

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS APUCARANA**

BRENDA MARQUES OLIVEIRA

**APROVEITAMENTO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR NA CONFECÇÃO DE PAVERS**

**APUCARANA
2019**

BRENDA MARQUES OLIVEIRA

**APROVEITAMENTO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR NA CONFECÇÃO DE PAVERS**

Monografia apresentada como parte dos requisitos necessários para aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra Silvia Paula Sossai Altoé

Coorientadora: Profa. Msc. Sarah Honorato Lopes da Silva

APUCARANA



Ministério da Educação
**Universidade Tecnológica Federal do
Paraná**
Câmpus Apucarana
COECI – Coordenação do Curso Superior
de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso

Aproveitamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na confecção de *pavers*

por

Brenda Marques Oliveira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado aos 25 dias do mês de novembro do ano de 2019, às 13 horas e 30 minutos, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharelado em engenharia civil, linha de pesquisa Construção Civil, do Curso Superior em Engenharia Civil da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A candidata foi arguida pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho aprovado.

Silvia Paula Sossai Altoé – ORIENTADORA

Andrea Sartori Jabur – EXAMINADORA

Lucas Lauer Verdade – EXAMINADOR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Durante o processo de beneficiamento tanto do álcool quanto do açúcar, grandes quantidades de bagaço são geradas. Este bagaço é utilizado, quase que em sua totalidade, para a geração de energia em termoelétricas que abastecem as usinas beneficiadoras de cana. O resíduo deste processo é a cinza, produto descartado diretamente no solo das lavouras de forma inadequada. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na substituição parcial de agregado miúdo para confecção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*). A substituição deste resíduo não só pode beneficiar na destinação do mesmo como na redução do consumo de recursos não renováveis, neste caso foi utilizado em lugar parcial à areia natural e aplicado em blocos de concreto para pavimentação (*pavers*). Os teores de substituição escolhidos para serem feitas análises foram de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, além do traço referência. Foram avaliadas características requeridas para os blocos de concreto para pavimentação como: tonalidade, massa, dimensão, absorção, resistência à compressão característica e módulo de elasticidade. A partir dos resultados obtidos será determinado um teor ótimo de substituição com base nas características analisadas. As amostras com 30% de substituição desenvolveram melhores resultados superando a resistência em 57,6 % do traço referência aos 28 dias, absorção de 7,76% e módulo de elasticidade de 29,19 GPa, ambos só não superaram essas duas características em relação ao traço referência, sendo o melhor dos resultados de substituição. Com este teor de substituição ótimo foram fabricados *pavers* para a confecção de uma calçada protótipo com o mesmo traço, além de uma calçada de mesmas dimensões com os blocos sem substituição, sendo analisadas quanto à temperatura superficial e drenagem do pavimento. Ambas alcançaram resultados bem próximos entre si, mostrando que o resíduo tem propriedades adequadas para a finalidade proposta, além de contribuir ambientalmente, prover uma melhor destinação ao resíduo e reduzindo a extração da areia.

Palavras-chave: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Blocos de concreto. Resíduo.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugar cane in the world. During the process of processing both alcohol and sugar, large amounts of bagasse are generated. This bagasse is used almost entirely for power generation in thermoelectric plants that supply sugarcane mills. The residue of this process is the ash, product disposed directly in the soil of crops inappropriately. This work aims to evaluate the performance of sugarcane bagasse ash in partial replacement of fine aggregate for making pavers. Substitution of this waste can not only benefit in its disposal but also in reducing the consumption of non-renewable resources, in this case it was partially used to natural sand and applied in pavers. The substitution levels chosen for analysis were 10%, 15%, 20%, 25% and 30%, besides the reference trait. Characteristics required for concrete paving blocks were evaluated as: tone, mass, dimension, absorption, characteristic compressive strength and modulus of elasticity. From the results obtained, an optimal substitution content will be determined based on the characteristics analyzed. The samples with 30% substitution developed better results, exceeding the resistance by 57.6% of the reference trait at 28 days, absorption of 7.76% and elasticity modulus of 29.19 GPa. reference trait, being the best of the substitution results. With this optimum substitution content, pavers were manufactured to make a prototype pavement with the same trace, as well as a pavement of the same size with blocks without replacement, being analyzed for surface temperature and floor drainage. Both achieved very close results, showing that the waste has properties suitable for the proposed purpose, besides contributing to the environment, providing a better destination for the waste and reducing the extraction of sand.

Keywords: Sugarcane bagasse ash. Concrete blocks. Residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa com a distribuição de usinas de cana-de-açúcar no estado do Paraná	14
Figura 2.2	Amostras de bagaço e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar produzidas em diferentes temperaturas	15
Figura 3.1	Medição da temperatura superficial	19
Figura 3.2	Passarela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana	19
Figura 3.3	Faixa de pedestre elevada	21
Figura 4.1	Fluxograma com as etapas de estudo	24
Figura 4.2	Agregado graúdo	26
Figura 4.3	Agregado miúdo	27
Figura 4.4	Amostras de CBC	28
Figura 4.5	Curva granulométrica da CBC	29
Figura 4.6	Ponto de pelota, a) ponto desejado, b) modificar fator a/c	32
Figura 4.7	Moldagem dos <i>pavers</i>	33
Figura 4.8	Vibrador utilizado para compactação e moldagem dos <i>pavers</i>	33
Figura 4.9	Amostras dentro da estufa	34
Figura 4.10	Prensa para ensaio de resistência à compressão, a) externa, b) interna	35
Figura 4.11	Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica	38
Figura 4.12	Modelo de assentamento – Calçada protótipo	39
Figura 4.13	Dispositivo cilíndrico para ensaio de infiltração	40
Figura 5.1	Curva granulométrica agregado graúdo	41
Figura 5.2	Curva granulométrica agregado miúdo	42
Figura 5.3	Bloco de concreto para pavimentação	43
Figura 5.4	Diferença de tonalidades, a) peças, b) calçada	43
Figura 5.5	Gráfico de absorção	46
Figura 5.6	Gráfico de comparação de resistências em diferentes idades	48
Figura 5.7	Gráfico absorção x resistência à compressão	51
Figura 5.8	Gráfico absorção x módulo de elasticidade	51
Figura 5.9	Gráfico resistência à compressão x módulo de elasticidade	52

Figura 5.10	Vista aérea com posicionamento da calçada protótipo na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana	53
Figura 5.11	Confecção dos blocos para as calçadas, a) moldagem, b) cura	53
Figura 5.12	Preparação do terreno, a) limpeza, b) nivelamento com areia	54
Figura 5.13	Calçada finalizada	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produção de Cana-de-açúcar Safra 2018/2019	14
Tabela 3.1	Distância de frenagem em metros	18
Tabela 3.2	Tolerância dimensionais das peças em milímetros	21
Tabela 4.1	Componentes do Cimento Portland CP II-F 32	25
Tabela 4.2	Características do Cimento Portland CP II-F 32 Supremo	25
Tabela 4.3	Análise química do cimento	26
Tabela 4.4	Classificação granulométrica da CBC de acordo com a porcentagem retida	29
Tabela 4.5	Coefficientes de uniformidade e curvatura da CBC	29
Tabela 4.6	Massa específica e teor de umidade da CBC	30
Tabela 4.7	Concentração de ânions no extrato lixiviado da CBC	31
Tabela 4.8	Concentração de ânions no extrato solubilizado da CBC	31
Tabela 4.9	Fator multiplicativo “ <i>p</i> ”	36
Tabela 4.10	Coefficiente de Student (nível de confiança de 80%)	36
Tabela 5.1	Resultados agregado graúdo	41
Tabela 5.2	Resultados agregado miúdo	42
Tabela 5.3	Massa seca das amostras	44
Tabela 5.4	Medição dimensional média	44
Tabela 5.5	Resultados de absorção das amostras	45
Tabela 5.6	Resultados de resistência com 28 dias	46
Tabela 5.7	Resultados de resistência com 120 dias	47
Tabela 5.8	Módulo de elasticidade das amostras	49
Tabela 5.9	Comparação de ensaios	50
Tabela 5.10	Resultados de Temperatura Superficial	55
Tabela 5.11	Resultados de Drenagem	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVAS	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivos específicos	13
2	CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - CBC	14
2.1	A CANA-DE-AÇÚCAR E OS RESÍDUOS GERADOS NO SEU PROCESSAMENTO	14
2.2	APLICAÇÃO DA CBC NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
3	BLOCOS PARA PAVIMENTAÇÃO DE CONCRETO - PAVERS	18
3.1	NORMAS TÉCNICAS E PROPRIEDADES REQUERIDAS	21
3.2	USO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE PAVERS	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	MATERIAIS	25
4.1.1	Aglomerante	25
4.1.2	Agregado graúdo.....	26
4.1.3	Agregado miúdo	27
4.1.4	Água	27
4.1.5	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	27
4.1.5.1	Análise granulométrica da CBC	28
4.1.5.2	Massa específica	30
4.1.5.3	Atividade Pozolânica	30
4.1.5.4	Ensaio de Lixiviação e Solubilização.....	30
4.2	DOSAGENS, MOLDAGEM E ENSAIOS DOS BLOCOS.....	32
4.2.1	Dosagem e moldagem	32
4.2.2	Inspeção Visual.....	33
4.2.3	Ensaio de absorção de água	34
4.2.4	Ensaio de Resistência à Compressão do Bloco	35
4.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico a partir do ensaio de determinação da velocidade de onda ultrassônica	37
4.3	CALÇADA PROTÓTIPO	38
4.3.1	Controle de temperatura	39
4.3.2	Drenagem.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41

5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
5.1.1	Agregado graúdo.....	41
5.1.2	Agregado Miúdo.....	42
5.2	ASPECTOS DOS <i>PAVERS</i>	42
5.2.1	Inspeção Visual.....	42
5.2.2	Absorção de água	45
5.2.3	Resistência à Compressão Característica	46
5.2.4	Módulo de elasticidade	48
5.2.5	Comparação de resultados	50
5.2.5.1	Absorção x Resistência à Compressão.....	50
5.2.5.2	Absorção x Módulo de Elasticidade	51
5.2.5.3	Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade	52
5.3	CALÇADA PROTÓTIPO	52
5.3.1	Fabricação das peças e execução da calçada	53
5.3.2	Temperatura Superficial	55
5.3.3	Drenagem.....	55
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O termo sustentabilidade é algo cada vez mais utilizado em diversos meios e mesmo tendo sido criado apenas na década de 80, através do encontro The World Conservation Strategy (IUCN et al., 1980), tem como definição ser um desenvolvimento que consiga satisfazer as necessidades da atualidade, sem afetar a necessidade das futuras gerações (WECD, 1987). Apesar deste fato, a sustentabilidade muitas vezes não é aplicada, o que observa-se é escassez de recursos e utilização desenfreada das matérias-primas ainda disponíveis.

Uma indústria como a da construção civil, que está presente em todos os lugares, acaba consumindo de forma expressiva os recursos naturais, tendo como exemplos: a areia, a brita e a água. Em torno de 40 bilhões de toneladas de areia são extraídas ao ano (UNEP, 2014), existindo casos de escassez do material em algumas regiões e, mesmo onde não ocorre a falta, há um crescente aumento no preço, além da degradação do ecossistema pelo assoreamento de rios acarretados pela extração de forma irregular e desenfreada.

Por outro lado, têm-se a cana-de-açúcar, na qual o Brasil é o maior produtor mundial (CONAB, 2019), que gera diariamente toneladas de subprodutos e estimula a indústria sucroalcooleira na busca de soluções para descarte dos resíduos gerados no processo de produção de açúcar e álcool.

Vinhoto, torta de filtração, palha, levedura, bagaço dentre outros são subprodutos das agroindústrias sucroalcooleiras, sendo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) proveniente da queima do seu bagaço para geração de energia e o último resíduo gerado pela cadeia da cana-de-açúcar. Essas cinzas são geralmente utilizadas como adubo nas lavouras, porém não possuem nutrientes minerais adequados para essa finalidade (NUNES, 2009). Além do mais, pesquisas indicam que o resíduo corresponde pela norma NBR 10004:2004 como Classe II A – Não perigoso e não inerte (ALTOÉ, 2013), indicando que o material é biodegradável, combustível ou solúvel em água, e assim pode gerar contaminação do solo devido a presença de componentes acima do nível recomendado, devendo ser encontradas soluções que os neutralizem.

Diferentes linhas de pesquisa aplicam com sucesso a CBC como substituto parcial do cimento Portland e da areia, em matrizes cimentícias utilizadas na construção civil que é uma possibilidade de destinação adequada para este resíduo (Cordeiro *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2009). Porém, há uma limitação para aplicação como aglomerante pois muitas vezes a cinza apresenta pouca reatividade. Isso se dá pela falta de controle operacional na queima do bagaço,

como o monitoramento temperatura de combustão e resfriamento (SALES; LIMA, 2010), sendo que o objetivo principal da queima é a geração de energia para abastecimento da usina.

Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2009) avaliaram a CBC quanto a sua temperatura de queima, notaram que as obtidas de forma controlada, até 600°C, obtiveram características pozolânicas, ou seja, possuem propriedades aglomerantes adequadas. As cinzas originadas da queima em altas temperaturas ou sem controle do processo apresentam pouca reatividade, surgem como equivalentes a um material inerte, o que torna mais próxima das propriedades de um agregado fino. Assim é possível a sua aplicação para substituição na composição de concretos e argamassas, uma alternativa considerável (CORDEIRO *et al.*, 2008), pois entraria com melhor custo final, visto que atualmente a cinza não possui mercado sendo descartada como um material sem valor.

A inclusão de adições minerais em matrizes cimentícias pode beneficiar tanto no custo como em algumas de suas propriedades físicas, isso se deve ao fato de que pode ocorrer a diminuição dos poros e, conseqüentemente, a redução de sua interconectividade de canais. Tal benefício é mostrado por Lima (2009) e Martins e Machado (2010), que encontraram aumento da resistência à compressão, aos 28 dias, quando aplicaram a substituição parcial do agregado miúdo. O primeiro utilizou teores de 20% e 30% em argamassas, e o outro aplicou tanto em concreto como em argamassas com taxas 30% e 50% de CBC em substituição parcial à areia.

A legislação vigente nacional que aborda sobre a destinação de resíduos sólidos é a Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010, denominada de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto Federal n.º 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Esta define de forma mais clara que a Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), sobre as responsabilidades pelos resíduos gerados tanto por pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que são autores, direta ou indiretamente pela geração de resíduos sólidos.

Um dos pontos mais importantes que esta política aborda é a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos, ou seja, responsáveis desde a geração do produto até o descarte final. Com o intuito de efetivar esses objetivos, foram inseridos o termo de logística reversa, que são os procedimentos e meios de coleta e a readequação dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para seu reaproveitamento ou outra destinação final adequada, além dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS), que atuarão dentro do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos de cada Município.

Ao analisar o caso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, não se nota a destinação adequada como já citado, por isso existe a preocupação apresentada em outras pesquisas e este trabalho propõe uma destinação correta, a fim de obter um melhor aproveitamento do resíduo.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Este trabalho se justifica devido à importância da indústria da construção civil para a sociedade, isso consequentemente está ligado ao consumo de materiais que não se renovam como é o caso dos agregados, na qual sua extração pode acarretar no impacto ambiental da vegetação, de animais, e da vida aquática. Essas áreas, segundo o Código Florestal Brasileiro (1965), por meio da Lei 4.771/65, que foi atualizado para a Lei nº 12.651/12, que dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, são consideradas como de preservação permanentes, as florestas e demais formas de vegetações naturais (CARBONARI *et al.*, 2006). Por isso, as licenças para exploração deste material têm sido suspensas, tornando a areia natural um material mais caro e escasso (ALMEIDA *et al.*, 2005).

Segundo John (2000), estima que a indústria da construção civil, seja responsável por 20 a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do planeta, sendo em sua esmagadora maioria recursos não renováveis. Isso nos leva a buscar alternativas acessíveis e compatíveis com a realidade e necessidade das construções em geral. A CBC tem-se mostrado um bom substituto tanto para agregados miúdos como para aglomerantes, dependendo de sua composição.

Além disso, o volume gerado anualmente deste resíduo colabora diretamente para a justificativa de sua utilização como material inerte, sendo que a estimativa da produção anual de cana na safra 2018/19 é de 635,51 milhões de toneladas (CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2018). O material gera um subproduto final de destino incerto que é a cinza de seu bagaço, que comumente é utilizada de volta às plantações, porém esta não oferece nenhuma propriedade nutritiva para tal (NUNES, 2009).

Segundo Cordeiro (2006), uma tonelada de cana-de-açúcar produz cerca de 6 kg de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC), levando em consideração a safra 2018/19, seriam produzidos cerca de 3,8 milhões de toneladas de CBC. Os dados geram uma grande motivação para buscar soluções de fins melhores e mais produtivos como a substituição pela areia natural para a redução de valores como de 40 bilhões de toneladas extraídas por ano, portanto, traria vantagem ambiental em ambos os lados.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade avaliar o desempenho da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como substituto parcial de agregado miúdo, para confecção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*).

1.2.1 **Objetivos específicos**

- Avaliar as características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar quanto à sua aplicação em substituição parcial do agregado miúdo;
- Confeccionar *pavers* com diferentes teores de substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo;
- Analisar a interferência da substituição através de testes de absorção de água, resistência à compressão característica e módulo de elasticidade nos *pavers* em seus diferentes teores;
- Determinar o teor ótimo de substituição, a partir da comparação dos resultados encontrados;
- Executar uma calçada protótipo com o traço de teor ótimo e com traço referencial e analisar seus comportamentos quanto à infiltração e temperatura.

2 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - CBC

2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR E OS RESÍDUOS GERADOS NO SEU PROCESSAMENTO

Hoje o Brasil é maior produtor mundial de álcool e açúcar, tendo sua origem de plantio da cana-de-açúcar no século XVIII, apesar de ter sido trazido no século XVI. No século XX o Brasil descobriu que o álcool poderia ser uma opção energética viável (Proálcool, 2009). Atualmente, o país detém cerca de 60% da produção do álcool etílico consumido no mundo, além de ser um dos maiores produtores mundiais de açúcar. Sua cultura corresponde à uma área com entorno de 8,7 milhões de hectares de plantio (CONAB, 2019), como está ilustrado na Tabela 2.1, que indica a estimativa da produção e a área cultivada por região.

Tabela 2.1 – Produção de Cana-de-açúcar Safra 2018/2019

REGIÃO	ÁREA CULTIVADA (10 ³ ha)	PRODUÇÃO (10 ³ t)
Norte	49,5	3.340,88
Nordeste	823,8	44.702,3
Centro Oeste	1.817,0	138.337,5
Sudeste	5.399,7	412.434,8
Sul	571,3	36.694,9
TOTAIS	8.661,4	635.510,4

Fonte: CONAB (2019)

O Estado do Paraná produz 36.640,5 mil toneladas, o que corresponde a 5,76% da produção nacional, sendo processada em 30 usinas de refinaria no estado, em sua maioria localizada nas regiões norte e noroeste como mostra a Figura 2.1 (CONAB, 2019).

Figura 2.1 – Mapa com a distribuição de usinas de cana-de-açúcar no estado do Paraná



Fonte: ALCOPAR (2016)

Vinhoto, torta de filtração, palha, levedura, bagaço dentre outros são subprodutos das agroindústrias sucroalcooleiras. O bagaço é um resíduo gerado em grandes quantidades que tem imensa serventia dentro da indústria, pois é possível que um sistema de cogeração de energia a partir de sua queima possa abastecer toda a energia necessária para o funcionamento da usina (CORDEIRO, 2006).

Dentre os processos envolvidos na utilização da energia proveniente da queima estão: o mecânico, o elétrico, de acionamento das bombas, de moendas e para o processo de destilação e concentração do caldo, tornando-a energeticamente autossuficiente (CORDEIRO, 2006; NUNES, 2009). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2005), cada tonelada de cana processada produz cerca de 12 quilowatt por hora.

Quanto aos valores de produção, para cada tonelada de cana moída geram 260 kg de bagaço (FIESP/CIESP, 2001), que quando queimado obtém cerca de 6 kg de cinza também por tonelada de cana (CORDEIRO, 2006). A Figura 2.2 apresenta da esquerda para a direita o bagaço (A) e três tipos de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, resultantes da queima em diferentes temperaturas, primeiro uma cinza que não teve combustão completa (B), e as outras 2 com maior temperatura de queima e/ou mais tempo nas caldeiras podendo possuir tons mais avermelhados (C) ou esbranquiçados (D).

Figura 2.2 – Amostras de bagaço e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar produzidas em diferentes temperaturas



Fonte: Cordeiro (2006)

Os altos valores da produção no país podem remeter a existência de uma maior responsabilidade com os resíduos gerados, porém não ocorre. Para o descarte do subproduto final do bagaço da cana-de-açúcar, que é a CBC, ainda há procura de uma solução mais adequada. O caso mais frequente é a utilização como adubo nas lavouras, porém é ineficiente,

sendo que as cinzas não possuem nutrientes minerais adequados para essa finalidade (NUNES, 2009).

2.2 APLICAÇÃO DA CBC NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A classificação para a CBC conforme a normativa de resíduos vigente no Brasil ABNT NBR 10004:2004 é considerada como um resíduo Classe II A: resíduos não perigosos e não inertes, tal ponto foi confirmado por Altoé (2013), que realizou ensaios de lixiviação e solubilização. Os dados obtidos estavam dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Anexo F da norma, isso indica que, apesar de não perigoso, apresenta propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Lima, Sales e Santos (2009) afirmam que estudar a composição da CBC é de grande importância quando forem aplicadas como adições minerais, pois sua utilização vai depender de sua estrutura química e mineralógica. Se adotadas como pozolanas, Bahurudeen *et al.* (2015), admite que precisam ser predominantemente amorfas para apresentarem maior reatividade, já as cinzas cristalinas atuam melhor quando aplicadas em substituição ao material inerte como os agregados (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Altoé (2013), testou a cinza em diferentes temperaturas de queima para analisar sua composição, através da Difractometria de Raios-x e no ensaio de atividade pozolânica, a partir do Método de Chapelle modificado por Raverdy *et al* (1980), seguindo a ABNT NBR 15895:2010 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. As CBCs que foram processadas em temperaturas mais baixas, em torno de 600°C a 650°C, provenientes da piscina de decantação de água das lavagens de chaminés da usina em questão, apresentaram atividade pozolânica. As amostras das demais temperaturas ensaiadas não atingiram o mínimo exigido por norma.

De acordo com Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2009) que estudaram a CBC oriundas da queima em temperaturas de 400°C a 900°C, controladas em laboratório, chegaram no valor de 600°C para utilização como pozolana, recomendada pelos requisitos da norma ABNT NBR 12653:2014 - Materias pozolânicos – Requisitos, demonstram que é necessário o controle de temperatura caso seja necessário a garantia desta característica.

Além das pesquisas citadas, Bessa (2011) também atingiu bons resultados na sua pesquisa quando adotou a cinza em concretos, obteve ganho de resistência e não observou alterações do material, quando substituiu parte do agregado miúdo pela CBC.

No que diz respeito à durabilidade, alguns estudos apontam o não comprometimento desta característica. Para Lima *et al.* (2011), os resultados do ensaio de carbonatação e abrasão foram semelhantes ao concreto referência quando também fabricou concretos onde adotou a CBC em lugar da areia.

Martins e Machado (2010) obtiveram aumento de resistência à compressão com 28 dias, com substituição de 20% em concretos e 50% em argamassas de areia por cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Bahurudeen *et al.* (2015) alcançaram acréscimo de resistência à compressão, diminuição da absorção e a retração por secagem obteve resultados similares ao concreto controlado.

Já Vanderlei *et al.* (2015) estudaram a aplicação em concretos auto-adensáveis (CAA), com a dosagem de pastas e argamassas com substituição parcial de areia por CBC até um teor de 10%. Concluíram que não foi prejudicial para o concreto, provando que é possível a utilização de CBC também nesse tipo de produto, acarretando na redução do consumo de areia, além de dar uma melhor destinação para um resíduo como a cinza.

3 BLOCOS PARA PAVIMENTAÇÃO DE CONCRETO - PAVERS

Ao final do século XIX, foram confeccionadas as primeiras peças pré-moldadas de concreto, algumas patentes haviam sido registradas antes da Primeira Guerra Mundial que, por sua uniformidade, possuíam vantagem comparadas às pedras naturais. Após a Segunda Guerra Mundial, os blocos intertravados avançaram pela Holanda e Alemanha como pavimento intertravado, já que os países estavam passando por um período de reconstrução. Quando foram criados tinham formato próximo ao de tijolos, sendo vantajosos na época pelo seu custo e a homogeneidade de seu formato (GODINHO, 2009).

Além de servir como pavimento, Santos (2011) destaca que uma das vantagens de se utilizar *pavers* é a aplicação como sinalização viária horizontal, o que seria por exemplo, a ilustração das listras de uma faixa de pedestre, pois a as peças podem ser fabricadas de diversas cores sem se necessária pintura posterior. Outro ponto a ser destacado, é que o pavimento proveniente de concreto permite 30% a mais de reflexão de luz (STARK, 1986 apud GODINHO, 2009) e economia na iluminação pública de até 60%, além de sua superfície ser por si só antiderrapante, o que contribui na segurança durante a frenagem de veículos, quando comparado com o pavimento flexível ou até a paralelepípedos como mostra a Tabela 3.1, elaborada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2008, p. 02).

Tabela 3.1 – Distância de frenagem em metros

	20 km/h seco	20 km/h úmido	40 km/h seco	40 km/h úmido	60 km/h seco	60 km/h úmido
Pavimento flexível	1,70	3,20	5,85	9,60	14,2	26,7
Pavimento Intertravado	1,68	2,50	5,23	8,15	13,6	21,3

Fonte: ABCP (2008)

Gartland (2010), cita que a adoção do pavimento de concreto feito com cimento Portland, é mais indicado para tornar o pavimento mais fresco por sua coloração cinza-clara. Mesmo podendo com o tempo reduzir seus valores de refletância para torno de 25%, continuará sendo muito melhor que as do asfalto de betume que atuam em torno de 5% a 10% de refletância. A Figura 3.1 apresenta como ocorre a medição de temperatura superficial do pavimento.

Figura 3.1 – Medição da temperatura superficial



Fonte: A Autora (2019)

Estima-se que a vida útil do pavimento intertravado seja em torno de 25 anos, isso se as camadas inferiores forem bem projetadas e executadas, os blocos sejam de boa qualidade e tenham sido assentados de forma correta (PIOROTTI, 1985 apud FIORITI, 2007). Se bem executados, podem ser aplicados em pátios, calçadas, praças, ruas, caminhos, rodovias, pisos industriais, portos, aeroportos, em maior ou menor quantidade (FIORITI *et al.*, 2010). A Figura 3.2 exemplifica um local onde pavimento pode ser aplicado, como a passarela para pedestres presente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana (UTFPR - AP).

Figura 3.2 – Passarela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana



Fonte: A Autora (2019)

Como as peças são pré-moldadas, após a execução ou restauração do pavimento o mesmo já poderá ser utilizado, além de possibilitar o rápido e prático acesso de instalações subterrâneas e ser facilmente recolocado após o serviço nas camadas inferiores. Caso adotado como pavimentos para tráfego de veículos, é recomendado para trechos onde a velocidade da

via seja inferior a 70 km/h. Quando comparadas ao pavimento asfáltico, a execução parece simples, não expõe os operários a temperaturas elevadas e não há a exaustão de gases (SANTOS, 2011).

Na cidade de Apucarana é possível encontrar *pavers* em várias localidades como em universidades, condomínios de apartamentos, em áreas externas de residências e praças, locais onde a velocidade de tráfego não excede 70km/h, em geral isso abrange grande parte da cidade e entrariam na classificação de tráfego leve. Em alguns lugares substitui tanto o pavimento como a pintura, exemplificado através de um ponto de travessia elevada, na cidade de Maringá, mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Faixa de pedestre elevada



Fonte: Martins Filho (2015)

É utilizado ainda como material drenante, como destaca Marchioni e Silva (2011) os autores afirmam que sempre existirá possibilidade de permeabilidade por meio das juntas, se a distribuição granulométrica recomendada para assentamento dos blocos for atendida, possibilita atingir o coeficiente de permeabilidade dos agregados na ordem de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s, o que contribui para a drenagem urbana, através da redução o volume de água transportada para as galerias de água públicas, evitando sobrecarga e conseqüentemente inundações. Porém segundo Virgiliis, (2009), em zonas urbanas ocorre o fechamento das juntas devido a quantidade de material pulverulento depositado, sendo então necessária a manutenção quando for notada alteração na eficiência da drenagem.

Mesmo com todas essas vantagens, os blocos de pavimento de concreto foram realizados por muito tempo sem uma normativa específica, apenas em 2011 entrou em vigor a ABNT NBR 15953:2011 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução, que estabelece padrões e condições técnicas para execução deste tipo de pavimento, com enfoque em suas camadas inferiores.

O aumento da aplicação de pavimentos intertravados trouxe a necessidade de orientação de padrões e especificações técnicas sobre sua execução. Para comprovação da eficiência do produto, ensaios como o de resistência mecânica, que expressam a capacidade de carga possível de ser aplicada ao pavimento, além do ensaio de abrasão que pode atestar sobre a vida útil do material. A absorção pode influenciar diretamente eficiência da peça, pois quanto maior a permeabilidade, maior será a eflorescência (CRUZ, 2003), ou seja, sais de cálcio que estão dentro da peça são dissolvidos pela água que também os transporta para a superfície, tendo aspecto de um resíduo pulverulento branco.

3.1 NORMAS TÉCNICAS E PROPRIEDADES REQUERIDAS

A norma que atualmente compreende os requisitos e os métodos de ensaio para aceitação de peças de pavimento intertravado é a ABNT NBR 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaios, que unificou a ABNT NBR 9780:1987 e ABNT NBR 9781:1987 e se inspirou na norma europeia EN 1338 - *Concrete paving blocks – Requirements and test methods*.

Para aceitação das peças deve ser feita inspeção visual para não aceitar peças não homogêneas com arestas irregulares ou qualquer fator que possa prejudicar o correto assentamento das peças e seu desempenho estrutural ou estético, além de ter tolerâncias de variações entre o bloco e o tamanho padrão indicadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tolerâncias dimensionais das peças de concreto em milímetros

Comprimento	Largura	Espessura
±3	±3	±3

Fonte: ABNT NBR 9781:2013

A norma prevê também que os para os blocos amostrados, que passarão por ensaio de absorção, desvio padrão dos valores encontrados não deve apresentar valor maior que 6%, sendo que em nenhuma delas deve ser admitido valor maior que 7%, individualmente. Um dado que não foi abordado em testes neste trabalho, por ser um teste facultativo segundo a norma ABNT NBR 9781:2013, é a resistência à abrasão, presente no item 5.6. Apesar de não obrigatória, a norma informa que a cavidade máxima durante o ensaio não deverá ultrapassar 23 mm, atuando também para solicitação de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Outro ensaio exigido pela norma é a resistência característica à compressão aos 28 dias, devendo ser maior que 35 MPa para tráfego de pedestre, veículos leves e veículos comerciais de linha, e maior de 50 MPa para tráfego de veículos especiais ou solicitações de efeitos abrasivos acentuados. Porém esse valor é contestado por alguns autores como Fioriti (2007), que encontrou 15 MPa como resistência compatível à solicitações de passeios públicos, a partir de seu estudo com resíduos de pneus em blocos de pavimentação de tráfego leve.

A fim de alcançar a alta resistência exigida pela norma, tem-se a necessidade de elevar o consumo de cimento e aditivos nos blocos, o que é preocupante, pois o cimento, além de necessitar muita energia na sua fabricação, é responsável por altas emissões de CO₂ à atmosfera. Para cada tonelada de clínquer produzido, material base da fabricação de qualquer cimento Portland, é lançada em torno de uma tonelada de CO₂ na atmosfera, sendo responsável por 7% da emissão global do gás (METHA, 1999).

3.2 USO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE PAVERS

Ao buscar alternativas para serem adotadas em concretos, Silva *et al.* (2017) acrescentaram borracha moída em substituição de parte do agregado miúdo em *pavers*. Obteve acréscimos na resistência nas substituições de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, sendo que o de 10% atingiu aumento de 14,6% em relação ao concreto referência. Já para porcentagens acima, ocorreu decréscimo, mostrando que o ideal para esse tipo de material são substituições em quantidades menores de acordo com as condições ensaiadas.

Carnin *et al.* (2010) atingiram a resistência à compressão exigida pela norma ABNT NBR 9781:2013 quando substituiu toda areia natural por areia de descarte de fundição em *pavers*. Todas as amostras superaram os valores de resistência característica de 35 Mpa. A absorção média atingida foi em torno de 6,6%, valor acima do limite de 6% previsto pela norma.

Campelo *et al.* (2009) obteve resistência à compressão aos 28 dias, encontrada pelos *pavers* com 25% de agregado de concreto reciclado (ACR), superior ao apresentado pelos *pavers* sem substituição. Com isso nota-se que houve o preenchimento maior dos vazios na substituição do agregado miúdo pelo ACR, confirmado pelos ensaios de absorção, que também obtiveram resultados melhores que o traço referencial.

Muitas pesquisas como a de Altoé (2013), mostram que as substituições com a cinza geram bons resultados quando utilizadas em alternativa ao agregado miúdo em *pavers*. Com o teor de 25% de substituição chegou a 39,09 MPa de resistência à compressão, um acréscimo de 25,17% em relação ao traço referência de concreto, resistência também superior ao exigido pela

ABNT NBR 9781:2013 que é de 35 MPa. Notou-se ainda a diminuição da absorção do concreto quanto maior foi o teor de substituição, justificada pela menor finura da cinza quando comparada aos outros agregados.

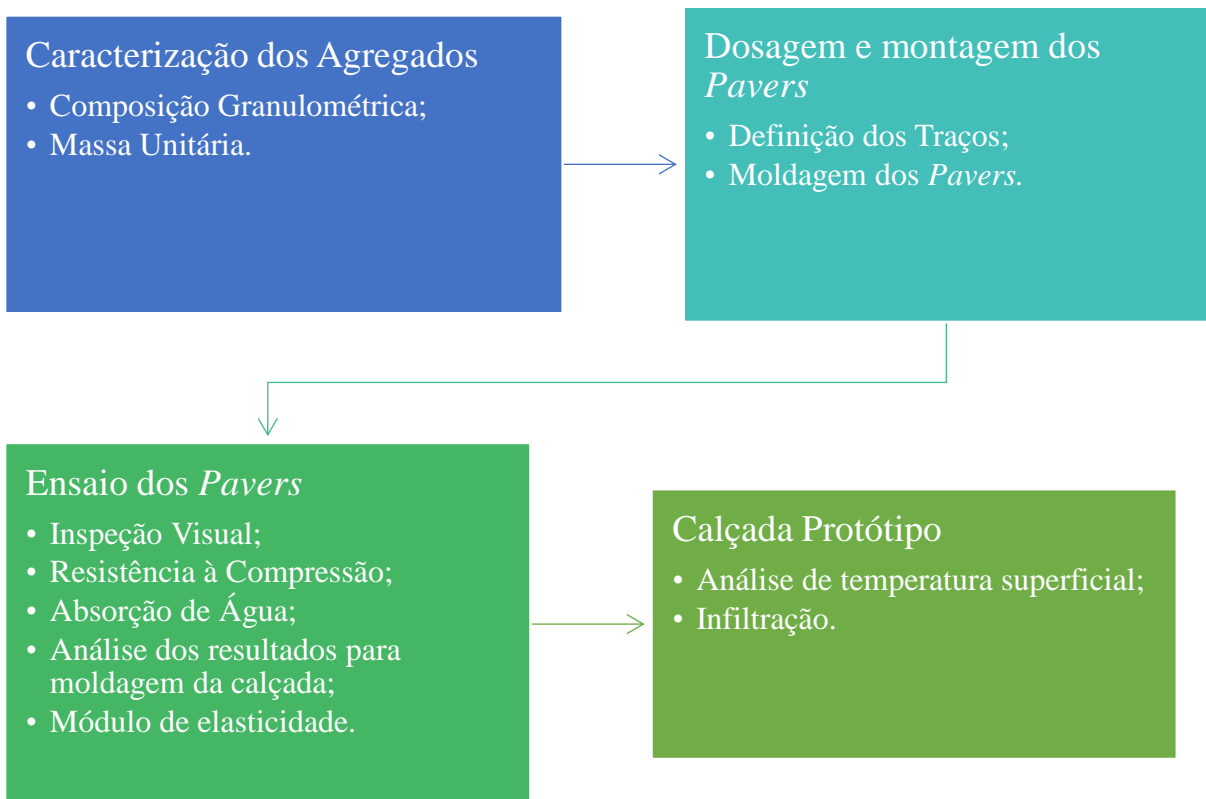
Em 2017, Altoé alcançou um aumento de 16% de resistência mecânica característica de *pavers* com 25% de substituição de CBC por areia com relação ao concreto referência, conseguindo atingir 39,19 Mpa. A substituição também foi favorável no que se diz respeito a absorção, pois obteve valores bem abaixo do limite de 6% exigido em norma, como para o traço de 25% em que o valor de absorção encontrado foi de 3,6% mostrando ser possível a aplicação da cinza nos blocos e gerar bons resultados.

Martins Filho (2015) concluiu que foi possível a substituição de cimento Portland em até 2,5% por cinza leve e 25% de agregado miúdo por cinza pesada em *pavers*. Ambos os traços atingiram resistência mecânica à compressão acima do valor previsto em norma, além de satisfazer o critério de absorção e ter desgaste por abrasão inferior ao traço referência, todos os ensaios previstos pela norma ABNT NBR 9781:2013.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo abordará os materiais utilizados e a metodologia aplicada para alcançar o objetivo do estudo a partir da caracterização dos materiais, a escolha da dosagem, a moldagem dos *pavers*, a determinação das propriedades e assim confeccionar uma calçada protótipo, como melhor descrito no diagrama a seguir na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Diagrama das etapas de estudo



Fonte: A Autora (2019)

A caracterização dos agregados, a moldagem e os ensaios dos *pavers*, foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil – UTFPR – Apucarana e o rompimentos dos blocos ocorreu no Laboratório de Estruturas – UTFPR – Apucarana. Foi feita também a calçada protótipo, instalada e ensaiada entre os blocos N e P da Universidade.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Aglomerante

Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CP II-F 32, este contém de 6% a 14% de pozolana, que garante uma maior impermeabilidade e durabilidade ao concreto produzido com este tipo de cimento. A norma que o regulamenta é a ABNT NBR 11578:1991 - Cimento Portland composto - Especificação que padroniza sua composição conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Componentes do Cimento Portland CP II-F 32

Sigla	Componentes (%)			
	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP II-F 32	94 - 90	-	-	6 - 10

Fonte: ABNT NBR 11578:1991

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) sugere a utilização desse aglomerante em argamassas de revestimento e assentamento de tijolos, blocos, azulejos e ladrilhos, concreto simples, concreto armado, concreto protendido, entre outros.

A Tabela 4.2 indica as características que o material da marca Supremo possui, correspondente ao que foi empregado na confecção dos blocos e a Tabela 4.3 caracteriza os componentes, em porcentagem, existentes no material também fornecidos pela marca.

Tabela 4.2 – Características do Cimento Portland CP II-F 32 Supremo

Item de controle	Unidade	Dados do fabricante	NBR 16697
Resistência 1 dia	Mpa	15	-
Resistência 3 dias	Mpa	26	≥10
Resistência 7 dias	Mpa	30	≥20
Resistência 28 dias	Mpa	37	≥32
Blaine	cm ² /g	3671	≥2600
Início de pega	min	265	≥60
Fim de pega	min	324	≥600

Fonte: Supremo (2019)

Tabela 4.3 – Análise química do cimento

Perda ao Fogo	%	-	10,7	≤12,5
Resíduo Insolúvel	%	-	3,6	≤7,5
Óxido de Silício	%	SiO ₂	16,1	
Óxido de Alumínio	%	Al ₂ O ₃	3,9	
Óxido de Ferro	%	Fe ₂ O ₃	2,6	
Óxido de Cálcio	%	CaO	58,4	
Óxido de Magnésio	%	MgO	5,8	-
Sulfatos	%	SO ₃	2,8	≤4,5
Óxido de Potássio	%	K ₂ O	0,95	
Óxido de Sódio	%	Na ₂ O	0,22	
Cloretos	%	Cl	0	
Anidrido Carbônico	%	CO ₂	9,3	≤11,5
Cal Livre	%		0,6	

Fonte: Supremo (2019)

4.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado a confecção dos blocos foi a brita zero, também conhecido como pedrisco, com origem basáltica e diâmetros entre 4,8 e 9,5 mm, exemplificado na Figura 4.2. Proveniente de fornecedores de materiais de construção da região de Apucarana-PR. A caracterização do material foi feita por meio de ensaio de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com as normas:

- Determinação da composição granulométrica: ABNT NBR NM 248:2003;
- Determinação da massa específica: ABNT NBR NM 53:2009;
- Determinação da massa unitária: ABNT NBR NM 045:2006.

Figura 4.2 – Agregado graúdo

Fonte: A Autora (2019)

4.1.3 Agregado miúdo

Foi empregada areia média quartzosa como agregado miúdo, oriunda de fornecedores de materiais de construção da região de Apucarana-PR mostrada na Figura 4.3. A mesma foi caracterizada por ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com os processos estabelecidos pelas normas citadas a seguir:

- Determinação da composição granulométrica: ABNT NBR NM 248:2003;
- Determinação da massa específica: ABNT NBR NM 52:2009;
- Determinação da massa unitária: ABNT NBR NM 045:2006.

Figura 4.3 – Agregado miúdo



Fonte: A Autora (2019)

4.1.4 Água

Para a confecção do concreto foi utilizado água potável em seu amassamento, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) através da rede de abastecimento de água da cidade de Apucarana.

4.1.5 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar que se utilizou neste trabalho é oriunda da usina termoelétrica da Usina Santa Terezinha (Usaçucar), localizada no distrito de Iguatemi à cerca de 10 km de Maringá-PR. Nela são moídas até 9.000 toneladas de cana e queimados 1670 toneladas de bagaço por dia (ALTOÉ, 2017).

A cinza provém de uma queima em torno de 900 °C a 1000 °C, sendo que seu rendimento irá depender da umidade que o bagaço estava antes de se tornar cinza e do tipo de solo onde a cana é colhida. A Usina de Santa Terezinha tem uma produção entorno de 14 kg de cinza pesada para cada tonelada de bagaço, gera 23,38 toneladas de cinza diariamente (ALTOÉ, 2017).

Devido à alta produção, a usina termoelétrica consegue abastecer energeticamente todo o complexo, a partir da queima do bagaço, podendo ainda vender possíveis excedentes para outras usinas e termoelétricas da região.

As amostras utilizadas já haviam sido passadas pela peneira 4,8mm, para não haver galhos, gravetos, pedras e partículas que não foram queimadas completamente, o estado da cinza que vem das fornalhas, o material retirado e a cinza peneirada estão mostrados na Figura 4.4 respectivamente indicados como (A), (B) e (C).

Figura 4.4 – Amostras de CBC



Fonte: Altoé (2017)

Para a caracterização da cinza foram adotados os dados obtidos por Altoé (2017), pois as amostras são provenientes do mesmo local. Na pesquisa referenciada acima foram realizados os ensaios de: composição granulométrica, determinação de massa específica, atividade pozolânicas, lixiviação e solubilização, que serão descritos brevemente neste trabalho.

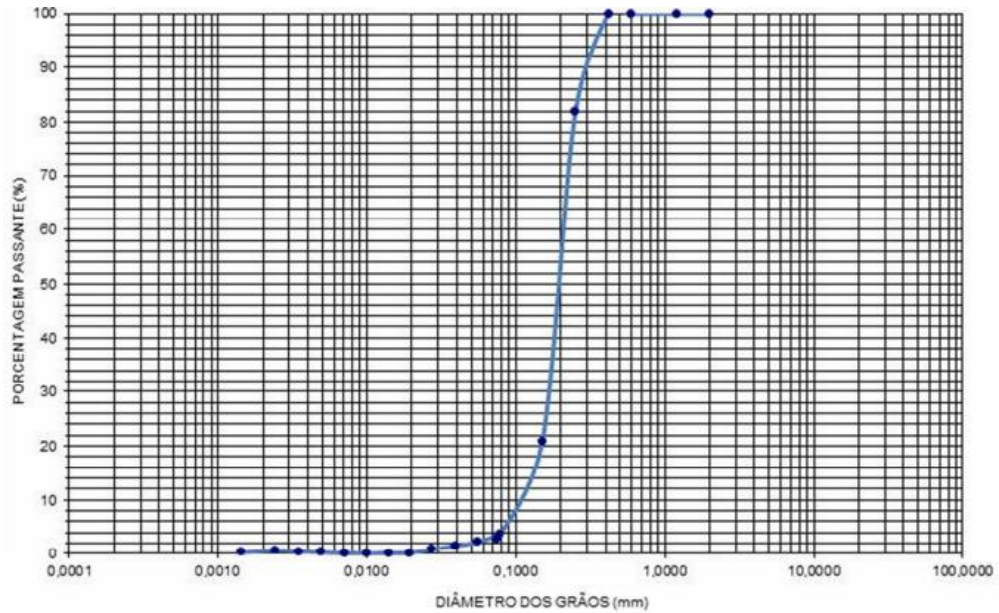
4.1.5.1 Análise granulométrica da CBC

A determinação granulométrica segue a NBR 7181:1984 – Solo – Análise Granulométrica, e por meio destes é possível obter a curva granulométrica do material. A mesma permite descobrir propriedades como grau de uniformidade e coeficiente de curvatura da CBC analisada.

Os dados obtidos pelo autor (ALTOÉ, 2017) estão descritos pela Figura 4.5 que indica a configuração da curva granulométrica, pela Tabela 4.4 que indica sua classificação

granulométrica e pela Tabela 4.5 que apresentam os coeficientes para a determinação do quão uniforme é a amostra.

Figura 4.5 – Curva granulométrica da CBC



Fonte: Altoé (2017)

Tabela 4.4 – Classificação granulométrica da CBC de acordo com a porcentagem retida

Classificação segundo a ABNT NBR 6502:1995	Porcentagem Retida (%)
0,6 a 2mm – Areia grossa	0,00
0,2 a 0,6 mm – Areia média	18,19
0,06 a 0,2 – Areia fina	79,03
0,002 a 0,06 – Silte	0,00
≤ 0,002 mm – Argila	2,78

Fonte: Altoé (2017)

Tabela 4.5 – Coeficientes de uniformidade e curvatura da CBC

Coeficiente	Valor
D60	0,2
D30	0,16
D10	0,11
U	1,25
CC	1,16

Fonte: Altoé (2017)

A amostra é classificada como predominantemente como uma areia fina, muito uniforme e com distribuição granulométrica bem graduada.

4.1.5.2 Massa específica

A norma que mais se adequa para a determinação da massa específica no Brasil é a NBR 6508:1984 – Grãos de solos que passam na peneira 4,8mm. A Tabela 4.6 apresenta os valores de massa específica e de umidade média encontrados pelo autor.

Tabela 4.6 – Massa específica e teor de umidade da CBC

Massa Específica dos grãos (médio) (g/cm³)	2,70
Média Umidade (%)	0,13

Fonte: Altoé (2017)

4.1.5.3 Atividade Pozolânica

A determinação da atividade pozolânica segue conforme a ABNT NBR 15895:2010 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. O consumo de Ca(OH)_2 deverá ser de no mínimo 750 mg/g para que a amostra possua atividade pozolânica, porém não foi o que aconteceu com a amostra de Altoé (2017) que reagiu com 137 mg de Ca(OH)_2 , portanto segundo a norma ABNT NBR 15895:2010 o material não se classifica como pozolânico.

4.1.5.4 Ensaios de Lixiviação e Solubilização

A lixiviação e a solubilização são ensaios feitos com o intuito de distinguir os componentes presentes em amostragens, para determinar a estabilidade química e avaliar se possuem componentes contaminantes. Os experimentos adotados para tais ensaios são os presentes na ABNT NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e na ABNT NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Sendo que os resultados serão avaliados pela caracterização determinada na ABNT NBR 10004:2004.

Os resultados o autor quanto ao ensaio de lixiviação da cinza está indicado na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8 os resultados de solubilização a seguir.

Tabela 4.7 – Concentração de ânions no extrato lixiviado da CBC

Parâmetros	Limite Máximo (mg/l) ANBT NBR 10004:2004 (Anexo F)	Concentração (mg/l)
Arsênio	1,00	0,00000
Bário	70,00	0,00000
Cádmio	0,50	0,00405
Chumbo	1,00	0,09840
Cromo	5,00	0,13980
Mercúrio	0,10	0,0060
Fluoreto	150,00	Nd
Prata	5,00	0,00900
Selênio	1,00	0,00000

Fonte: Altoé (2017)

Tabela 4.8 – Concentração de ânions no extrato solubilizado da CBC

Parâmetros	Limite Máximo (mg/l) ANBT NBR 10004:2004 (Anexo F)	Concentração (mg/l)
Alumínio	0,20	2,00500
Arsênio	0,01	0,00000
Bário	0,70	0,00000
Cádmio	0,006	0,00750
Chumbo	0,01	0,14590
Cloreto	250,00	Nd
Cobre	2,00	0,05000
Cromo	0,05	Nd
Ferro	0,30	0,04899
Fluoreto	1,50	Nd
Manganês	0,10	0,0250
Mercúrio	0,001	Nd
Nitrato	10,00	Nd
Prata	0,05	0,0087
Selênio	0,01	Nd
Sódio	200,00	33,33000
Sulfato	250,00	Nd
Zinco	5,00	Nd

Fonte: Altoé (2017)

Com estes dados a amostra poderá ser classificada como “não perigoso” pelo ensaio de lixiviação e pelo Anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004. Porém os níveis acima do indicado de alumínio, cádmio e chumbo no ensaio de solubilização classificam o material como “não inerte”. Portanto a amostra representa um “Resíduo não perigoso – Classe II A – Não inerte”, correspondente a um resíduo biodegradável, combustível ou solúvel em água, porém se descartado diretamente no solo poderá causar contaminação. Isso mostra que a aplicação em plantações como fertilizante não é uma escolha assertiva para disposição de tal material.

4.2 DOSAGENS, MOLDAGEM E ENSAIOS DOS BLOCOS

4.2.1 Dosagem e moldagem

Para atender os parâmetros exigências da ABNT NBR 9781:2013, a proporção entre aglomerante e agregado adotada é de 1:4, sendo metade dos agregados como miúdo e metade gráudo, próximo ao traço desenvolvido por Amadei (2011) de 55% miúdo e 45% gráudo, adoção que atingiu valores de resistência próximos ao exigido em norma.

Foram então estabelecidos 5 teores de substituição feitos em massa com base em que para dois blocos são utilizados 1 kg de cimento e correspondendo ao traço de 1:2:2, serão 2 kg de agregado miúdo e 2 kg de agregado gráudo. A confecção dos *pavers* tem como objetivo de identificar qual atuaria melhor quando aplicado, com valores de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, semelhantes às adotadas por Altoé (2013), com exceção do valor de 30% e também às de Cordeiro (2006), excluídos os valores de 25% e 30%.

A relação água cimento adotada foi de 0,45, sendo notada pelo Método do Ponto de Pelota (HOOD, 2006) se fosse necessário incremento de água à mistura. Pelo método o concreto deve adquirir consistência firme sem resíduos nas mãos, o incremento de aditivos poderia também ajudar na trabalhabilidade do concreto e reduzir o consumo de água, porém não foram adotados. A Figura 4.6 A indica qual é o ponto desejado do material e a Figura 4.6 B como seria a configuração da mistura se caso fosse necessária a alteração no volume de água.

Figura 4.6 – Ponto de pelota



(A)

(B)

Fonte: Altoé (2017)

A confecção foi feita de forma manual com auxílio de uma carruola e uma colher de pedreiro, Figura 4.7, no Laboratório de Materiais de Construção Civil no Bloco P da UTFPR - Apucarana.

Figura 4.7 – Moldagem dos *pavers*



Fonte: A Autora (2019)

Os blocos de concreto foram moldados com auxílio de fôrmas próprias para *pavers* de 20 x 10 x 6 cm de dimensões aproximadamente, e um vibrador de peneiras para agregados graúdos da marca Matest, mostrado na Figura 4.8, compactados em 2 camadas e alisados com a ajuda de colher de pedreiro, sendo executados os 6 *pavers* de cada traço por vez, totalizando 36 peças.

Figura 4.8 – Vibrador utilizado para compactação e moldagem dos *pavers*



Fonte: A Autora (2019)

A desforma dos *pavers* ocorreu aos 3 dias de idade, além de cura durante 48h sendo molhados por aspersão duas vezes ao dia, depois permaneceram no Laboratório de Materiais até os 28 dias para então realização dos ensaios previstos.

4.2.2 Inspeção Visual

A inspeção foi realizada em 6 peças, através da medição de dimensões, pesagem e verificação de cor. A coloração não é um parâmetro mencionado em norma ao contrário dos

outros, porém foi avaliado para considerar qualquer alteração entre as peças com e sem adição de resíduo. Como citado anteriormente, a ABNT NBR 9781:2013 determina que a variação independente da dimensão avaliada, não deve ultrapassar 3 mm com relação à referência da fôrma, sendo este um parâmetro a ser vistoriado neste trabalho.

4.2.3 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção foi realizado em 3 peças de cada traço previsto pela norma ABNT NBR 9781:2013, que caracteriza a infiltração de água em um corpo poroso, representada por um incremento de massa quando comparado a seu estado seco. Este experimento é importante pois a absorção pode ser ligada diretamente à durabilidade da peça, se há um alto valor de absorção, significa que mais líquido infiltrará na peça e mais ela será afetada pelo mesmo (AKASAKI *et al.*, 2010).

Para obter os valores de absorção dos corpos, faz-se necessário a imersão em água dos corpos de prova por 24 horas, após retirados são posicionados sobre tela metálica por um minuto e é seca a superfície. Esse processo caracteriza a condição de saturado com a superfície seca, desta forma são pesados e é registrado o valor encontrado de massa saturada por bloco.

Após o recolhimento dos dados, as peças são levadas à estufa por mais 24 horas, depois retiradas e deixadas em resfriamento por no máximo 10 minutos. São então novamente pesadas obtendo um valor de massa seca. A Figura 4.9 mostra *pavers* em processo de secagem.

Figura 4.9 – Amostras dentro da estufa



Fonte: Altoé (2017)

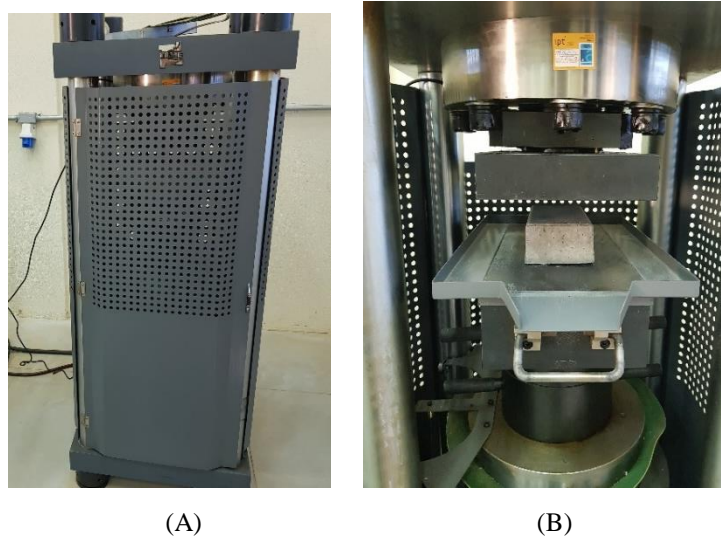
A norma ainda prevê que deve se deve repetir ambas as pesagens a cada 2 horas, sendo que a diferença entre as massas sucessivas não deve registrar variação superior a 0,5% em relação ao anterior, assim deve-se anotar os valores de massa saturada e massa seca.

Com esses valores podemos obter em porcentagem a absorção, através da diminuição da massa saturada pela massa seca e dividido pela massa seca. O valor máximo de absorção média não deve ultrapassar 6% e individual de 7%, pois indicaria uma porosidade não compatível para peças de concreto para pavimentação.

4.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão do Bloco

Foram ensaiados 6 *pavers* para cada traço, portanto são 36 *pavers* ao todo, na idade de 28 dias e 120 dias, feitos os testes no Laboratório de Estruturas situado no bloco P da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Apucarana. O equipamento utilizado foi a prensa YAW-2000S da marca Time Grouping, mostrada sua parte externa pela Figura 4.10 A e interna pela Figura 4.10 B, com um exemplo de *paver* posicionado para o ensaio.

Figura 4.10 – Prensa para ensaio de resistência à compressão



Fonte: A Autora (2019)

A norma NBR 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio, indica acoplar 2 placas de aço ao centro da prensa, com diâmetro de $(85 \pm 0,5)$ mm e espessura mínima de 20 mm, porém devido à falta do material o ensaio foi realizado sem o mesmo, tendo em contato toda a superfície do bloco com o equipamento.

Para a obtenção da resistência foi dividida a força máxima atingida em ensaio na unidade Newton pela área de aplicação da força em milímetros quadrados e, dependendo da altura da amostra, foi multiplicada por um fator “*p*” nesta equação, indicado numericamente na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Fator multiplicativo “p”

Altura nominal da peça (mm)	“p”
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: ABNT NBR 9781:2013

A mesma norma considera que a resistência à compressão deve obedecer a uma distribuição normal, com valor característico estimado, indicado pela Equação 1 e 2:

$$f_{pk,est} = f_p - t * s \quad (1)$$

Sendo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Onde:

- f_p = resistência média das peças em MPa;
- f_{pi} = resistência individual das peças em MPa;
- $f_{pk,est}$ = resistência característica estimada
- n = número de peças da amostra;
- s = desvio-padrão da amostra, expresso em MPa;
- t = coeficiente de Student em função do número de amostras, presente na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Coeficiente de Student (nível de confiança de 80%)

n	t
6	0,920
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,870
16	0,866
18	0,863
20	0,861
22	0,859
24	0,858
26	0,856
28	0,855
30	0,854
32	0,842

Fonte: ABNT NBR 9781:2013

4.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico a partir do ensaio de determinação da velocidade de onda ultrassônica

O módulo de elasticidade do concreto pode ser definido pela inclinação da curva de tensão-deformação relacionada a um carregamento uniaxial. De maneira mais prática, é determinado pela porosidade referente à relação de água/cimento e o grau de hidratação em concretos. A porosidade ainda possui relação direta com a resistência podendo atuar como um limitador já que é influenciado diretamente pelo volume de vazios. Estas relações, porém, apesar de interligadas, não são diretamente proporcionais devido à complexidade do material. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A ABNT NBR 8802:2019 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, estabelece uma forma não destrutiva para a determinação desta velocidade, partir desta técnica é possível “estimar a profundidade de fissuras e outras imperfeições; monitorar a variação de propriedades do concreto ao longo do tempo; determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, por meio das ondas longitudinais e/ou transversais” (p. 14).

Conforme a ASTM C597-16- Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, a velocidade de pulso de ondas longitudinais, V , numa massa de concreto, se relaciona com suas propriedades de acordo com a Equação 3:

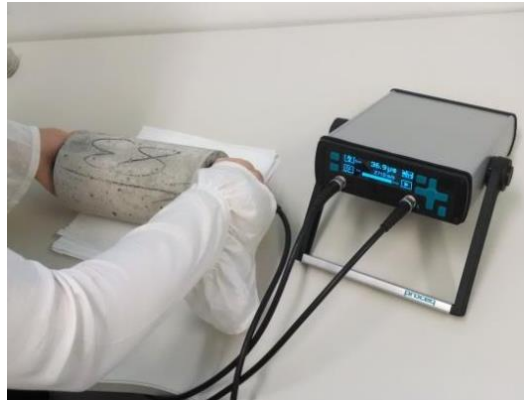
$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (3)$$

Onde:

- E = módulo de elasticidade dinâmico;
- ν = coeficiente de Poisson dinâmico;
- ρ = massa específica.

A partir desta é possível obter o valor do módulo de elasticidade indiretamente, isolando esta variável. Sendo que segundo a ABNT NBR 8802:2019, o ensaio deve ser feito depois de ocorrido a cura do material e caso estejam imersos em água deverão ser retirados 24 horas antes do ensaio. Os transdutores do equipamento devem ser posicionados em faces opostas como mostra a Figura 4.11 com utilização de gel nas partes que entrarão em contato com a superfície do concreto. O resultado será a média das leituras obtidas.

Figura 4.11 - Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Pacheco *et al.* (2014)

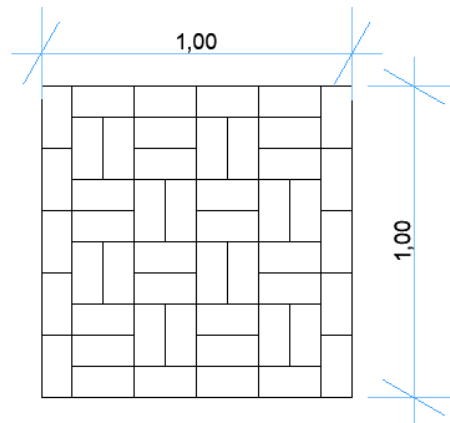
4.3 CALÇADA PROTÓTIPO

Uma calçada protótipo foi construída na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, com a finalidade de examinar o comportamento das peças durante os meses de setembro e outubro de 2019. A calçada está localizada entre os blocos N e P da UTFPR e possui um metro por um metro cada segmento, sendo necessário 100 blocos para tal, 50 com blocos sem substituição do resíduo e 50 com o teor ótimo de substituição. Foram curados por 7 dias após a desforma. Com o protótipo foi possível comparar a eficiência dentro dos ensaios analisados e distinguir a influência da cinza na prática.

Foi avaliada ao longo do período questões temperatura superficial e infiltração. A medição de temperatura se deu 2 vezes no dia, em 5 dias e a drenagem a cada duas semanas, sendo feitas 3 medições.

A calçada seguiu partes das recomendações da norma ABNT NBR 15953:2011 - Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução, devido à falta de equipamentos próprio para tal função e por ser um trecho exclusivamente para testes. Primeiramente foi feita uma limpeza superficial, em seguida se deu a distribuição de uma camada de aproximadamente 2 cm de areia no local pretendido a fim de nivelar os blocos e aplicação da areia também em suas juntas, após o assentamento das peças, que se deu conforme a Figura 4.12. A paginação da calçada ilustrada corresponde ao tipo trama, mesmo feito por Altoé (2017) em suas análises.

Figura 4.12 – Modelo de assentamento – Calçada protótipo



Fonte: A Autora (2019)

A contenção lateral, que é uma das exigências, não foi feita e a compactação se deu apenas com o auxílio de uma marreta de borracha, sendo que uma placa vibratória traria melhores resultados.

4.3.1 Controle de temperatura

Todo material possui a propriedade de absorver e refletir calor, dependendo de sua composição e de sua cor. A temperatura foi monitorada durante 5 dias aleatoriamente, sendo feitas duas medições por dia, examinando sua influência ao longo do tempo e comparando os dois trechos executados. As medições foram realizadas através de um termômetro de superfície.

4.3.2 Drenagem

Uma das principais utilizações de *pavers* é no auxílio à drenagem urbana, no caso por meio de suas juntas não impermeabilizadas, já que não estamos tratando de um bloco permeável. Porém existe a perda dessa infiltração causada pela acomodação do terreno, selagem das juntas ou pela deposição de material ao longo do tempo.

Jabur (2013) indica o ensaio previsto na ASTM C1701 (método de ensaio *in situ* para determinação de coeficientes de permeabilidade em concreto permeável) para avaliar o coeficiente de permeabilidade do pavimento. Na pesquisa o autor avaliou diferentes métodos para infiltração em pavimentos intertravados, blocos vazados e asfalto poroso. O método citado foi o que mais atendeu às expectativas quanto a condições de execução, podendo ser aplicado em pavimentos recém implantados, como é o caso deste trabalho.

Para o método é necessário um cilindro de diâmetro de 30 cm e altura mínima de 20 cm que será posicionado na superfície do pavimento, como mostra a Figura 4.13, tendo suas bordas vedadas com massa de calafetar, a modo de evitar a perda de água.

Figura 4.13 – Dispositivo cilíndrico para ensaio de infiltração



Fonte: Jabur (2013)

Para o ensaio o pavimento deverá estar pré-umidecido, com o despejo de 3,6 litros de água no interior do cilindro posicionado no pavimento. Se a infiltração da água ocorrer em tempo inferior a 30 s utiliza-se 18 litros durante o ensaio, caso contrário serão utilizados mais 3,6 litros. O ensaio consiste na repetição deste processo cronometrando sempre o tempo de infiltração total da água. Durante a pré-molhagem, o volume de água deve ser adicionado ao cilindro mantendo a altura da água no nível entre 10 mm e 15 mm observados a partir da régua colocada dentro do cilindro.

Com estes dados é possível aplicar a Lei de Darcy, obtendo o coeficiente de permeabilidade pela Equação 4, que após calculados foram comparados aos de Jabur (2013).

$$I = \frac{K * M}{D^2 * t} \quad (4)$$

Onde:

- I = Coeficiente de Infiltração em milímetros por hora;
- M = Massa de água infiltrada em quilogramas;
- D = Diâmetro interno do cilindro em milímetros;
- T = Intervalo de tempo entre adição da água e seu desaparecimento na superfície em segundos;
- K= Constante = 4.583.666.000.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram realizados ensaios de análise granulométrica, massa unitária e massa específica para caracterização dos agregados, os resultados estarão discriminados nos tópicos 5.1.1 e 5.1.2.

5.1.1 Agregado graúdo

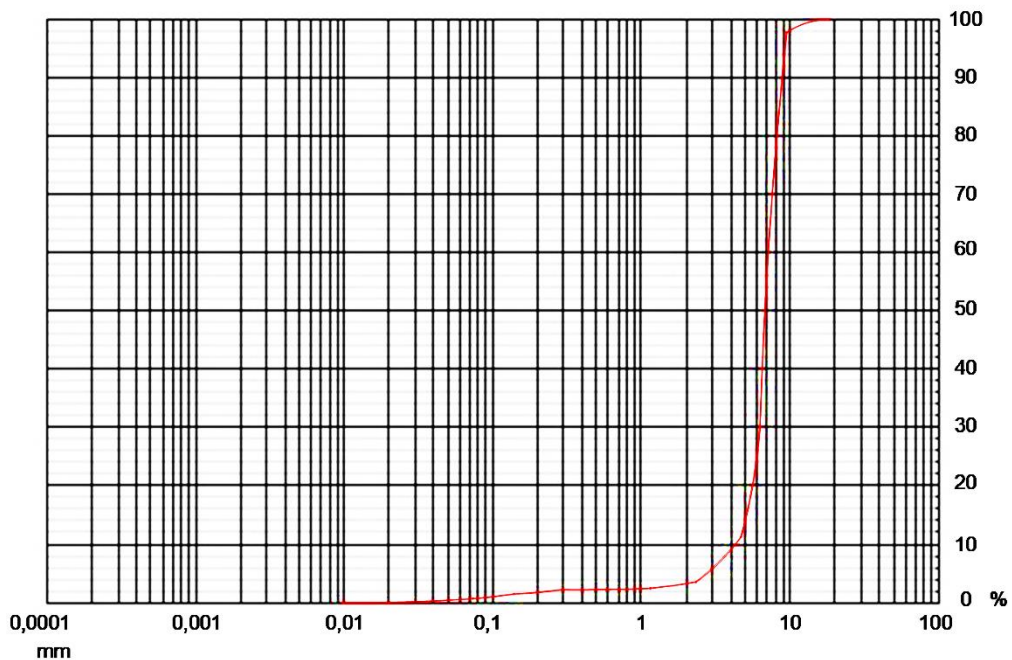
A caracterização do agregado graúdo é explicitada pela Tabela 5.1 com resultados de massa unitária, massa específica e diâmetro máximo característico, além de sua curva granulométrica apresentada na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados agregado graúdo

Característica	Valores
Massa específica	3,75 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	1,49 g/cm ³
Diâmetro máximo característico	9,52 mm

Fonte: A Autora (2019)

Figura 5.1 – Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: A Autora (2019)

5.1.2 Agregado Miúdo

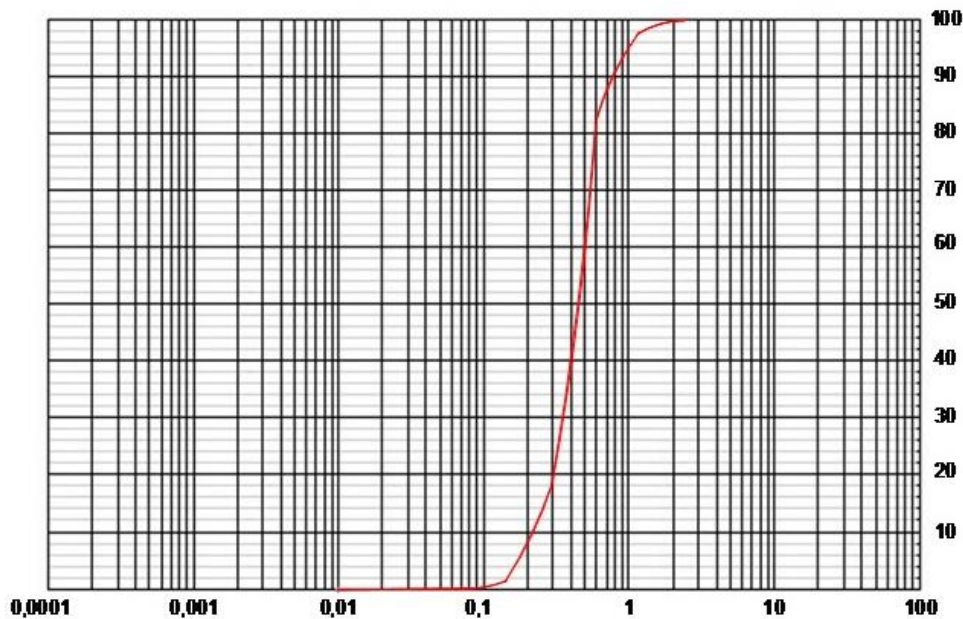
Foi obtido também resultados para caracterização para o agregado miúdo, quanto sua massa específica, massa unitária e diâmetro máximo característico, mostrados na Tabela 5.2 abaixo, enquanto a Figura 5.2 mostra o gráfico de granulometria do material analisado.

Tabela 5.2 – Resultados agregado miúdo

Característica	Valores
Massa específica	2,63 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	1,39 g/cm ³
Diâmetro máximo característico	1,2 mm

Fonte: A Autora (2019)

Figura 5.2 – Curva granulométrica agregado miúdo



Fonte: A Autora (2019)

5.2 ASPECTOS DOS PAVERS

5.2.1 Inspeção Visual

As propriedades que foram analisados neste item são coloração, massa e dimensão, sendo o último destes pontos anteriormente citado por ser exigido pela ABNT NBR 9781:2013. A Figura 5.3 ilustra a conformidade de um dos blocos confeccionado.

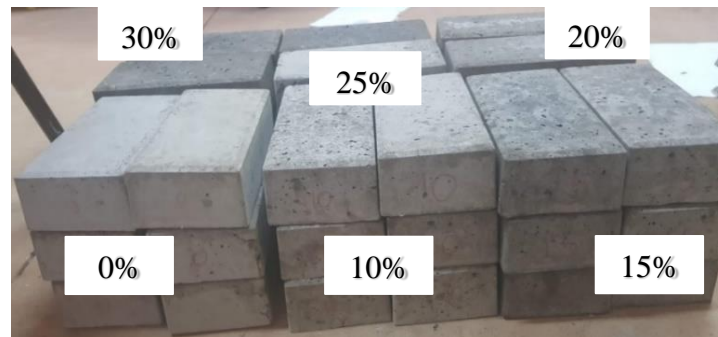
Figura 5.3 – Bloco de concreto para pavimentação



Fonte: A Autora (2019)

Primeiramente analisando a tonalidade das peças é possível ver uma diferença considerável neste caso (Figura 5.4 A), porém quando se analisa a Figura 5.4 B, que ilustra o a calçada protótipo com traços diferentes, é possível visualizar que a variação não será tão expressiva na prática aplicando em uma calçada.

Figura 5.4 – Diferença de tonalidades



(A)



(B)

Fonte: A Autora (2019)

Quanto a massa, é possível observar na Tabela 5.3 que não houve um padrão que a relacione com o incremento de cinza, pois os teores de 10% e 15% obtiveram decréscimo com relação ao sem substituição e os teores de 20%, 25% e 30% obtiveram acréscimo que, individualmente, pode não representar um valor expressivo, mas em uma grande carga do material irá influenciar.

Tabela 5.3 – Massa seca das amostras

Teor de Substituição	CP	Massa seca (g)	Média (g)	Variação
0%	1	2364	2359	-
	2	2367		
	3	2347		
10%	4	2363	2337	-22
	5	2366		
	6	2283		
15%	7	2321	2325	-35
	8	2308		
	9	2345		
20%	10	2342	2369	10
	11	2368		
	12	2397		
25%	13	2400	2380	21
	14	2356		
	15	2384		
30%	16	2448	2447	88
	17	2444		
	18	2450		

Fonte: A Autora (2019)

A tolerância dimensional de ± 3 mm foi atendida em todas as amostras como mostrado na Tabela 5.4 com as médias dos resultados das medições realizadas.

Tabela 5.4 – Medição dimensional média

Teor de Substituição	Comprimento (mm)	Variação (mm)	Largura (mm)	Variação (mm)	Altura (mm)	Variação (mm)
Forma	196	-	99	-	58	-
0%	195	-1	99	0	56	-2
10%	196	0	99	0	57	-1
15%	197	1	98	-1	58	0
20%	196	0	98	-1	58	0
25%	196	0	99	0	57	-1
30%	195	-1	99	0	57	-1

Fonte: A Autora (2019)

Como visto nenhum dos resultados deste tópico afetou a uniformidade de maneira prejudicial, a ponto de ter que ser rejeitada alguma das peças ou dos traços.

5.2.2 Absorção de água

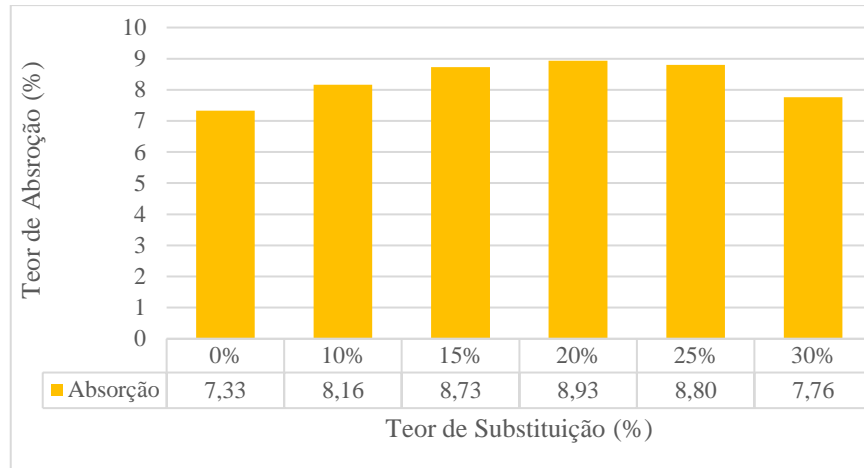
A absorção conforme anteriormente citado é um fator determinante na peça pois indica sua porosidade o que pode afetar diretamente em sua durabilidade (AKASAKI *et. al*, 2010). Foi encontrada de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 9781:2013 após seus 28 dias de idade tendo seus resultados descritos na Tabela 5.5 a seguir.

Tabela 5.5 – Resultados de absorção das amostras

Teor de Substituição	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Média (%)
0%	2364	2537	7,318	7,33
	2367	2540	7,309	
	2347	2520	7,371	
10%	2363	2555	8,125	8,16
	2366	2554	7,946	
	2283	2475	8,410	
15%	2321	2522	8,660	8,73
	2308	2505	8,536	
	2345	2556	8,998	
20%	2342	2552	8,967	8,93
	2368	2576	8,784	
	2397	2614	9,053	
25%	2400	2610	8,750	8,80
	2356	2566	8,913	
	2384	2592	8,725	
30%	2448	2644	8,007	7,76
	2444	2626	7,447	
	2450	2642	7,837	

Fonte: A Autora (2019)

O melhor resultado foi de 0% e seguindo em ordem crescente de valores: 30%, 10%, 15%, 25% e 20% sendo que a maior diferença se deu entre os traços de 0% e de 20%, onde a variação foi de 2,63%. Para melhor visualização e comparação entre as amostras a Figura 5.5 dispõe um gráfico com os resultados deste mesmo ensaio.

Figura 5.5 - Gráfico de absorção

Fonte: A Autora (2019)

Como visto, nenhum dos resultados atendeu os requisitos da norma de absorção máxima média de 6% e individual de 7%, podendo influenciar na integridade do material, porém como este trabalho se baseia na comparação de resultados e o traço sem substituição não distou muito dos demais apesar de apresentar o melhor resultado.

O fato de que todos os corpos alcançaram resultado não tão positivo pode ser referente ao método de execução utilizado, pois foi realizado a partir de uma adaptação de equipamentos para este trabalho, como descrito no tópico a respeito da moldagem. Também pode ser relacionada com a redução da trabalhabilidade, acarretada pelo aumento da incorporação da cinza no concreto.

5.2.3 Resistência à Compressão Característica

Os resultados de resistência à compressão característica foram obtidos em duas etapas, com 28 dias e com 120 dias, sendo 3 amostras de cada traço em cada etapa. As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados das respectivas datas.

Tabela 5.6 – Resultados de resistência com 28 dias

Teor de Substituição	Força (kN)	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Característica (MPa)
0%	371,8	21,74	21,12	19,77
	308,1	18,02		
	403,5	23,60		

Teor de Substituição	Força (kN)	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Característica (MPa)
10%	377,2	22,06	23,04	22,61
	406,6	23,78		
	398	23,27		
15%	323	18,89	20,62	19,81
	384,6	22,49		
	350,2	20,48		
20%	348,9	20,40	21,27	20,90
	364,1	21,29		
	378,3	22,12		
25%	229	13,39	15,65	14,67
	271	15,85		
	303,1	17,73		
30%	483,9	28,30	33,37	31,17
	592,4	34,64		
	635,7	37,18		

Fonte: A Autora (2019)

Como visto nestes primeiros resultados, a maior das resistências encontradas foi a do traço com substituição de 30% de agregado miúdo, sendo de aproximadamente 58% maior que o traço referencial, apesar de nenhum valor final chegou perto dos 35 MPa exigidos pela norma ABNT NBR 9781:2013.

Seguindo em ordem decrescente de resistência, as amostras de 10%, 20% e 15% também alcançaram melhores resultados que o traço sem substituição.

Tabela 5.7 – Resultados de resistência com 120 dias

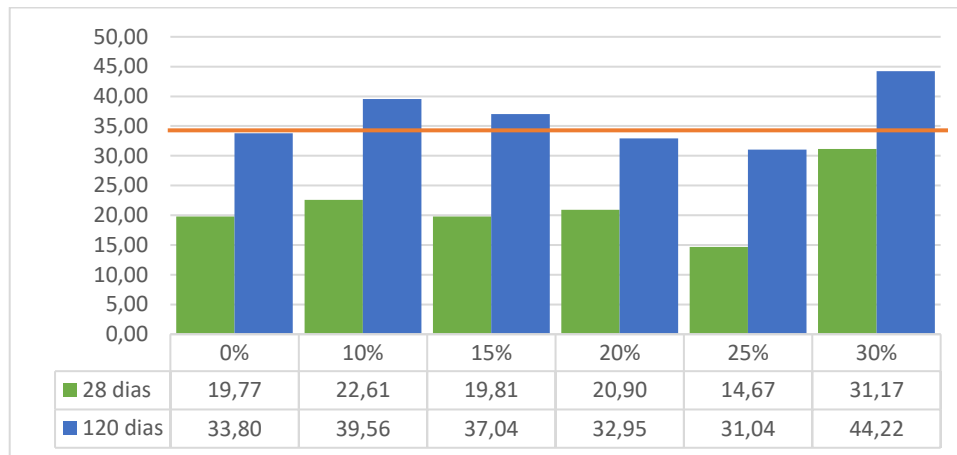
Teor de Substituição	Força (kN)	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Característica (MPa)
0%	750,8	43,91	36,91	33,80
	508,4	29,73		
	634,4	37,10		
10%	786,4	45,99	42,55	39,56
	609,7	35,65		
	786,6	46,00		
15%	610,5	35,70	39,18	37,04
	754,4	44,12		
	645,0	37,72		
20%	525,4	30,73	34,65	32,95
	647,1	37,84		
	604,9	35,37		

Teor de Substituição	Força (kN)	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Característica (MPa)
25%	515,6	30,15	31,72	31,04
	550,1	32,17		
	561,3	32,82		
30%	734,9	42,98	45,27	44,22
	815,4	47,68		
	771,9	45,14		

Fonte: A Autora (2019)

Os resultados da segunda idade analisada mostra uma melhoria das resistências, tendo destaque para os valores de 10%, 15% e 30% que superaram os 35 MPa de resistência característica, além de também superarem o valor do traço sem substituição, tendo o de 30% o melhor resultado e 30,8% maior que a referência. A relação entre as idades é melhor analisada através da Figura 5.6.

Figura 5.6 – Gráfico de comparação de resistências em diferentes idades



Fonte: A Autora (2019)

O gráfico mostra o aumento de resistência entre as idades além de ilustrar quais dados atingiram o objetivo dos 35 MPa, porém lembrando que como coloca Fioriti (2007), 15 MPa seria condizente e suficiente para o tipo de aplicação que a norma ABNT NBR 9781:2013, indica de tráfego leve, sendo assim todas as amostras seriam aprovadas.

5.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma característica mecânica do concreto endurecido, que tem relação direta com a porosidade do mesmo, e por consequência com a resistência à

compressão e também com a absorção. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior a sua rigidez e sua resistência, por outro lado, menor a sua absorção e porosidade.

Porém, pesquisas realizadas com concretos com materiais reciclados mostram que o valor do módulo de elasticidade cai à medida que se aumenta a quantidade de resíduos, observando-se uma maior porosidade e menor rigidez, sem afetar, no entanto, a resistência à compressão. Isso pode ser ocasionada pela influência direta da composição do agregado e também pelo seu formato. A Tabela 5.8 a seguir apresenta os resultados encontrados deste ensaio.

Tabela 5.8 – Módulo de elasticidade das amostras

Teor de Substituição	Massa seca (g)	ρ (g/cm³)	Velocidade (Km/s)	E(GPa)	Média (GPa)
0%	2364	2320,206	3,81	30,31	30,26
	2367	2323,151	3,846	30,93	
	2347	2303,521	3,774	29,53	
10%	2363	2319,225	3,54	26,16	26,34
	2366	2322,169	3,604	27,15	
	2283	2240,707	3,571	25,72	
15%	2321	2278,003	3,54	25,69	26,05
	2308	2265,244	3,54	25,55	
	2345	2301,558	3,604	26,91	
20%	2342	2298,614	3,636	27,35	27,33
	2368	2324,132	3,636	27,65	
	2397	2352,595	3,571	27,00	
25%	2400	2355,539	3,54	26,57	26,51
	2356	2312,354	3,604	27,03	
	2384	2339,836	3,509	25,93	
30%	2448	2402,650	3,636	28,59	29,12
	2444	2398,724	3,704	29,62	
	2450	2404,613	3,67	29,15	

Fonte: A Autora (2019)

Todos os resultados de módulo de elasticidade que a cinza foi aplicada obtiveram redução em relação à referência, mostrando que pode ter ocorrido um aumento no volume de vazios e em sua porosidade. Esse aspecto pode estar ligado a redução da trabalhabilidade que a CBC provoca na pasta de concretos, pela maior absorção de água que o agregado comum.

5.2.5 Comparação de resultados

A Tabela 5.9 abaixo traz os três resultados de ensaios dos blocos, que possuem interferência em sua durabilidade e resistência, neste tópico elas serão comparadas para encontrar possíveis relações condizentes com as substituições.

Tabela 5.9 – Comparação de ensaios

Teor de Substituição	Absorção (%)	Resist. 28 dias (MPa)	Resist. 120 dias (MPa)	Mód. de Elast. (GPa)
0%	7,33	19,77	33,80	30,26
10%	8,16	22,61	39,56	26,34
15%	8,73	19,81	37,04	26,05
20%	8,93	20,90	32,95	27,33
25%	8,80	14,67	31,04	26,51
30%	7,76	31,17	44,22	29,12

Fonte: A Autora (2019)

Apesar do aumento do teor de substituição influenciar na trabalhabilidade do concreto e este ser um fator que poderia influenciar nas características acima descritas, os resultados encontrados demonstram que a substituição não influenciou de forma significativa nas características analisadas. Para análise mais detalhada, os ensaios serão comparados dois a dois, afim de encontrar correlações e semelhanças entre os resultados.

5.2.5.1 Absorção x Resistência à Compressão

De uma forma geral, existe uma relação entre resistência à compressão e absorção, como pode ser visto na faixa de teores de substituição de 15 a 25%, onde ocorreu uma queda da resistência e um aumento da absorção.

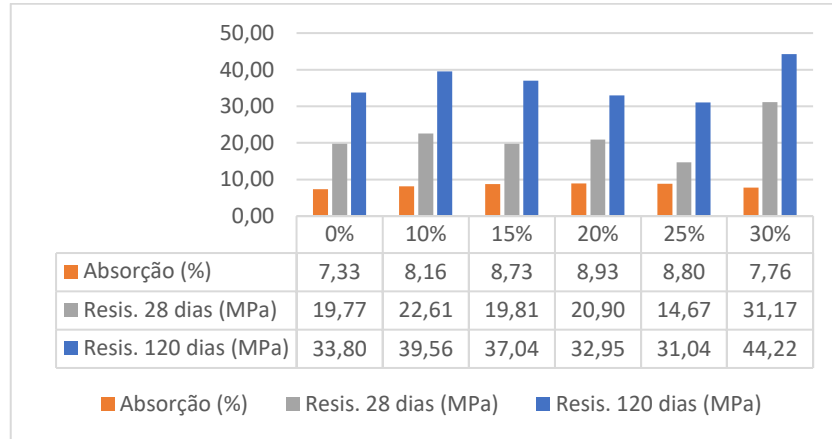
A existência desta relação já havia sido determinada nos trabalhos de Altoé (2017) e Martins Filho (2015), porém nestes a relação se mostrava contrária, ou seja, aumentava o teor, aumentava a resistência e diminuía a absorção.

Mesmo sendo conclusões diferentes, elas contribuem para a afirmação que existe uma relação, o que pode ter ocorrido neste trabalho são as alterações feitas para a moldagem, não tendo sido feita compactação de forma correta e influenciando na porosidade do material.

Por outro lado, no caso do teor de 30% a presença de uma maior parcela de finos, provenientes da CBC, pode ter criado um efeito de compensação, melhorando assim o

desempenho nas características analisadas. A Figura 5.7 a seguir ilustra por meio de gráfico com os resultados destes ensaios.

Figura 5.7 – Gráfico absorção x resistência à compressão



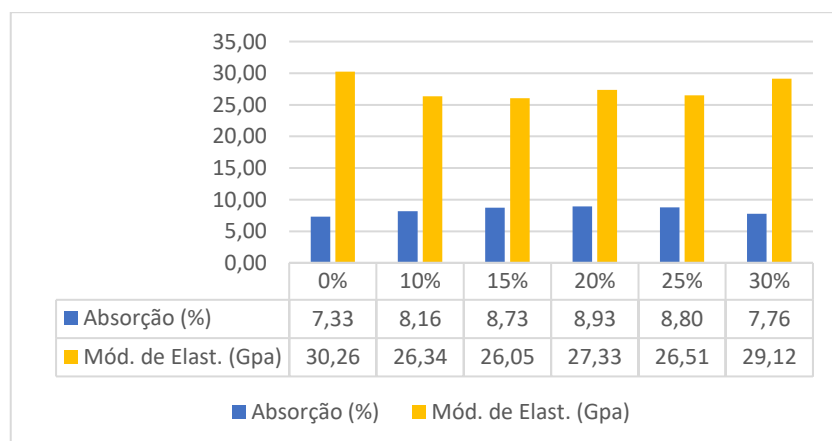
Fonte: A Autora (2019)

5.2.5.2 Absorção x Módulo de Elasticidade

No caso da relação entre módulo de elasticidade, existe correspondência entre os dados de 0% e 30% pois em ambos o melhor resultado é o de 0% e o segundo melhor é de 30%, mostrando novamente o melhor empacotamento das partículas neste caso dentre as substituições.

Os traços intermediários a estes tiveram maior diferenciação dos resultados, tendo maiores absorções e menores módulos de elasticidade mostrando a relação direta entre ambas as características. A Figura 5.8 a seguir apresenta ambos os resultados lado a lado.

Figura 5.8 – Gráfico absorção x módulo de elasticidade

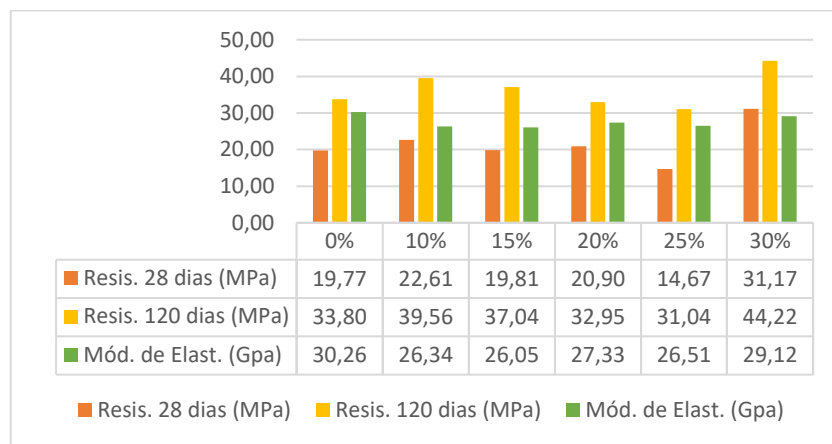


Fonte: A Autora (2019)

5.2.5.3 Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade

O mesmo que ocorreu na primeira relação acontece nesta, o aumento do teor de substituição tende a acarretar na redução da resistência e também diminuição do módulo de elasticidade. Por outro lado, o segundo melhor do resultado de elasticidade foi o melhor de resistência, correspondente ao traço de 30%, mostrando ser este o melhor traço de substituição desta comparação. A relação é melhor ilustrada através da Figura 5.9.

Figura 5.9 – Gráfico resistência à compressão x módulo de elasticidade



Fonte: A Autora (2019)

A partir da análise de todos os ensaios feitos e todas as comparações, é possível notar que o traço que mais se destacou foi o de 30% de substituição de cinza, apresentou aumento significativo na característica de resistência a compressão, e resultados próximos ao referênciã nas outras características avaliadas, o que demonstra a viabilidade deste teor de substituição.

5.3 CALÇADA PROTÓTIPO

A calçada protótipo foi construída na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, entre os blocos P e N, com finalidade exclusiva para testes, pois não teve ligação com as travessias já existentes. A seguir, está ilustrada na Figura 5.10, sua localização por satélite.

Figura 5.10 - Vista aérea com posicionamento da calçada protótipo na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana



Fonte: Google (2019)

5.3.1 Fabricação das peças e execução da calçada

Foram confeccionados 50 blocos para cada calçada, com o auxílio de uma betoneira devido a quantidade a ser moldada, porém o processo de moldagem e compactação se deu da mesma forma que os *pavers* que passaram por ensaios individuais. Cada trecho da calçada possui 1,00 metro por 1,00 metro, sendo uma delas feita com os blocos de traço referência e a outra com traço de teor ótimo que, no caso, foi teor de 30%.

A Figura 5.11 A apresenta parte dos blocos que estão presentes na calçada executada, que foram moldados em duas etapas, nos dias 23 e 24 de maio, desformados com 3 dias de idade e curados por 7 dias por aspersão, 2 vezes ao dia (Figura 5.11 B).

Figura 5.11 – Confeção dos blocos para as calçadas



(A)

(B)

Fonte: A Autora (2019)

O início da execução da calçada se deu com a limpeza do terreno e retirada de parte do solo com uma enxada, o trecho que foi escolhido para assentamento não apresentava tanta

vegetação a ser removida como é possível visualizar na Figura 5.12 A. Após feita a limpeza foi despejada areia sobre a região a ser assentados com intuito facilitar o nivelamento dos blocos (Figura 5.12 B).

Figura 5.12 – Preparação do terreno



(A)

(B)

Fonte: A Autora (2019)

A calçada seguiu o tipo trama de assentamento e foi utilizada areia para rejunte da mesma e vassoura para espalhar melhor em todos os cantos e extremidades. A Figura 5.13 ilustra ambos os trechos executados para serem ensaiados após terem sido recolocados com legenda referente ao tipo de blocos assentados em cada segmento.

Figura 5.13 – Calçada finalizada



Fonte: A Autora (2019)

É possível ver ligeiramente uma diferenciação de cor entre as calçadas, mas não é algo que chegue a interferir esteticamente ainda mais considerando que apenas este fator de cor foi a diferença obtida pelos ensaios realizados nesta pesquisa.

5.3.2 Temperatura Superficial

O monitoramento da temperatura foi feito com um termômetro próprio para tal ação e feita a leitura de ambas as calçadas em 2 períodos do dia, colhidas no horário das 10 da manhã e 15:30 da tarde, em 5 dias. A Tabela 5.10 mostra os resultados encontrados e a variação entre os dois tipos de calçada em cada medição, além da temperatura média (TM), umidade relativa do ar (UR) e precipitação do dia (PREC) (SIMEPAR, 2019), sendo que a estação do ano corresponde aos dados apresentados é a primavera.

Tabela 5.10 – Resultados de Temperatura Superficial

Data	TM (°C)	UR (%)	PREC (mm)	Trecho	Temperatura manhã (°C)	Variação	Temperatura tarde (°C)	Variação
23/set	16,8	64	0,0	Referencial	24,2	-3,31%	21	-3,33%
23/set				30% CBC	23,4		20,3	
24/set	18,9	70	0,0	Referencial	27,3	0,73%	22,9	-1,31%
24/set				30% CBC	27,5		22,6	
25/set	16,1	94	8,6	Referencial	28,9	-1,73%	24,1	-1,66%
25/set				30% CBC	28,4		23,7	
30/set	23,4	41	0,0	Referencial	42,4	-2,12%	32,5	2,15%
30/set				30% CBC	41,5		33,2	
01/out	25,0	44	0,0	Referencial	39	1,79%	26,8	2,99%
01/out				30% CBC	39,7		27,6	

Fonte: A Autora (2019)

Apesar de os blocos feitos com a cinza serem levemente mais escuros que os sem substituição, não influenciou na temperatura já que algumas vezes o com CBC obteve menores temperaturas em algumas das medições, portanto os resultados foram satisfatórios neste quesito.

5.3.3 Drenagem

A drenagem do pavimento é analisada aqui por fazer parte das vantagens dos *pavers* citada por autores. Ocorre através da infiltração de suas juntas pois esses tipos de blocos não são destinados a servirem como pavimento permeável. Os resultados encontrados estão discriminados na Tabela 5.11 a seguir.

Tabela 5.11 – Resultados de drenagem

Dia 13/09				
	Volume (L)	Tempo (s)	Infiltração (mm/h)	Infiltração (m/s)
Ref	3,6	36,8	498,22	1,38E+08
30% CBC	3,6	34,6	529,44	1,47E+08
Dia 27/09				
	Volume (L)	Tempo (s)	Infiltração (mm/h)	Infiltração (m/s)
Ref	3,6	40,7	450,48	1,25E+08
30% CBC	3,6	37,9	483,76	1,34E+08
Dia 11/10				
	Volume (L)	Tempo (s)	Infiltração (mm/h)	Infiltração (m/s)
Ref	3,6	36,6	500,95	1,39E+08
30% CBC	3,6	34,2	536,10	1,49E+08

Fonte: A Autora (2019)

Como visto os valores entre as calçadas foram bem próximos e consideravelmente altos, isso deve ao fato de que ocorreu vazamento lateral pelo desnivelamento das peças durante o ensaio e pela dimensão maior das juntas, além de que como a contenção lateral não foi feita, a areia se movia durante o lançamento da água o que seria evitado ou reduzido se o modo de assentamento conforme a ABNT NBR 15953:2011 fosse seguido passo a passo.

Mesmo assim não era esperado a interferência pela diferenciação dos blocos, já que a drenagem do caso deste pavimento se dá através de suas juntas, portanto a composição do bloco reflete no resultado deste ensaio.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos podemos concluir quanto a possibilidade de substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em blocos de concreto para pavimentação é viável, primeiramente quanto a granulometria que corresponde a uma areia natural fina. Apesar de ser um resíduo que possa gerar contaminação do solo como visto pelos resultados que seguem a norma NBR 10004:2004 de classificação dos resíduos sólidos, o concreto tem a propriedade de neutralizar esses componentes justificando inicialmente sua aplicação.

Em relação aos ensaios realizados individualmente começando pela absorção, a substituição causou pouca diferença nos resultados apesar de ter acrescido em todos os casos comparados ao traço sem substituição dos *pavers*, o mesmo ocorreu com o ensaio de módulo de elasticidade que não foi o desejado pois diminuiu os valores, porém ainda obtiveram resultados próximos. Isso mostra que a relação entre os dois parâmetros foi confirmada e o traço de 30% em ambos chegou bem próximo ao referencial.

Tais resultados eram plausíveis de serem encontrados pois a cinza tem tendência a absorver mais a água adicionada na mistura do concreto, influenciando na trabalhabilidade e na compactação dos blocos acarretando em uma maior porosidade e menor encapsulamento de partículas. Porém se este fosse o caso teria uma tendência de aumento de absorção e diminuição do módulo de elasticidade conforme o aumento do teor de substituição, tal padrão não aconteceu.

É necessário lembrar que nenhum dos valores de absorção foram aprovados pelo o que normaliza a ABNT tanto os com substituição como o referencial que foi de 7,33% ficando acima dos 6% esperados e sendo este o menor dos valores encontrados, mostrando que a forma de moldagem obteve influência direta nos resultados encontrados, portanto a característica não apresentou influência de forma significativa pela utilização da CBC.

A utilização da cinza, no entanto, conseguiu melhorias significativas de resistência característica à compressão, principalmente o traço de 30% que atingiu 31,17 MPa com 28 dias e 44,22 MPa com 120 dias após a moldagem e em analogia temos os valores relacionados ao traço referencia 19,77 MPa e 33,80 Mpa respectivamente. Além de que os traços de 10 e 15% também obtiveram valores superiores em resistência nas duas datas que foram ensaiados comparados ao traço sem substituição.

Os resultados positivos por alguns dos corpos pode ter se dado pelo melhor empacotamento das partículas, que atingiram uma conformidade maior dentro dos *pavers* e mesmo sem a moldagem comumente utilizada, alcançaram bons resultados.

Com base nos resultados obtidos nos diferentes ensaios é possível afirmar que o teor ótimo de substituição é 30% pois obteve as melhores características dentre as substituições, tanto que foi o traço designado para confecção de parte da calçada protótipo junto com o traço referência também para verificação das alterações que poderiam ser influenciadas pela cinza.

Quanto aos resultados do protótipo fica evidente a viabilidade da utilização da cinza pois a temperatura superficial que poderia ser um fator a sofrer alteração já que a cinza tende a trazer uma tonalidade mais escura ao concreto poderia absorver mais o calor dos raios solares, principalmente se tratando da maior das substituições realizadas. Este trabalho mostrou que não é um aspecto que impediria a aplicação dessas peças como pavimento, da mesma forma que as que são utilizadas pois algumas das vezes o pavimento até com menores temperaturas, chegando a ter diferença de 3,33% de diminuição.

Os resultados da drenagem do pavimento não sofreram interferência da substituição pois a infiltração se deu basicamente pelas juntas, portanto a forma de execução e as condições do ensaio são as únicas coisas que o influenciaram. Devido ao nivelamento, ao espaçamento das juntas e da falta de contenção lateral foram encontrados resultados bem mais altos que o esperado.

Conclui-se então que a substituição da cinza em geral é viável sem causar comprometimento significativo das características analisadas. É visto que os resultados deste trabalho cabem somente a partir dos equipamentos, materiais e metodologias adotadas.

6.1 PESQUISAS FUTURAS

Para possíveis pesquisas futuras poderiam ser adotados teores com maior concentração de cinza, devido ao fato de que a melhor substituição foi a maior dentre as ensaiadas, sendo então observadas se dentre estas o teor de 30% continuaria sendo o melhor.

Seria possível também ser feito um novo protótipo de calçada, acrescido com camadas inferiores que contribuíssem melhor com a drenagem e ser seguida todas as instruções da NBR 15953:2011 de assentamento para então serem refeitos os testes de infiltração e comparar os resultados deste trabalho com os novos que seriam obtidos.

REFERÊNCIAS

- AKASAKI, J. L. et al. Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51, 2009. Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2010.
- ALCOPAR – Associação dos Produtores de Bionergia do Estado Do Paraná. 2016. Disponível em <http://www.alcopar.org.br/>. 2016.
- ALMEIDA, F. C. R. et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial byproduct for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, 2015.
- ALMEIDA, S. L. M. et al. **Produção de areia manufaturada em usina piloto**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2005/CAC00210005.pdf>>. Acesso em: 20 Abr. 2019.
- ALTOÉ, S. P. S. **Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção blocos de concreto para pavimentação**. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2013.
- ALTOÉ, S. P. S. **Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers)**. 174f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- AMADEI, I. B. A. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR**. 153 f. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 201.2R**: guide to durable concrete. Detroit, 2002. 41p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-16**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. W. Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005, Atlas de energia elétrica do Brasil, Biomassa. 2 ed. Brasília: ANEEL, 243 p.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002. **Guia básico de utilização do cimento Portland** – BT-106; 7 ed. São Paulo: ABCP, 28 p.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2008. **Pavimentos intertravados - Um caminho de vantagens com baixo custo**. Disponível em: < <http://www.maski.com.br/prefabricados/extras/cartilha-abc-paver/>>. Acesso em: 20 Abr. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e Solo. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508**: Massa específica dos Sólidos. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015.

BESSA, S. A. L., **Utilização da CBC como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**, Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 de Ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 6 Abr. 2019.

BRASIL. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção de vegetação nativa. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 Mai. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm#art83>. Acesso em: 6 Abr. 2019.

CARNIN, R. L. P. et al. Desenvolvimento de peças de concreto (paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, Joinville, v. 5, n. 4, p. 56-67, 2010. Disponível em: <http://www.technocast.com.mx/downloads/guesser/Desen_Artefatos_Pavers_AreiaDesc_Fund.pdf>. Acesso em: 20 Abr. 2019.

CARBONARI, B.T.; GUIZILINI, R.P.; KLEIN, N. S. Estudo do agregado miúdo para a produção de argamassas auto-densável: substituição da areia natural por areia de britagem. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 2008. v. 12., p. 10. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 2 – Safra 2018/19, n.1 – Segundo Levantamento, Brasília, 76 f., ago. 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em 2 Abr. 2019.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 445f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Pozzolanic activity a filler effect of sugarcane bagasse ash in Portland cement an lime mortars. **Cement & Concret Composites**. 2008. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>. 2008. Acesso em: 2 Abr. 2019

CORDEIRO, G.C; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v.23, 2009. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/conbuimat>>. 2009. Acesso em: 2 Abr. 2019.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 281 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

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

FIORITI, C. F; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 32, n. 3, p. 237-244, 2010. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/6013>>. Acesso em: 20 de Abr. 2019.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GARTLAND, Lisa. Ilhas de calor: como mitigar zonas de Calor em áreas urbanas, **Editora Oficina de Texto**, São Paulo, 2010.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. 157f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, 2009.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

IUCN; UNEP; WWF. **The World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development**. International Union for Conservation of Nature (IUCN), United Nations Environment Programme (UNEP) and World Wide Fund for Nature (WWF), Gland, Switzerland, 1980.

JABUR, Andrea Sartori, **Projeto de Pesquisa: MAPLU 2 - Manejo de Águas Pluviais em Meio Urbano - Técnicas Compensatórias**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LIMA, S.A.; SALES, A.; SANTOS, T. J. Caracterização físico-química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando o seu uso em argamassas e concretos como substituto do agregado miúdo. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51, 2009. Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2010.

LIMA, S. A. et al. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 201–212, 2011.

MARCHIONI, M., SILVA, C. O. Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas. São Paulo, **Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)**, 2011. 24p. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/Cartilha_Pav_Intertravado_Permeavel_v1.pdf>. Acesso em: 18 Abr. 2019.

MARTINS, C.H.; MACHADO, P.H.T. Estudo da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas em concretos. In: ECMEC 2010 – Encontro Nacional de Materiais de

Estruturas Compositas, 2010, Porto. **Anais...** ECMEC, 2010. Editora da Universidade do Porto, 2010. 1 CD-ROM.

MARTINS FILHO, S. T., **Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2015. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NUNES, I.H.S. **Estudos das características físicas e químicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para uso na construção**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

PACHECO, J. *et al.* Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 56, 2014, Natal. **Anais...** CBC, 2014. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf>>. Acesso em: 5 Mai 2019.

PIOROTTI, J. L. **Pavimentação intertravada**. **Montana**. Rio de Janeiro, 64 p. 1985.

PRÓ-ÁLCOOL. **Programa Brasileiro do Álcool**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm>>. Acesso em 10 Abr. 2019.

UNEP - United Nations Environment Programme, 2014. Disponível em <http://www.unep.org/>. Acesso em: 15 Abr. 2019.

SALES, A; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, Vol. 30, p. 1114–1122, 2010.

SANTOS, A. Nova norma de execução destaca virtudes do pavimento intertravado. **Cimento Itambé – Massa Cinzenta**. 2011. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/novanorma-de-execucao-destaca-virtudes-do-pavimento-intertravado/>>. Acesso em: 18 Abr. 2019.

SILVA, F. M. et al. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná. 2019. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em: 25 Out. 2019.

TAVEIRA A. et al. Pavimentos intertravados de concreto fabricados com utilização de resíduos de construção e de demolição (RCD). In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos. **Anais...** Feira de Santana, 2009. p. 424-434.

VANDERLEI, R. D., NAGARO, M. F., PEINADO., H.S., BAPTISTA, T. T. A., YASSINE, A.J.N. Desenvolvimento de pastas e argamassas contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar para obtenção de concreto autoadensável. **Revista Tecnológica – Edição Especial 2014 Maringá**, p. 153-161, 2015.

VIRGILIIS, Luís Afonso Corrêa, **Procedimentos de Projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de Cheias**. 2009. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WCED, World Commission on Environment and Development. **Our Common Future**. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1987. 383 p.