertura de malha de 0,15 mm, sendo considerada adequada a sua utilização para produção de blocos de concreto para pavimentação.

Figura 3 - Porcentagem de areia retida e retida acumulada.



Na Figura 4 é possível perceber que a curva granulométrica da areia se encontra dentro do limite superior utilizável e do limite inferior utilizável, com módulo de finura de 2,55 e dimensão máxima característica de 2,36 mm, o que certifica que o material pode ser empregado na confecção dos *pavers* sem prejudicar a trabalhabilidade da massa.

Figura 4 - Porcentagem de areia retida e limites superior e inferior das zonas ótimas.

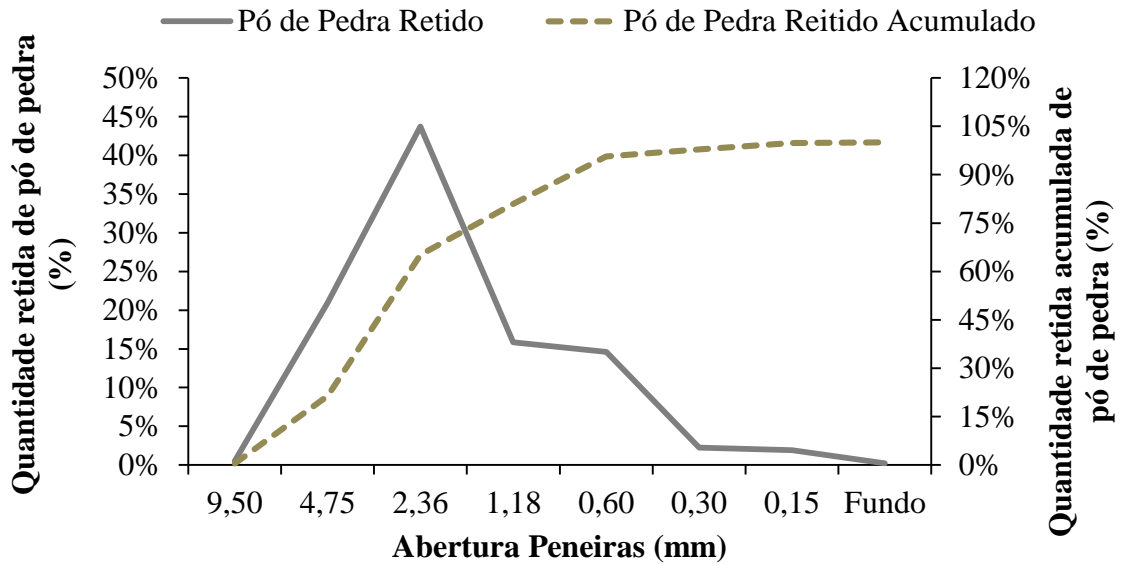


Com relação à distribuição granulométrica de areias, Rodrigues (1984), restringe a utilização de areias grossas, em consequência à interferência entre as partículas, o que prejudica a compactação. Segundo o autor, na maioria das vezes são utilizadas pelos fabricantes na confecção de blocos de concreto para pavimentação, areias classificadas como médias, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), com módulos de finura variando entre 2,5 e 3,2.

Viana Neto, Sales e Sales (2018), encontram valores de módulo de finura de 2,69 na caracterização da areia, valor semelhante ao encontrado neste estudo. No estudo desenvolvido por Vasconcelos e Akasaki (2010) foram obtidos valores para dimensão máxima característica para a areia de 2,36 mm e módulo de finura de 2,66, valores que também se assemelham aos obtidos nesta pesquisa.

Na Figura 5 é possível observar que a maior parte das partículas do agregado miúdo pó de pedra utilizado nesta pesquisa, ficaram retidas e retidas acumuladas entre as peneiras com aberturas de 4,75mm e 0,15mm. A maior porcentagem de material ficou retido na peneira de 2,36 mm.

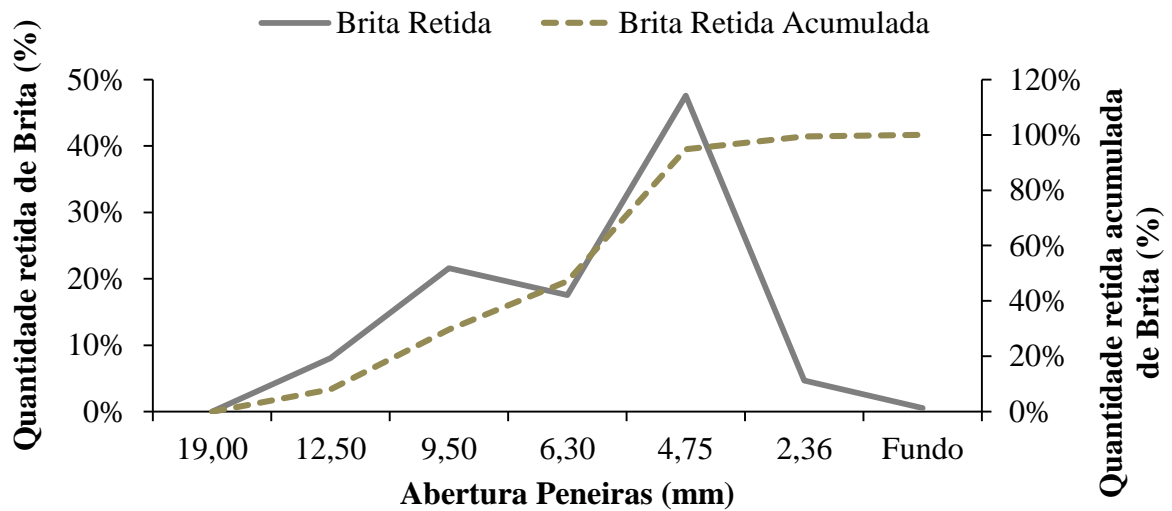
Figura 5 - Porcentagem de pó de pedra retida e retida acumulada.



Observa-se que existe uma pequena porcentagem de material retido na peneira com abertura de 9,5 mm. Este resultado pode ser consequência da origem do agregado, uma vez que é proveniente do beneficiamento de outro material e não passa por processo de classificação na empresa fornecedora.

De acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), a granulometria do agregado graúdo utilizável deve estar entre as peneiras de abertura de 12,5 mm e 2,36 mm. Dessa forma, a porcentagem retida e a retida acumulada de agregado graúdo (brita) (Figura 6) atendem aos limites estabelecidos pela mesma, onde a maior porcentagem de material ficou retido na peneira de 4,75 mm, com módulo de finura igual a 5,18, podendo ser empregado na confecção dos pisos de concreto. Resultado semelhante ao encontrado neste trabalho, foi obtido por Santos et al. (2017), onde o módulo de finura do agregado graúdo foi de 6,75.

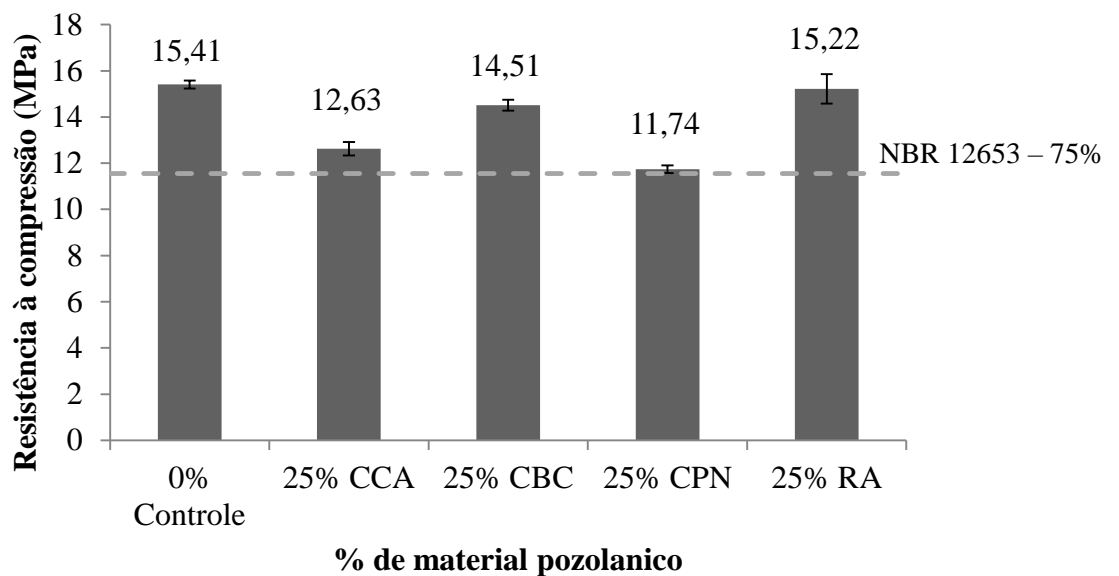
Figura 6 - Porcentagem de brita retida e retida acumulada.



3.2 Análise de pozolanicidade dos resíduos utilizados

Estão apresentados na Figura 7 os valores de índice de atividade pozolânica obtidos no teste de resistência à compressão para a argamassa referência e para as argamassas com substituição parcial do cimento pelas cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana, cinzas de pneu e pó de ardósia.

Figura 7 - Índice de atividade pozolânica dos materiais utilizados.



De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), um material é considerado pozolânico quando o valor da resistência à compressão da argamassa com substituição de 25% do cimento pelo possível material pozolânico for igual ou superior a 75% da resistência à compressão da argamassa referência.

Para que as argamassas produzidas com os materiais de substituição atendessem a norma e fossem caracterizados como materiais pozolânicos, o valor mínimo de resistência à compressão deveria ser de 11,55 MPa. Dessa forma todas as argamassas superaram 75% do valor da argamassa referência, comprovando a viabilidade de utilização desses materiais em substituição parcial ao cimento *Portland*.

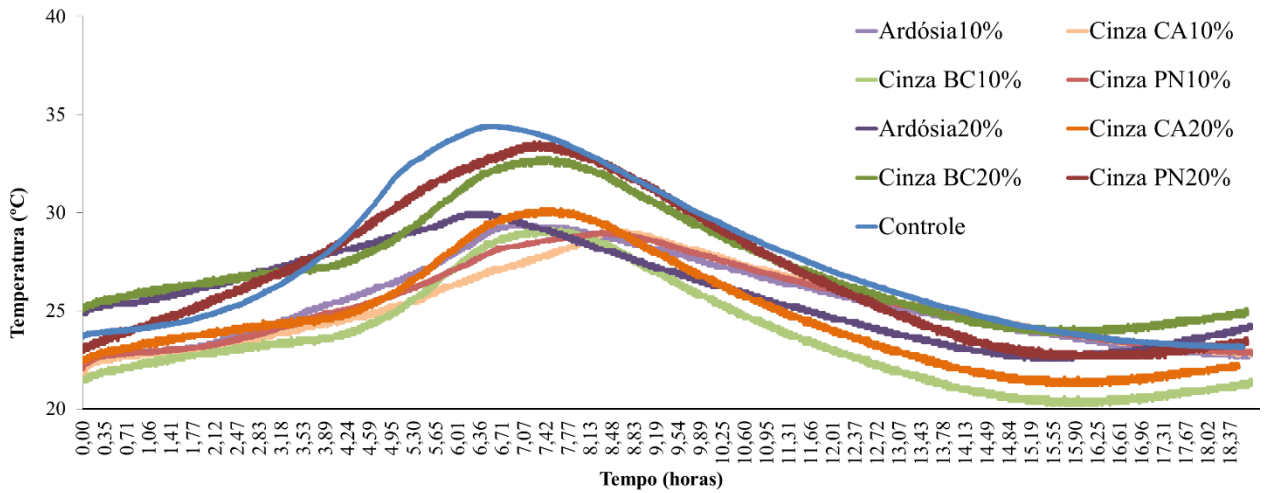
Os difratogramas obtido por meio do ensaio de DRX para as cinzas de bagaço de cana e para cinzas da casca de arroz (Figura 2A e Figura 2B respectivamente) indicaram a predominância de dióxido de silício (SiO_2) em suas composições químicas, o que aumenta a possibilidade do material apresentar características pozolânicas (JUNG et al., 2018), o que pode ter contribuído para este resultado.

Omoniyi, Akinyemi e Akinosun (2013), avaliaram a substituição do cimento por cinzas de casaca de arroz, na produção de blocos para pavimentação de concreto. Foram produzidas amostras com 0%, 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz. Os autores observaram que a substituição do cimento em até 20% pela cinza de casca de arroz, tem efeito positivo nas propriedades de resistência dos blocos, comprovando a atividade pozolânica do material.

Martins Filho e Martins (2017), avaliaram a potencialidade de utilização de cinzas provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do agregado miúdo e do aglomerante, para a produção de blocos para pavimentação. Os autores afirmam que é possível substituir até 2,5% de cimento por cinza leve (alta pozolanicidade) e 25 % de agregado miúdo por cinza pesada (baixa pozolanicidade). O traço com essas substituições atingiu resistência mecânica à compressão de 35,04 MPa, valor superior ao mínimo exigido pela norma, confirmando as características pozolânicas das cinzas do bagaço de cana.

A mistura produzida com cinzas da borracha de pneu, foi a que apresentou o menor índice de atividade pozolânica (11,74 MPa). Esse resultado pode estar relacionado à predominância de óxido de zinco (ZnO) em estado amorfo na composição química das cinzas (Figura 2C), podendo retardar a cura do cimento, reduzindo a resistência do compósito. No entanto, Senin et al. (2016), avaliaram a utilização de cinzas de borracha de pneu nas propriedades de argamassa de cimento e os resultados mostraram que essas cinzas apresentam grande potencialidade para serem utilizadas na produção de argamassa cimentícia.

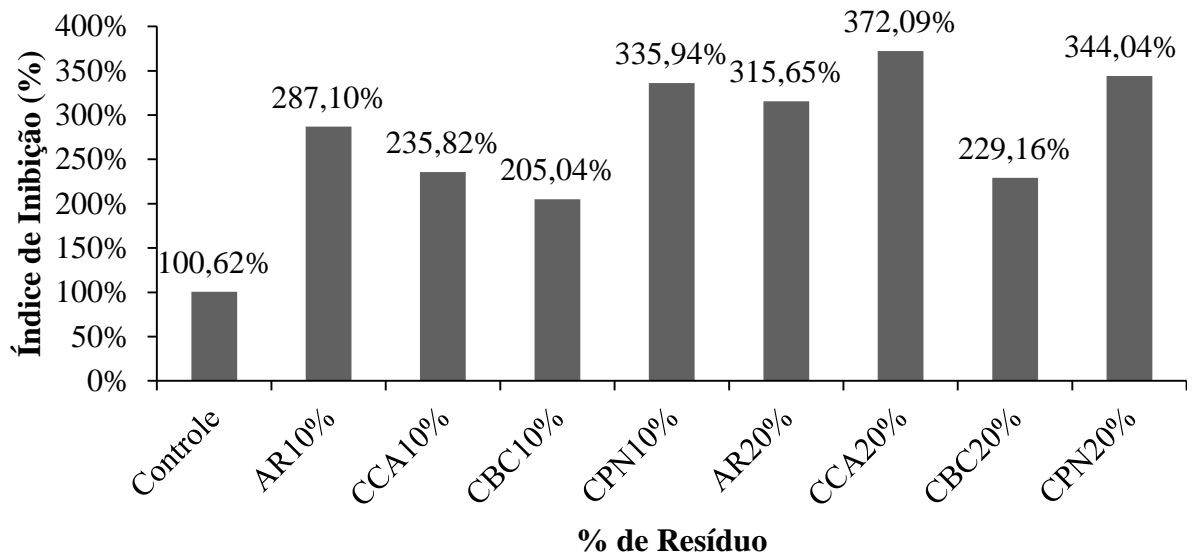
Figura 9 - Curva de inibição dos tratamentos utilizados produção dos *pavers*.



É possível observar que a curva de hidratação da pasta de cimento (cimento+água) (Figura 8) utilizada como parâmetro de comparação para as curvas dos demais tratamentos, apresentou uma temperatura máxima de hidratação inicial de 70,90°C, a qual ocorreu em um tempo de 3,95 horas de ensaio. Além disso, observa-se que a formulação controle utilizada na produção dos *pavers*, leva à diminuição da temperatura máxima de hidratação (34,45°C) e aumento do tempo de cura (6,58 horas) (Figura 8), devido a incorporação dos agregados miúdos (areia e pó de pedra) e grãos (brita), os quais podem apresentar retardantes em suas composições, afetando a cura do cimento.

Comparando o efeito da substituição do cimento pelas cinzas da casca de arroz, cinzas do bagaço de cana, cinzas de pneu e pelo resíduo de ardósia na formulação dos *pavers*, observa-se que ocorreu uma redução na temperatura hidratação e um aumento no tempo de cura à medida em que houve a substituição do cimento pelos resíduos (Figura 9). Essas curvas de hidratação da pasta de cimento foram convertidas em índices de inibição de acordo com a metodologia de Hofstrand et al. (1984) e os valores obtidos para cada tratamento dos pisos intertravados estão apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Índice de Inibição dos tratamentos utilizados para produção dos *pavers*.



AR (resíduos de ardósia); CCA (cinza da casca de arroz); CBC (cinza do bagaço de cana); CPN (cinza da borracha de pneu).

Observando a Figura 10, verifica-se que o tratamento controle foi o que apresentou menor índice de inibição (100,62%) e o tratamento com 20% de cinzas da casca de arroz foi o que apresentou o maior índice (372,09%). O controle e os demais tratamentos apresentaram interferência na hidratação do cimento, sendo classificados de acordo com Okino et al. (2004), como materiais de inibição muito alta.

Esse aumento do índice de inibição com o aumento da quantidade de resíduos, pode estar relacionado com a diminuição da quantidade de cimento presente na formulação, e também com as dimensões reduzidas (0,074 mm) das partículas dos resíduos, associadas a uma maior área superficial em contato com o cimento, o que retarda as reações de hidratação (CASTRO et al., 2017; NASSER; AL-MEFARREJ, 2016).

3.4 Caracterização dos pisos intertravados

3.4.1 Caracterização física dos *pavers*

3.4.1.1 Densidade antes e após o ensaio de durabilidade

Os valores médios de densidade aparente para cada um dos tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado, estão apresentados na Tabela 6. Além da variação dos valores médios dos *pavers* com resíduos em relação aos *pavers* controle.

Tabela 6 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a densidade aparente dos *pavers*.

| Tratamento | Densidade Aparente (g/cm ³) | Δ (%) | Densidade Aparente Envelhecido (g/cm ³) | Δ (%) |
|------------|---|--------------|---|--------------|
| 10% RA | 1,73 ^(0,02) ns a | -1,75 | 1,50 ^(0,01) * b | -3,23 |
| 20% RA | 1,71 ^(0,03) ns a | -2,61 | 1,46 ^(0,02) * b | -5,81 |
| 10% CCA | 1,67 ^(0,02) * a | -4,82 | 1,47 ^(0,01) * b | -5,16 |
| 20% CCA | 1,65 ^(0,01) * a | -6,39 | 1,44 ^(0,02) * b | -7,10 |
| 10% CBC | 1,72 ^(0,01) ns a | -2,35 | 1,49 ^(0,01) * b | -3,87 |
| 20% CBC | 1,70 ^(0,01) ns a | -3,00 | 1,46 ^(0,01) * b | -5,81 |
| 10% CPN | 1,70 ^(0,02) ns a | -3,20 | 1,47 ^(0,02) * b | -5,16 |
| 20% CPN | 1,71 ^(0,01) ns a | -2,54 | 1,43 ^(0,01) * b | -7,74 |
| Controle | 1,76 ^(0,04) a | | 1,55 ^(0,02) b | |

*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

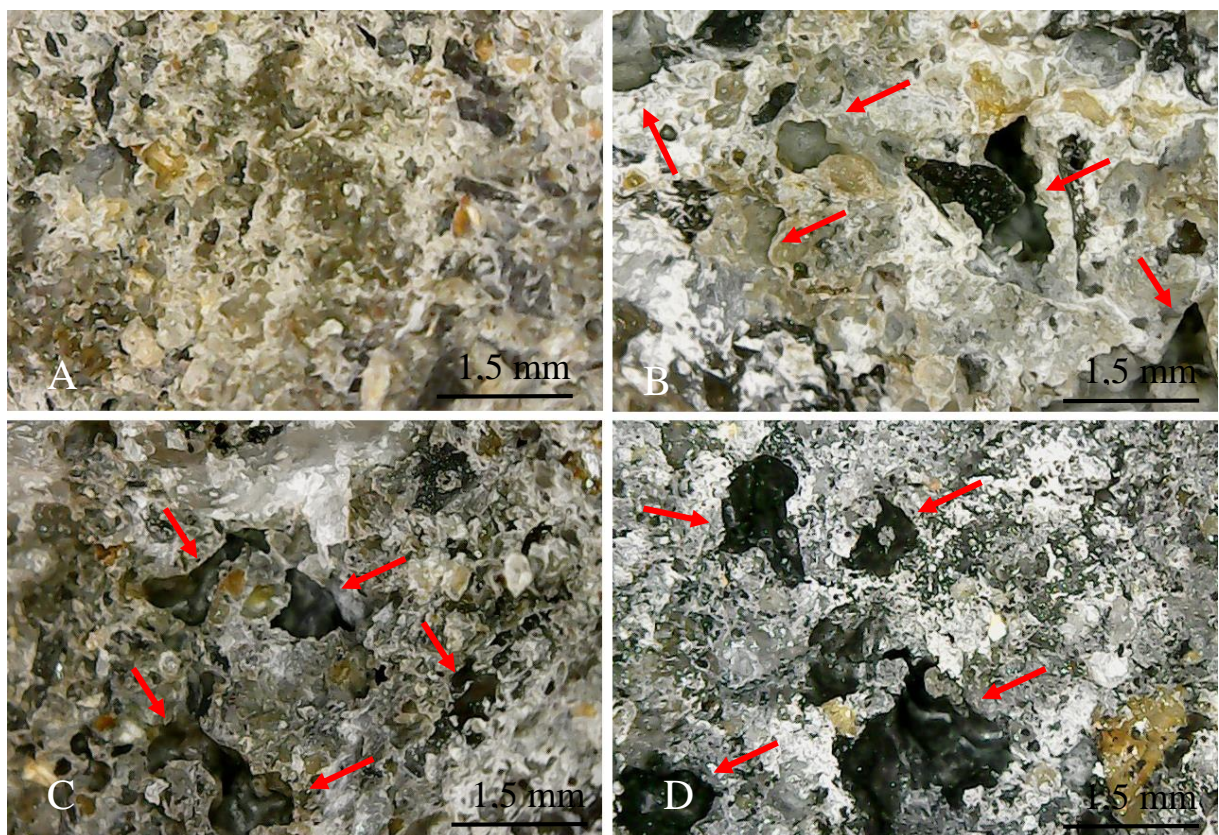
Com relação a propriedade densidade aparente dos pisos intertravados aos 28 dias de cura, somente os produzidos com 10% e 20% de cinzas da casca de arroz apresentaram diferença significativa em relação ao tratamento controle. A cinza de casca de arroz proporcionou uma redução significativa no valor de densidade aparente das amostras, apresentando variação de -4,82% para os tratamentos com 10% de cinzas e -6,39% para os tratamentos com 20%, em relação ao tratamento controle.

Quando o cimento é substituído por cinza de casca de arroz, que possuem maior área superficial (147 m²/g) quando comparada ao cimento (0,474 m²/g), a relação água/cimento é elevada para garantir a trabalhabilidade da mistura (Tabela 4), o que gera grande quantidade de água e maior formação de vazios (poros), após evaporação da água. Tais poros são responsáveis pela redução da densidade dos *pavers* (KIM; LEE, 2011; DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001).

Comportamento semelhante ao encontrado neste estudo, foi observado por Mayooran, Ragavan e Sathiparan (2017), onde a densidade do bloco de cimento produzido com cinzas da casca de arroz foi menor que a densidade do bloco de cimento controle, constatando que a utilização desse resíduo reduz a densidade final do compósito.

Quanto à densidade aparente dos pisos intertravados envelhecidos, observa-se que todos os tratamentos utilizando resíduos (ardósia, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana e cinza de pneu), apresentaram redução significativa na densidade em relação ao tratamento controle, com variação entre -7,74% e -3,23%, devido a fragilização das ligações entre a matriz e os resíduos sofrida durante os ciclos de envelhecimento, aumentando o número de poros (HWANG; HUYNH, 2015), como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Micrografias dos *pavers* após o envelhecido acelerado.

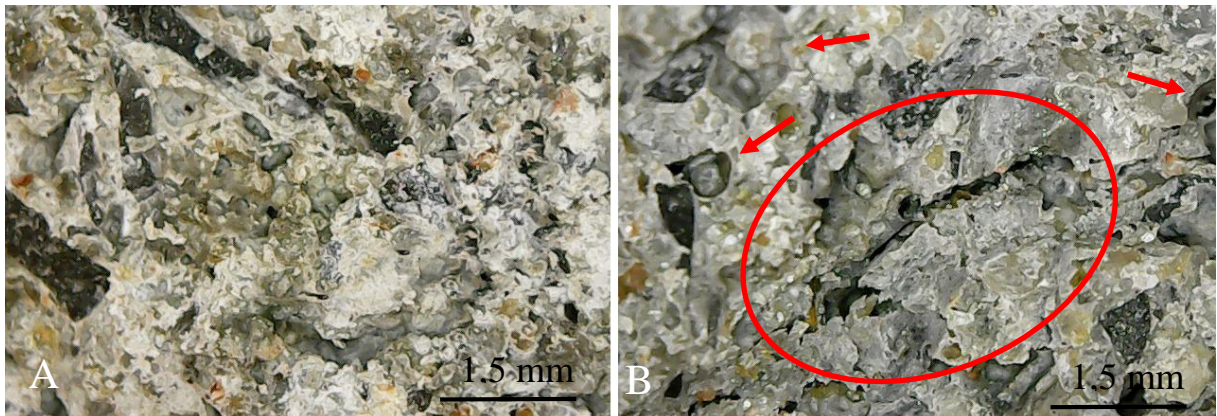


A) *Paver* controle após o envelhecimento; B) *Paver* com 10% de ardósia após o envelhecimento; C) *Paver* com 10% de cinzas da casca de arroz após o envelhecimento; D) *Paver* com 10% de cinzas de pneu após o envelhecimento. As setas indicam o surgimento de poros durante os ciclos de envelhecimento para os *pavers* produzidos com resíduos.

Ao comparar os pisos aos 28 dias de cura e os envelhecidos dentro de cada tratamento, nota-se que todos os tratamentos, tanto o controle como os produzidos com resíduos (AR, CCA, CBC, CPN), apresentaram redução significativa na densidade aparente após o envelhecimento,

devido ao surgimento de defeitos na microestrutura dos *pavers* e maior formação de poros, provocados pelo ciclos de molhagem e secagem com temperaturas elevadas (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, et al. 2018), como pode ser observada na Figura 12, que ilustra a microestrtrutura do *paver* antes e após o envelhecimento acelerado.

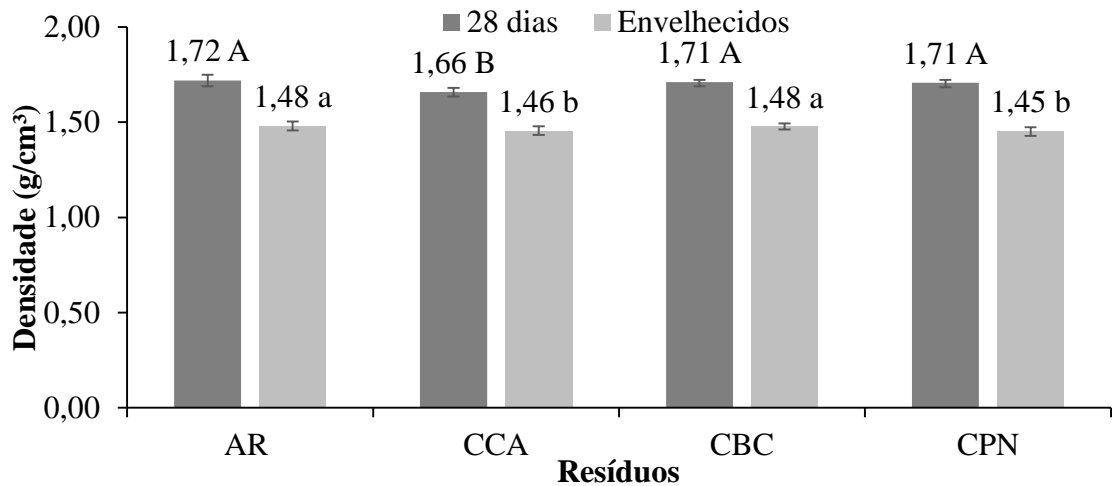
Figura 12 - Micrografias do tratamento com 20% de cinzas de bagaço de cana antes e após o envelhecimento acelerado.



A) *Paver* com 20% de cinzas de bagaço de cana antes do envelhecimento acelerado; B) *Paver* com 20% de cinzas de bagaço de cana depois do envelhecimento acelerado com o surgimento de poros e microtrinas. As setas apontam o surgimento de poros e o círculo o surgimento de microtrinas provocados pelos ciclos de envelhecimento.

No que se refere aos resíduos (AR, CCA, CBC, CPN) e as duas porcentagens (10% e 20%), não foi observada interação para a densidade aparente dos pisos aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado. Os valores médios de densidade aparente em função do tipo de resíduo para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos podem ser visualizados na Figura 13, já os valores médios de densidade aparente em função das porcentagens de resíduos utilizados na produção dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado estão apresentados na Figura 14.

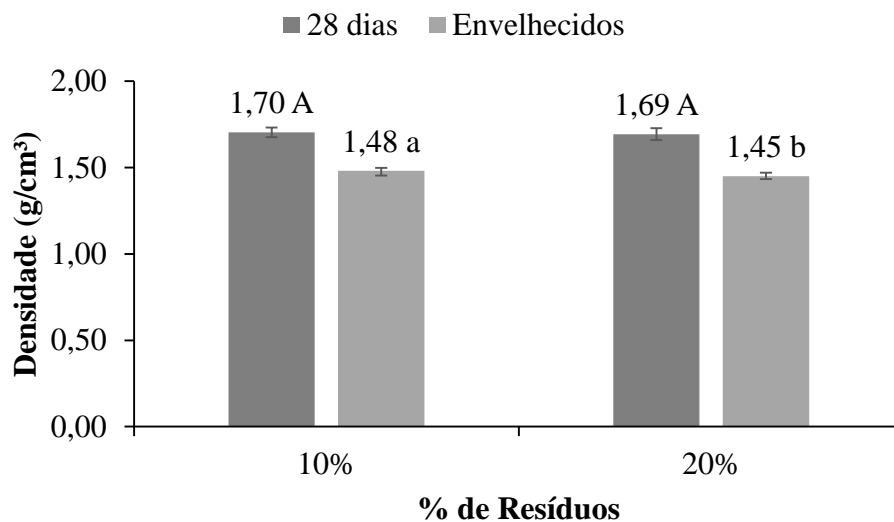
Figura 13 - Valores médios de densidade aparente em função dos resíduos utilizados na produção dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

RA (resíduos de ardósia); CCA (cinza da casca de arroz); CBC (cinza do bagaço de cana); CPN (cinza da borracha de pneu).

Figura 14 - Valores médios de densidade aparente em função das porcentagens de resíduos utilizados na produção dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



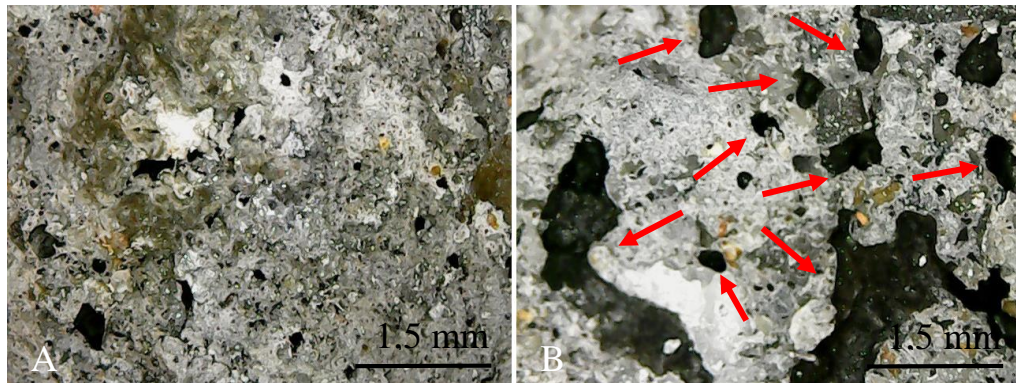
Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

A Figura 13 apresenta a densidade aparente avaliada em função dos resíduos antes e após o envelhecimento acelerado. Nota-se que a cinza da casca de arroz reduziu significativamente os valores de densidade quando comparada aos demais tratamentos antes do envelhecimento. Já após o envelhecimento, as cinzas da casca de arroz e a cinzas de pneu foram

estatisticamente iguais, diferenciando-se dos tratamentos produzidos com resíduos de ardósia e cinzas de bagaço de cana, que apresentaram os maiores valores de densidade. Como mencionado anteriormente, essa redução da densidade aparente dos *pavers* produzidos com cinzas da casca de arroz pode estar relacionada à uma maior relação água/cimento utilizada na mistura produzida com esse resíduo, acarretando em maior formação de poros (SINGH; SIDDIQUE, 2013). Além disso, esse resultado pode estar relacionado ao atraso na cura do cimento, devido ao alto índice de inibição obtido para as amostras confeccionadas com cinzas da casca de arroz (Figura 10), promovendo uma menor hidratação do cimento, e consequentemente reduzindo o preenchimento dos espaços vazios na matriz. Já a redução da densidade dos *pavers* produzidos com cinzas de pneu após o envelhecimento acelerado, pode ter sido provocada pelo menor índice de atividade pozolânica obtido para as amostras produzidas com esse resíduo (Figura 7), além da presença de óxido de zinco (ZnO) na sua composição (Figura 2C) que pode ter retardado a cura do cimento, afetando negativamente a densidade dos *pavers* (YIN; AHAMED; LISAK, 2018).

Analisando a Figura 14 que mostra a avaliação da densidade em função das porcentagens de resíduos antes e após do envelhecimento acelerado, é possível observar que não houve diferença estatística entre as porcentagens antes do envelhecimento acelerado, constatando que o aumento da quantidade de resíduos não interferiu nos valores de densidade. No entanto, observa-se que houve diferença estatística entre as porcentagens de resíduos após o envelhecimento acelerado, onde os menores valores obtidos foram para os tratamentos com 20% de resíduos. De acordo com Savastano Júnior; Warden; Coutts (2000) ao adicionar uma maior quantidade de resíduos ao material, pode ocorrer uma redução na densidade, o que está associado ao grau de compactação da mistura e a geração de poros. Esse efeito é acentuado pelos ciclos de envelhecimento, que degradam as ligações entre a matriz e os resíduos, resultando em poros com tamanhos maiores reduzindo a densidade, como mostra a Figura 15.

Figura 15- Micrografias dos *pavers* produzidos com cinzas de Pneu antes e após e envelhecimento acelerado.



A) *Paver* com 20% de cinzas de pneu antes do envelhecimento acelerado; B) *Paver* com 20% de cinzas de pneu após do envelhecimento acelerado com formação de poros maiores. Setas indicam o surgimento de poros com tamanhos maiores provocados pelos ciclos de envelhecimento, reduzindo a densidade final dos *pavers*.

3.4.1.2 Porosidade Aparente antes e após o ensaio de durabilidade

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios de porosidade aparente dos *pavers*, antes e após o envelhecimento acelerado, para cada um dos tratamentos avaliados. Assim como a variação dos valores médios dos *pavers* com resíduos em relação aos *pavers* controle.

Tabela 7 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a porosidade aparente dos *pavers*.

| Tratamento | Porosidade Aparente (%) | Δ (%) | Porosidade Aparente Envelhecidos (%) | Δ (%) |
|------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|
| 10% RA | 4,94 ^(0,14) ns a | -1,29 | 6,42 ^(0,08) * b | 13,37 |
| 20% RA | 5,15 ^(0,27) ns a | 2,37 | 6,50 ^(0,05) * b | 14,88 |
| 10% CCA | 6,11 ^(0,12) * a | 18,85 | 6,99 ^(0,14) * b | 23,56 |
| 20% CCA | 6,73 ^(0,05) * a | 30,99 | 7,43 ^(0,08) * b | 31,26 |
| 10% CBC | 5,08 ^(0,28) ns a | -1,06 | 6,23 ^(0,22) * b | 10,04 |
| 20% CBC | 4,80 ^(0,41) ns a | -6,53 | 6,12 ^(0,23) * b | 8,05 |
| 10%CPN | 5,15 ^(0,27) ns a | 0,30 | 6,30 ^(0,40) * b | 11,29 |
| 20%CPN | 5,53 ^(0,18) ns a | 7,72 | 6,67 ^(0,14) * b | 17,88 |
| Controle | 5,14 ^(0,15) a | | 5,66 ^(0,05) b | |

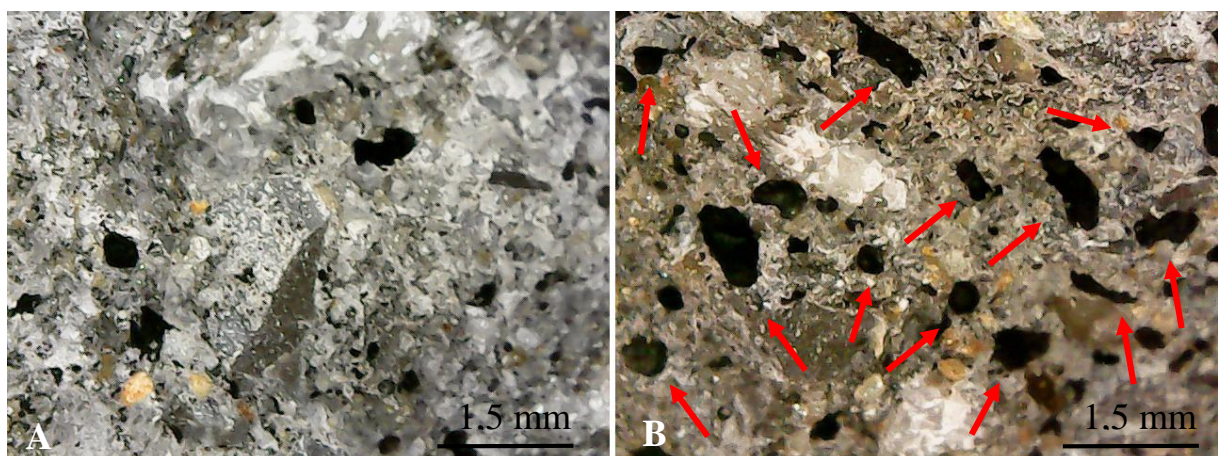
*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Para a propriedade porosidade aparente aos 28 dias de cura, apenas os tratamentos com 10% e 20% de cinzas da casca de arroz apresentaram diferença significativa em comparação ao tratamento controle, com variação de 18,85% para os tratamentos com 10% de cinzas de casca de arroz e 30,99% para os tratamentos com 20% cinzas. A adição das cinzas da casca de arroz influencia a densidade de empacotamento do sistema, alterando a quantidade de água disponível para preencher os poros. Como esse material tem uma área superficial maior do que o cimento, ele influencia a quantidade de água disponível na camada superficial. Nesse sentido, a adição da cinza da casca de arroz influencia a demanda de água da mistura (Tabela 4), acarretando na formação de uma maior quantidade de poros e consequentemente na diminuição da densidade dos compósitos (Tabela 6) (BILIR; GENCEL; TOPCU; 2015).

Para os *pavers* envelhecidos, foi observada diferença significativa para todos dos tratamentos em comparação ao tratamento controle, com variação entre 8,05 a 31,26%, resultado que justifica a redução da densidade dos compósitos após o envelhecimento (Tabela 6), devido a maior formação de poros provocada pelos ciclos de molhagem e secagem.

Ao comparar os *pavers* após 28 dias de cura com os *pavers* envelhecidos dentro de cada tratamento, observa-se que todos os tratamentos apresentaram diferença estatística para a porosidade, sendo os maiores valores encontrados para os *pavers* envelhecidos, uma vez que os ciclos de envelhecimento afetam as ligações químicas do cimento deixando-as mais fracas, acarretando na formação de maior número de poros (SILVA et al., 2018), como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Micrografias dos *pavers* com cinzas de pneu aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.



A) Formação de poros no *paver* com 10% de cinzas de pneu antes do envelhecimento; B) Formação de poros no *paver* com 10% de cinzas de pneu depois do envelhecimento. Setas indicam aumento na formação de poros provocado pelos ciclos de molhagem e secagem à temperatura elevada.

Ainda com relação aos dados, foi observada interação entre os resíduos (RA, CCA, CBC, CPN) e as duas porcentagens (10% e 20%) para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos. Os desdobramentos dos dados de porosidade aparente dos *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos podem ser visualizados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 – Valores médios de porosidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens dos *pavers* aos 28 dias de cura (%).

| Tratamento | RA | CCA | CBC | CPN |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10% | 4,94 ^(0,17) Aa | 6,11 ^(0,12) Ab | 5,08 ^(0,28) Aa | 5,15 ^(0,27) Aa |
| 20% | 5,15 ^(0,33) Aa | 6,73 ^(0,05) Bb | 4,80 ^(0,41) Aa | 5,53 ^(0,18) Aa |

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (na coluna) e minúscula (na linha) não diferem entre si de acordo com a análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Tabela 9 – Valores médios de porosidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens dos *pavers* envelhecidos (%).

| Tratamento | RA | CCA | CBC | CPN |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10% | 6,42 ^(0,08) Aa | 6,99 ^(0,14) Ab | 6,23 ^(0,22) Aa | 6,30 ^(0,40) Aa |
| 20% | 6,50 ^(0,05) Ab | 7,43 ^(0,08) Bc | 6,12 ^(0,23) Aa | 6,67 ^(0,14) Ab |

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (na coluna) e minúscula (na linha) não diferem entre si de acordo com a análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Ao avaliar as porcentagens (10% e 20%) dentro de cada resíduo (RA, CCA, CBC, CPN), tanto para os *pavers* aos 28 dias de cura como para os envelhecidos, nota-se que apenas o tratamento utilizando cinzas de casca de arroz se diferenciou estatisticamente, apresentando o maior valor para o tratamento com 20% de cinzas.

Ao comparar os resíduos (RA, CCA, CBC, CPN) dentro de cada porcentagem (10% e 20%), tanto para os *pavers* aos 28 dias de cura como para os *pavers* envelhecidos, observou-se efeito significativo para a porosidade aparente. Para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos utilizando 10% de resíduo, nota-se que a cinza da casca de arroz apresentou maior porosidade comparada aos demais tratamentos, que foram estatisticamente iguais.

Ao utilizar 20% de resíduos para os *pavers* aos 28 dias de cura, nota-se que a cinza da casca de arroz apresentou maior porosidade comparada ao resíduo de ardósia, a cinza do bagaço de cana e a cinza de pneu, que foram iguais estatisticamente. Já para a porcentagem de 20%, para os *pavers* envelhecidos, observa-se que a cinza da casca de arroz se diferenciou estatisticamente do resíduo de ardósia e da cinza de pneu que foram estatisticamente iguais e da cinza de bagaço de cana que foi estatisticamente diferente dos demais tratamentos, apresentando uma menor porosidade, resultado que pode estar relacionado ao menor índice de

inibição obtido para as cinzas do bagaço de cana (Figura 10), uma vez que há uma maior hidratação do cimento e o desenvolvimento silicatos de cálcio hidratados, permitindo preencher os espaços vazios da matriz, não afetando de maneira significativa a hidratação do cimento.

A maior taxa de porosidade obtida para os *pavers* produzidos com cinzas de casca de arroz pode estar relacionado ao maior índice de inibição obtido para esse resíduo (Figura 10), onde há maior área superficial do resíduo em contato com o cimento, retardando as reações de hidratação e conseqüentemente afetando as propriedades dos compósitos (NASSER; AL-MEFARREJ, 2016). De acordo Aiqin, Chengzhi e Ningsheng (1997) e Aiqin, Chengzhi e Ningsheng (1999), o grau de hidratação influencia significativamente a porosidade do compósito. Um maior grau de hidratação do cimento, resulta em menores porosidades, melhorando as propriedades finais dos produtos.

3.4.1.3 Absorção de Água antes e após o ensaio de durabilidade

Os valores médios da absorção de água dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado para cada um dos tratamentos avaliados e a variação dos valores médios dos *pavers* produzidos com resíduos em relação aos *pavers* controle, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 10 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a absorção de água dos *pavers*.

| Tratamento | Absorção de Água (%) | Δ (%) | Absorção de água Envelhecido (%) | Δ (%) |
|------------|-----------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
| 10% RA | 2,87 ^(0,10) ns a | -9,46 | 4,60 ^(0,22) * b | 21,73 |
| 20% RA | 2,78 ^(0,18) ns a | -12,30 | 4,70 ^(0,27) * b | 24,31 |
| 10% CCA | 3,65 ^(0,64) * a | 15,14 | 4,80 ^(0,10) * b | 26,96 |
| 20% CCA | 4,30 ^(0,37) *a | 35,65 | 5,00 ^(0,10) * b | 32,25 |
| 10% CBC | 2,97 ^(0,62) ns a | -6,31 | 4,17 ^(0,62) * b | 10,21 |
| 20% CBC | 2,82 ^(0,25) ns a | -11,04 | 4,09 ^(0,22) * b | 8,20 |
| 10%CPN | 3,03 ^(0,16) ns a | -4,42 | 4,29 ^(0,22) *b | 13,43 |
| 20%CPN | 3,23 ^(0,10) ns a | 1,89 | 4,65 ^(0,10) * b | 23,02 |
| Controle | 3,17 ^(0,30) a | | 3,78 ^(0,07) b | |

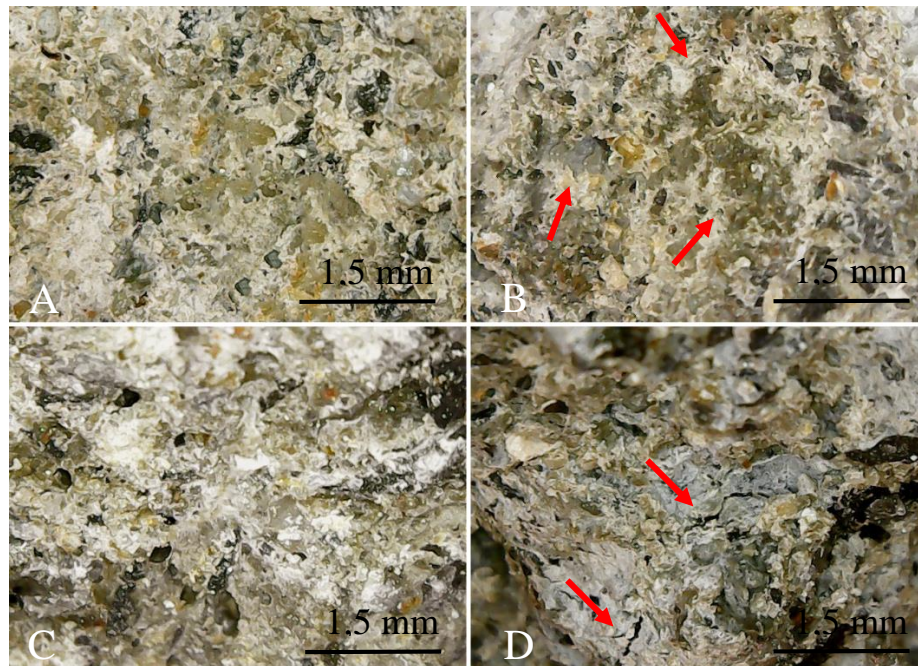
*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Comparando o tratamento controle com os tratamentos com adição de resíduos aos 28 dias de cura, observou-se que apenas os *pavers* produzidos com cinzas da casca de arroz apresentaram diferença significativa, aumentando a absorção de água, com variação de 15,14% para os tratamentos com 10% de cinzas de casca de arroz e 35,65% para os tratamentos com 20% de cinzas, constatando que o aumento da porcentagem de resíduo proporcionou ainda maiores valores de absorção. Tal aumento pode estar associado à redução da densidade (Tabela 6) e ao aumento da porosidade (Tabela 7) desses *pavers*. Assim como foi observado nos resultados de densidade e porosidade, o efeito de diluição do cimento, causado pela inserção das cinzas da casca de arroz, aumenta a relação água/cimento da mistura (Tabela 4), acarretando em uma maior formação de poros e conseqüentemente em uma maior absorção de água (RODRIGUES et al., 2015; CORDEIRO et al., 2018).

Já para os *pavers* envelhecidos, todos os tratamentos obtiveram diferença significativa em relação ao tratamento controle, apresentando aumento significativo na absorção de água, com variação de 8,20 a 32,25%. Esse resultado pode estar relacionado à redução da densidade (Tabela 6) e ao aumento na formação de poros (Tabela 7) desse compósitos após os ciclos de envelhecimento.

Quando comparados os *pavers* aos 28 dias de cura com os envelhecidos, verifica-se que os produzidos tanto no tratamento controle como nos tratamentos com adição de resíduos após o envelhecimento acelerado, apresentaram um aumento significativo na absorção de água, devido à redução da densidade e aumento da porosidade desses *pavers* após o envelhecimento acelerado (Tabela 6 e Tabela 7 respectivamente). Além disso, esse resultado pode ser consequência da geração de defeitos na microestrutura dos compósitos ocasionados pelos ciclos de envelhecimento (WEI; MEYER, 2014), como observado na Figura 17, que apresenta o tratamento controle e o tratamento com 10% de cinzas de bagaço de cana antes e após o envelhecimento acelerado, confirmando o surgimento de defeitos microestruturais, indicados pelas setas, após os ciclos de molhagem e secagem.

Figura 17 - Defeitos na microestrutura dos compósitos com a inclusão dos resíduos.



A) *Paver* controle antes do o envelhecimento; B) *Paver* controle depois do envelhecimento com surgimento de poros; C) *Paver* com 10% de cinzas de bagaço de cana antes do envelhecimento; D) *Paver* com 10% cinzas de bagaço de cana após o envelhecimento com o surgimento de defeitos microestruturais. Setas indicam aumento na formação de poros e surgimento de defeitos microestruturais, provocados pelos ciclos de envelhecimento.

Silva et al. (2017) analisaram a absorção de água de pisos intertravados aos 7 dias de cura, com a incorporação de resíduo de borracha de pneus e verificaram aumento dessa propriedade, variado de 3,23% a 4,08%, aumento esse proporcional ao acréscimo da porcentagem de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha.

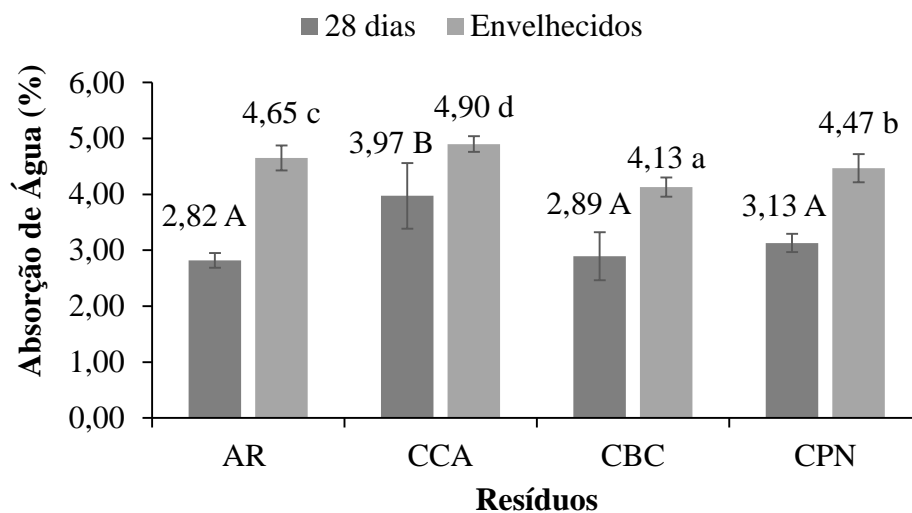
Klarens et al. (2017), estudaram o emprego de cinzas do carvão utilizado na geração de energia elétrica, na produção de pisos intertravados. Os autores observaram que a utilização dessas cinzas, provocou um aumento considerável na absorção de água desses compósitos.

Jegan e Sriram (2018), avaliaram o desempenho dos blocos de pavimentação utilizando pó de granito em substituição parcial ao cimento e observaram um ligeiro aumento na absorção de água dos *pavers*, variando de 5,23% a 5,82%, com o aumento da porcentagem do resíduo. Todos esses estudos revelaram que a adição de resíduos na produção de pisos intertravados pode aumentar a absorção de água dos compósitos, assim como nesta pesquisa.

O valor de absorção de água para o tratamento controle e para os experimentos com 10% e 20% de resíduos antes e após ao envelhecimento, estão de acordo com os critérios estabelecidos pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013) que indicam que os blocos de concreto destinados à pavimentação devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.

Não foi observada interação entre os resíduos (ardósia, cinza da casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu) e as duas porcentagens (10% e 20%) para a propriedade absorção de água dos *pavers* aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado. É possível observar na Figura 18 os valores médios de absorção de água em função do resíduo para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos. Já na Figura 19 estão apresentados os valores médios de absorção de água em função das porcentagens para os *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.

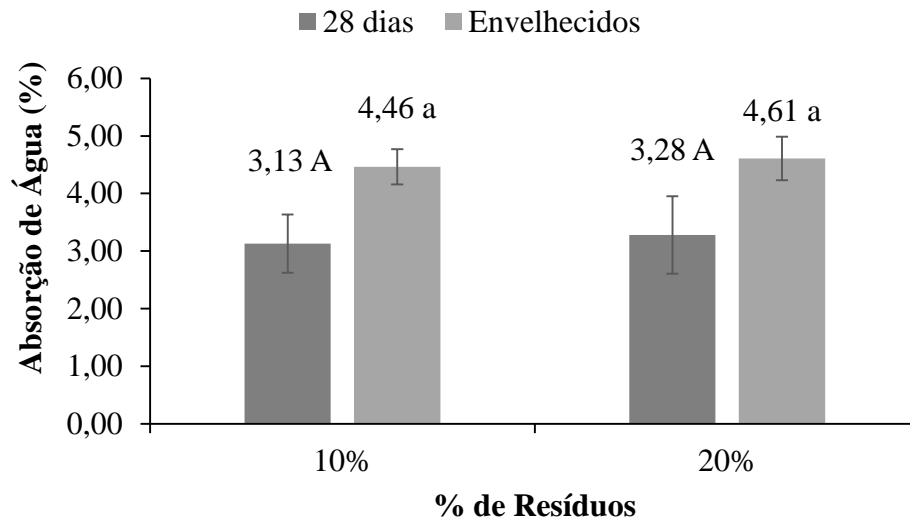
Figura 18 - Valores médios de absorção de água em função dos resíduos utilizados na produção dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

RA (resíduos de ardósia); CCA (cinza da casca de arroz); CBC (cinza do bagaço de cana); CPN (cinza da borracha de pneu).

Figura 19 - Valores médios de absorção de água em função das porcentagens de resíduos utilizados na produção dos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

Observa-se na avaliação da absorção de água em função dos resíduos antes do envelhecimento acelerado (Figura 18) que os RA, CBC e CPN foram estatisticamente iguais, apresentando os menores valores de absorção, resultado justificado pela maior densidade (Figura 13) e menor porosidade (Tabela 8) desses *pavers*. Já a CCA foi estatisticamente diferente dos demais resíduos, apresentando o maior valor de absorção de água. Essa tendência apresenta relação direta com a densidade (Tabela 6) e porosidade dos compósitos (Tabela 7). Segundo Hentges et al. (2018), compósitos com menor densidade apresentam maior quantidade de poros e conseqüentemente maior absorção de água, o que justifica o resultado obtido neste estudo.

Ao analisar a absorção de água em função dos resíduos após o envelhecimento acelerado (Figura 20), nota-se que todos os resíduos se diferenciaram estatisticamente entre si. Os *pavers* produzidos com CBC apresentaram menor valor de absorção de água (4,13%), resultado que pode estar relacionado à maior densidade (Figura 13) e uma menor porosidade (Tabela 9) desses *pavers*, seguido da CPN (4,47%), do RA (4,65%) e da CCA, que obteve o maior valor de absorção de água (4,90%), resultado semelhante ao encontrado antes do envelhecimento acelerado, onde a CCA afetou significativamente a absorção de água dos *pavers*.

Quando avaliada a absorção de água em função das porcentagens de resíduos antes e após o envelhecimento acelerado (Figura 19), verificou-se que não houve diferença estatística

entre as porcentagens, constatando que o aumento na porcentagem de resíduos não interferiu significativamente nessa propriedade, resultado que corrobora com os valores encontrados para a densidade antes do envelhecimento (Figura 14). No entanto, apesar de ter ocorrido uma redução da densidade aparente dos compósitos com 20% de resíduos após o envelhecimento acelerado, isso não afetou de maneira significativa a absorção de água dos *pavers*.

3.4.2 Caracterização mecânica dos *pavers*

3.4.2.1 Resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade

Os valores médios de resistência à compressão para cada um dos tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado, estão apresentados na Tabela 11, bem como a variação dos valores médios dos *pavers* feitos com resíduos em relação aos *pavers* controle.

Tabela 11 - Efeito da utilização de resíduos de ardósia, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu sobre a resistência à compressão dos *pavers*.

| Tratamento | Resistência à Compressão (MPa) | Δ (%) | Compressão Envelhecidos (MPa) | Δ (%) |
|-----------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| 10% RA | 19,36 ^(1,20) * a | -12,64 | 17,32 ^(2,02) * a | -20,73 |
| 20% RA | 18,12 ^(1,40) * a | -18,23 | 17,63 ^(0,07) * a | -19,31 |
| 10% CCA | 17,79 ^(1,22) * a | -19,72 | 17,82 ^(0,66) * a | -18,44 |
| 20% CCA | 15,97 ^(1,91) * a | -27,93 | 15,27 ^(0,88) * a | -30,11 |
| 10% CBC | 19,62 ^(1,78) * a | -11,46 | 19,50 ^(0,12) * a | -10,76 |
| 20% CBC | 15,77 ^(1,20) * a | -28,84 | 15,62 ^(0,14) * a | -28,51 |
| 10%CPN | 18,34 ^(1,32) * a | -17,24 | 16,68 ^(3,06) * a | -23,66 |
| 20%CPN | 16,43 ^(1,50) * a | -25,86 | 16,30 ^(0,44) * a | -25,40 |
| Controle | 22,16 ^(1,30) a | | 21,85 ^(0,68) a | |

*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett ($\alpha=0.05$) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Quando avaliada a resistência à compressão dos *pavers*, nota-se que a substituição de cimento pelos resíduos (RA, CCA, CBC, CPN) nas porcentagens de 10% e 20% promoveu

redução significativa dos valores de resistência à compressão aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado, em relação ao tratamento controle, mesmo os resíduos apresentando propriedades pozolânicas (Figura 7). A redução na resistência à compressão para os pisos aos 28 dias de cura apresentou variação entre -28,84% a -11,46%, já para os pisos envelhecidos a variação foi de -30,11% a -10,76% em relação ao tratamento controle.

De acordo com Zhang et al. (1996), a densidade de empacotamento do sistema, é influenciada pela adição de material pozolânico, alterando dessa forma, a quantidade de água de preenchimento. Um material pozolânico tem uma área superficial maior que o cimento, e isso faz com que ele também influencie na quantidade de água na camada de superfície. Deste modo, quando um material pozolânico é adicionado à pasta de cimento, ele influencia a quantidade de água da mistura, afetando sua resistência, em razão da redução da densidade do material e de uma maior formação de poros.

Essa redução na resistência a compressão também está associada às microtrincas presentes nos compósitos, como ilustrado na Figura 20. Essas microtrincas são causadas, uma vez que a zona de transição entre a pasta de cimento e os materiais pozolânicos é mais fraca que a pasta de cimento puro, e isso afeta diretamente a resistência à compressão (LIAN; ZHUGE, 2010; SUA-IAM; MAKUL, 2014).

Figura 20 – Micrografia mostrando microtrincas presentes nos *pavers* com a inclusão de cinzas da casca de arroz.



As setas apontam o surgimento de microtrincas após o envelhecimento, provocadas pelos ciclos de molhagem e secagem.

Ao comparar os *pavers* aos 28 dias de cura com os envelhecidos dentro de cada tratamento, observa-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos. Esse resultado

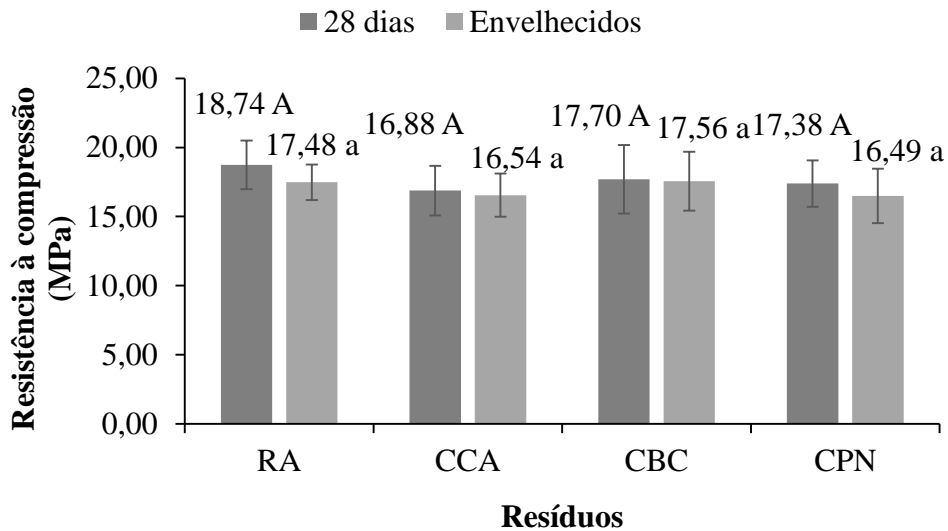
mostra que os ciclos de envelhecimentos pelos quais os pisos foram submetidos não afetaram significativamente a resistência à compressão. De acordo com Shao et al. (2019) e Pereira et al. (2018), o grau de reação pozolânica aumenta gradualmente com o aumento tempo de cura, o que pode ser uma justificativa para esse resultado, revelando a reatividade limitada das pozolanas utilizadas.

A norma NBR 9781 (2013) especifica que os valores de resistência a compressão dos *pavers* devem ser maiores ou iguais a 35 MPa quando destinados à tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e maiores ou iguais a 50 MPa quando destinados à tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados. Dessa forma, nenhum dos tratamentos com 10% e 20% de substituição do cimento pelos resíduos (ardósia, cinza da casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu), incluindo o tratamento controle, antes e após o envelhecimento acelerado, atenderam os valores determinados pela norma. A relação água / cimento, a quantidade total de material cimentício e a ausência de uso de um superplastificante podem ser indicados como fatores que comprometem os valores de resistência à compressão.

No entanto, pisos que são atualmente comercializados foram submetidos ao teste de compressão e apresentaram um valor médio de 21,97 MPa, valor semelhante aos obtidos neste trabalho, fato que confirma o potencial de utilização desses resíduos na produção de pisos intertravados.

Não foi observada interação entre os resíduos (RA, CCA, CBC, CPN) e as duas porcentagens (10% e 20%) para a resistência à compressão dos *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos. É possível observar na Figura 21 os valores médios de resistência à compressão em função dos resíduos para os *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado. Já os valores médios de resistência à compressão em função das porcentagens para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos, estão apresentados na Figura 22.

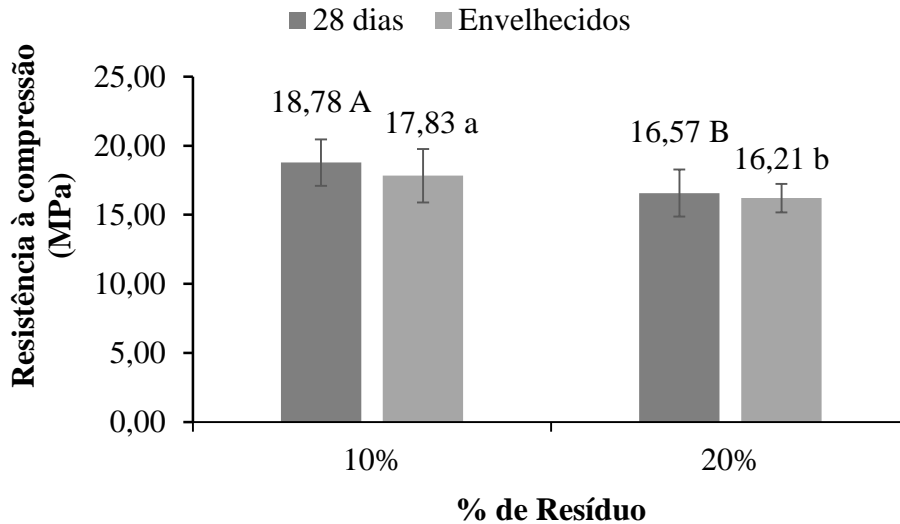
Figura 21 - Valores médios de resistência à compressão em função dos resíduos utilizados nos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

RA (resíduos de ardósia); CCA (cinza da casca de arroz); CBC (cinza do bagaço de cana); CPN (cinza da borracha de pneu).

Figura 22 - Valores médios de resistência à compressão em função das porcentagens de resíduos utilizados nos *pavers* antes e após o envelhecimento acelerado.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula (*pavers* aos 28 dias de cura) e minúscula (*pavers* envelhecidos) não diferem entre si pela análise de variância, a um nível de significância de 5%.

Na Figura 21, que apresenta a resistência à compressão avaliada em função dos resíduos para os *pavers* aos 28 dias de cura e envelhecidos, nota-se que os valores médios de resistência foram estatisticamente iguais para os quatro resíduos utilizados, não afetando a resistência à

compressão dos *pavers*. Apesar dos *pavers* produzidos com a cinza da casca de arroz terem apresentado menor densidade, maior porosidade e absorção de água em relação aos demais tratamentos, esses resultados não afetaram significativamente a resistência à compressão dos *pavers* confeccionados com esse resíduo.

Na Figura 22 onde mostra a avaliação da resistência à compressão em função das porcentagens de resíduos antes e após o envelhecimento acelerado, verifica-se que houve diferença estatística entre as porcentagens, onde os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos para os tratamentos com 10% de resíduo. Tal fato pode estar relacionado à crescente retirada de cimento *Portland* da mistura, onde a quantidade de silicato de cálcio hidratado diminui com essa maior substituição do cimento, sendo este o principal composto resultante da hidratação do cimento, responsável pela resistência mecânica dos compósitos (MARTINS FILHO; MARTINS, 2017; SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2017). Além disso, de acordo com Silva et al. (2017), a inserção de resíduos pode diminuir a trabalhabilidade da mistura, afetando a densidade de empacotamento e conseqüentemente diminuindo a resistência à compressão.

Diferentes estudos apontam essa redução da resistência à compressão dos *pavers* com o aumento da substituição do cimento Portland por materiais alternativos. Juan-Valdés et al.(2019), estudaram a viabilidade de produção de blocos de concreto destinados à pavimentação utilizando concreto reciclado e constataram uma redução significativa da resistência dos compósitos com a incorporação desses resíduos, obtendo um valor médio de 30 MPa. Mashaly et al. (2016), avaliaram a resistência de blocos utilizados na pavimentação produzidos com resíduo de mármore (lodo de mármore) substituindo parcialmente o cimento. Os autores observaram que uma porcentagem maior de substituição resultou em menor resistência à compressão dos compósitos produzidos.

Martins Filho e Martins (2017), analisaram a utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do agregado miúdo e do cimento Portland para produção de blocos para pavimentação. De acordo com os autores, quando os teores de cinza leve foram aumentando, a resistência diminuiu, assim como observado neste estudo, uma vez que houve redução na quantidade de cimento.

3.5 Análise da Viabilidade econômico-financeira dos *pavers*

A Tabela 12 apresenta a ficha técnica para as variáveis do tratamento controle. As Tabelas 13 e 14 apresentam as fichas técnicas para os tratamentos com utilização de resíduo de

ardósia nas proporções de 10 e 20%. As fichas técnicas para os tratamentos com cinzas da casca de arroz nas proporções de 10 e 20%, estão apresentadas nas Tabelas 15 e 16. Nas Tabelas 17 e 18 estão as fichas técnicas para os tratamentos com utilização de cinzas de pneu nas proporções de 10 e 20% e nas Tabelas 19 e 20 estão as fichas técnicas para os tratamentos com cinzas da casca de bagaço de cana nas proporções de 10 e 20%.

Tabela 12 - Ficha técnica para o tratamento controle.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0,375 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,11 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,247 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.088,44 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$67.945,63 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 13 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de resíduo de ardósia.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0,352 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,11 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,0233 | Ardósia | R\$0,025 | R\$0,0006 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,241 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.008,29 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$66.182,34 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 14 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de resíduo de ardósia.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0,325 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,10 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,05002 | Ardósia | R\$0,025 | R\$0,0013 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,233 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$2.915,86 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$64.148,96 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 15 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas da casca de arroz.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0,359 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,11 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,0158 | Arroz | R\$0,075 | R\$0,0012 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,244 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.044,19 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$66.972,13 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 16 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas da casca de arroz.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0,341 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,10 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,0339 | Arroz | R\$0,075 | R\$0,0025 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,239 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$2.993,08 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$65.847,71 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 17 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas de pneu.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0,356 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,11 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,0194 | Pneu | R\$0,117 | R\$0,0023 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,244 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.044,02 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$66.968,50 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 18 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas de pneu.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0,333 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,10 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,0418 | Pneu | R\$0,117 | R\$0,0049 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,239 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$2.992,88 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$65.843,45 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg.

Tabela 19 - Ficha técnica para o tratamento com 10% de cinzas do bagaço de cana.

| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0,368 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,11 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,007 | Cinza de bagaço de cana | R\$0,00** | R\$0,00 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,245 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.061,90 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$67.361,72 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg

** O Resíduo não possui valor comercial, uma vez que ele é doado.

Tabela 20 - Ficha técnica para o tratamento com 20% de cinzas do bagaço de cana.

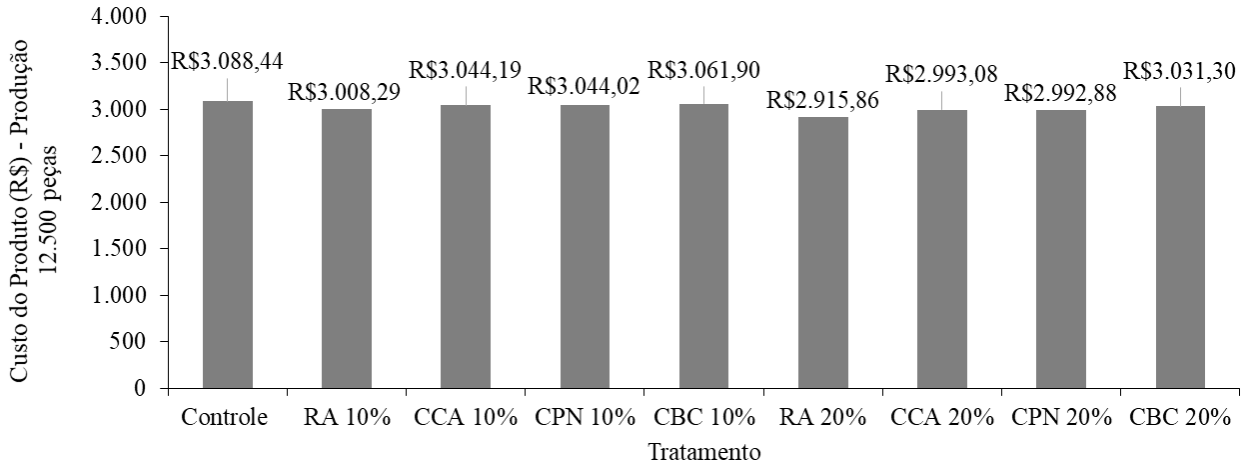
| Quantidade (kg) | Descrição dos Componentes | Custo Unitário (R\$/kg) | Custo Total (R\$) |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0,360 | Cimento | R\$0,30 | R\$0,10 |
| 0,775 | Areia | R\$0,038 | R\$0,03 |
| 0,775 | Pó de Pedra | R\$0,080 | R\$0,06 |
| 0,575 | Brita | R\$0,075 | R\$0,04 |
| 0,015 | Cinza de bagaço de cana | R\$0,00** | R\$0,00 |
| Total de matérias-primas para composição de um piso: | | | R\$0,243 |
| Total de matérias-primas referente à produção diária de 12.500 peças (250m ²): | | | R\$3.031,30 |
| Total de matérias-primas referente à produção mensal de 275.000 peças (5.500 m ²): | | | R\$66.688,69 |

* Peso nominal total dos elementos utilizados para compor o produto 2,5Kg

** O Resíduo não possui valor comercial, uma vez que ele é doado.

Na análise das fichas técnicas dos tratamentos, observa-se uma variação no custo final dos produtos, havendo variação de custo em todos os tratamentos. Verifica-se que a utilização dos resíduos (ardósia, cinza da casca de arroz e cinzas de pneu) provocou uma redução no valor do aglomerante (Cimento CPV – ARI), onde quanto maior a porcentagem utilizada dos resíduos menor o custo final do produto, uma vez que o custo desses resíduos é inferior ao custo do cimento, elemento de substituição desta pesquisa. O preço dos compósitos, referente à produção mensal de 12.500 peças para os quatro diferentes resíduos e para as duas proporções utilizadas, está apresentado na Figura 23.

Figura 23- Gastos mensais do produto para o tratamento controle e experimentos com utilização dos resíduos.



AR (resíduos de ardósia); CCA (cinza da casca de arroz); CBC (cinza do bagaço de cana); CPN (cinza da borracha de pneu).

Ao analisar a Figura 35 nota-se uma redução no custo dos pisos intertravados em relação ao tratamento controle, tal redução está relacionado ao menor custo das matérias-primas utilizadas em substituição parcial ao cimento.

A substituição do cimento pelos resíduos (RA, CCA, CBC, CPN) resultou em redução do custo com matérias-primas em 2,50%, os tratamentos com 10% de resíduos reduziram o valor em 1,58%, já os tratamentos com 20% provocaram uma redução de 3,41%. O menor custo foi do compósito produzido com 20% de ardósia, reduzindo 5,60% do custo com matérias-primas, sendo o mais indicado economicamente.

4 CONCLUSÃO

Analisando as propriedades físicas, a utilização de resíduos promoveu redução da densidade aparente, aumento da absorção de água e da porosidade. Ainda assim, os índices de absorção de água estão abaixo do limite estipulado pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013), não sendo um limitante de utilização até a porcentagem de 20%. No que se refere às propriedades mecânicas, verificou-se redução da resistência à compressão com a substituição parcial do cimento pelos resíduos. Os pisos intertravados com incorporação de resíduos apresentaram valores de resistência mais baixos em comparação ao tratamento controle, no entanto, nenhum dos tratamentos, incluindo o controle atingiu o valor mínimo de 35 MPa estipulado pela NBR 9781 (ABNT, 2013). A cinza da casca de arroz foi o resíduo que mais afetou as propriedades físicas dos *pavers*, sendo dessa forma, o menos indicado para a produção de blocos de concreto destinados à pavimentação. Já a cinza do bagaço de cana e o resíduo de ardósia são os mais indicados para a produção de *pavers*, uma vez que as propriedades dos compósitos produzidos com esses resíduos se assemelharam ao tratamento controle.

A inclusão dos resíduos (pó de ardósia, cinzas da casca de arroz, cinzas do bagaço de cana e cinzas de pneu) resultou em redução do custo com matérias-primas em 2,50%, os tratamentos com 10% de resíduos reduziram o valor em 1,58%, já os tratamentos com 20% reduziram o custo em 3,41%. O menor custo foi do compósito produzido com 20% de ardósia, reduzindo 5,60% do custo com matérias-primas, sendo o mais indicado economicamente.

Pesquisas futuras ainda são necessárias para fornecer maiores informações sobre utilização desses resíduos na produção de pisos intertravados, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e também promovendo uma destinação adequada aos resíduos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às entidades de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES; à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais.

REFERÊNCIAS

- AIQIN, W. CHENGZHI, Z. NINGSHENG Z. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**. v. 27, n. 5, p. 685-695, 1997.
- AIQIN, W. CHENGZHI, Z. NINGSHENG Z. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, **Cement and Concrete Research**. v. 29, n. 11, p. 1721-1726, 1999.
- ALMADA, B. S. et al. Study of Portland Cement Composites Replacing Cement for Waste from the Cutting and Polishing of Ornamental Rocks. **Science and Engineering Investigations**, v. 7, n. 76, p. 120-125, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 948**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Índice de atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 6 p. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro. 3p. 1996.
- BILIR, T.; GENCEL, O. TOPCU, I.B. Properties of mortars with fly ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 782–789, 2015.
- CALHEIRO, D. et al. Influence of the particle size segregation and the additive milling use for the suitability of rice husk ash as byproduct. **Revista Matéria**, v.21, n.2, p. 270 – 281, 2016.
- CÁRDENES, V. et al. Influence of Chemical-Mineralogical Composition on the Color and Brightness of Iberian Roofing Slates. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 24, n. 4, p. 460-467, 2012.
- CASTRO, A. L. et al. Characterization of blended cements with red clay industry waste. **Cerâmica**, v. 63, p. 65-76, 2017.
- CECHIN, L. et al. Effect of adding blast furnace slag to composites with mosso bamboo. **Revista Matéria**, v.23, n.4, 2018.

- COELHO, M. A. Z. et al. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: Produção de enzimas a partir da casca de coco verde. **B. CEPPA**, v. 19, n. 1, p. 33-42, 2001.
- CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement And Concrete Research**, v. 97, p.41-49, jul. 2017.
- CORDEIRO, G. C. et al. Long-Term Compressive Behavior of Concretes with Sugarcane Bagasse Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, n. 2, p. 564–573, 2018.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Quim. Nova**, v. 24, n. 6, p. 778-782, 2001.
- ELYAMANY, H. E.; ABD ELMOATY, M.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, p. 295–307, 2014.
- ENZWEILER, H.; COUTINHO, E. B.; SCHWAAB, M. Cinzas de casca de arroz como fonte alternativa de silício para a síntese de zeólita beta. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 17, n. 17, p. 3284 - 3292, 2013.
- FILHO, W. B. N.; FRANCO, C. R. Avaliação do Potencial dos Resíduos Produzidos Através do Processamento Agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1968-1987, 2015.
- FRÍAS, M. et al. Scientific and technical aspects of blended cement matrices containing activated slate wastes. **Cement & Concrete Composites**, v. 8, p. 19–25, 2014.
- FRÍAS, M. et al. The influence of slate waste activation conditions on mineralogical changes and pozzolanic behaviour. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 96, n. 7, p. 2276-2282, 2013.
- FONSECA, C. S. et al. Micro/nanofibrila celulósicas de Eucalyptus fibrocimentos extrudados. **Revistas Cerne**, Lavras, v 22, n.1, p. 59-68, 2016.
- GANJIAN, E., JALULL, G., SADEGHI-POUYA, H. Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 270–275, 2015.
- GAYARRE, F.L. et al. Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. **Construction and Building Materials**, v.40, p.1193–1199, 2013.
- GENCEL, O.; GOK, M.S.; BROSTOW, W. Effect of metallic aggregate and cement content on abrasion resistance behaviour of concrete, **Material Research Innovations**, v. 15, n. 2, p. 116-123, apr. 2011.
- GHORBANI, S.; GHOLIZADEH, M.; BRITO, J. Effect of Magnetized Water on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Block Pavers. **Materials**, v. 11, p. 1647, 2018.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 562–574, 2014.

GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. A Life-Cycle Approach to Environmental, Mechanical, and Durability Properties of “Green” Concrete Mixes with Rice Husk Ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1-32, 2015.

HENGL, H.L. et al. The performance of paving block structures with mortar filled joints under temperature loading, accessed by means of numerical simulations, **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 7, p. 1575-1594, 2018.

HENTGES, G. et al. Porosidade do bloco cerâmico e absorção de água. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, São Paulo, v. 4, n. 2, 2012.

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

HWANG, C.; HUYNH, T. Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 93, p. 335–341, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos do Setor Agrossilvipastoril**: Resíduos Sólidos Inorgânicos. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2013.

JEGAN, J.; SRIRAM, B. Replacement of cement by granite powder in paver blocks. **International Research Journal of Engineering and Technology**, Babylon, v. 5, n. 6, p. 1680-1683, jun. 2018.

JUAN-VALDÉS, A. et al. Paving with Precast Concrete Made with Recycled Mixed Ceramic Aggregates: A Viable Technical Option for the Valorization of Construction and DemolitionWastes (CDW). **Materials**, Hamburg, v. 12, n. 1, p. 24, 2019.

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.

KASHIYANI, B.K.; PITRODA, J.; SHAH, B.K.; Innovative addition of polypropylene fibre in interlocking paver block to improve compressive strength, **Int. J. Civ. Struct. Environ. Infrastruct. Eng. Res. Dev.**, v.3, p. 17–26, 2013.

KIM, H.K.; LEE, H.K. Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 115–1122, 2011.

KINOSHITA, T. et al. Hydrometallurgical recovery of zinc from ashes of automobile tire wastes. **Chemosphere**, v. 59, p. 1105–1111, 2005.

KLARENS, K. et al. The use of bottom ash for replacing fine aggregate in concrete paving blocks. **MATEC Web of Conferences**, Cachan, v. 138, p. 01005, 2017.

LIAN C, ZHUGE Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – na experimental investigation. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 24, n.12, p. 2664–71, 2010.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira**. 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

LUTFI, M. et al. A comparative analysis of the quality of concrete blocks produced from coconut fibre, oil palm empty fruit bunch, and rice husk as filler material. **MATEC Web of Conferences**, Cachan, v. 195, p. 1-9, 2018.

MARTINS FILHO, S. T.; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 10, n. 4, p. 1205-1224, out./dez. 2017.

MASHALY, A. O. et al. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, Brno, v. 112, p.731-741, 2016.

MAYOORAN, S.; RAGAVAN, S.; SATHIPARAN, N. Comparative study on open air burnt low- and high-carbon rice husk ash as partial cement replacement in cement block production. **Journal of Building Engineering**, Lisbon, v. 13, p. 137–145, 2017.

MENG, Y.; LING, T.; MO, K. H. Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: Na overview. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 138, p. 298–312, 2018.

NAMARAK, C. et al. Development of Concrete Paving Blocks Prepared from Waste Materials without Portland Cement. **Materials Science**, Lithuania, v. 24, n. 1. 2018.

NASSER, R. A.; AL-MEFARREJ, H. A. Evaluation of using midribs of date palm fronds as a raw material for wood-cement composite panels industry in Saudi Arabia. **Agricultural Engineering Research Journal**, v.1, p.43-50, 2016.

NOCHAIYA T.; SEKINE Y.; CHOOPUN S.; CHAIPANICH A. Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as additive J. **Journal of Alloys and Compounds**, Germany, v. 630, p. 1–10, 2015.

OKINO, E. Y. A. et al. Chapa Aglomerada de Cimento-Madeira de Hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p 451-457, 2004.

OMONIYI, T. E.; AKINYEMI, B. A. Performance of concrete paving blocks reinforced with bamboo and rice husk ash as partial replacement for cement. **Journal of Civil Engineering Research**, Parma, Itália, v. 3, n. 2, p. 81-87, 2013.

PANESAR, P. S. et al. Bio-processing of agro-industrial wastes for production of food-grade enzymes: progress and prospects. **Appl Food Biotechnol**, v. 3, n. 4, p. 208-227, 2016.

PEREIRA, A. M. et al. Mechanical strength assessment of concrete with rice husk ash. **Revista Matéria**, v.20, n.1, pp. 227– 238, 2015.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1984.

RODRIGUES, R.; BRITO, J.; SARDINHA, M. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 77, p. 349-356, 2015.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, A. M. Physico-mechanical and durability characteristics of concrete paving blocks incorporating cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 157, p. 300–312, 2017.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F. et al. Activation temperature-mediated mineralogical transformations in slate quarry sludge: Pozzolanic properties. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 819–829, 2018.

SANTOS, C. C. et al. Análise da resistência de concretos com areia de fundição e cinza de casca de arroz. **CONSTRUINDO**, Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., p. 15 – 28, Jan - Jun. 2017.

SATO, V. Y.; GALINA, A. P. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 6, p. 1284-1307, 2018.

SENIN, M. S. et al. Properties of Cement Mortar Containing Rubber Ash as Sand Replacement. **Materials Science and Engineering Conference Series**. v. 160, n. 1, p. 1-10, 2016.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibers as reinforcement of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v.22, n.25, p.379-384, 2000.

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; KREIN, L. A. Degradation of rendering mortars made with fine concrete aggregates by thermal cycles. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 211-224, jan./mar. 2018.

SHAO, J. et al. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 209–215, 2019.

SILVA, E. J. et al. Cement composite with high content treated coconut fiber: physical properties and durability. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.23, n.3, p. 1-19, 2018.

SILVA, M. F. et al. Evaluation of mechanical strength of sustainable concrete paving blocks (SCPB). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.22, n.1, p. 1-11, 2017.

SINGH, R.; SIDDIQUE, M. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 72, p. 20–32, 2013.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 78, p.184–194, 2014.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 77-90, 2010.

VIANA NETO, L. A.C.; SALES, A. T. C.; SALES, L. C. Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n.1, p. 1-11, mar. 2018.

VILLA-CÓRDOBA, T. et al. Characterization of slate ornaments from Teotihuacan by nuclear and conventional techniques. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 292, p.1249–1258, 2012.

WATTANASIRIWECH, D.; SAITON, A.; WATTANASIRIWECH, S. Paving Blocks from Ceramic Tile Production Waste. **Journal of Cleaner Production**, Brno, v. 17, n.18, p. 1663 – 1668, 2009.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation rate of natural fiber in cement composites exposed to various accelerated aging environment conditions. **Corrosion Science**, Delft, v. 88, p. 118–132, 2014.

XIA, Z. et al. Characteristics of parametamorphic rock reservoirs in Pingxi area, Qaidam Basin, NW China. **Petroleum Exploration and Development**, v. 46, 1, p. 93–103, 2019.

YIN, K.; AHAMED, A.; LISAK, G. Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review. **Waste Management**, v. 78, p. 401–416, 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, p. 42–50, 2018.

ZHANG, C. et al. The filling role of pozzolanic material, **Cement and Concrete Research**, Zurich, v. 26, n. 6, p. 943- 947, 1996.