

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL -
PPGCiv

SILVIA PAULA SOSSAI ALTOÉ

**RESÍDUOS DE PNEUS E DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇUCAR NA
FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVERS)**

SÃO CARLOS

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL -
PPGCiv

**RESÍDUOS DE PNEUS E DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇUCAR NA
FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVERS)**

SILVIA PAULA SOSSAI ALTOÉ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutora em Estruturas e Construção Civil.

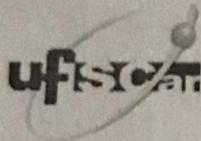
Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

Coorientador: Dr. Carlos Humberto Martins

SÃO CARLOS

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Sílvia Paula Sossai Altoé, realizada em 27/10/2017:

Prof. Dr. Almir Sales
UFSCar

Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri
USP

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
EESC/USP

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba
UFSCar

ALTOE, S. P. S. **Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers)**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 174 páginas. 2017.

RESUMO

A utilização de resíduos na construção civil ganha cada vez mais espaço no universo científico e um ponto muito discutido é a real durabilidade e possibilidade de utilização dos materiais desenvolvidos. A real contribuição desta forma de reciclagem de resíduos vem de encontro a grandes problemáticas ambientais dos diversos setores da indústria, como a utilização de resíduos naturais, a disposição inadequada dos resíduos gerados e todas as consequências por elas geradas. A presente pesquisa teve como proposta analisar a potencialidade de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e do resíduo de pneus na confecção de blocos de concreto para pavimentação em substituição do agregado miúdo, a areia natural. Para isto, inicialmente, os resíduos foram caracterizados para conhecer suas características e viabilidade na substituição, posteriormente foram estudados vários teores de substituição com o objetivo de chegar a um traço ótimo, determinado a partir da análise de propriedades físicas e mecânicas das peças (padrão dimensional, resistência mecânica, absorção de água e índice de desgaste para abrasão). Depois de determinado o traço ótimo foram confeccionadas peças o suficiente para execução de uma calçada protótipo, que foi analisada por um período de 4 meses, segundo os seguintes parâmetros: aspecto geral, infiltração de água, temperatura superficial e durabilidade (absorção e abrasão). O teor considerado ótimo de substituição foi de 27%, sendo 25% de CBC e 2% de resíduo de pneus, isto se deve ao fato do traço apresentar resultados nos ensaios realizados muito próximos do traço referência, ou seja, não influenciando de forma negativa as características analisadas. Um aspecto adicional analisado também foi a eficiência de neutralização dos metais potencialmente contaminantes presentes em ambos resíduos utilizados quando empregados na matriz cimentícia proposta através de ensaios de lixiviação e solubilização, o que foi comprovado, mostrando assim que o *paver* pode ser considerado uma destinação ambientalmente adequada para ambos resíduos. Na análise do comportamento das peças ao longo do uso não foram observadas, nem levantadas nos ensaios realizados, qualquer diferença significativa entre o trecho executado com resíduos e o trecho executado sem resíduos, o que demonstram, novamente, a potencialidade da proposta inicial. Pode-se concluir que, para as condições estudadas, a substituição do agregado miúdo pela CBC e pelos resíduos de pneus é potencialmente viável, contribuindo assim para a obtenção de um produto sustentável.

Palavras-chave: pavers, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, resíduo de pneu, reciclagem.

ALTOE, S. P. S. **Waste tires and the burning of sugarcane bagasse in the manufacture of pavers**. Thesis (Doctorate in Structures and Civil Construction). Federal University of São Carlos. São Carlos. 174 pages. 2017.

ABSTRACT

The use of waste in the construction industry is gaining more space in the scientific universe and a very discussed point is the real durability and possibility of using the materials developed. The real contribution of this form of waste recycling comes against major environmental issues of the various sectors of the industry, such as the use of natural waste, the inadequate disposal of waste generated and all the consequences generated by them. The present research had as proposal to analyze the potential of use of bagasse ash, sugar and the residue of tires in the manufacture of concrete blocks for paving in place of the small aggregate, the natural sand. For this, initially, the residues were characterized to know their characteristics and feasibility in the substitution, later several substitution contents were studied with the objective of reaching an optimal trait, determined from the physical and mechanical properties analysis of the pieces (dimensional standard, mechanical strength, water absorption and abrasion wear index). After determining the optimal trait, enough pieces were made to execute a prototype road, which was analyzed for a period of 4 months, according to the following parameters: general appearance, infiltration, surface temperature and durability (absorption and abrasion). The optimum substitution content was 27%, 25% of BCC and 2% of tire residue, due to the fact that the trait presented results in the tests performed very close to the reference trait, ie, not negatively influencing characteristics analyzed. An additional aspect analyzed was also the neutralization efficiency of the potentially contaminating metals present in both residues used when used in the proposed cement matrix, which was proven, thus showing that the paver can be considered an environmentally adequate destination for both residues. In the analysis of the behavior of the pieces along the use, no significant difference between the run with waste and the run without waste was observed or raised in the tests performed, which again demonstrate the potentiality of the initial proposal. It can be concluded that, for the conditions studied, the replacement of the small aggregate by CBC and tire waste is potentially feasible, thus contributing to the achievement of a sustainable product.

Keywords: pavers, ash from sugarcane bagasse, tire residue, recycling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Distribuição das Usinas de Cana-de-açúcar no estado do Paraná | 28 |
| Figura 2 - Amostras de bagaço e cinza do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas | 30 |
| Figura 3 - Depósito de Pneus a céu aberto e em cursos d'água | 37 |
| Figura 4 - Passarelas na Universidade Estadual de Maringá (a) e Cruzamentos de Avenidas na cidade de Maringá (b) feitas de pavers | 43 |
| Figura 5 - Faixa granulométrica indicada para blocos de concreto e paver | 48 |
| Figura 6 - Vibro-prensa com desforma sobre paletes..... | 49 |
| Figura 7 - Elementos do pavimento intertravado | 50 |
| Figura 8 – Modelos de assentamento de pavimentos intertravados | 51 |
| Figura 9 – Confinamento Externo..... | 53 |
| Figura 10 - Regularização de camada de assentamento | 53 |
| Figura 11 – Assentamento das peças..... | 54 |
| Figura 12 – Compactação Inicial | 54 |
| Figura 13 - Rejuntamento..... | 55 |
| Figura 14 - Organograma Experimental..... | 58 |
| Figura 15 - Pedrisco | 60 |
| Figura 16 – Areia | 60 |
| Figura 17 – Unidade Usaçucar Iguatemi..... | 62 |
| Figura 18 – Saída do Bagaço da Moagem..... | 63 |
| Figura 19 – Montes de Cinza depositados na Usina | 63 |
| Figura 20 – Aspecto Visual da Amostra de CBC..... | 64 |
| Figura 21 – Resíduo de Pneu..... | 65 |
| Figura 22 – Análise Granulométrica por peneiramento (A) e sedimentação (B)..... | 66 |
| Figura 23 – Ensaio de massa específica | 68 |
| Figura 24 – Agitador rotativo de frascos..... | 69 |
| Figura 25 – Ensaio granulométrica resíduo de pneu | 70 |
| Figura 26 – Ensaio de massa específica resíduo de pneu..... | 71 |
| Figura 27 – Ponto de pelota..... | 73 |
| Figura 28 – Betoneira(A) e Vibro-prensa (B) utilizados na fabricação dos pavers | 73 |
| Figura 29 – Produção dos Pavers..... | 74 |
| Figura 30 – Pesagem (A) e medição (B) dos pavers | 75 |
| Figura 31 - Prensa para ensaio de resistência à compressão | 76 |
| Figura 32– Paver na prensa entre os discos..... | 76 |
| Figura 33 – Ensaio de absorção: peças imersas em água (A) e peças na estufa (B) | 79 |
| Figura 34 – Localização da Calçada | 82 |
| Figura 35 – Medição da Temperatura Superficial..... | 84 |
| Figura 36 – Dispositivo de Infiltração..... | 84 |
| Figura 37 – Curva distribuição granulométrica agregado miúdo | 87 |
| Figura 38 – Curva distribuição granulométrica agregado graúdo | 88 |
| Figura 39 - Curva Granulométrica - CBC | 89 |
| Figura 40 - Curva Granulométrica – Resíduo de Pneu | 94 |
| Figura 41 – Curva Granulométrica da mistura..... | 97 |
| Figura 42 – Paver fabricado usualmente na Fábrica de Artefatos da UEM | 99 |
| Figura 43 – Pavers fabricados com incorporação de resíduos | 100 |
| Figura 44 – Resistência à Compressão..... | 102 |
| Figura 45 – Resistência à Compressão Pneu 2% | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 46 – Resistência à Compressão Pneu 5% | 104 |
| Figura 47 - Gráfico Absorção..... | 107 |
| Figura 48 – Índice de desgaste à Abrasão | 108 |
| Figura 49 – Localização da Calçada (A) e condições do local antes da execução (B) | 112 |
| Figura 50 – Esquema da Calçada Executada..... | 112 |
| Figura 51 – Fabricação dos pavers da calçada protótipo..... | 113 |
| Figura 52 – Limpeza e nivelamento do terreno..... | 114 |
| Figura 53 – Execução de Camada de Assentamento..... | 114 |
| Figura 54 – Assentamento dos <i>pavers</i> | 115 |
| Figura 55 – Rejuntamento com areia | 116 |
| Figura 56 – Arremates e contenção lateral..... | 116 |
| Figura 57 – Caçada terminada..... | 117 |
| Figura 58 – Diferença de Coloração | 117 |
| Figura 59 – Coloração da Calçada | 118 |
| Figura 60 – Aspecto Geral da Calçada e das peças..... | 119 |
| Figura 61 – Localização dos Pontos de Leitura | 119 |
| Figura 62 – Temperatura Superficial..... | 123 |
| Figura 63 – Sequência do ensaio de infiltração..... | 124 |
| Figura 64 – Índice de Desgaste – Resistência à Abrasão (mm)..... | 126 |
| Figura 65 - Comparação do Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)..... | 127 |
| Figura 66 – Índice de Absorção de Água – Peças com 4 meses de Utilização | 128 |
| Figura 67 - Comparação do Índice de Absorção de Água | 129 |
| Figura 68 – Comparação da Emissão de CO ₂ nos concreto | 133 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Competências dos atores envolvidos na gestão de resíduos..... | 22 |
| Tabela 2 – Quantidade de consumo de agregados na construção civil | 26 |
| Tabela 3 - Produção de Cana-de-açúcar Safra 2016/2017 | 28 |
| Tabela 4 - Requisitos para blocos de concreto para pavimentação | 45 |
| Tabela 5 – Sugestão de Módulo de Finura | 49 |
| Tabela 6 - Características do aditivo | 61 |
| Tabela 7 – Traços | 72 |
| Tabela 8 – Fator “p” multiplicativo da resistência à compressão dos <i>pavers</i> | 77 |
| Tabela 9 – Coeficiente de student..... | 77 |
| Tabela 10 - Características do Cimento CP V ARI..... | 86 |
| Tabela 11 - Caracterização do agregado miúdo | 87 |
| Tabela 12 – Caracterização do agregado graúdo..... | 87 |
| Tabela 13 – Porcentagem passante (%) - CBC..... | 89 |
| Tabela 14 – Porcentagem retida – Classificação granulométrica CBC..... | 89 |
| Tabela 15 - Coeficiente de uniformidade e curvatura - CBC | 90 |
| Tabela 16 – Uniformidade e distribuição granulométrica - CBC..... | 90 |
| Tabela 17 – Massa Específica - CBC | 91 |
| Tabela 18 – Determinação do Teor de Umidade..... | 91 |
| Tabela 19 – Concentração de ânions no extrato lixiviado - CBC | 92 |
| Tabela 20 – Concentração de ânions no extrato solubilizado - CBC | 92 |
| Tabela 21 – Características granulométricas - Resíduo de Pneu..... | 94 |
| Tabela 22– Massa Unitária - Resíduo de Pneu..... | 95 |
| Tabela 23 – Massa Específica - Resíduo de Pneu | 95 |
| Tabela 24 - Concentração de ânions no extrato lixiviado – Resíduo de Pneu..... | 96 |
| Tabela 25 – Concentração de ânions no extrato solubilizado – Resíduo de Pneu..... | 96 |
| Tabela 26 – Dosagem dos <i>Pavers</i> em massa..... | 98 |
| Tabela 27 – Massa média das peças | 100 |
| Tabela 28 – Tolerância Dimensional..... | 101 |
| Tabela 29 – Resistência à Compressão média e característica estimada..... | 102 |
| Tabela 30 – Estatística Descritiva da Resistência à compressão dos <i>pavers</i> | 105 |
| Tabela 31 – Resultado Teste ANOVA | 105 |
| Tabela 32 – Índice de Absorção de Água..... | 106 |
| Tabela 33 – Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)..... | 108 |
| Tabela 34 - Concentração de ânions no extrato lixiviado – <i>Pavers</i> | 110 |
| Tabela 35 – Concentração de ânions no extrato solubilizado – <i>Pavers</i> | 110 |
| Tabela 36 – Cálculo da Eficiência de Retenção do <i>Paver</i> | 110 |
| Tabela 37 – Medições da Temperatura Superficial da Calçada Protótipo | 120 |
| Tabela 38 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade do solo | 123 |
| Tabela 39 - Resultados obtidos pelo teste de infiltração, ASTM C1701 | 125 |
| Tabela 40 – Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)..... | 126 |
| Tabela 41 – Comparação do Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)..... | 127 |
| Tabela 42 – Índice de Absorção de Água - Peças com 4 meses de Utilização | 128 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 43 – Emissão de CO ₂ dos materiais componentes..... | 132 |
| Tabela 44 – Cálculo da Emissão de CO ₂ por m ³ de concreto..... | 133 |
| Tabela 45 - Preços unitário a dos componentes do concreto..... | 134 |
| Tabela 46 – Custos do Concreto (m ³)..... | 134 |

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.

| | |
|-----------------------|--|
| a/c | Relação Água/Cimento |
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANIP | Associação Nacional da Indústria Pneumática |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ARI | Alta Resistência Inicial |
| CBC | Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar |
| CO₂ | Gás Carbônico |
| COMCAP | Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa - UEM |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| COPEL | Companhia de Energia Elétrica do Paraná |
| CP | Cimento Portland |
| CSA | Canadian Standards Association |
| EPUSP | Escola Politécnica da Universidade de São Paulo |
| fck | Resistência Característica à Compressão |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas |
| kg | Quilograma |
| m² | Metro quadrado |
| m³ | Metro cúbico |
| MAPA | Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| MPa | Mega Pascal |
| RMA | Associação Norte-americana de Borracha |
| SNIC | Sindicato Nacional da Indústria do Cimento |
| t | Tonelada |
| ÚNICA | União da Indústria Canavieira do Estado de São Paulo |

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.1. | <i>OBJETIVO</i> | 17 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos | 17 |
| 1.2. | <i>ESTRUTURA DO TRABALHO</i> | 17 |
| 2. | OS RESÍDUOS SÓLIDOS E SEU APROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .. | 19 |
| 2.1. | <i>LEGISLAÇÃO BRASILEIRA</i> | 19 |
| 2.1.1 | A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)..... | 20 |
| 2.2. | <i>DEFINIÇÃO DE RESÍDUOS</i> | 22 |
| 2.3. | <i>APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL</i> | 25 |
| 2.4. | <i>CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC)</i> | 27 |
| 2.4.1. | A Cana-de-açúcar e o setor Sucroalcooleiro | 27 |
| 2.4.2. | Resíduos gerados no beneficiamento da cana-de-açúcar | 29 |
| 2.4.3. | Aplicação dos resíduos de CBC na Construção Civil | 30 |
| 2.5. | <i>RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS</i> | 35 |
| 2.5.1. | Pneus: características e produção | 35 |
| 2.5.2. | Descarte de pneus | 36 |
| 2.5.3. | Aplicação dos resíduos de pneus inservíveis na Construção Civil..... | 39 |
| 2.6. | <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> | 41 |
| 3. | BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO - <i>PAVERS</i> | 43 |
| 3.1. | <i>PROPRIEDADES DOS PAVERS – NORMAS TÉCNICAS</i> | 44 |
| 3.2. | <i>MATERIAIS, DOSAGEM E EQUIPAMENTOS</i> | 47 |
| 3.2.1. | Materiais | 47 |
| 3.2.2. | Dosagem | 47 |
| 3.2.3. | Equipamentos de fabricação | 49 |
| 3.3. | <i>EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS COM PAVERS</i> | 50 |
| 3.3.1. | Estrutura do Pavimento | 50 |
| 3.3.2. | Controle de execução..... | 52 |
| 3.4. | <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> | 55 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 57 |
| 4.1. | <i>MATERIAIS</i> | 59 |
| 4.1.1. | Aglomerante | 59 |
| 4.1.2. | Agregado Graúdo | 59 |
| 4.1.3. | Agregado Miúdo..... | 60 |
| 4.1.4. | Água | 61 |
| 4.1.5. | Aditivo..... | 61 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1.6. | Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar | 62 |
| 4.1.7. | Resíduo de Pneu Inservível | 64 |
| 4.2. | <i>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS</i> | 65 |
| 4.2.1. | Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar | 65 |
| 4.2.2. | Resíduos de Pneus Inservíveis..... | 69 |
| 4.3. | <i>DOSAGEM, MOLDAGEM E ENSAIOS DOS BLOCOS DE PAVIMENTAÇÃO</i> | 71 |
| 4.3.1. | Dosagem e moldagem | 71 |
| 4.3.2. | Inspeção Visual: dimensões, massa e cor | 74 |
| 4.3.3. | Ensaio de resistência à compressão | 75 |
| 4.3.4. | Ensaio de absorção de água | 78 |
| 4.3.5. | Ensaio de resistência à abrasão..... | 79 |
| 4.3.6. | Ensaio de Lixiviação e Solubilização dos <i>Pavers</i> | 80 |
| 4.4. | <i>CALÇADA PROTÓTIPO</i> | 81 |
| 4.4.1. | Assentamento das peças | 82 |
| 4.4.2. | Inspeção Visual | 83 |
| 4.4.3. | Controle de temperatura superficial | 83 |
| 4.4.4. | Drenagem – Teste de infiltração..... | 84 |
| 4.4.5. | Durabilidade – Abrasão e Absorção de Água | 85 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 86 |
| 5.1. | <i>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</i> | 86 |
| 5.1.1. | Aglomerante | 86 |
| 5.1.2. | Agregado Miúdo..... | 86 |
| 5.1.3. | Agregado Graúdo | 87 |
| 5.1.4. | Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar - CBC | 88 |
| 5.1.5. | Resíduo de Pneu Inservível | 93 |
| 5.2. | <i>DOSAGEM DOS PAVERS</i> | 97 |
| 5.3. | <i>PROPRIEDADES DOS PAVERS</i> | 98 |
| 5.3.1. | Inspeção Visual | 98 |
| 5.4. | <i>CALÇADA PROTÓTIPO</i> | 111 |
| 5.4.1. | Execução da Calçada | 112 |
| 5.4.2. | Inspeção Visual | 117 |
| 5.4.3. | Controle de Temperatura Superficial | 119 |
| 5.4.4. | Drenagem – Teste de Infiltração | 123 |
| 5.4.5. | Durabilidade – Abrasão e Absorção de Água | 125 |
| 5.5. | <i>ESTIMATIVA DO PRODUTO DESENVOLVIDO SOB O ASPECTO SUSTENTÁVEL</i> | 129 |
| 5.5.1. | Redução no consumo de Recursos Naturais..... | 129 |
| 5.5.2. | Neutralização dos metais potencialmente contaminantes presentes nos resíduos | 130 |
| 5.5.3. | Emissão de CO ₂ | 131 |
| 5.5.4. | Comparação de Custos | 133 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6. | CONCLUSÕES | 135 |
| 6.1. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 138 |
| | REFERÊNCIAS | 139 |
| | ANEXO A – LAUDO ENSAIO DE POZOLANICIDADE | 146 |
| | APÊNDICE A – RESUTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA | 147 |
| | APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS TRAÇOS..... | 156 |
| | ANEXO B – LAUDO RESISTÊNCIA À ABRASÃO | 165 |
| | APÊNDICE C – PLANILHA LEITURAS DE TEMPERATURA | 166 |

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os diversos segmentos industriais buscam a cada dia novas tecnologias e sistemas gerenciais que contribuam para o aumento da produção visando atender a um mercado com alto poder de consumo e cada vez mais exigente. Porém, em contrapartida são resultantes desse comportamento produtivo: a necessidade de matéria-prima e a geração, cada vez maior, de resíduos, o que conduz a uma extração indiscriminada, porém ainda necessária, dos recursos naturais e a geração de resíduos de certa forma ignorada.

A cobrança por soluções que minimizem os impactos gerados por este cenário impulsiona os responsáveis pela produção a avaliar e analisar de forma diferente dois extremos da cadeia produtiva: a extração indiscriminada dos recursos naturais e as consequências de uma produção sem controle. Como resultado os setores produtivos buscam a aplicação de práticas e estratégias de gestão ambiental que demonstrem o seu comprometimento com esta nova realidade, agregando, desta forma, mais valor aos seus produtos frente a uma sociedade mais consciente da necessidade da busca pela conservação do meio ambiente (ROSA, 2007).

Uma solução para esta questão, apontada por várias linhas de pesquisa, para minimizar os danos causados ao ambiente e, simultaneamente, garantir a continuidade da produção é a utilização de materiais alternativos e a substituição, total ou parcial, dos recursos naturais, por meio da reciclagem de resíduos. Segundo John (2000) a primeira e mais visível contribuição da reciclagem é a preservação dos recursos naturais. Uma vez que se estes forem substituídos por resíduos pode-se afirmar que ocorrerá um prolongamento da vida útil das reservas naturais e uma redução da destruição da paisagem, flora e fauna.

O setor da construção civil é um dos setores mais promissores para a utilização de resíduos como fonte de matéria-prima, sendo que resíduos das mais diferentes origens têm sido aplicados com sucesso na fabricação de argamassas, concretos, elementos de vedação, entre outros. Essa utilização de resíduos na construção civil vem ao encontro da necessidade do setor de diminuir os impactos ambientais por ele causados: atualmente se estima que a indústria da construção civil seja responsável por 20 a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do planeta (JOHN, 2000).

No Brasil a abordagem à gestão de resíduos não foi tratada de forma clara e direta na legislação ambiental brasileira, sendo implícita e genérica até 2010 quando foi publicada a Lei n.º 12.305, denominada de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto Federal n.º 7.404, de 23 de dezembro de 2010.

A PNRS visa o monitoramento dos resíduos gerados nos processos produtivos industriais e sua gestão integrada, e entre seus princípios estão a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda, e promotor de cidadania.

Desta forma, considera-se que as indústrias não são apenas responsáveis pelos resíduos gerados, mas também por seus produtos até o descarte final, que deverá ter destino ambientalmente correto. O processo produtivo deve ser visto como um todo e integrado à sociedade, de maneira tal que o reaproveitamento do resíduo ou sua reciclagem deve ser definido no início da produção.

A proposta apresentada por este trabalho é o reaproveitamento de dois resíduos por meio da substituição parcial da areia empregada na confecção de *pavers*, o que pode contribuir para diminuição da extração deste material, evitando, assim, a degradação do ecossistema local, devido ao assoreamento causado durante o processo de extração. Para isto, a pesquisa visa estudar o reaproveitamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e do resíduo de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*), em substituição ao agregado miúdo.

Tanto a cinza do bagaço da cana-de-açúcar quanto o resíduo de pneus inservíveis são resíduos gerados, anualmente, em grandes quantidades, que tem tempo de decomposição lenta, e que normalmente ocupam grande volume em aterros, ou ainda, são lançados inadequadamente e de forma indiscriminada no meio ambiente, o que provavelmente tem contaminado o solo, o ar e a água, além de trazer sérios riscos à saúde da população.

Segundo a Associação Nacional das Indústrias Pneumáticas (ANIP, 2016) a produção de pneus novos no ano de 2015 foi de 71,9 milhões de unidades. Deste total, 63,5 % teve como finalidade a reposição, ou seja, cerca de 45 milhões de pneus foram trocados somente no ano de 2015 no país. Ainda segundo a ANIP, desse montante, 46,8% são pneus usados que podem retornar ao mercado para serem ainda utilizados nos veículos ou submetidos a algum tipo de reforma, e 53,2% são pneus inservíveis, que não têm mais utilização veicular. Desde 1999, quando começou a coleta dos pneus inservíveis pelos fabricantes, até o final de 2014, mais de 3 milhões de toneladas de pneus inservíveis, equivalentes a 625 milhões de pneus de passeio, foram coletados e destinados adequadamente. A forma mais comum de destinação dos pneus inservíveis é como combustível alternativo para a indústria de cimento, seguida pela fabricação de granulado e pó de borracha para utilização em artefatos de borracha ou asfalto-borracha, solado de sapato, e

dutos pluviais. Porém, o setor ainda afirma que existe a necessidade de novas aplicações para este material, uma vez que o volume de resíduos gerados anualmente é alto e muitas unidades ainda não são destinados aos 824 pontos de coleta existentes no território brasileiro.

No processo de beneficiamento da cana-de-açúcar o maior subproduto gerado é o bagaço da cana-de-açúcar, utilizado em larga escala como combustível em caldeiras para geração de energia que gera dois tipos de cinza: a cinza pesada e a cinza volante. Se for levado em consideração a expectativa da safra 2016/2017 com um montante de 690,98 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2016), e que todo o bagaço seria utilizado como fonte de energia seriam, então, produzidas aproximadamente 4 milhões de toneladas de cinza por ano.

Anualmente são utilizadas cerca de 378 milhões de toneladas de agregados na fabricação de concretos (SNIC, 2011). A substituição deste agregado pelo resíduo reciclado além de contribuir para a redução da extração dos recursos naturais em grandes quantidades, também pode colaborar para a redução de CO₂ durante o transporte do mesmo até o local de utilização.

Os dois resíduos estudados tem uma característica em comum: a classificação como resíduos do tipo “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte” (ALTOÉ, 2013). Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Essa condição pode fazer com que quando lançados diretamente no solo possam a vir causar algum tipo de contaminação a longo prazo. Esta informação mostra a importância da realização dos ensaios de lixiviação e solubilização tanto para análise da destinação quanto da proposta para utilização destes materiais em diversos produtos. As matrizes cimentícias são conhecidos pela capacidade de promover a neutralização dos contaminantes presentes em diversos resíduos perigosos, mas para comprovar a eficácia deste procedimento também se faz necessária a execução dos mesmos ensaios com o produto final, ou seja, as matrizes cimentícias, garantido desta forma que não ocorrerá qualquer tipo de contaminação do ambiente.

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas utilizando a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos de pneus com sucesso. Mas algo que sempre chamou atenção nas pesquisas com os dois resíduos foi: o aumento da resistência mecânica do concreto quando da utilização da CBC e a redução desta mesma propriedade quando da utilização do resíduo de pneu. E foi à partir desta informação que surgiu a proposta da combinação dos dois resíduos, ou seja a hipótese da pesquisa: buscar um efeito “compensatório” entre eles, para isto a análise partiu de uma pesquisa prévia realizada por Altoé (2013), com a execução de diversos

traços. Nesta pesquisa, apesar de excelentes resultados obtidos com a CBC, não foi possível chegar a uma combinação que se aproximasse das propriedades do traço referência, e foi nesta linha de pensamento que se partiu na busca de novos traços e combinações.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e do resíduo de pneus inservíveis na substituição de agregado miúdo para confecção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*) sujeitos à solicitações leves.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar as características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e dos resíduos de pneus inservíveis quanto à possibilidade de sua aplicação como agregado miúdo;
- Analisar a influência da substituição parcial do agregado miúdo pelos resíduos propostos na resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão dos *pavers*;
- Determinar os teores ótimos de substituição a partir da interpretação dos dados obtidos nos diferentes ensaios realizados com os *pavers*;
- Analisar se os metais presentes na CBC e nos Pneus são neutralizados quando da utilização dos mesmos na confecção dos *pavers*;
- Executar e analisar o comportamento físico e mecânico de uma calçada protótipo, propondo uma metodologia e procedimento de avaliação para calçadas, que assim como esta, sejam executadas com materiais alternativos, como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos de pneus.

1.2. Estrutura do Trabalho

O primeiro Capítulo traz a Introdução do trabalho, onde estão definidos itens importantes para o desenvolvimento do mesmo, como a hipótese, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

No Capítulo 2 estão apresentados os resíduos que foram objeto de estudo da pesquisa, suas principais características, quantidades produzidas, suas aplicações na construção civil e sua influência nas diversas características dos produtos obtidos.

O Capítulo 3 traz pontos importantes para um conhecimento geral do produto a ser desenvolvido pela pesquisa: Blocos de Concreto para Pavimentação (*Pavers*). São abordados os materiais e forma de fabricação das peças, as normas vigentes e as propriedades requeridas por elas, procedimentos de execução e de avaliação dos pavimentos.

A Metodologia adotada e os materiais utilizados são apresentados no Capítulo 4. Neste capítulo todo o programa experimental é descrito, estão relacionadas as normas, materiais, equipamentos e procedimentos utilizados.

Os resultados obtidos e as discussões constam do Capítulo 5. São abordados os resultados obtidos desde a caracterização dos materiais e resíduos utilizados na fabricação das peças até a análise dos parâmetros estabelecidos para o estudo de viabilidade do produto através da determinação de suas propriedades e da construção da calçada protótipo.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

2. OS RESÍDUOS SÓLIDOS E SEU APROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1. Legislação Brasileira

A legislação brasileira, bem como as normas vigentes, sobre a questão dos resíduos é bem específica, sendo o marco inicial a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, denominada de Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). Nela devem ser destacados os seguintes princípios: a prevenção e precaução, instrumentalizados através do licenciamento ambiental das atividades efetivamente e/ou potencialmente poluidoras, e o poluidor-pagador, determinando que os poluidores devam se comprometer pela degradação causada pela sua atividade.

Em seu artigo a PNMA traz o princípio da publicidade ou princípio da informação ambiental através de um Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA). Dentro do SISNAMA foi criado ainda o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo, que visa o estabelecimento de normas, parâmetros e padrões para o desenvolvimento visando a manutenção da qualidade ambiental, seguindo o princípio da preservação da espécie humana, ou seja, a possibilidade de desenvolvimento vinculado a condição da população humana a usufruir de um ambiente saudável. As resoluções publicadas pelo CONAMA visam o controle das atividades industriais e da gestão dos resíduos por elas geradas, que possam de alguma forma degradar o ambiente.

A Constituição Federal (CF) de 1988 traz o meio ambiente como um bem de uso comum pertencente a todos e dotado de valor econômico e sendo assegurada a legalidade das legislações ambientais já existentes anterior a ela. O artigo 225 da CF determina que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.” É previsto ainda no artigo 170 a defesa do meio ambiente no processo de elaboração de produtos e serviços, ou seja, o não cumprimento deste princípio é violação direta da Constituição Federal Brasileira.

Outro marco da legislação ambiental brasileira foi a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, denominada de Lei de Crimes Ambientais, regulamentada em 22 de julho de 2008 pelo Decreto Federal n.º 6.514, que modificou o ordenamento jurídico das atividades lesivas ao meio ambiente, alterando as condutas de simples contravenções para crime. Os crimes ambientais podem acarretar em multas e, conforme determinado no artigo 75 da lei, podem

variar entre o mínimo de R\$ 50,00 (cinquenta reais) e o máximo de R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais), corrigidos periodicamente, com base nos índices estabelecidos na legislação pertinente.

O último diploma legal regulador das questões ambientais em âmbito nacional é a Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto Federal n.º 7.404, de 23 de dezembro de 2010, denominada de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nela as questões dos resíduos antes tratadas de forma genérica e implícita em outras normativas legais passam a vigorar explicitamente na cultura das organizações brasileiras, alterando o paradigma tradicional da concepção industrial do estado brasileiro. Dentre os princípios desta lei pode-se citar a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, considerando que os geradores não são apenas responsáveis pelos resíduos por eles gerados, mas também pelos seus produtos até o descarte final, que deverá ter destino ambientalmente correto.

A PNRS traz definidos como objetivos a não geração, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e a disposição final, além da redução, da utilização responsável dos recursos naturais e reutilização dos resíduos gerados. Para atingí-los são determinados instrumentos efetivos como a logística reversa (LR) e os planos de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS). Enfim, a PNRS restringiu as lacunas existentes na legislação ambiental brasileira, uma vez que a questão dos resíduos sólidos ainda era tratada através de normas infra legais, como normas da ABNT, portarias e resoluções, caracterizando que o Brasil está criando um anteparo legal e eficiente para o cumprimento dos regimentos da Constituição Federal Brasileira.

2.1.1 A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

Até a publicação da Lei n.º 12.305, denominada de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto Federal n.º 7.404, de 23 de dezembro de 2010, a abordagem da gestão de resíduos não foi tratada de forma clara e direta na legislação ambiental brasileira, sendo implícita e genérica. A PNRS visa o monitoramento dos resíduos gerados nos processos produtivos industriais e sua gestão integrada, e entre seus princípios estão a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania.

Desta forma, os agentes geradores de resíduos tornam-se não apenas responsáveis pelos resíduos gerados, mas também por seus produtos até o descarte final, que deverá ter destino ambientalmente correto. O processo produtivo deve ser visto como um todo e integrado à sociedade, de maneira tal que o reaproveitamento do resíduo ou sua reciclagem deve ser definido no início da produção.

Na Política Nacional de Resíduos Sólidos são definidas as responsabilidades na gestão dos resíduos sólidos gerados no Brasil. Sendo atribuídas a responsabilidade pela gestão “às pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente pela geração de resíduos sólidos” (PNRS, 2010), e aos executores das ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento desses resíduos, sejam estes internos ou externos, ligados direta ou indiretamente às atividades do empreendimento.

Nesse contexto, a PNRS desempenha papel importante na articulação e aplicação de outras legislações e normas como a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), o Estatuto das Cidades e a Política Nacional de Educação Ambiental, visto que é fundamental o planejamento integrado para a concepção de empreendimentos e regularização dos empreendimentos já existentes.

Para potencializar a aplicação da PNRS foram definidas competências específicas aos diversos atores, resultando em mudanças no setor produtivo, da produção ao consumo, e nas diversas esferas da sociedade, incluindo órgãos públicos e instituições de ensino e pesquisa (Tabela 1).

Observa-se que a competência atribuída aos atores públicos, implica na necessidade de integração ambiental entre as atividades praticadas no território do ente federativo, caracterizando uma mudança na aplicabilidade das diretrizes ambientais e maior comprometimento do poder público.

A concepção das ações dos empreendedores/produtores influencia diretamente na mudança do paradigma atual das atividades industriais uma vez que a responsabilidade pela destinação final remete à busca pela redução na geração dos resíduos. A relação sinérgica entre o setor produtivo e os comerciantes, propicia a execução da logística reversa prevista no art. 33 da PNRS.

Tabela 1 – Competências dos atores envolvidos na gestão de resíduos

| ATOR | COMPETÊNCIAS |
|---------------------------|---|
| Público | - propor de ações favoráveis à PNRS como: elaboração de Planos de Resíduos Sólidos Municipais Estaduais e Nacional; implementação de ações que visem a valorização dos resíduos; articulação entre as atividades econômicas. |
| Empreendedores/produtores | - inserir dos seus produtos no mercado com retorno planejado; - buscar por novos produtos, elementos e materiais que sejam passíveis de reaproveitamento; - desenvolver de novas tecnologias em parceria com instituições de ensino e pesquisa. |
| Comerciantes | - atuar como centrais de transbordo dos materiais ou embalagens provenientes das atividades industriais. (Elo entre indústria e consumidores. |
| Consumidores | - modificar costumes, visando o aumento da qualidade de vida e a preservação do ambiente, como colaboradores diretos na aplicação das ações propostas pelos demais atores. |

Fonte: PNRS (2010)

De forma geral, verifica-se que a Política Nacional de Resíduos Sólidos vem alterar a sistemática da cadeia de consumo, criando desafios ao setor produtivo, aos gestores públicos e à sociedade, aliando as questões ambientais à concepção de produto considerando a responsabilidade da fabricação até o retorno para o reaproveitamento no ciclo de produção (CORBUCCI NETO, 2012).

2.2. Definição de Resíduos

As atividades antrópicas, inevitavelmente, são geradoras de diversos tipos de resíduos que podem poluir os compartimentos água, ar e solo por emissões, deposição, disposição, descarga, infiltração, carreamento, acumulação, percolação, injeção ou enterramento no solo ou subsolo de substâncias ou produtos poluentes em estado sólido, líquido ou gasoso. Este

estudo se concentra na geração, gestão, armazenamento, coleta, transporte, transbordo, tratamentos e disposição final dos resíduos sólidos provenientes das atividades industriais.

Segundo a Lei nº. 12305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos:

“resíduos sólidos é todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade e cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.”

Resíduos sólidos são definidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT:2004), como sendo:

“todo resíduo nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Gerador é a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado que gere resíduos sólidos por meio de suas atividades, sendo estas consideradas desde a extração de matéria-prima até o consumo do produto final (BRASIL, 2010).

A Lei nº 12305:2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos, diz que resíduos sólidos podem ser classificados pela sua natureza física, composição química e por sua origem que pode ser domiciliar, comercial, público e de serviços de saúde, portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, industrial, radioativo, espacial, agrícola e entulho.

A classificação dos resíduos sólidos é fundamental para o estabelecimento de normas, leis, padrões, tratamentos e gestão desde a fonte geradora à disposição final ou ao reaproveitamento destes resíduos como matéria-prima de outros setores industriais. Desta forma, fixa-se a necessidade de conhecimento e classificação dos resíduos sólidos gerados, envolvendo a identificação criteriosa da matéria-prima e do processo ou atividade que lhes

deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT, 2004).

Segundo a ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados em duas classes distintas, a Classe I, composta pelos resíduos perigosos, e a Classe II, composta pelos resíduos não perigosos, e subdivida em Classe II A – Resíduos Não Inertes e Classe II B – Resíduos Inertes.

A PNRS traz a seguinte classificação para os resíduos sólidos (BRASIL, 2010) quanto a origem:

“I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Já quanto a periculosidade a PNRS traz a seguinte classificação:

II - quanto à periculosidade:

a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;

b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea "a".

Parágrafo único. Respeitado o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea "d" do inciso I do caput, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.”

2.3. Aproveitamento De Resíduos Na Construção Civil

Um dos maiores desafios da construção civil, principalmente, nos países em desenvolvimento, é atender as necessidades da sociedade como um todo no que se refere à melhorias e ampliações do ambiente construído, seja na forma de moradia, edificações públicas e infraestrutura, com um emprego cada vez menor de recursos naturais (CHEN; CHAMBERS, 1999 *apud* JOHN, 2000).

Segundo John (2000), alguns fatores são determinantes para o consumo de recursos naturais na construção civil em determinadas regiões:

- a) A taxa de resíduos gerados;
- b) A taxa de reposição das estruturas construídas e a vida útil destas;
- c) Manutenções nas construções existentes, inclusive as oriundas de manutenção por falhas construtivas;
- d) As perdas incorporadas nos edifícios;
- e) A tecnologia empregada.

A determinação exata da quantidade dos recursos consumidos é muito difícil de ser realizada. Desta forma, adota-se uma faixa de recursos naturais extraídos do planeta entre 20% e 50%. O valor como citado anteriormente varia de região para região, isto pode ser comprovado pela Tabela 2, adaptada de valores pesquisados por John (2000), que apresenta a

quantidade de consumo de agregados naturais na construção civil no Japão, no Reino Unido e nos Estados Unidos.

Tabela 2 – Quantidade de consumo de agregados na construção civil

| PAÍS | ANO | QUANTIDADE (ton./hab.ano) | FONTE |
|-------------|------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Japão | 1995 | 9,4 | KASAI (1998) * |
| Reino Unido | 1998 | 6,0 | DERT (1998) * |
| EUA | 1999 | 7,5 | MATOS e WAGNER (1999) * |

Fonte (*) *apud* John (2000)

Pode-se dizer que o consumo de agregados naturais no Brasil cresce proporcionalmente à quantidade de cimento produzida, se for levado em consideração um traço médio em massa de 1:6 (JOHN, 2000), e uma produção de aproximadamente 55 milhões de toneladas de cimento Portland entre os anos de 2016 e 2017 (SNIC, 2017), chegamos a um consumo de 330 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. É importante lembrar que este número representa somente os materiais para este fim, não estão computados agregados utilizados na fabricação de outros materiais e componentes, os resíduos gerados tanto na indústria como também na extração das matérias primas ou ainda os utilizados na pavimentação.

Uma solução para este problema, apontada por diversos pesquisadores, é a reciclagem de resíduos industriais. Segundo John (2000) a primeira e mais visível contribuição da reciclagem é a preservação dos resíduos naturais. Uma vez que se estes forem substituídos por resíduos pode-se afirmar que ocorrerá uma prolongação da vida útil das reservas naturais e uma redução da destruição da paisagem, flora e fauna.

Esta prática teve início com o objetivo de dar destinação final aos entulhos e ruínas decorrentes da segunda guerra, e por outro lado atender a demanda de materiais para reconstruir o que havia sido destruído. Porém, esta técnica, apesar de ser aplicada há bastante tempo, é pouco difundida e aceita, de acordo com Levy e Helene (2002) alguns países tem maior grau de desenvolvimento e uma maior escala de utilização dos resíduos. As pesquisas estão voltadas para a utilização de resíduos em substituição aos aglomerantes e agregados em concretos, argamassas, blocos de vedação e pavimentação.

Outros aspectos devem ser levados em consideração quando da análise da viabilidade da reciclagem dos resíduos. O primeiro é a diminuição de resíduos enviados a aterros ou então

destinados de forma inadequada, gerando contaminação de todos os compartimentos ambientais. Depois podem ser enumerados: a redução do consumo energético para a produção de um determinado bem, redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto, geração de empregos e aumento da competitividade da economia, entre outros (JOHN, 2000).

A utilização de resíduos como material alternativo vem se mostrando em diversas pesquisas uma grande oportunidade de reciclagem de resíduos industriais como materiais para diversas aplicações. Exemplo disto é a utilização de resíduos de mármore e granito, resíduos da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar, a borracha de pneus inservíveis, a areia de fundição e também os próprios resíduos da construção civil e da demolição.

2.4. Cinza Do Bagaço De Cana-De-Açúcar (CBC)

A utilização de concreto nas construções cresce anualmente, elevando, conseqüentemente o consumo de Cimento Portland e de agregados naturais, matérias-primas na confecção dos concretos. Com a finalidade de reduzir os custos do produto final e também diminuir a degradação ambiental, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de substituir os componentes do concreto por materiais alternativos, com composição semelhante. Por isso, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), subproduto da queima do bagaço como combustível na geração de energia, tornou-se alvo de investigações como material substituto tanto do aglomerante quanto do agregado (CHUSILP; JATURAPITAKKU; KIATTIKOMOL, 2009).

2.4.1. A Cana-de-açúcar e o setor Sucroalcooleiro

A cana-de-açúcar (*Sacharam*) é uma planta tipicamente tropical, pertence à família das gramíneas ou poáceas, que possui exclusiva habilidade de estocar sacarose nos colmos (CHEN; CHOU, 1993). É originária do sudeste asiático e se adaptou muito bem ao Brasil, quando começou a ser cultivada pelos portugueses durante o período de colonização do país. Rapidamente passou a ter uma significativa importância econômica, o que é claramente visto pelos índices de produtividade divulgados todos os anos pelos órgãos oficiais (CONAB, 2016).

A cana-de-açúcar é destinada principalmente a fabricação de açúcar e álcool, sendo que o Brasil é responsável pela maior produção mundial de açúcar e produtor de 60% do

álcool etílico produzido no mundo (MAPA, 2007; ÚNICA, 2008). A produção prevista para a safra 2016/2017 é de 690,98 milhões de toneladas, com um crescimento estimado em 3,8% em relação à safra anterior. A área cultivada foi de 9.073,7 mil hectares, aumento de 4,8%, se comparada com a safra 2015/2016 (CONAB, 2016). Na Tabela 3 estão apresentados os dados de produção nas diferentes regiões do país.

Tabela 3 - Produção de Cana-de-açúcar Safra 2016/2017

| REGIÃO | ÁREA CULTIVADA (em mil ha) | PRODUÇÃO (em mil ton.) |
|---------------|-------------------------------|---------------------------|
| Norte | 52,3 | 3.414,00 |
| Nordeste | 931,8 | 49.897,2 |
| Centro Oeste | 1.751,6 | 136.386,7 |
| Sudeste | 5.715,2 | 454.880,2 |
| Sul | 622,9 | 46.400,3 |
| TOTAIS | 9,073,7 | 690.978,4 |

Fonte: CONAB, 2016

O estado do Paraná produz sozinho cerca de 46 mil de toneladas., representando 5% da produção nacional de cana-de-açúcar. Este volume é processado em 30 usinas e destilarias, quantidade que vem aumentando proporcionalmente à quantidade produzida. Estas usinas estão em sua maioria localizadas na região Norte e Noroeste do estado, como pode ser visto na Figura 1, que representa a localização das usinas no estado do Paraná.

Figura 1 - Distribuição das Usinas de Cana-de-açúcar no estado do Paraná



Fonte: ALCOPAR, 2016

2.4.2. Resíduos gerados no beneficiamento da cana-de-açúcar

A fabricação do açúcar e do álcool compreendem várias etapas. Tanto para a fabricação de açúcar como do álcool as etapas iniciais do processo de produção englobam a colheita e transporte da cana até a usina, a lavagem e o processamento para extração do caldo. Posteriormente, para produção de açúcar, o caldo é tratado, e para produção de álcool o caldo é tratado e fermentado. Sabe-se que a escolha do produto final depende do mercado financeiro interno e externo e que a produção aumenta no produto que estiver mais viável financeiramente.

Durante seu beneficiamento a cana-de-açúcar gera uma série de resíduos, que vão desde as folhas e cascas utilizadas como fontes de nutrientes para ração animal até a vinhaça que processada através de um digestor anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) gera biogás (CHAUHAN; CHAUDAHARY; SAMAR, 2011). Um resíduo gerado em grande quantidade é o bagaço, utilizado em larga escala como combustível para todo processo produtivo bem como em centrais de cogeração de energia elétrica, devido a seu alto poder calorífico (SALES; LIMA, 2010). Segundo Akasaki *et al.* (2010), a energia elétrica produzida pode atender as necessidades da usina possibilitando, com isto, a sua autossuficiência e ainda gerar excedentes exportáveis às concessionárias de energia.

O setor industrial representa mais que um terço do consumo de todos os tipos de energia, seja na forma de vapor, de combustíveis ou de energia elétrica. Este alto consumo traz consigo, além de uma demanda muito alta de energia elétrica, principal fonte de energia da indústria, vários impactos ao meio ambiente. Como solução para este problema especialistas apontam a reciclagem de materiais alternativos como fonte de energia. Um exemplo disto é o que a indústria de açúcar faz com o bagaço da cana-de-açúcar que serve de combustível para as caldeiras e termoelétricas (CHAUHAN; CHAUDAHARY; SAMAR, 2011).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), o bagaço de cana é o recurso de maior potencial na geração de energia elétrica no país: em média, cada tonelada de cana processada requer cerca de 12 kWh. Sabe-se que os custos de geração são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, o que possibilita por meio da cogeração a autossuficiência do setor em termos de suprimento energético, permitindo também a comercialização do excedente de energia elétrica. Vale destacar que o período de colheita da cana-de-açúcar coincide com o de estiagem das principais bacias hidrográficas do

parque hidrelétrico brasileiro, tornando uma opção ainda mais vantajosa na geração de energia pela queima do bagaço. Durante a queima do bagaço para a geração de energia é produzido a Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC) que pode ser coletada no fundo da caldeira.

Para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida são gerados cerca 6 kg de CBC (CORDEIRO, 2006). Se for levado em consideração a safra nacional 2016/2017 com um montante de 690,98 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, e que todo o bagaço seria utilizado como fonte de energia seriam, então, produzidas aproximadamente 4 milhões de toneladas de CBC. A Figura 2 mostra o aspecto do bagaço e da cinza da cana-de-açúcar.

Figura 2 - Amostras de bagaço e cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzidas em diferentes temperaturas



Fonte: Cordeiro, 2006

A correta destinação deste resíduo constitui um dos maiores problemas das usinas após a limpeza das caldeiras, que é aproveitado na adubação ou então é lançada no ambiente sem tratamento adequado. Várias pesquisas demonstram que a CBC possui poucos nutrientes, além de ter degradação lenta, o que não justificaria a sua utilização como fertilizante (SOUZA *et al.*, 2007; NUNES, 2009).

A CBC apresenta características que indicam a possibilidade de sua utilização como material inerte, em substituição à areia, ao invés de ser utilizada na fertilização das lavouras, já que não possui propriedades específicas para este fim (LIMA; SALES; SANTOS, 2010). Segundo a classificação de resíduos vigente no Brasil (ABNT, 2004), a CBC é considerada um resíduo Classe II A (resíduos não perigosos e não inertes), o que a torna indicada para utilização em matrizes cimentícias.

2.4.3. Aplicação dos resíduos de CBC na Construção Civil

A incorporação da CBC na Construção Civil pode trazer vantagens uma vez que este resíduo pode ser utilizado em substituição aos materiais necessários a este setor industrial, preservando, assim, os recursos naturais não renováveis (AKASAKI *et al.*, 2010).

Segundo Lima, Sales e Santos (2010), é de extrema importância o estudo quanto à composição da CBC quando da utilização como adições minerais, sendo assim, a aplicação das cinzas deve ser realizada de acordo com sua composição química e mineralógica. Como pozolanas devem ser utilizadas as cinzas predominantemente amorfas, por apresentarem maior reatividade (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; BAHURUDEEN *et al.*, 2014), já as cinzas predominantemente cristalinas, apresentam maior eficiência quando aplicadas como material inerte (ALMEIDA *et al.*, 2015; SALES; LIMA, 2010).

As pesquisas estão voltadas para determinação da composição química e das características mineralógicas, análise da resistência mecânica e durabilidade, além da influência da temperatura de queima do bagaço da cana-de-açúcar e da moagem em todas as outras características da CBC. A seguir serão relacionadas às principais características da CBC e as principais pesquisas realizadas sobre elas.

2.4.3.1. *Composição química e características mineralógicas*

A CBC em sua composição química apresenta dióxido de silício (SiO_2) em diferentes concentrações. Porém, segundo Akasaki *et al.* (2010), apesar das diferentes concentrações de SiO_2 , as diferenças mais relevantes na CBC dizem respeito à forma como a sílica presente nela pode ser encontrada, na forma cristalina ou amorfa, determinado, assim, sua reatividade.

As características mineralógicas da CBC dependem da temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar, pois este fator determina o surgimento de fases amorfas ou cristalina da sílica. De acordo com Cordeiro (2006), quanto maior a temperatura de queima maior a cristalinização dos compostos, indo desde fases amorfas para temperaturas mais amenas, até picos pronunciados de cristalização para temperaturas mais elevadas.

De acordo com Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2009) que analisaram as características da CBC para um intervalo de temperaturas de queima de 400°C a 900°C, controlada em laboratório, a CBC obtida com queima controlada até 600°C pode ser utilizada como pozolana, apresentando, nestas condições, atividade pozolânica recomendada pelos requisitos da NBR 12653:2014 (NBR, 2014). Estes resultados demonstram que a temperatura de calcinação é fator determinante para a obtenção de CBC reativas.

Para avaliar as características e potencialidades da CBC, Frias *et al.* (2011) analisaram a CBC obtida em duas situações: na própria usina como resultado da cogeração de energia e uma cinza produzida no laboratório em condições controladas. Apesar das amostras apresentarem uma composição química e mineralógica semelhantes, para se ter ganhos de qualidade no resíduo gerado pela queima, se faz interessante uma gestão adequada do bagaço antes de sua utilização como combustível, com a devida remoção de contaminantes, a fim de se ter um material limpo para queima e, se possível, controlar a temperatura de queima em torno de 800 ° C. Com estas condições as cinzas podem ter características semelhantes as que foram produzidas em laboratório, no que diz respeito ao comportamento pozolânico.

Altoé (2013) analisou a CBC por meio da Difractometria de Raios-X e do ensaio de atividade pozolânica para diferentes temperaturas de queima. As cinzas provenientes da queima do bagaço a temperaturas mais baixas, 600°C e 650°C, e coletadas na piscina de decantação da água proveniente da lavagem das chaminés de uma usina, apresentaram atividade pozolânica.

A CBC quando obtida à temperaturas de calcinação de 700°C, segundo Bahududeen e Santhanam (2015), apresenta elevada atividade pozolânica, e as partículas com dimensões inferiores a 53 µm têm propriedades adequadas para serem classificadas com material suplementar cimentício.

2.4.3.2. Resistência mecânica

Quando se estuda a possibilidade da incorporação de um resíduo em concretos e argamassas uma das questões mais levantadas é a influência deste resíduo na resistência à compressão do concreto ou argamassa fabricados. No caso da CBC os estudos apontam para uma melhora significativa nesta propriedade, o que pode contribuir para a diminuição no consumo de cimento na confecção de concretos e argamassas, auxiliando, assim, na redução do impacto ambiental causado pela emissão de CO₂ pelas fábricas cimenteiras. A forma de utilização mais estudada é a confecção de concretos e argamassas onde a CBC substitui parcialmente, tanto o cimento quanto o agregado miúdo.

O aumento de resistência em concretos confeccionados com CBC em substituição aos agregados ou ao cimento se dá pelo efeito filler da cinza e também por sua atividade pozolânica quando obtida através de queima com temperatura controlada, segundo Cordeiro *et al.* (2008)

O uso de CBC em substituição ao cimento pode chegar a teores de 20% na confecção de concretos, apresentando melhora de características como: aumento de resistência, diminuição da permeabilidade, maior resistência à penetração de cloretos, o que melhora a durabilidade. Esta propriedade está ligada ao fato das pequenas partículas da CBC preencherem os vazios e espaços anteriormente ocupados por ar, produzindo, assim, um concreto mais denso (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007; CHUSILP, JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMO, 2010).

A cinza volante, ou cinza leve, pode apresentar atividade pozolânica, como estudado por Hojo (2014) que utilizou a cinza volante como substituto ao cimento e comprovou que é um resíduo viável para substituir parcialmente o aglomerante com o índice de atividade pozolânica superior ao mínimo exigido. Nos ensaios com os corpos de prova de concreto com traço com substituição de até 7,5% foi obtida um valor de resistência semelhante ao traço de referência, com uma redução no consumo de cimento de 367 kg/m³ para 339 kg/m³.

Ao investigar a influência da substituição do cimento por diferentes teores de CBC, Bahurudeen *et al.* (2015) concluíram que os concretos produzidos apresentaram redução do calor de hidratação, aumento de resistência à compressão, redução da permeabilidade e retração por secagem similar ao concreto referência.

Porém, a falta de controle nos processos de geração das cinzas, no que diz respeito ao controle de temperatura de queima e de resfriamento das cinzas, faz com que esses resíduos apresentem muitas vezes pouca reatividade e tornem menos atrativa a sua utilização em compostos cimentícios. De acordo com Lima, Sales e Santos (2010), apesar de também apresentar esta condição, a CBC ainda tem se mostrado como um resíduo viável para a utilização como material de construção, principalmente em substituição à areia natural.

Em seu estudo sobre a fabricação de artefatos utilizados na infraestrutura urbana com teores de substituição de areia por CBC, Bessa (2011) chegou a conclusão, após análise mecânica, que houve um ganho de resistência e que a durabilidade não foi afetada.

Altoé (2013) estudou a potencialidade da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e do resíduo de pneus inservíveis na substituição parcial de agregado miúdo na confecção de pavers. Na resistência à compressão os pavers produzidos com os teores de 10%, 15%, 20% e 25% de substituição de areia por CBC apresentaram um aumento significativo em relação ao traço referência com resistências superiores ao exigido pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) que é de 35 MPa. O aumento do teor de substituição também contribuiu para a redução da absorção de água. Além disso, o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apontou uma grande incidência de cristais de silicato de

cálcio hidrato (C-S-H) na matriz cimentícia que é responsável pelas características mecânicas do concreto.

De acordo com Almeida *et al* (2015) houve uma melhora nas propriedades mecânicas das argamassas produzidas com 30% de CBC em substituição a areia natural. Além disso, essas argamassas tiveram uma maior resistência à penetração de cloretos.

Alguns estudos também focaram na produção de concretos autoadensáveis (CAA), como Vanderlei *et al.* (2015) que realizaram a dosagem de pastas e argamassas com substituição parcial de areia por CBC até um teor de 10%, e comprovaram a real possibilidade de incorporação sem que haja prejuízo nas propriedades reológicas e mecânicas, permitindo, assim, a redução no consumo de areia, e proporcionando o aproveitamento do resíduo CBC como agregado na construção civil.

2.4.3.3. *Durabilidade*

A capacidade do concreto de resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, à abrasão e aos processos de deterioração pode ser definida como durabilidade, e está ligada a fenômenos físico-químicos que ocorrem entre os constituintes do concreto e os agentes agressivos (AKASAKI *et al.*, 2010).

O índice de vazios e a conexão entre os poros dos concretos determinam a passagem de líquidos e gases. Desta forma quanto maior a permeabilidade maior a possibilidade de ocorrerem reações que levam à perda de durabilidade. Assim, a durabilidade do material pode ser avaliada através do índice de vazios e da absorção de água por capilaridade (AKASAKI *et al.*, 2010).

O comportamento frente à penetração de íons cloreto serve para indicação de durabilidade. Em ensaios realizados por Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) observou-se que a carga passante em pastas de cimento diminui com o aumento do teor de substituição do cimento por CBC.

Devido ao tamanho de suas partículas, a CBC contribui para a diminuição da permeabilidade dos concretos quando utilizada em substituição de cimento, sendo que os melhores resultados são para substituições de 30% em massa. Segundo Chusilp, Jatutapitakkul e Kiattikomol (2010) a permeabilidade diminui com o aumento do teor de substituição. Este teor de substituição também foi apontado por Rukzon e Chindaprasirt (2012) como teor ótimo de substituição do cimento, reduzindo a penetração de cloretos e melhorando a resistência dos concretos.

De acordo com Lima *et al* (2011) os ensaios de carbonatação e abrasão de concretos fabricados com a cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo obtiveram resultados similares aos do concreto referência.

Para avaliar a durabilidade de argamassas produzidas com CBC em substituição à areia natural, Sales *et al* (2014) realizaram ensaios de carbonatação acelerada e penetração de cloretos para várias porcentagens de substituição. Para teores de 30% e 50% ocorreu uma redução da penetração de cloretos, já a profundidade de carbonatação das argamassas com teor de 30% foi semelhante à da argamassa referência.

O aumento do teor de substituição de areia por CBC também contribuiu para a redução da absorção de água em blocos de concreto para pavimentação, alcançado notáveis 3,4% para o teor de 20% e 3,42% para o teor de 25% (ALTOÉ, 2013), índices extremamente inferiores ao determinado pela norma NBR 9781:2013 que estabelece o limite de 6% (ABNT, 2013).

2.5. Resíduos de Pneus Inservíveis

2.5.1. Pneus: características e produção

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em sua Resolução nº416/2009 classifica e define os pneus da seguinte forma:

“I - Pneu ou pneumático: componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em uma roda de veículo e contendo fluído(s) sobre pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo;

II - Pneu novo: pneu, de qualquer origem, que não sofreu qualquer uso, nem foi submetido a qualquer tipo de reforma e não apresenta sinais de envelhecimento nem deteriorações, classificado na posição 40.11 da Nomenclatura Comum do Mercosul-NCM;

III - Pneu usado: pneu que foi submetido a qualquer tipo de uso e/ou desgaste, classificado na posição 40.12 da NCM, englobando os pneus reformados e os inservíveis;

IV - Pneu reformado: pneu usado que foi submetido a processo de reutilização da carcaça com o fim específico de aumentar sua vida útil, como: a) recapagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem; b) recauchutagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros; e c) remoldagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos.

V - pneu inservível: pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma.” (CONAMA, 2009)

Com a implantação do Plano Geral de Viação Nacional em 1934 inicia-se a produção de pneus no Brasil. Porém, o crescimento definitivo da produção nacional se dá com a instalação no Rio de Janeiro da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha, em 1936, e já nos primeiros anos foram produzidos 29 mil pneus. Entre 1938 e 1941, outros grandes fabricantes do mundo passaram a produzir pneus no Brasil, elevando a produção nacional para 441 mil unidades. No final dos anos 1980, o Brasil já tinha produzido mais de 29 milhões de pneus (ANIP, 2016).

Desde então, o Brasil conta com a instalação de 15 fábricas de pneus, das quais cinco são internacionais: Bridgestone, Continental, Goodyear, Michelin e Pirelli (ANIP, 2016).

Para atender a todas as exigências de desempenho e segurança vários componentes e processos são combinados durante a produção. As principais matérias-primas são borracha sintética, borracha natural, derivados de petróleo como o negro de fumo, cabos e cordonéis de aço e produtos químicos como o enxofre. A parcela de utilização de cada um dos itens de composição é definida de acordo com o uso do produto final, assim como os processos de fabricação, seguindo especificações técnicas e procedimentos pré-determinados (ANIP, 2016).

A produção brasileira de pneus no ano de 2015 foi de aproximadamente 68,631 milhões de unidades, divididas entre pneus de cargas, de caminhões, carros, motos e bicicletas (ANIP, 2016). Ainda, segundo relatórios da ANIP, aproximadamente 83% dos pneus fabricados são consumidos pelo mercado nacional, seja pelas revendas (63%) ou pelas montadoras de carros (20%). Assim, pode-se dizer que aproximadamente 57 milhões de pneus são comercializados no território nacional.

2.5.2. Descarte de pneus

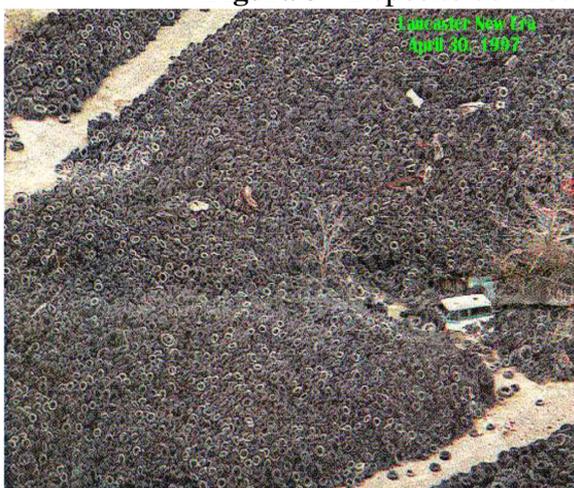
De acordo com a ANIP, cerca de 43 milhões de pneus são trocados anualmente no país. Desse montante, 46,8% são pneus usados que podem retornar ao mercado para serem ainda utilizados nos veículos ou submetidos a algum tipo de reforma, e 53,2% são pneus inservíveis, que não têm mais utilização veicular. Desde 1999, quando começou a coleta dos pneus inservíveis pelos fabricantes, até o final de 2014 mais de 3 milhões de toneladas de pneus inservíveis, equivalentes a 625 milhões de pneus de passeio, foram coletados e

destinados adequadamente. A forma mais comum de destinação dos pneus inservíveis é como combustível alternativo para a indústria de cimento, seguida pela fabricação de granulado e pó de borracha para utilização em artefatos de borracha ou asfalto borracha, solado de sapato, dutos fluviais. Porém, o setor ainda afirma que existe a necessidade de novas aplicações para este material, uma vez que o volume de resíduos gerados anualmente é alto e muitas unidades ainda não são destinados aos 824 pontos de coleta existentes no território brasileiro.

O descarte inadequado traz danos à saúde da população e ao ambiente, e ocorre em terrenos baldios, rios e aterros, que somado ao grande volume deste resíduo e ao seu longo período de degradação (aproximadamente 400 a 800 anos), fazem dele um dos maiores geradores de impactos ambientais negativos (FIORITI, 2007; AMADEI, 2010).

A destinação inadequada inclui o descarte em córregos e cursos d'água, onde acabam criando barreiras e contribuindo para alagamentos e desvio dos mesmos, e a simples deposição em terrenos baldios ou fundos de quintais, onde acabam por acumular água, servindo de repositório para mosquitos e local de esconderijo de roedores. Além disto, podem ser utilizados como combustível, sem que haja controle da emissão de gases, o que os torna perigosos, devido à liberação de substâncias tóxicas durante a queima (FIORITI; INO; AKASAKI, 2010). Depósitos de pneus a céu aberto e pneus depositados em cursos d'água podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 - Depósito de Pneus a céu aberto e em cursos d'água



Fonte: www.mma.gov.br

A Resolução n.º 416/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 30 de setembro de 2009, dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, definindo o que é um pneu

inservível e também o que deve ser entendido como destinação ambientalmente adequada.

O pneu inservível é considerado como o pneu que possui danos a sua estrutura que impossibilitem a sua rodagem ou a sua reforma. Como destinação ambientalmente adequada se entende como procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida(s) pelos órgãos ambientais competentes, observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos.

De acordo com a mesma Resolução, para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, ou seja, para troca, as empresas que fabricam os pneus ou então que os importam devem destinar de forma adequada um pneu inservível no território nacional. No caso de importações esta medida tem como objetivo evitar a transferência de passivos ambientais para dentro do País.

Além disto, determina ainda que os fabricantes e os importadores implementem pontos de coleta de pneus inservíveis. Segundo a ANIP (2016), através da seu Programa Reciclanip, encontram-se instalados no Brasil cerca de 824 pontos de coleta distribuídos em todo o território nacional. Desde o início do Programa, em 1999, até 2014 a entidade contabilizou, para destinação ambientalmente adequada, mais de 3 milhões de toneladas de pneus inservíveis, equivalentes a cerca de 600 milhões de pneus de automóveis. Em 2014, a Reciclanip coletou e destinou corretamente 445 mil toneladas de pneus inservíveis, o que corresponde a 89 milhões de pneus de passeio. Para chegar a esses resultados, as indústrias de pneus investiram US\$ 270 milhões desde o início do Programa até 2014. Estes números devem ser comprovados através de relatórios anuais que comprovem o tipo de destinação adotada, sendo que esta deverá estar devidamente licenciada pelo órgão competente.

A Resolução CONAMA n.º416 (CONAMA, 2009) veta a disposição final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto, sendo que a utilização de pneus inservíveis como combustível em processos industriais só poderá ser efetuada caso exista norma específica para sua utilização. Hoje, no Brasil, 69,7% dos pneus são utilizados como combustível alternativo para a indústria de cimento.

Segundo a Lei n.º. 12305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os fabricantes e importadores de pneus ficam obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos,

os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de diversos materiais, entre eles os pneus, reafirmando assim o que diz a Resolução n.º416 do CONAMA (2009).

2.5.3. Aplicação dos resíduos de pneus inservíveis na Construção Civil

O reaproveitamento dos pneus inservíveis se dá de diversas formas: na fabricação de solados de sapatos, borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais, além de tapetes para automóveis. No Brasil, uma das formas mais comuns de reaproveitamento dos pneus inservíveis é como combustível alternativo para as indústrias de cimento (ANIP, 2016).

Na construção civil são várias as alternativas de utilização: recauchutagem, fonte de energia, muros de gravidade, obras de contenção, barreiras de inércia, proteção contra marés, construção de edificações, drenagem, concreto sem fins estruturais, agregado para argamassas e concretos, pavimentação, cobertura de aterros sanitários, co-processamento em indústrias cimenteiras.

De acordo com RMA (2009), as aplicações mais comuns da borracha de pneu na Engenharia Civil incluem: material de enchimento de peso leve; drenagem em campo séptico; aterro em estradas; suporte de base de estrada; sistema de drenagem de gases em aterros sanitários; material para compostagem; estabilizadores de encostas; controle de erosão, diques, barragens; isolante térmico e acústico; drenagem em aterro sanitário; aditivos para pavimentos asfálticos e pistas esportivas; cobertura de parques infantis, concretos leves etc.

Uma alternativa de aplicação de resíduos de pneus é a sua incorporação em matrizes cimentícias, principalmente em substituição agregados naturais utilizados pelo setor.

2.5.3.1. Resistência mecânica

O resíduo de pneu é conhecido por reduzir a resistência à compressão do concreto. No entanto, Pinto *et al.* (2003) afirmam que é possível incorporar 5% de pó de borracha sem que seja alterada de forma significativa a resistência à compressão das pastas de cimento Portland. Observa-se também quando da substituição um aumento da porosidade, principalmente quando são utilizadas partículas com granulometria maior.

Embora seja possível a confecção de concretos com resistências de 20MPa, o uso de concreto com adição de pneu como concreto estrutural é inviável. Entretanto, seu uso em

materiais pré-moldados como blocos de alvenaria e de pavimentação são alternativas com grande potencialidade (MARQUES, 2005).

Os blocos de vedação, tanto estruturais quanto de vedação, apresentam resultados que atendem às especificações das normas brasileiras, oferecendo um material mais leve, permitindo facilitar a execução (FIORITI; AKASAKI; NIRSHE, 2002).

Fioriti, Ino e Akasaki (2010) analisaram a viabilidade da utilização de borracha de pneu em blocos intertravados para pavimentos. Os resultados obtidos nas experimentações indicam que o uso de blocos intertravados com resíduos de pneus pode ser feito em ambientes com solicitações leves como, por exemplo, em calçadas, praças, ciclovias e condomínios residenciais. Tendo como indicativo de melhores resultados, avaliando-se todos os ensaios, o percentual de 8 a 12% de resíduos a ser adicionado no concreto dos blocos intertravados, com consumo de cimento em torno de 325 kg/m³.

Segundo Granzotto (2010) o teor ideal de substituição de agregado miúdo por resíduo de pneu é da ordem 5% para a confecção de concretos de baixa resistência. Os resultados obtidos revelam que é possível obter uma taxa ótima de adição sem que ocorram perdas significativas da resistência à compressão e à tração do concreto com adições. Conclui-se que este tipo de concreto pode vir a ser utilizado, de maneira satisfatória, para confecção de pavers, calçadas, meio-fio etc.

Após análise de diversos teores de substituição, Ling (2011) chegou à conclusão de que o teor de 10% seria o ideal, uma vez que não alterou significativamente as propriedades dos blocos de pavimentação e também auxiliaram no preenchimento de vazios do concreto seco, criando pontos mais resistentes na mistura.

As diferentes linhas de pesquisa mostram que o resíduo de borracha de pneu possui indicações de utilização em concretos compostos, visando aplicações em locais de baixa resistência mecânica, menor peso e absorção de água, bom isolamento térmico e acústico além de resistência ao impacto.

2.5.3.2. *Durabilidade*

Os estudos realizados com a adição de resíduos de pneus ao concreto mostram que, sendo consideradas as devidas proporções, as propriedades como baixa permeabilidade, resistência ao impacto e resistência à abrasão podem ser melhoradas, contribuindo, assim, para a durabilidade do material.

Uma característica observada nos concretos com adição de resíduo de pneu é a forma

da ruptura, sendo mais dúctil e com propagação de fissuras mais dispersa. Isto se deve a maior capacidade de absorção de energia do compósito contendo borracha (FIORITI, 2007). Devido a isto, locais onde é necessário o amortecimento de vibrações, ou locais onde é necessária a resistência ao impacto são ideais para utilização de concreto com adição de resíduos de borracha segundo Siddique e Naik (2004).

Ganjian, Khorami, Maghsoud (2007) comprovaram que apesar da baixa resistência os concretos que continham resíduos de pneus apresentaram uma diminuição da permeabilidade o que contribui para aumento da durabilidade dos concretos.

De acordo com Akasaki *et al.* (2003), que em seu estudo analisaram diferentes granulometrias de resíduos de pneus em substituição aos agregados miúdos e graúdos em composições de concreto, houve uma queda de trabalhabilidade nas misturas após a incorporação dos resíduos, uma diminuição da massa específica e menor absorção de água. A absorção de água sofreu variação de acordo com o tamanho das partículas, já que para partículas menores a absorção foi menor.

Papakonstantinou *et al.* (2006) e Son *et al.* (2010) estudaram a aplicação de pneu em concretos em diversas situações, e constaram também a redução de resistência, mas também comprovaram melhora em propriedades com flexibilidade e desgaste.

2.6. Considerações Finais

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos de pneus já foram estudados de diversas formas, como pode ser visto neste Capítulo, com sucesso. Mas algo que sempre chamou atenção nas pesquisas com os dois resíduos foi: o aumento da resistência mecânica do concreto quando da utilização da CBC e a redução desta mesma propriedade quando da utilização do resíduo de pneu. E foi à partir desta informação que surgiu a proposta da combinação dos dois resíduos, buscando um efeito “compensatório” entre eles. Para isto, a análise partiu de uma pesquisa prévia realizada por Altoé (2013), com a execução de diversos traços. Nesta pesquisa, apesar de excelentes resultados obtidos com a CBC, não foi possível chegar a uma combinação que se aproximasse das propriedades do traço referência, e foi nesta linha de pensamento que se partiu na busca de novos traços e combinações.

Não se pode esquecer também que a partir do momento que se propõem a reciclagem ou reutilização de resíduos como forma de destinação adequada dos mesmos se faz necessária a análise de que realmente qual a real contribuição para a preservação do ambiente e garantindo o mesmo comportamento do produto original no produto desenvolvido. No caso

da construção civil, onde a busca é substituir os recursos naturais por resíduos das mais diversas origens, isto pode ser analisado inicialmente através dos estudos das propriedades mecânicas e físicas dos produtos propostos como: resistência à compressão, absorção de água, propriedades dimensionais e visuais, índice de desgaste e durabilidade. Além, é claro, de se pensar em uma possível redução de custos na produção. Porém, do ponto de vista ambiental, os estudos devem ir um passo a frente, deve ser analisado se realmente a destinação proposta traz os benefícios que se imagina inicialmente.

Faz-se necessária uma classificação inicial destes resíduos, precisa-se saber se eles podem de alguma forma contaminar ou trazer danos ao ambiente, e ir além a fim de saber se a destinação proposta também não o faz. A CBC e o pneu são frequentemente lançados diretamente sobre o solo, porém estes resíduos, apesar de não perigosos, são classificados como não inertes, e isso não garante que os mesmos não possam com o passar do tempo serem fontes de contaminação. Por isso, além dos estudos de propriedades requeridas por normas e pela própria utilização do produto proposto, tem-se que analisar se este não pode também ser fonte de contaminação ou se, melhor ainda, ele pode neutralizar possíveis contaminações futuras.

Um aspecto que também pode ser alvo de estudo é se existe também outra contribuição ambiental muito importante: a redução da emissão de CO₂. É de conhecimento geral que a indústria da construção civil sempre foi vista de forma negativa neste aspecto, por isso se de alguma forma consegue-se oferecer alternativas para que estes índices sejam reduzidos, ou se ainda sejam pesquisados e desenvolvidos materiais que possam converter este quadro garante-se uma maior eficiência na proposta de reaproveitamento de materiais.

É neste viés que a pesquisa foi desenvolvida no ponto de vista da utilização dos resíduos, buscando atender as propriedades e garantindo o comportamento esperado dos blocos de concreto para pavimentação confeccionados e também analisando a real contribuição ambiental.

3. BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO - PAVERS

A pavimentação surgiu da necessidade dos povos de vencer grandes distâncias entre as cidades, estabelecendo vias de comunicação entre elas. Os pioneiros na construção de estradas foram os Etruscos, que dominaram a Itália entre 800 e 350 a.C., se valendo de pedras de mão juntamente com materiais mais finos construíram estradas que tinham como principal característica a preocupação com o conforto e com a resistência. Com base no conhecimento dos Etruscos os romanos passaram a construir estradas com os mais diferentes materiais, destacando-se as pedras talhadas manualmente, os blocos de tijolos, blocos de madeira e pavers de concreto (FIORITI, 2007).

Define-se *paver* como bloco de concreto pré-moldado para pavimentos (ACI 116.R-00, 2002). Os *pavers*, devido ao forte desenvolvimento de seu setor produtivo, são aplicados nos mais diversos segmentos da construção como em pátios, calçadas, praças, ruas, caminhos, rodovias, pisos industriais, portos, aeroportos, em maior ou menor quantidade. O que era inicialmente utilizado em áreas com o objetivo de proporcionar melhores efeitos arquitetônicos ou paisagísticos, começou a ganhar lugar como um material versátil, que possibilita harmonização com qualquer ambiente (FIORITI *et al.*, 2010).

A partir da década de 1970 os sistemas de fabricação e os modelos disponíveis começaram a se proliferar, buscando por materiais alternativos que oferecessem equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos, contribuindo para o desenvolvimento e crescimento de um sistema prático e confiável para pavimentação (FIORITI, 2007). Hoje as peças são encontradas nos mais diferentes locais, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Passarelas na Universidade Estadual de Maringá (a) e Cruzamentos de Avenidas na cidade de Maringá (b) feitas de pavers



(a)



(b)

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) enumera diversas vantagens deste tipo de pavimento para os centros urbanos, entre elas se destacam: é ideal para ruas urbanas com velocidade de tráfego inferior a 70 km/h; permite incorporar a sinalização viária horizontal, uma vez que podem ser fabricadas peças pigmentadas, que quando utilizadas dispensam a realização da pintura de sinalização; a coloração mais clara que o pavimento asfáltico proporciona maior conforto térmico, colaborando para a redução das ilhas de calor nos centros urbanos; melhora também a visibilidade e contribui para a economia com iluminação artificial; contribui para a segurança de frenagem dos veículos; facilita a manutenção das instalações de serviços subterrâneos e a abertura de valas para a execução ou manutenção destes, permitindo ainda o reaproveitamento das peças; a execução do pavimento é relativamente simples, sem a necessidade de pavimentadoras, e sem expor os operários a temperaturas elevadas e à exaustão de gases da massa de asfalto; a qualificação da mão-de-obra é barata e rápida (SANTOS, 2011).

Além das vantagens técnicas e de execução que os pavimentos intertravados apresentam, eles podem também contribuir muito para a drenagem urbana, devido às suas propriedades drenantes, o que garante também sua eficiência ambiental. Os pisos intertravados possibilitam que a água da chuva permeie entre as juntas e encontre o solo, facilitando a drenagem. Esta característica contribui, segundo Godinho (2009), para a redução do volume de água transportada para os coletores públicos, que geralmente acabam sobrecarregados, levando a ocorrência de inundações.

A crescente aplicação deste tipo de pavimento conduziu à necessidade do estabelecimento de padrões e especificações para a sua execução. Em 25 de junho de 2011 entrou em vigor a NBR 15953:2011 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011), que tem como finalidade estabelecer padrões e condições técnicas para execução deste tipo de pavimento. Segundo Santos (2011), com a regulamentação da ABNT, a ABCP tem a expectativa de que este sistema torne-se cada vez mais utilizado no Brasil, tanto quanto é utilizado em países europeus e nos Estados Unidos. Além de regulamentar a execução, a NBR 15953:2011 (ABNT, 2011) também estimula a execução da pavimentação em ruas por onde trafegam veículos a menos de 70 km/h.

3.1. *Propriedades dos Paviers – Normas Técnicas*

A Associação Brasileira de Normas Técnicas possui duas normas que dispõem sobre pisos intertravados: uma delas fala sobre a execução dos pisos e outra sobre as propriedades

requeridas das peças.

A NBR 15953:2011 - Pavimentos intertravados com peças de concreto (ABNT, 2011) estabelece as diretrizes para assentamento de pavers em camada granular, além de diretrizes de execução de qualquer tipo de pavimento sujeito ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos, cujo revestimento seja de pavimento intertravado.

A NBR 9781:2013 - Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) estabelece os requisitos e métodos de ensaio exigidos para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos.

A NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) unifica duas normas anteriores sobre o assunto NBR 9780:1987 e NBR 9781:1987, e foi escrita a partir das exigências da norma europeia EN 1338 (*Concrete paving blocks-Requirements and test methods*) adaptada à realidade brasileira. Esta norma traz alguns pontos que ainda não eram exigidos nas normas anteriores como dois novos métodos de ensaio: o de absorção de água, segundo o qual as peças devem apresentar absorção média menor ou igual a 6%; e o de resistência à abrasão, cujo resultado deve ser menor ou igual a 23 mm para tráfego leve, e menor ou igual a 20 mm em condições de tráfego sujeitos à abrasão intensa. Além disto, modifica também os critérios dimensionais das peças (SGORLON, 2014). Era muito esperada mudanças quanto a exigência de resistência mecânica, porém foram mantidos os parâmetros anteriores. A Tabela 4 traz os critérios para produção de blocos de concreto para pavimentação, de acordo com a normalização vigente no país (ABNT, 2013).

Tabela 4 - Requisitos para blocos de concreto para pavimentação

| Requisitos Físicos | | Limites |
|--|--|----------------|
| Tolerância Dimensional (mm) | Altura (mm) | ± 3 |
| | Largura (mm) | ± 3 |
| | Comprimento (mm) | ± 3 |
| Resistência Característica à Compressão (MPa) | Tráfego de pedestre, veículos leves e comerciais de linha | ≥ 35 |
| | Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados | ≥ 50 |

Tabela 4 - Requisitos para blocos de concreto para pavimentação (Continuação)

| Requisitos Físicos | | Limites |
|----------------------|--|-----------|
| Abrasão (mm) | Tráfego de pedestre, veículos leves e comerciais de linha | ≤ 20 |
| | Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados | ≤ 23 |
| Absorção de água (%) | | ≤ 6 |

Fonte: NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) - Adaptado

Um consenso entre diversos pesquisadores diz respeito aos valores mínimos exigidos pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) para os valores de resistência à compressão, que exige que os blocos suportem sobrecargas extremamente elevadas, não condizendo com todos os tipos de ambientes onde os mesmos são utilizados. Vários países exigem resistências menores, como por exemplo, a África do Sul e a Austrália onde o valor mínimo é de 25 MPa. As normas destes países levam em consideração a finalidade de utilização do *paver*, o que não ocorre com a norma brasileira (FIORITI, 2007; GODINHO, 2009; AMADEI 2010). Comentando as normas brasileiras, Fioriti (2007), após desenvolver um trabalho de aplicação de resíduos de pneus em blocos para pavimentação de tráfego leve, afirma que a resistência à compressão de 15 MPa foi satisfatória, pois as solicitações de passeios públicos são inferiores a este valor.

Com a necessidade de atingir as altas resistências exigidas pela norma brasileira os fabricantes se veem obrigados a utilizar elevados consumos de cimento e aditivos na produção dos *pavers*. Do ponto de vista ambiental, o alto consumo de cimento nos concretos é preocupante, apesar do concreto de cimento Portland ser reconhecido como um material verde (compatível com o meio ambiente) com relação aos outros materiais de construção. O cimento Portland, o principal ligante hidráulico usado no concreto moderno, é produto de uma indústria não apenas de uso intensivo de energia (4GJ/t cimento), mas também responsável por grandes emissões de gás carbônico (CO₂). A fabricação de uma tonelada de clínquer de cimento Portland lança perto de uma tonelada de CO₂ na atmosfera. A produção anual mundial de cimento 1,5 bilhão de toneladas, principalmente de cimento Portland, é responsável por quase 7% das emissões globais de CO₂ (MEHTA, 1999).

3.2. Materiais, Dosagem e Equipamentos.

A fabricação de blocos de concreto para pavimentação requer materiais, dosagens e equipamentos específicos para que as peças tenham as características necessárias para apresentar o desempenho desejado.

3.2.1. Materiais

Os materiais utilizados para a fabricação dos *pavers* são: aglomerante, agregado miúdo, agregado, aditivos químicos, pigmentos e água (FIORITI, 2007), respeitando a dosagem para cada um dos fins, estabelecidos de acordo com a particularidade e as propriedades requeridas para o produto final.

Com o avanço de pesquisas que visam o aproveitamento de resíduos sólidos na construção civil, os *pavers* têm demonstrado grande potencial para o reaproveitamento. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas utilizando resíduos neste produto com resultados promissores: pneus, resíduos de galvanoplastia, entre outros. Ling (2011) afirma que a possibilidade da introdução de resíduos sólidos e subprodutos na fabricação de blocos de concreto pode reduzir consideravelmente o problema de gestão de certos resíduos industriais.

A fabricação de *pavers* é caracterizada pela utilização de concretos com menor abatimento que os concretos de consistência plástica, uma vez que a quantidade de água adicionada à mistura é menor. Este concreto levemente umedecido é também conhecido como “concreto seco” (FRASSON; OLIVEIRA; PRUDÊNCIO, 2010).

Este tipo de concreto tem grande sensibilidade às variações de água utilizada na mistura. Se falta água à mistura é alta a probabilidade de ocorrer a segregação, o que dificulta a compactação e acabamento superficial. Por outro lado, o excesso pode levar à instabilidade da mistura no momento de compactação. Ribeiro (2005) ressalta que a influência da água está ligada a fatores externos, como a energia de compactação, e a fatores internos, como a curva granulométrica e tipo dos agregados, e o tipo e a quantidade de cimento empregado.

3.2.2. Dosagem

A dosagem pode ser definida como o processo de escolha dos materiais que irão compor o concreto e determinar suas quantidades relativas, atendendo aos requisitos de

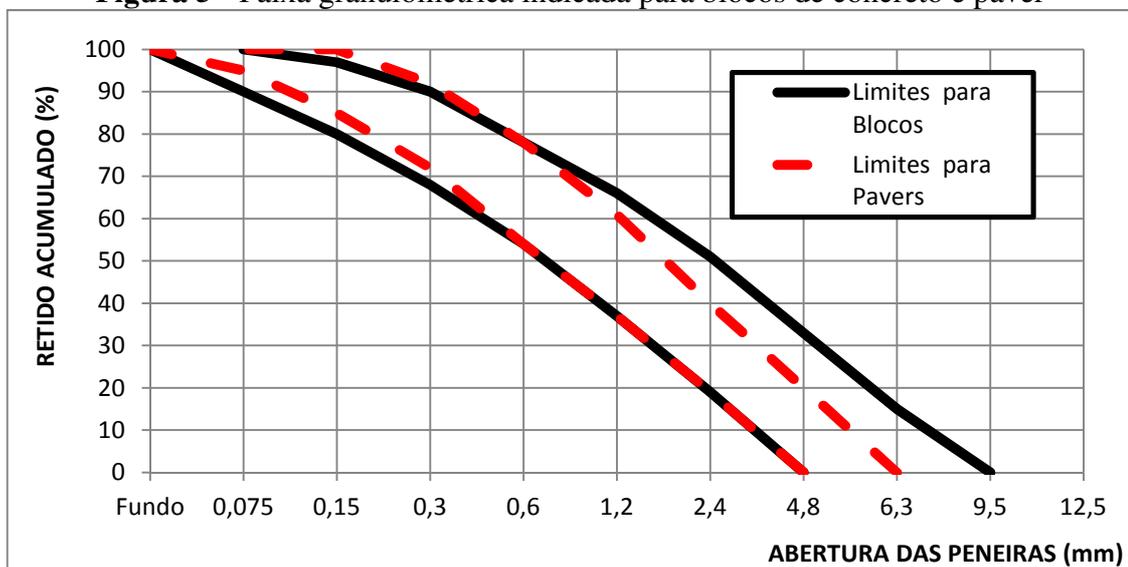
resistência, durabilidade e consistência necessária, além de apresentar um custo adequado às necessidades de cada obra e aplicação (NEVILLE, 1995; RECENA, 2002).

No processo de dosagem do concreto para blocos algumas precauções devem ser levadas em consideração, uma vez que por se tratar de um concreto seco e não plástico, no concreto dos blocos há uma grande quantidade de ar na mistura, ao contrário dos concretos convencionais (OLIVEIRA, 2004).

Um método de dosagem utilizado para blocos de alvenaria e *pavers* é o método de dosagem proposto por Fernandes (2012) e amplamente divulgado pela ABCP. Baseando-se em três estudos: o estudo de granulometria, o estudo da umidade ótima e o estudo de consumo de cimento é proposto um traço ótimo a ser utilizado. Sendo o mais utilizado o estudo de granulometria.

No estudo de granulometria são propostas faixas granulométricas para a dosagem de blocos e *pavers*. Na Figura 5 podem-se observar os limites recomendados para produção de blocos e *pavers* e suas representações gráficas, respectivamente (FERNANDES, 2012).

Figura 5 - Faixa granulométrica indicada para blocos de concreto e paver



Fonte: Fernandes, 2012

A escolha entre uma curva granulométrica mais próxima ao limite superior ou inferior leva em conta aspectos como acabamento e o custo unitário. Quanto mais próximo ao limite superior se produz blocos mais resistentes, econômicos e rústicos, já no outro extremo o diferencial fica por conta do melhor acabamento (FERNANDES, 2012).

No estudo de granulometria também é analisado o módulo de finura, que corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas

peneiras da série normal, dividida por 100 (ABNT, 2003). Fernandes (2012) propõem alguns parâmetros de módulo de finura (MF) em função do uso do concreto seco, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Sugestão de Módulo de Finura

| COMPONENTE | MF |
|-----------------------|----------------|
| Bloco aparente | < 3,00 |
| Bloco até 10 MPa | < 3,40 |
| Bloco acima de 10 MPa | de 3,40 a 4,00 |
| Paver 50 MPa | de 3,20 a 3,80 |

Fonte: Fernandes (2012)

3.2.3. Equipamentos de fabricação

As vibro-prensas multifuncionais são os equipamentos utilizados para a fabricação de artefatos de cimento, entre eles os *pavers*. Nestas máquinas o mecanismo empregado faz com que o material penetre e preencha as formas de aço do equipamento através da vibração. Este tipo de equipamento permite o controle de homogeneidade das resistências mecânicas, da textura e dimensões durante o processo de fabricação (FIORITI, 2007). A Figura 6 ilustra uma vibro-prensa multifuncional.

Figura 6 - Vibro-prensa com desforma sobre paletes



Este tipo de equipamento trabalha com a vibração associada à prensagem, onde a primeira é responsável pelo preenchimento e adensamento do concreto nas formas e a segunda pelo adensamento e controle das dimensões das peças (HOOD, 2006). Existem

vários tipos de vibro-prensas: quanto ao seu mecanismo de adensamento, podendo ser manual, hidráulica, ou pneumática; quanto ao processo de desforma, podem ser: vibro-prensa tipo poedeira, vibro-prensa com desforma sobre paletes e vibro-prensa de desforma de multicamadas (FIORITI, 2007).

3.3. Execução de Pavimentos com Pavers

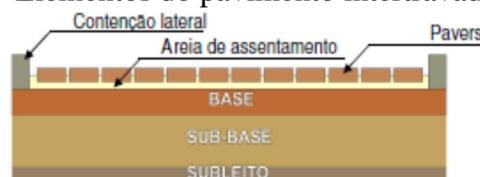
A execução de pavimentos intertravados de concreto é regulamentada pela NBR 15953:2011 (ABNT, 2011) que estabelece as diretrizes para execução de qualquer tipo de pavimento sujeito ao tráfego de pedestre, de veículos dotados de pneumáticos e de áreas de armazenamento de produtos. As atribuições de responsabilidades são também definidas nesta norma, atribuindo ao executor do pavimento a responsabilidade de atender às especificações da norma e do projeto, além de avaliar as peças e utilizar ferramentas e equipamentos adequados à correta execução (SANTOS, 2011).

3.3.1. Estrutura do Pavimento

A NBR 15953:2011 (ABNT, 2011) caracteriza o pavimento intertravado como sendo um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de revestimento constituída por peças de concreto sobrepostas sobre uma camada de assentamento e cujas juntas são preenchidas por material de rejuntamento, e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

O pavimento tem a finalidade de resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego, melhorando as condições de segurança e conforto, resistindo ao desgaste. Para tanto, é constituída de diversas camadas, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Elementos do pavimento intertravado



Fonte: ABCP, 2001

O subleito é a estrutura final de terraplenagem sobre a qual será executada a pavimentação. Deve ser devidamente compactado e regularizado antes da execução das

camadas superiores, que tem como finalidade proporcionar as condições de suporte necessárias para a compactação das camadas posteriores. Esta camada deve avançar além da contenção lateral nos pisos intertravados, ou seja, ir além da área de pavimento executada.

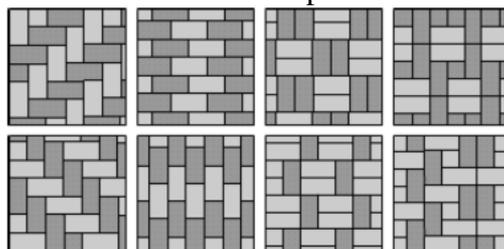
Logo acima do subleito estão as camadas de base e sub-base. A base é a camada estrutural do pavimento, responsável por receber as tensões distribuídas pela camada de revestimento e proteger o subleito destas solicitações, evitando deterioração dos pavimentos intertravados provenientes das deformações de caráter permanente. Para garantir essas características deve ocorrer a compactação adequada da camada.

Uma parte fundamental na execução deste pavimento é a contenção lateral que deve ser executada antes da camada de assentamento. Esta estrutura de contenção evita o deslocamento e soltura das peças. O confinamento externo cerca o pavimento, normalmente é executado na forma de sarjeta, guia ou meio-fio; já o confinamento interno margeia através de meio-fio ou estrutura similar todas as instalações internas ao pavimento, como câmaras de inspeção, jardineiras, bocas de lobo.

A camada de assentamento funciona como um filtro para água que penetra entre as juntas, podendo ser constituída por areia grossa ou pó de pedra. Porém, não tem a função de regularizar as reentrâncias da base, motivo pelo qual alguns pavimentos apresentam ondulações. Esta camada deve ter espessura uniforme em torno de 4 cm (BRICKA, 2010).

O revestimento ou camada de rolamento é executado sobre a camada de assentamento. No processo de assentamento do *paver* deve-se levar em consideração que não deve ser deslocada nenhuma das peças já assentadas e também a regularidade da camada de assentamento. Os *pavers* deverão ser assentados um a um, sendo que este deverá ser encostado naqueles já colocados e na camada de assentamento. Após o término do assentamento deve ser realizado o rejuntamento e compactação da camada de rolamento. O arranjo definirá a aparência estética do pavimento intertravado. Alguns modelos podem ser vistos na Figura 8 (FIORITI, 2007).

Figura 8 – Modelos de assentamento de pavimentos intertravados



Fonte: BRICKA, 2010

3.3.2. Controle de execução

Para uma melhor execução dos pavimentos intertravados, a NBR 15953:2011 (ABNT, 2011) estabelece critérios e procedimentos a serem seguidos. Alguns deles são descritos a seguir.

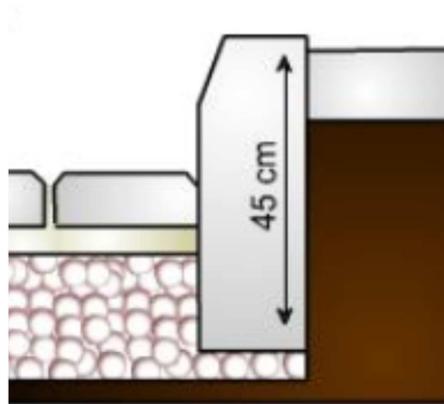
- *Projeto* – O projeto deve estabelecer as premissas em função da implantação, utilização do pavimento e interferências em geral; analisar as condições e características do leito; estimar as condições de carregamento à qual o pavimento estará sujeito, especificar ou compatibilizar o sistema de drenagem; especificar a estrutura de fundação do pavimento quanto a declividade, espessura, compactação e materiais a serem utilizados; especificar as peças de contenção do pavimento, levando em consideração as condições de intertravamento necessárias, definir as peças de concreto a serem utilizadas na camada de rolamento levando em consideração as especificações da NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) definir o padrão de assentamento das peças de concreto; executar o detalhamento da paginação levando em consideração o projeto arquitetônico e paisagístico. Observar as cotas e caimentos antes do início da execução são de suma importância para uma boa execução do pavimento.

- *Equipe executora* – Utilizar pessoal devidamente capacitado e com treinamento atualizado, e se a empresa ou equipe contratadas observam a legislação trabalhista e de saúde e segurança do trabalho.

- *Modelo* – Ao contrário de algumas normas internacionais a norma brasileira não exige a execução de um modelo para testes, mas sim que os projetos contenham padrão de assentamento, de alinhamento e interferências, além das demais características do pavimento.

- *Entrega e armazenamento de material* – O transporte das peças deve ser por *pallets*, o descarregamento pode ser manual ou mecânico. O transporte das peças deve ser feito de forma a não causar nenhum dano às peças, que devem ser depositadas de forma organizada, próximo às frentes de trabalho.

- *Contenções Laterais* – As contenções laterais devem ser constituídas de estruturas rígidas ou de dispositivos fixados à base do pavimento, de modo a impedir o seu deslocamento; executadas obedecendo as cotas de nível e alinhamento especificados em projeto; executadas antes das camadas de revestimento; ser conferidas e aceitas antes da etapa de execução da camada de assentamento. A Figura 9 mostra o confinamento do tipo externo.

Figura 9 – Confinamento Externo

Fonte: BRICKA, 2010

- *Areia ou Pó de Pedra de assentamento* – O material de assentamento deve ter umidade entre 3 e 7% no momento da aplicação; estar isenta de torrões de argila, materiais friáveis ou matéria orgânica. A espessura da camada deve ser de 50 mm, com variação máxima de 20 mm.

- *Camada de Assentamento* – Espalhar o material na frente de serviço, em quantidade suficiente para suprir a jornada de trabalho; executar mestras paralelamente à contenção lateral, nivelando-as na espessura da camada de assentamento, respeitando o caimento; nivelar o material de assentamento manualmente utilizando régua metálica, resultando em uma superfície sem irregularidades; assim que lançada a camada de assentamento deve receber a camada de rolamento, por isso só deve ser preparado a quantidade necessária para a frente de trabalho, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Regularização de camada de assentamento

Fonte: MASKI, 2011

- *Blocos de Concreto* – As peças devem seguir e cumprir todas as exigências da NBR

9781:2013 (ABNT, 2013). O assentamento deve seguir a paginação escolhida, conforme a Figura 11, tomando-se muito cuidado com a disposição das peças e atentando para a espessura das juntas.

Figura 11 – Assentamento das peças



Fonte: MASKI, 2011

- *Compactação Inicial* – A compactação deve ser feita com placa vibratória (Figura 12) com sobreposição de 15 a 20 cm, e a uma distância mínima de 1,5 m das contenções laterais. Além disso, o projeto pode prever outras formas de compactação, desde que sejam mantidas as características da camada de revestimento.

Figura 12 – Compactação Inicial



Fonte: MASKI, 2011

- *Areia de rejuntamento* – A espessura das juntas deve variar de 2 a 5 mm, espessura conseguida com auxílio de espaçadores incorporados aos blocos. O material de rejuntamento

seco deve ser espalhado sobre a camada de revestimento, formando uma camada fina, por toda a área; executar o processo de preenchimento das juntas por varrição, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Rejuntamento



Fonte: MASKI, 2011

- *Inspeção Final* – Devem ser observadas as inclinações, paginação e outras especificações do projeto antes do recebimento.

3.4. Considerações Finais

Os blocos de concreto para pavimentação (*pavers*) são objeto de vários estudos que envolvem a incorporação de resíduos, seja por adição ou por substituição. Isso se dá por ser uma material amplamente utilizado, com grande importância na drenagem e pavimentação urbana, e que permite estudar a influência desses resíduos de diferentes formas, além de possuir uma norma específica que permite uma avaliação completa das peças, envolvendo: dimensões, resistência mecânica, absorção de água e resistência à abrasão.

Mas além do estudo deste material enquanto não assentado, ou seja, logo após a fabricação, se faz necessário também um estudo mais aprofundado deste material em condições reais de utilização. Desta forma, pode-se avaliar a influência dos resíduos na durabilidade e no comportamento das peças ao longo do tempo, verificando, assim, se o material atenderá às mínimas condições de desempenho esperado das peças.

Uma forma que pode ser eficaz neste tipo de estudo é a execução de um protótipo, no

caso dos *pavers*, poderia ser uma calçada que fosse utilizada normalmente e que permitisse a realização de ensaios que possam estabelecer parâmetros de comparação entre uma calçada referência e a executada com peças confeccionadas com resíduos. Podem ser avaliados parâmetros como facilidade de assentamento, temperatura superficial, infiltração e ensaios de absorção de água e abrasão.

Dentro desta linha a pesquisa propõem, além de estudar as propriedades das peças fabricadas, também analisar o comportamento das mesmas em condições reais de utilização através da construção de uma calçada protótipo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

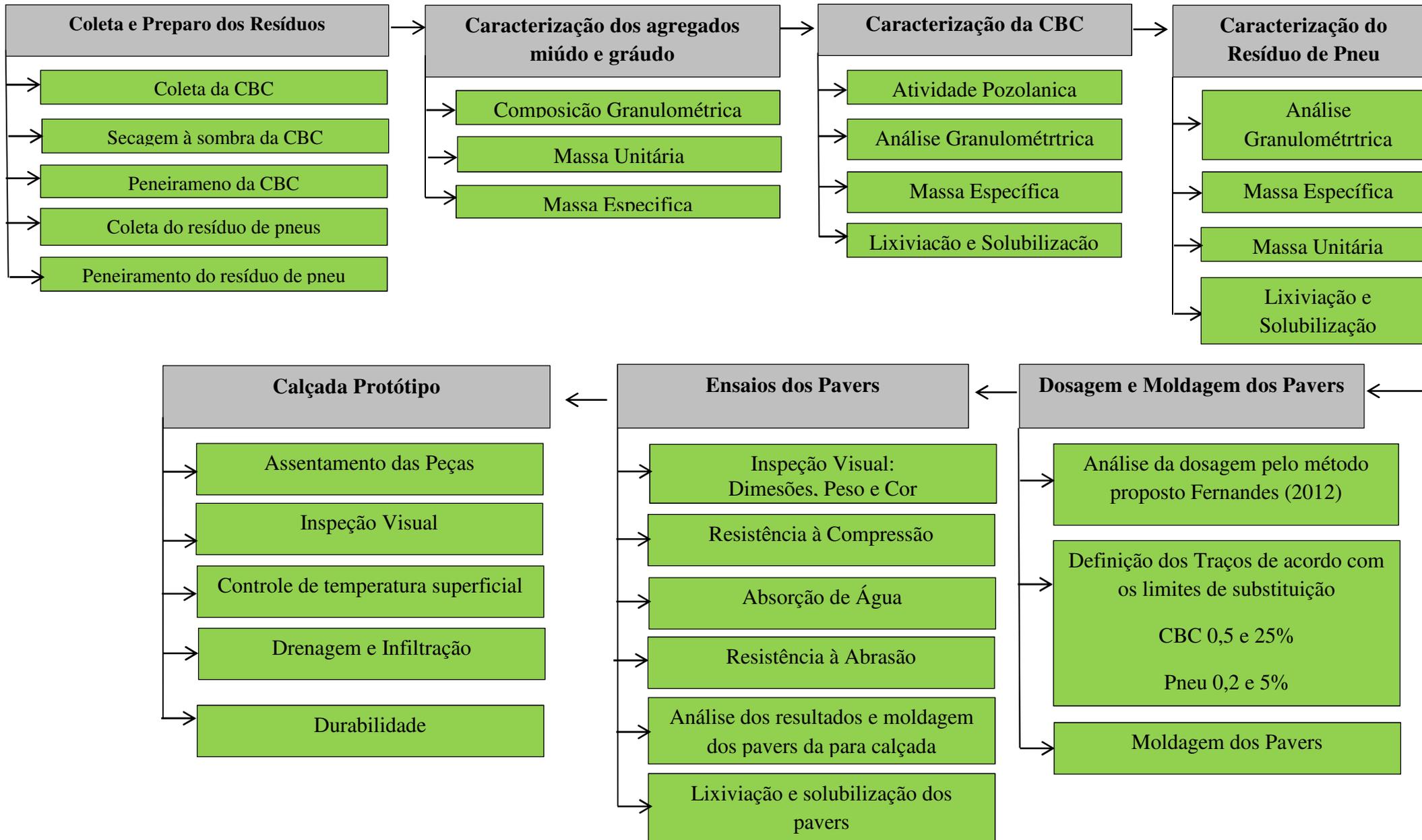
Neste capítulo são expostos os materiais e a metodologia que foram utilizados para alcançar o objetivo principal do estudo. Os ensaios para caracterização dos materiais, estudos de dosagens e determinação das propriedades dos pavers e da calçada protótipo estão a seguir descritos.

As etapas de caracterização dos agregados e *pavers* foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá e contou com a colaboração e a infraestrutura dos laboratórios abaixo mencionados: Laboratório de Concretos Especiais – UEM, Laboratório de Materiais de Construção Civil – UEM, Laboratório de Mecânica dos Solos – UEM.

Para a fase de moldagem das peças foi utilizada a Fábrica de Artefatos da Universidade Estadual de Maringá, responsável pela fabricação das peças de concreto pré-moldado utilizados nas obras e manutenção da universidade.

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos neste trabalho, visualizando melhor o delineamento da pesquisa foi elaborado o organograma da Figura 14, onde estão detalhados os ensaios realizados com o intuito de avaliar o desempenho dos blocos de concreto para pavimentação com incorporação de resíduos de pneus inservíveis e de CBC.

Figura 14 - Organograma Experimental



4.1. Materiais

Para a produção dos *pavers*, na fase experimental desta pesquisa, foram utilizados: cimento, areia média, brita com diâmetro máximo de 4,8mm, CBC, resíduo de pneu e aditivo para *pavers* e água.

4.1.1. Aglomerante

O processo de fabricação de peças pré-moldadas tem como características marcantes a necessidade de uma rápida desforma das peças e também de uma resistência ao transporte das mesmas. Para tanto, a indústria se vale da utilização de materiais que garantam estas características, como o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), que confere às peças alta resistência inicial já no início do processo de cura.

O CP V ARI é regulamentado ABNT NBR 5733:1991, sendo recomendado para o preparo de argamassas e concretos que conseguem elevadas resistências com maior velocidade (ABCP, 2002), e largamente utilizado na indústria de pré-moldados.

Desta forma, o cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V ARI, que é o mais utilizado pelos fabricantes de *pavers*.

4.1.2. Agregado Graúdo

O agregado graúdo natural empregado na confecção dos blocos foi a brita zero, de origem basáltica, com diâmetro entre 4,8 e 9,5 mm, conforme a Figura 15. O material é proveniente da Pedreira Ingá, localizada na cidade de Maringá-PR. Para sua caracterização foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com procedimentos estabelecidos pelas normas vigentes.

A caracterização do agregado graúdo utilizado na fabricação dos *pavers* foi realizada de acordo com as seguintes normas:

- Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003).
- Determinação da massa unitária - NBR NM 045:2006 (ABNT, 2006).
- Determinação da massa específica – NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009).

Figura 15 – Agregado Graudo



4.1.3. Agregado Miúdo

O agregado miúdo natural utilizado foi a areia média quartzosa, proveniente de fornecedores de materiais de construção da região de Maringá-PR, que a recebem diretamente do Porto localizado às margens do Rio Paraná, e seu aspecto pode ser visto na Figura 16. Para sua caracterização foram feitos ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária de acordo com procedimentos estabelecidos pelas normas vigentes.

Figura 16 – Areia



A caracterização da areia utilizada na confecção dos *pavers* foi realizada de acordo com as seguintes normas:

- Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003).

- Determinação da massa unitária - NBR NM 045:2006 (ABNT, 2006).
- Determinação da massa específica – NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009).

4.1.4. Água

Para o amassamento do concreto foi adicionada à mistura água potável, proveniente da rede de abastecimento de água da cidade de Maringá, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.

4.1.5. Aditivo

Em todos os traços moldados foi utilizado o aditivo líquido para baixo consumo de cimento em concretos semi-secos. As características deste aditivo estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características do aditivo

| | |
|------------|---|
| Fabricante | Sika Brasil |
| Nome | SikaPaver HC-10 |
| Tipo | Plastificante para concreto semi-seco |
| Estado | Líquido |
| Cor | Vermelho |
| Densidade | 1,01 + 0,02 kg/l |
| Ph | 7 + 1 |
| Consumo | 0,2 a 0,5 % em relação a massa de cimento |

Fonte – Sika, 2016

A finalidade deste aditivo é a produção otimizada de concretos com teor de umidade muito baixo, sendo recomendado pelo fabricante para indústrias de peças pré-moldadas, como blocos, pavers, tubos, que utilizem concreto semi-seco. A reação físico-química proporciona: eficiente dispersão das partículas de cimento, aditivos e pigmentos; incorporação de ar; melhoria do adensamento do concreto através da máquina de compactação; otimização da produção com menor tempo de compactação e melhora no tempo de retirada das peças; redução do atrito entre a fôrma e o concreto; redução da aderência entre a camada superior de concreto e a peça que comprime os blocos; aumento da estabilidade do concreto "verde" na desmoldagem; dosagens de concreto mais econômicas; criação de produtos de alta qualidade

(SIKA, 2016).

4.1.6. Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada na pesquisa é proveniente da usina termoeétrica da Usina Santa Terezinha (Usaçucar), localizada no distrito de Iguatemi à aproximadamente 10 km de Maringá-PR. A Usina opera com duas caldeiras para a queima do bagaço de cana-de-açúcar, conforme ilustrado na Figura 17. A produção diária é de 1.000 toneladas de açúcar VHP e 180.000 litros de álcool hidratado, chegando a moer 9.000 toneladas de cana por dia. A Usina termoeétrica é autossuficiente para todo o complexo da Usina, queimando 1.670 toneladas de bagaço por dia.

Figura 17 – Unidade Usaçucar Iguatemi



Fonte: Usaçucar (2015)

O bagaço a ser utilizado nas caldeiras é armazenado à céu aberto, como pode ser visto na Figura 18, ficando somente uma parcela estocada em um armazém para ser utilizado. O excedente é comercializado para outras usinas e termoeétricas da região.

Figura 18 – Saída do Bagaço da Moagem



Durante o processo da queima do bagaço a cinza cai na parte inferior da fornalha e é transportada por de correias transportadoras, constantemente resfriadas, até montes de cinza depositados a céu aberto diretamente sobre o solo, conforme a Figura 19. Diariamente é realizada a coleta destas cinzas, que são posteriormente misturadas à torta de filtro, outro resíduo do processo de produção da usina, e lançado como “fertilizante” nas plantações de cana-de-açúcar.

Figura 19 – Montes de Cinza depositados na Usina



A cinza é resultante de um processo de queima sem controle da temperatura, em torno de 900°C a 1000°C, onde seu rendimento varia de acordo com a umidade do bagaço e do tipo de solo (argiloso ou de terra vermelha) de onde a cana é colhida. Segundo a Usina, cada tonelada de bagaço queimado gera em torno de 14 kg de cinza pesada, sendo geradas

23,38 toneladas de cinza diariamente.

As amostras coletadas foram levadas ao laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá. As cinzas foram secas à sombra durante 48 horas. Após o processo de secagem as amostras foram peneiradas na peneira 4,8mm para a retirada de galhos, gravetos, pedras e partículas resultantes da combustão incompleta. As amostras podem são mostradas na Figura 20 (A) CBC em estado bruto, (B) Material retirado da CBC e (C) Cinza peneirada.

Figura 20 – Aspecto Visual da Amostra de CBC



Para a caracterização e classificação do material foram realizados procedimentos de determinação de atividade pozolânica, determinação de composição granulométrica, determinação de massa específica, lixiviação e solubilização de acordo com as normas vigentes.

4.1.7. Resíduo de Pneu Inservível

O resíduo de pneus utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Borrachas SS, localizada na cidade de Maringá, que recebe resíduos de empresas de recauchutagem de pneu de toda região e é utilizado para fabricação de correias transportadoras. Este resíduo passa por um processo de separação, trituração e peneiramento, onde a borracha é separada dos demais componentes dos pneus. Após passar por este processo, o resíduo já na forma de pó, é aquecido e toma a forma do regenerado de borracha, posteriormente aplicado na fabricação das correias.

Após a coleta da amostra foi realizado um peneiramento com a finalidade de retirar pedaços maiores de borracha que não ficaram retidos nas peneiras do equipamento da empresa. A Figura 21 mostra a amostra após o peneiramento.

Figura 21 – Resíduo de Pneu



Para a caracterização e classificação do material foram realizados procedimentos experimentais devidamente normatizados, para determinação da composição granulométrica, determinação da massa específica, lixiviação e solubilização.

4.2. Ensaio de Caracterização dos Resíduos

4.2.1. Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

A CBC será caracterizada de acordo com os ensaios descritos a seguir.

4.2.1.1. Atividade pozolânica

A atividade pozolânica foi determinada através do Método de Chapelle Modificado, seguindo a NBR 15895:2010 (Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado), pelo Laboratório de Materiais de Construção do IPT-SP. O ensaio consiste em colocar 2 g de CaO, 1g do material supostamente pozolânico e 250 ml de água isenta de CO₂ dentro de um frasco e agita-lo em banho-maria por aproximadamente 16 horas. A quantidade em* mg de CaO reagida com 1g do material corresponde ao valor de atividade pozolânica, sendo o consumo de Ca(OH)₂ igual a 750 mg/g considerado o mínimo necessário para o material apresentar uma atividade pozolânica considerável.

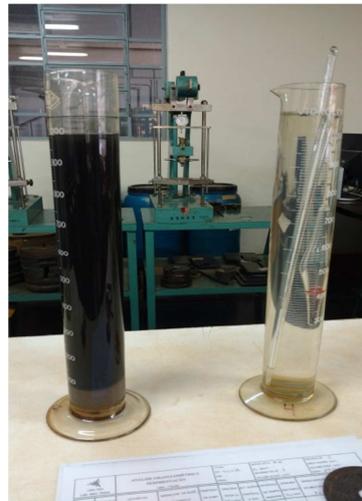
4.2.1.2. *Análise granulométrica*

A determinação da análise granulométrica da CBC foi feita por meio de peneiramento (Figura 22 A) e sedimentação (Figura 22 B), seguindo a NBR 7181:1984 - Solo - Análise granulométrica, obtendo-se assim a curva granulométrica do material (ABNT, 1984).

Figura 22 – Análise Granulométrica por peneiramento (A) e sedimentação (B)



(A)



(B)

As curvas granulométricas permitem o estudo de características como o grau de uniformidade e o coeficiente de curvatura para a CBC. Tais características foram calculadas de acordo com o descrito abaixo.

Grau de Uniformidade

O grau de uniformidade é determinado conforme a NBR 6502:1995 - Rochas e Solos (ABNT, 1995), sendo definido pela Equação 01:

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

D60 – diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica (mm).

D10 – diâmetro de partículas correspondente aos 10% nesta mesma curva (mm).

O grau de uniformidade representa a variedade de dimensões que as partículas do material possui, sendo diretamente proporcional à inclinação da curva granulométrica. Conforme a Equação 01, quanto maior a inclinação da curva, mais bem graduado é o material, segundo a classificação da NBR 6502:1995 - Rochas e Solos (ABNT,1995):

$U < 5$ muito uniforme;

$5 < U < 15$ uniformidade média;

$U > 15$ não uniforme.

Coefficiente de Curvatura (CC):

O coeficiente de curvatura está relacionado à curva granulométrica entre D60 e D10, e pode ser descrito pela Equação 02:

$$CC = \frac{(D30)^2}{(D10 * D60)} \quad \text{(Equação 02)}$$

Onde:

D30 – diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos na curva granulométrica (mm).

Em solos bem graduados $1 < CC < 3$.

4.2.1.3. *Massa específica*

A massa específica da CBC, por ser um material extremamente fino, deve ser determinada pela NBR 6508:1984 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica (ABNT, 1984), que estabelece o seguinte procedimento:

1 – Pesar a amostra para o ensaio e anotar sua massa da amostra (P1);

2 – Colocar a massa no picnômetro e completar o volume com água destilada, pesar o conjunto picnômetro + amostra + água (P2);

3 – Esvaziar e lavar o picnômetro, completando o volume com água destilada e pesar o conjunto picnômetro + água (P3).

A densidade dos grãos da amostra é obtida pela Equação 03:

$$\gamma_s = \frac{\frac{P_1}{(1+w)}}{\left(\frac{P_1}{1+w}\right) + P_3 + P_4} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

γ_s – é a massa específica dos grãos do solo (g/cm^3),

P_1 – massa da amostra úmida (g),

W – é a umidade da amostra (%),

P_2 – é a massa do picnômetro + amostra + água (g),

P_3 – é a massa do picnômetro + água (g),

γ_{wt} – é a massa específica da água (g/cm^3).

Para retirada de bolhas de ar presentes nas amostras que podem interferir na determinação correta da densidade foi realizada a retirada de ar por bomba a vácuo, previsto em norma, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Ensaio de massa específica



4.2.1.4. *Ensaio de lixiviação e solubilização*

O procedimento utilizado na obtenção do extrato lixiviado para a CBC seguiu a NBR 10005:2004 (ABNT:2004), assim como o procedimento da extração do solubilizado seguiu a 10006:2004 (ABNT:2004). Sendo que, as amostras de lixiviado e solubilizado foram submetidas a determinação dos teores de contaminantes listados segundo os anexos F e G da NBR 10004:2004 (ABNT:2004), por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica (EAA) 52 Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatôgrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC.

O procedimento para obtenção do extrato lixiviado consistiu na pesagem de 50 g de amostra seca, triturada e peneirada e sua transferência para um frasco de lixiviação juntamente com 1 litro de solução de ácido acético. O frasco foi vedado e colocado em um aparelho chamado “agitador rotativo de frascos” (Figura 24). As amostras permaneceram sob agitação por 18 horas a 30 rpm. Em seguida as amostras foram filtradas em membrana de 0,45 μm e acondicionadas em frascos identificados, seguindo para a leitura do teor de contaminantes. Todas as leituras foram feitas em duplicata.

Figura 24 – Agitador rotativo de frascos



Para os ensaios de solubilização as amostras também foram secas por 24 horas em estufa a 42°C, trituradas e peneiradas. Em seguida, ocorreu a pesagem de 250 g de cada amostra que foram transferidas para frascos PET de 2 litros. Adicionava-se ao frasco 1 litro de água deionizada, agitando-se por 5 minutos. Os frascos foram fechados e deixados para descanso por 7 dias na temperatura ambiente. Após esse período, as amostras foram filtradas à vácuo em membrana de 0,45 μm , armazenadas em frascos menores para posterior leitura de contaminantes.

4.2.2. Resíduos de Pneus Inservíveis

4.2.2.1. Análise Granulométrica

Inicialmente as amostras de resíduo de pneus foram secas em temperatura ambiente por um período de 72 horas, garantindo assim que a amostra se encontrava seca para a realização dos ensaios de caracterização. A composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248:2003 (ABNT:2003), garantindo, assim, que o resíduo

corresponda às características de agregado miúdo, uma vez que a proposta do estudo é a substituição deste agregado, conforme Figura 25.

Figura 25 – Ensaio granulométrica resíduo de pneu



4.2.2.2. *Massa Unitária*

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 45:2006 (ABNT:2006), utilizada para agregados com dimensões característica inferiores à 37,5 mm.

A amostra ensaiada tinha quantidade suficiente para preencher um cilindro de 15 dm³. Primeiramente foi pesado o recipiente vazio, e em seguida, o agregado foi colocado no recipiente em 3 camadas devidamente compactadas com 25 golpes de soquete uniformemente distribuídos. Após o preenchimento do recipiente este é nivelado e pesado.

A massa unitária foi calculada pela Equação 04:

$$\text{Massa Unitária} = \frac{M2 - M1}{V1} \quad (\text{Equação 04})$$

M1 – Massa do recipiente (g)

M2 – Massa do recipiente preenchido com agregado (g)

V1 – Volume do recipiente (dm³)

4.2.2.3. *Massa Específica*

Por ser um resíduo fino, assim como a CBC, a massa específica foi determinada pela NBR 6508:1984 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica (ABNT, 1984), conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Ensaio de massa específica resíduo de pneu



4.2.2.4. *Ensaio de lixiviação e solubilização*

O procedimento utilizado na obtenção do extrato lixiviado para a CBC seguiu a NBR 10005:2004 (ABNT:2004), assim como o procedimento da extração do solubilizado seguiu a 10006:2004 (ABNT:2004). Sendo que, as amostras de lixiviado e solubilizado foram submetidas a determinação dos teores de contaminantes listados segundo os anexos F e G da NBR 10004:2004 (ABNT:2004), por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica (EAA) 52 Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatógrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC.

O procedimento utilizado já foi descrito anteriormente no item 4.2.3.4.

4.3. *Dosagem, Moldagem e Ensaio dos Blocos de Pavimentação*

4.3.1. *Dosagem e moldagem*

Com o objetivo de atender os requisitos da NBR 9781:2013 (ABNT:2013), a

proporção entre aglomerante e agregado foi definida como 1:4, sendo que 55% do agregado utilizado é agregado miúdo e 45% agregado graúdo, conforme traço desenvolvido por Amadei (2011) em sua pesquisa, onde esta proporção alcançou valores de resistência mecânica próximos ao exigido pela norma. Para uma melhor análise da dosagem do traço do paver referência proposta foi utilizada a metodologia desenvolvida por Fernandes (2012) e indicada pela ABCP. Esta metodologia apresenta sistematicamente os procedimentos de dosagem, o que permite a reprodutibilidade em laboratório, além de ser sugerida por um órgão de representatividade.

Após definida a dosagem a ser utilizada na fabricação dos *pavers*, foram definidos os traços com diferentes teores de substituição, baseados nos traços utilizados e resultados obtidos na pesquisa de Altoé (2013). Estes traços foram ajustados no presente trabalho, delimitando traços com teores máximos e mínimos de substituição de cada resíduo utilizados na pesquisa de 2013, buscando a máxima aplicação possível de cada um dos resíduo em substituição ao agregado miúdo natural, desta forma foram estabelecidos 7 teores de substituição (Tabela 7)

Tabela 7 – Traços

| TEOR DE SUBSTITUIÇÃO EM MASSA(%) | | | |
|---|-----|-------------|------------|
| TRAÇO | | PNEU | CBC |
| T0 | 0% | 0% | 0% |
| T1 | 25% | 0% | 25% |
| T2 | 5% | 0% | 5% |
| T3 | 5% | 5% | 0% |
| T4 | 2% | 2% | 0% |
| T5 | 27% | 2% | 25% |
| T6 | 7% | 2% | 5% |
| T7 | 30% | 5% | 25% |
| T8 | 10% | 5% | 5% |

Foi adotada uma relação água/cimento fixa de 0,42, conforme definido por Altoé (2013), não havendo necessidade de correções durante o processo de moldagem. Para confirmar a relação utilizada durante o processo de moldagem foi realizada a verificação da consistência ideal através do Método do Ponto de Pelota (HOOD, 2006). Este método permite

verificar melhor a quantidade de água ideal no concreto: quando a quantidade está correta o concreto adquire consistência e se firma sem deixar resíduos nas mãos (Figura 27 A), já se ele se soltar (Figura 27 B) a quantidade de água é insuficiente e precisa ser aumentada. O aditivo foi adicionado à água de amassamento.

Figura 27 – Ponto de pelota



A medição dos materiais para confecção de todos os traços foi feita em massa, de forma a garantir uma maior rigorosidade no controle da produção.

Seguindo os traços definidos os *pavers* foram fabricados na Fábrica de Artefatos da Universidade Estadual de Maringá, em betoneira de 400 Litros, mostrada na Figura 24 A, e moldados em uma vibro-prensa pneumática, marca Beton MB 900P, Figura 24 B, com capacidade de produção de 08 blocos por ciclo, com desforma sobre paletes.

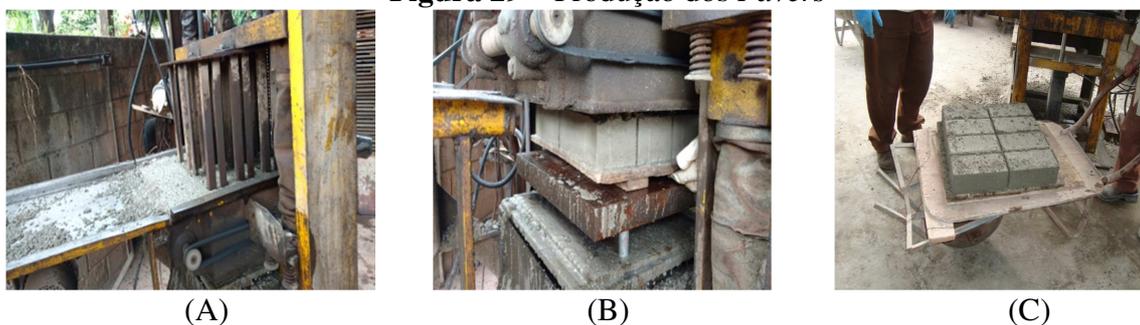
Figura 28 – Betoneira(A) e Vibro-prensa (B) utilizados na fabricação dos pavers



O concreto depois de misturado é colocado na vibro-prensa, onde inicialmente é vibrado, acomodando as partículas de concreto seco (Figura 29 A); logo após é prensado e vibrado ao mesmo tempo. O molde ascende (Figura 29 B) e a placa de madeira móvel que acomoda os *pavers* é removida (Figura 29 C)..

Os *pavers* fabricados tem forma retangular com dimensões de (19,5x9,5x8,0)cm. Tanto a forma quanto as dimensões das peças fabricadas ficaram condicionadas ao molde da vibro-prensa utilizada, já que esta possuía somente este molde para *pavers*.

Figura 29 – Produção dos *Pavers*



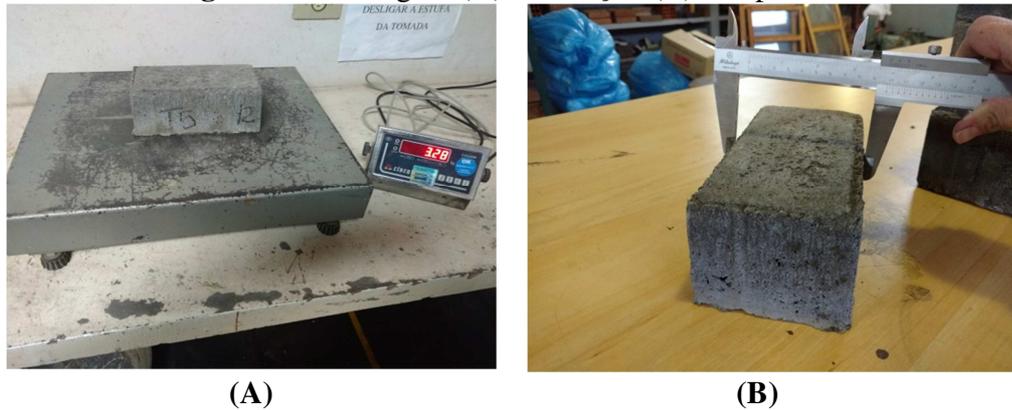
Os *pavers*, ficaram no pátio da fabrica durante 48 horas, sendo molhados três vezes ao dias, após este período foram levados ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá onde permaneceram na Câmara Úmida até a realização dos ensaios previstos no Programa Experimental foram realizados. Para cada traço foram fabricadas 32 peças.

4.3.2. Inspeção Visual: dimensões, massa e cor

Foram separadas 6 peças de cada traço, na idade de 28 dias, para realização da inspeção visual, que consiste na medição, pesagem e verificação de cor das mesmas. Os parâmetros de massa e cor não são definidos em norma, porém foram adotados para verificar qualquer alteração entre as peças moldadas com adição de resíduos e as peças referência. Quanto ao parâmetro dimensional, a NBR 9781:2013 (ABNT:2013) determina que as peças sejam medidas em suas três dimensões, espessura, largura e altura, não podendo haver variação de 3 mm em qualquer uma das três.

As peças, aos 28 dias, foram separadas, medidas, pesadas e analisadas quanto à cor conforme mostra a Figura 30.

Figura 30 – Pesagem (A) e medição (B) dos pavers



4.3.3. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é tomado como parâmetro pela maioria das normas nacionais e internacionais, por isso esta característica é de extrema importância na avaliação de desempenho dos *pavers*.

Neste trabalho o estudo desta propriedade é uma das características que define a viabilidade de substituição do agregado miúdo pelos resíduos. Pelas pesquisas desenvolvidas por diversos autores esta substituição interfere diretamente na resistência à compressão do concreto, seja pela sua diminuição no caso do resíduo de pneus, seja pelo seu aumento no caso da CBC. Além disto, a substituição combinada também foi estudada.

Para o ensaio de resistência à compressão foram fabricados 18 *pavers* para cada um dos primeiros traços definidos, que foram ensaiados com idade de 28 dias, conforme o definido pela norma NBR 9781:2013 (ABNT,2013).

O ensaio realizado seguiu o estabelecido na NBR 9781:2103 (ABNT,2013), que admite que todas as outras características dos *pavers* estão ligadas diretamente a esta propriedade. Para a realização dos ensaios, os *pavers* foram retificados e imersos em água por 24 horas, como exige a norma, e ensaiados no equipamento disponibilizado pelo laboratório, uma Máquina Universal de Ensaio (MEU) da marca EMIC, conforme mostra a Figura 31

Figura 31 - Prensa para ensaio de resistência à compressão



Para realização do ensaio de acordo com a NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) o corpo de prova deve ser colocado centralizado com as placas auxiliares da prensa, discos de aço com diâmetro de $90 \pm 0,5$ mm, conforme mostrado na Figura 32, simulando, assim, o esforço que o *paver* deverá suportar durante o sua utilização.

Figura 32– Paver na prensa entre os discos



Para cálculo da resistência de cada um dos *pavers* foi utilizada pela Equação 05:

$$f_c = \frac{P}{A} * p \quad (\text{Equação 05})$$

Onde,

P =carga de ruptura em N

A = área do carregamento (mm²)

f_c = resistência à compressão das peças

p = fator de correção previsto na NBR 9781:2013 (ABNT:2013) de acordo com a altura dos *pavers*, mostrado na Tabela 08.

Tabela 8 – Fator “ p ” multiplicativo da resistência à compressão dos *pavers*

| Altura das peças (mm) | “ p ” |
|-----------------------|---------|
| 60 | 0,95 |
| 80 | 1,00 |
| 100 | 1,05 |

Fonte: NBR 9780:2013 (ABNT:2013)

A NBR 9781:2013 (ABNT:2013) admite que a resistência à compressão obedeça a uma distribuição normal tendo o seu valor característico determinado pela Equação 06:

$$f_{pc, est} = f_p - t * s \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

$f_{pc, est}$ = resistência característica estimada à compressão, em MPa;

f_p = resistência média das peças ensaiadas de acordo com NBR 9781:2013 (ABNT:2013), em MPa

t = coeficiente de student (Tabela 9)

Tabela 9 – Coeficiente de student

| N | Coeficiente de student |
|----|------------------------|
| 6 | 0,920 |
| 7 | 0,906 |
| 8 | 0,896 |
| 9 | 0,889 |
| 10 | 0,883 |
| 12 | 0,876 |
| 14 | 0,870 |
| 16 | 0,866 |

Fonte: NBR 9780:2013 (ABNT:2013)

n = número de peças

s = desvio padrão da amostra, definido pela Equação 07

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_i)^2}{n-1}} \quad (\text{Equação 07})$$

f_i = resistência individual das peças ensaiadas

4.3.4. Ensaio de absorção de água

Segundo a NBR 9781:2013 (ABNT,2013) a absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

Sendo assim, a absorção está diretamente ligada à porosidade da peça. Quanto menor a porosidade de uma peça, menor a quantidade de água que ela absorve e, com isto, maiores poderão ser suas resistências mecânicas e a sua durabilidade, uma vez que quando utilizados em áreas expostas à umidade o controle da absorção é necessário para o controle das eflorescências.

Segundo Fioriti (2007), a absorção de água por imersão está relacionada com a medição do volume de poros permeáveis do concreto, e não à facilidade com que o fluido penetra no mesmo. A absorção de água está intimamente ligada aos vazios (poros permeáveis) existentes na matriz de cimento. Quanto maior a porosidade das peças, maior sua absorção de água. Esses espaços não preenchidos podem vir a ocasionar perda de durabilidade e de resistência mecânica das peças, assim como aumento da lixiviação de substâncias químicas contidas na mesma.

O ensaio realizado baseou-se na NBR 9781:2013 (ABNT,2013). Para o ensaio foram utilizados 3 *pavers* para cada traço na idade de 28 dias.

No procedimento, primeiramente os corpos de prova são imersos por 24 horas em água e são pesados (M2) na condição saturado superfície seca, que consiste em drenar o *paver* sobre tela metálica por 1 minuto e secar sua superfície com pano seco. Uma vez saturados, os corpos de prova são levados à estufa, onde permanecem por 24 horas. Após este tempo, os mesmos são resfriados por 10 minutos e pesados (M1).

Vale salientar que a NBR 9781:2013 (ABNT,2013) prevê que tanto no processo de

pesagem quanto de secagem, o procedimento de pesagem é repetido a cada duas horas até que não ocorra uma variação superior de 0,5% entre o valor de massa encontrado e o valor obtido anteriormente. A Figura 33 mostra as etapas do ensaio.

Figura 33 – Ensaio de absorção: peças imersas em água (A) e peças na estufa (B)



O valor a absorção de água, expresso em porcentagem, é dado pela Equação 08, e segundo a ABNT NBR 9781:2013 deve ser menor do que 6%:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (\text{Equação 08})$$

4.3.5. Ensaio de resistência à abrasão

A resistência à abrasão está diretamente ligada à resistência do pavimento ao desgaste, sendo tão importante quanto às outras propriedades requeridas aos *pavers*. A NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) prevê e descreve o ensaio de abrasão, porém faz dele uma escolha facultativa. Por não ser um ensaio obrigatório e por não ser muito comum, tanto empresas fabricantes quanto pesquisadores ainda adotam outros métodos para estudar este parâmetro. Dentre as diversas possibilidades o método utilizado para a determinação da abrasão dos *pavers*, foi o Método CIENTEC, disponibilizado no Rio Grande do Sul. Foi ensaiados 1 *paver* para o traço tido como teor ótimo de substituição quanto ao parâmetro de resistência à compressão, com idade de 28 dias, uma vez que este é um ensaio dispendioso. A proposta é a realização de uma comparação entre o traço com teor ótimo e o traço referência.

O Método CIENTEC consiste em simular um percurso de 500 metros percorridos por um corpo de prova de 50x50mm, com uma pressão constante de 0,06 MPa sobre carbetão de silício. O resultado é obtido com a realização de medições em 5 pontos do corpo de prova

antes e após a realização do ensaio, sendo o desgaste a média destas medições e dado em mm.

4.3.6. Ensaio de Lixiviação e Solubilização dos *Pavers*

Pelo fato dos resíduos utilizados se apresentarem como não inertes, ou seja, podem apresentar alterações nas propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, optou-se por repetir os ensaios de lixiviação e solubilização dos *pavers*. Para isso foram moídos parte dos *pavers* referência e dos *pavers* fabricados com o teor ótimo de substituição, e, após a extração dos extratos de lixiviado e solubilizado, os mesmos foram comparados com os padrões dos metais encontrados nos resíduos que apresentaram teores superiores ao exigido em norma.

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados para a classificação da periculosidade das peças fabricadas, após o seu período de vida útil, e também para avaliação do processo de estabilização/solidificação dos resíduos na matriz cimentícia. O ensaio de lixiviação é o ensaio mais comum para avaliar a imobilização dos contaminantes. Ele avalia o potencial do material lixiviado em liberar determinados tipos de contaminantes e consequentemente, fornece informações sobre a classificação do resíduo, além de avaliar se o mesmo deve ser submetido a um processo de tratamento (REDDI; INYANG, 2000).

O procedimento utilizado na obtenção do extrato lixiviado para a CBC seguiu a NBR 10005:2004 (ABNT:2004), assim como o procedimento da extração do solubilizado seguiu a 10006:2004 (ABNT:2004). Sendo que, as amostras de lixiviado e solubilizado foram submetidas a determinação dos teores de contaminantes listados segundo os anexos F e G da NBR 10004:2004 (ABNT:2004), por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica (EAA) 52 Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatôgrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC. Conforme procedimento já descrito anteriormente no item 4.2.3.4.

4.3.6.1. Cálculo da eficiência na retenção de metais

O processo de estabilização/solidificação de um resíduo tem como principal objetivo a verificação da capacidade de fixação/retenção dos elementos em excesso no resíduo bruto nas matrizes solidificadas.. De acordo com Pablos (2008), os ensaios que submetem essas matrizes a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada (ensaio de solubilização), são as referências para a análise do processo. Já Brito (2007) utiliza os ensaios

de lixiviação como base para avaliar essa capacidade de retenção de contaminantes. Por esse motivo é extremamente importante a comparação entre os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo bruto e os resultados dos ensaios das matrizes solidificadas (pavers). Esta comparação foi feita por meio da determinação da eficiência de retenção dos metais na matriz de cimento e foi calculada por meio da Equação 09:

$$E_{retenção} = \frac{C_{bruto} - C_{tratado}}{C_{bruto}} \times 100 \quad (\text{Equação 09})$$

Onde

$E_{retenção}$ = Eficiência de retenção, em porcentagem (%).

C_{Bruto} = Concentração do metal no extrato lixiviado/solubilizado do resíduo bruto, em (mg L⁻¹).

$C_{tratado}$ = Diferença entre a concentração do metal lixiviado/solubilizado nos blocos sem adição do resíduo (referência) e com adição do resíduo, em (mg L⁻¹).

4.4. Calçada Protótipo

Uma calçada protótipo foi construída na Universidade Estadual de Maringá, com o objetivo de analisar o comportamento das peças durante um período de 4 meses. A calçada está localizada na Passarela Central de Pedestres da universidade, conforme indicado na Figura 34, na entrada da Rua 10 de Maio. Tem aproximadamente 10 metros de comprimento por 1 metro de largura, e teve a execução dividida dois trechos, um com *pavers* do traço referência e outro com o traço que obtiver melhores resultados nos ensaios de propriedades das peças.

Figura 34 – Localização da Calçada



A proposta foi a avaliação de algumas características importantes para o pavimento intertravado durante 4 meses, onde foram analisadas características como: assentamento das peças, inspeção visual (cor, juntas e comportamento), condições de conforto térmico (temperatura superficial), drenagem, durabilidade (abrasão e absorção de água). As medições de temperaturas foram executadas semanalmente, as de drenagem foram executadas mensalmente e as de durabilidade ao final do período de 4 meses.

4.4.1. Assentamento das peças

A calçada foi executada com auxílio da equipe de manutenção e serviços internos da prefeitura da Universidade Estadual de Maringá e dos alunos do curso de Engenharia Civil. Para o assentamento foram obedecidas as exigências da NBR 15953:2011 - Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011), no que diz respeito a:

- Camadas de Pavimento: camada de regularização, reforço de subleito, sub-base, base e revestimento;
- Execução: projeto do pavimento, contenção lateral, areia de assentamento,

assentamento das peças, ajustes e arremates, compactação inicial, rejuntamento, compactação final, inspeção final.

4.4.2. Inspeção Visual

A inspeção visual tem como finalidade avaliar as condições gerais do pavimento já acabado, na tentativa de analisar o comportamento do mesmo ao longo da utilização. Nesse trabalho foram determinados como fatores de avaliação, comparando as peças entre si, e principalmente entre as peças confeccionadas com resíduos e as do traço referência:

- Cor: observar variação de cor nas peças;
- Juntas: analisar de forma detalhada a variação da espessura das juntas em relação à adotada no momento da execução;
- Intertravamento das peças: o intertravamento das peças, seja horizontal, vertical ou rotacional, é o principal responsável pela longevidade deste tipo de pavimento, e é somente ao longo da vida útil do pavimento que o mesmo pode ser avaliado e observado. Para verificar este parâmetro devem ser observadas as condições das peças quanto ao seu alinhamento com as peças vizinhas e quanto ao afundamento do pavimento;
- Desgaste superficial: o desgaste das peças ocorre durante a utilização; para avaliar esta característica medições das variações ocorridas na superfície das peças foram realizadas.

4.4.3. Controle de temperatura superficial

Os pisos absorvem e emitem calor de diferentes formas de acordo com o material do qual são constituído. A temperatura da superfície será monitorada semanalmente em três diferentes horários (manhã, tarde e noite) a fim de determinar a variação da mesma ao longo do dia e de acordo com o tipo de material constituinte da calçada.

Foram feitas medições em três pontos diferentes tanto na calçada construída com os *pavers* referência quanto para a calçada construída com os *pavers* contendo resíduos. Para realizar as medições foi utilizado um termômetro de superfície Marca Sato Modelo SK-8700, como o mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Medição da Temperatura Superficial

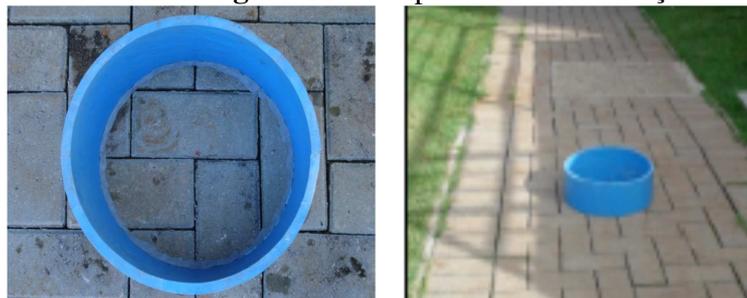


4.4.4. Drenagem – Teste de infiltração

Uma das características dos pavimentos permeáveis é a perda da permeabilidade ao longo do tempo, seja pela acomodação do terreno ou pela selagem das juntas. Segundo Jabur (2013) um método indicado para a avaliação do coeficiente de permeabilidade de pavimento é o ensaio da ASTM C1701 (método de ensaio *in situ* para determinação de coeficientes de permeabilidade em concreto permeável). Em seu estudo o autor analisou diferentes métodos de estudo de infiltração em pavimentos intertravados, pavimentos com blocos vazados e asfalto poroso, e o método da ASTM C1701 foi o que apresentou melhores condições de execução, sendo excelente para ser aplicado em pavimentos novos, o que seria o caso da calçada em questão.

O método consiste em utilizar um cilindro com diâmetro de 30 cm e altura mínima de 20 cm e posicioná-lo na superfície do pavimento. As bordas do cilindro devem ser vedadas com massa de calafetar de modo a evitar a perda de água, conforme Figura 36.

Figura 36 – Dispositivo de Infiltração



Fonte: JABUR (2013)

Inicialmente o pavimento é pré-molhado, despejando-se 3,6 l de água no interior do cilindro, e então espera-se a água infiltrar. Isto é feito para que o solo seja saturado. Se o tempo da pré-molhagem for inferior a 30 s, utiliza-se 18 l de água no ensaio, ou novamente 3,6 l se o tempo de pré-molhagem for superior a 30 s. Desta forma, o ensaio será executado repetindo-se o procedimento anterior a fim de obter o tempo que a água irá levar para infiltrar totalmente no pavimento. Na pré-molhagem e durante o ensaio, o volume de água deve ser adicionado ao cilindro mantendo-se um fluxo constante e mantendo-se a altura de água dentro do cilindro entre 10 mm e 15 mm. O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Lei de Darcy, segundo a Equação 09:

$$I = \frac{K * M}{D^2 * t} \quad \text{(Equação 09)}$$

Onde:

I=Coeficiente de Infiltração (mm/h)

M=Massa de água infiltrada (kg)

D= Diâmetro interno do cilindro (mm)

t= Intervalo de tempo entre adição da água e seu desaparecimento na superfície

K=Constante= 4.583.666.000

As medições foram realizadas em pontos pré-determinados da calçada mensalmente, e comparados com os valores de permeabilidade descritos por Jabur (2013).

4.4.5. Durabilidade – Abrasão e Absorção de Água

Os ensaios de abrasão e absorção de água são realizados antes do assentamento das peças, assim que saem das fábricas, e estão diretamente ligados à avaliação de durabilidade das mesmas, porém, não se sabe ao certo como essas características se mantêm durante a vida útil do pavimento. Durante a execução da calçada algumas peças foram colocadas de forma a serem retiradas para que pudessem ser ensaiadas de acordo com os ensaios de abrasão e absorção já descritos.

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos anteriormente, antes do assentamento, e também entre os *pavers* referência e os fabricados com resíduos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão expostos e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados até o presente momento de acordo com o Organograma Experimental apresentado.

5.1. Caracterização dos Materiais

5.1.1. Aglomerante

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), que confere às peças alta resistência inicial já no início do processo de cura. As características do material foram obtidas junto ao fabricante e constam da Tabela 10 e atendem as normas brasileiras com relação ao limite mínimo de qualidade.

Tabela 10 - Características do Cimento CP V ARI

| Item de Controle | Unidade | Dados do Fabricante | NBR 5737/ NBR 5733 |
|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Resistência 24 horas | MPa | 27 | ≥ 14 |
| Resistência 3 dias | MPa | 37 | ≥ 24 |
| Resistência 7 dias | MPa | 42 | ≥ 34 |
| Resistência 28 dias | MPa | 48 | - |
| Blaine | cm ² /g | 5330 | ≥ 3000 |
| Início de pega | min | 160 | ≥ 60 |
| Fim de pega | min | 265 | ≤ 600 |

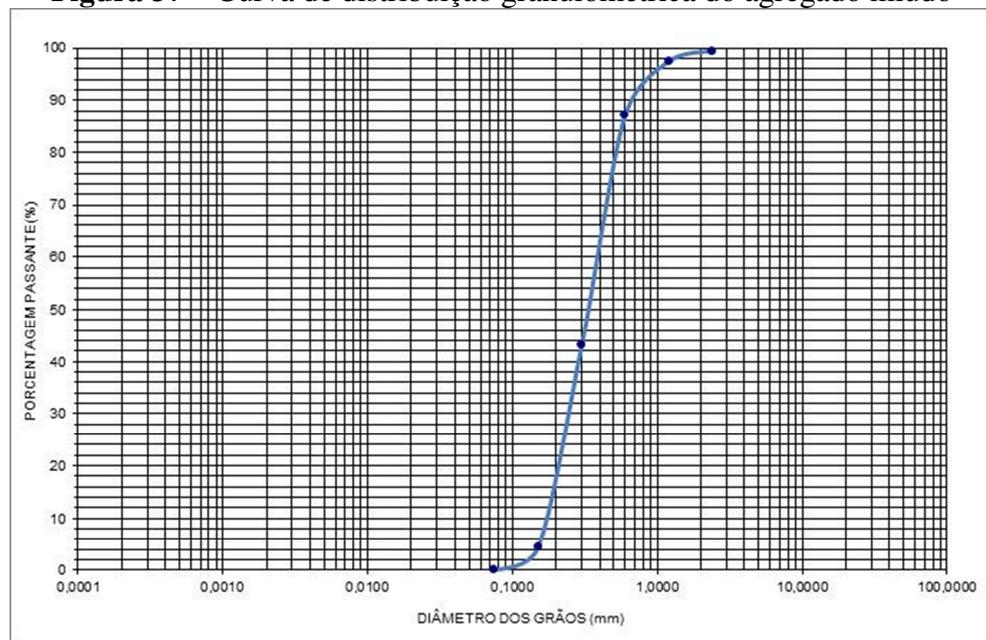
Fonte: Cauê, 2016

5.1.2. Agregado Miúdo

Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo: determinação de massa específica, massa unitária no estado solto, diâmetro máximo característico e módulo de finura constam da Tabela 11 e a Figura 37 mostra a curva de distribuição granulométrica.

Tabela 11 - Caracterização do agregado miúdo

| Característica | Unidade | Valores |
|--------------------------------|-------------------|---------|
| Massa específica | g/cm ³ | 2,655 |
| Massa unitária no estado solto | g/cm ³ | 1,635 |
| Diâmetro máximo característico | mm | 1,2 |
| Módulo de finura | - | 1,68 |

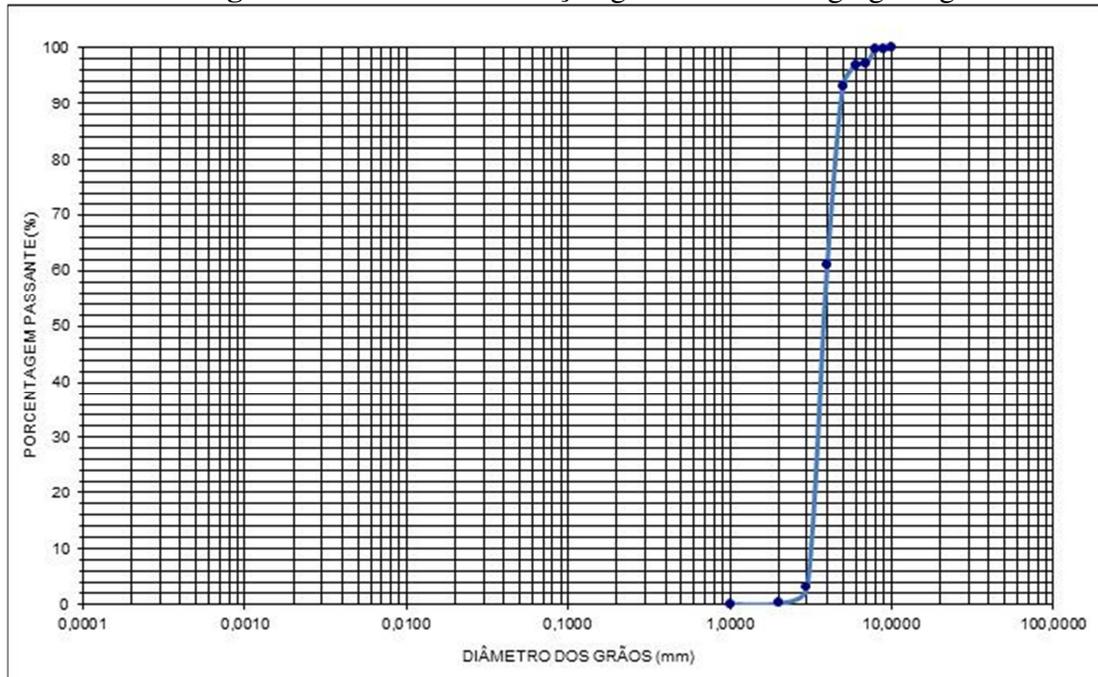
Figura 37 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo

5.1.3. Agregado Graúdo

Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo: determinação de massa específica, massa unitária no estado solto, diâmetro máximo característico e módulo de finura constam da Tabela 12 e a Figura 38 mostra a curva de distribuição granulométrica.

Tabela 12 – Caracterização do agregado graúdo

| Característica | Unidade | Valores |
|--------------------------------|-------------------|---------|
| Massa específica | g/cm ³ | 2,900 |
| Massa unitária no estado solto | g/cm ³ | 1,516 |
| Diâmetro máximo característico | mm | 6,30 |
| Módulo de finura | - | 4,49 |

Figura 38 – Curva distribuição granulométrica agregado graúdo

5.1.4. Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar - CBC

5.1.4.1. Atividade Pozolânica

O ensaio de atividade pozolânica foi realizado no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo seguindo o Método de Chapelle Modificado conforme as diretrizes da NBR 15895:2010 (ABNT,2010) e o procedimento IPT123-CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041 – Revisão 1.

A amostra analisada apresentou um índice de atividade pozolânica de 137 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de amostra, o que segundo a norma NBR 15894-1:2010 (ABNT, 2010) não é indicativo de material pozolânico, uma vez que para se caracterizar desta forma o material necessita apresentar um índice maior ou igual a 750 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$. O resultado descrito consta no Relatório de Ensaio n.º 1 091 761-203, constante no Anexo A.

5.1.4.2. Análise Granulométrica

A Análise Granulométrica foi realizada pela combinação entre peneiramento e sedimentação seguindo a NBR 7181:1984 (ABNT, 2016). A Figura 39 e as Tabelas 13, 14, 15

e 16 trazem os resultados dos ensaios realizados.

Figura 39 - Curva Granulométrica - CBC

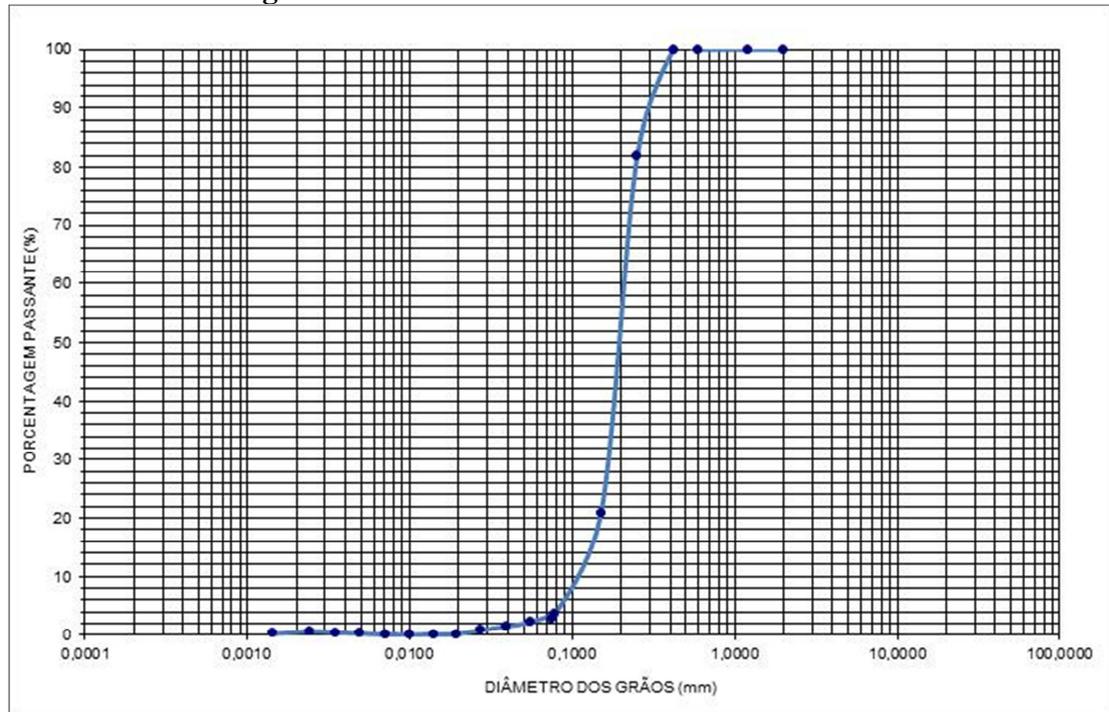


Tabela 13 – Porcentagem passante (%) - CBC

| Diâmetro dos grãos (mm) | Porcentagem (%) |
|-------------------------|-----------------|
| 2 | 100,00 |
| 0,6 | 100,00 |
| 0,2 | 81,81 |
| 0,06 | 2,78 |
| 0,002 | 2,78 |

Tabela 14 – Porcentagem retida – Classificação granulométrica CBC

| Classificação segundo a ABNT NBR 6502:1995 | Porcentagem Retida(%) |
|---|-----------------------|
| 0,6 a 2 mm - 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 |

Tabela 15 - Coeficiente de uniformidade e curvatura - CBC

| Coeficiente | Valor |
|--------------------|--------------|
| D60 | 0,20 |
| D30 | 0,16 |
| D10 | 0,11 |
| U | 1,25 |
| CC | 1,16 |

Tabela 16 – Uniformidade e distribuição granulométrica - CBC

| Aspecto | Amostra |
|--------------------------------|----------------|
| Uniformidade | Muito Uniforme |
| Distribuição Granulométrica | Bem graduada |

Conforme pode ser observado na curva de distribuição granulométrica e na Tabela 13, 79% da cinza ficou retida entre as peneiras 0,06 a 0,2 mm, na classificação da NBR 6502:1995 (ABNT, 1995) elas são semelhantes às areias finas. A amostra apresentou o valor de uniformidade igual a 1,25 (Tabela 14) o que indica uma curva granulométrica quase vertical, ou seja os diâmetros variam em um intervalo pequeno, indicando uma amostra com distribuição uniforme. A graduação da amostra pode ser classificada com boa graduação (Tabelas 14 e 15), com valor do coeficiente de distribuição granulométrica próximo a 1.

5.1.4.3. *Massa Específica e Teor de Umidade*

Os resultados do ensaio para determinação de massa específica, realizado de acordo com a metodologia proposta na ABNT NBR 6508:1984, constam da Tabela 17. O teor de umidade da amostra consta da Tabela 18.

O valor da massa específica da cinza ficou muito próximo do valor da areia utilizada neste trabalho, cujo valor da massa específica foi de 2,65 g/cm³.

Tabela 17 – Massa Específica - CBC

| Item | | Amostra | |
|--|---------------|---------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Capacidade do Picnomêtro (ml) | | 22/500 | 24/200 |
| Amostra Úmida (g) | P1 | 60 | 60 |
| Amostra Seca (g) | | 59,92 | 59,92 |
| Picnomêtro + Solo + Água (g) | P2 | 654,34 | 648,04 |
| Picnomêtro + Água (g) | P3 | 616,56 | 610,22 |
| Temperatura ensaio (°C) | | 24,8 | 25,0 |
| Massa específica da água (g/cm ³) | | 0,9971 | 0,9971 |
| Massa Específica dos grãos (g/cm ³) | Gs | 2,70 | 2,70 |
| Massa Específica dos grãos (médio) (g/cm ³) | Gs (médio) | 2,70 | |

Tabela 18 – Determinação do Teor de Umidade

| Determinação do Teor de Umidade | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Capsula n° | 20 | 50 | 78 |
| Amostra Úmida + Cápsula (g) | 76,69 | 83,64 | 72,87 |
| Amostra Seca + Cápsula (g) | 76,61 | 83,54 | 72,81 |
| Massa Cápsula (g) | 18,35 | 18,27 | 14,35 |
| Umidade (%) | 0,14 | 0,15 | 0,10 |
| Média | 0,13 | | |

5.1.4.4. Ensaios de Lixiviação e Solubilização

A lixiviação e solubilização são ensaios que tem por objetivo separar certas substâncias contidas nos materiais por meio de lavagem ou percolação com solventes, determinando-se e avaliando-se a estabilidade química dos resíduos, permitindo a identificação e quantificação de contaminantes. As Tabelas 19 e 20 apresentam os teores de íons determinados nos extratos lixiviado e solubilizado, respectivamente, bem como os limites máximos permitidos nesses extratos pela NBR 10004:2004 (ABNT,2004), que constam nos Anexos F e G da referida norma.

Tabela 19 – Concentração de ânions no extrato lixiviado - CBC

| Parâmetros | Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (mg/l) (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 | 0,00060 |
| Fluoreto | 150,00 | Nd |
| Prata | 5,00 | 0,00900 |
| Selênio | 1,00 | 0,00000 |

Tabela 20 – Concentração de ânions no extrato solubilizado - CBC

| Parâmetros | Limite Máximo ABNT NBR 10004:2004 (mg/l) (Anexo G) | 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 |

Os valores do ensaio do extrato lixiviado se mantiveram dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Anexo F da NBR 10004:2004 (ABNT,2004), classificado, assim, a CBC como um resíduo “NÃO PERIGOSO”. Os metais alumínio, cádmio e chumbo se mostram no ensaio de solubilização acima do permitido pela NBR 10004:2004 (ABNT,2004) em seu

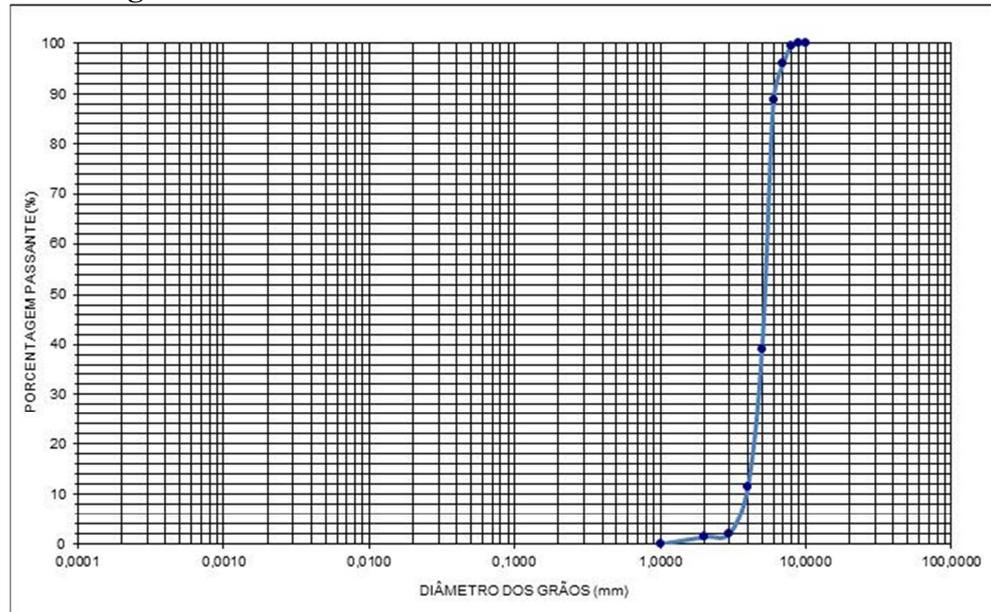
Anexo F, por isto, este resíduo é enquadrado na classe dos não-inertes. Dessa forma, de acordo com a NBR 10004:2004 (ABNT,2004), a amostra de CBC analisada pode ser classificada, pelos parâmetros ora apresentados, como “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte”. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Essa condição da CBC, de ser um material não inerte, pode fazer com que o mesmo lançado diretamente no solo possa a vir causar algum tipo de contaminação a longo prazo, lembrando que o lançamento direto em lavouras é o método usualmente empregado para a CBC. Esta informação justifica mais uma vez o emprego da CBC como agregado na fabricação de concretos e *pavers*, uma vez que o concreto pode levar ao encapsulamento dos materiais contaminantes, mitigando as possíveis contaminações. Para tanto foram realizados também os ensaios de solubilização e lixiviação nos *pavers*, buscando confirmar a eficiência da neutralização e estabilização dos contaminantes presentes nos resíduos empregados na fabricação das peças.

5.1.5. Resíduo de Pneu Inservível

5.1.5.1. Análise Granulométrica

A Análise Granulométrica foi realizada de acordo com o normatizado pela NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). A Figura 40 e a Tabela 21 apresentam, respectivamente, a curva granulométrica e as características granulométricas do resíduo de pneu inservível.

Figura 40 - Curva Granulométrica – Resíduo de Pneu**Tabela 21 – Características granulométricas - Resíduo de Pneu**

| Propriedade | Resíduo de Pneu |
|-------------------------------|-----------------|
| Diâmetro Máximo | 2,4mm |
| Módulo de Finura | 4,14 |
| Classificação (NBR 7211/2009) | Areia Grossa |

O resíduo de pneu apresenta características granulométricas de materiais com granulometria uniforme, como pode ser observado por sua curva granulométrica. A composição granulométrica tem influência direta sobre a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1995) e no seu adensamento, o que leva a uma maior resistência, uma vez que quanto mais denso o concreto maior sua resistência (FIORITI, 2007).

5.1.5.2. Massa Unitária

Para a determinação da massa unitária do resíduo de pneu foi executado o ensaio utilizado para agregados com dimensões características inferiores à 37,5 mm, seguindo o procedimento descrito na NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006), sendo o resultado mostrado na Tabela 22.

Tabela 22– Massa Unitária - Resíduo de Pneu

| Material | Massa Unitária |
|-----------------|-----------------------|
| Resíduo de Pneu | 1,67g/cm ³ |

5.1.2.3. Massa Específica

A Tabela 23 traz os resultados do ensaio para determinação de massa específica, realizado de acordo com a metodologia proposta na NBR 6508:1984 (ABNT, 1984).

Tabela 23 – Massa Específica - Resíduo de Pneu

| Item | | Amostra | |
|--|---------------|---------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Capacidade do Picnomêtro (ml) | | 22/500 | 24/500 |
| Amostra Úmida (g) | P1 | 16,43 | 17,31 |
| Amostra Seca (g) | | 16,43 | 17,31 |
| Picnomêtro + Solo + Água (g) | P2 | 589,03 | 582,00 |
| Picnomêtro + Água (g) | P3 | 610,98 | 604,57 |
| Massa Específica dos grãos (g/cm ³) | Gs | 0,43 | 0,43 |
| Massa Específica dos grãos (médio) (g/cm ³) | Gs (médio) | 0,43 | |

O resíduo de pneu apresenta massa específica dos grãos menor que a massa específica do agregado miúdo utilizado na confecção dos *pavers* o que pode contribuir para um produto mais leve.

5.1.2.4. Ensaios de Lixiviação e Solubilização

A lixiviação e solubilização são ensaios que tem por objetivo separar certas substâncias contidas nos materiais por meio de lavagem ou percolação com solventes, determinando-se e avaliando-se a estabilidade química dos resíduos, permitindo a identificação e quantificação de contaminantes. As Tabelas 24 e 25 apresentam os teores de íons determinados nos extratos lixiviado e solubilizado, respectivamente, bem como os limites máximos permitidos nesses extratos pela ABNT NBR 10004:2004, que constam nos Anexos F e G da referida norma.

Tabela 24 - Concentração de ânions no extrato lixiviado – Resíduo de Pneu

| Parâmetros | Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (Anexo F) | Concentração (mg/l) |
|-------------------|--|--------------------------------|
| Arsênio | 1,00 | 0,00003 |
| Bário | 70,00 | 0,00001 |
| Cádmio | 0,50 | 0,00278 |
| Chumbo | 1,00 | 0,18940 |
| Cromo | 5,00 | 0,12340 |
| Mercúrio | 0,10 | 0,00750 |
| Fluoreto | 150,00 | Nd |
| Prata | 5,00 | 0,00164 |
| Selênio | 1,00 | Nd |

Tabela 25 – Concentração de ânions no extrato solubilizado – Resíduo de Pneu

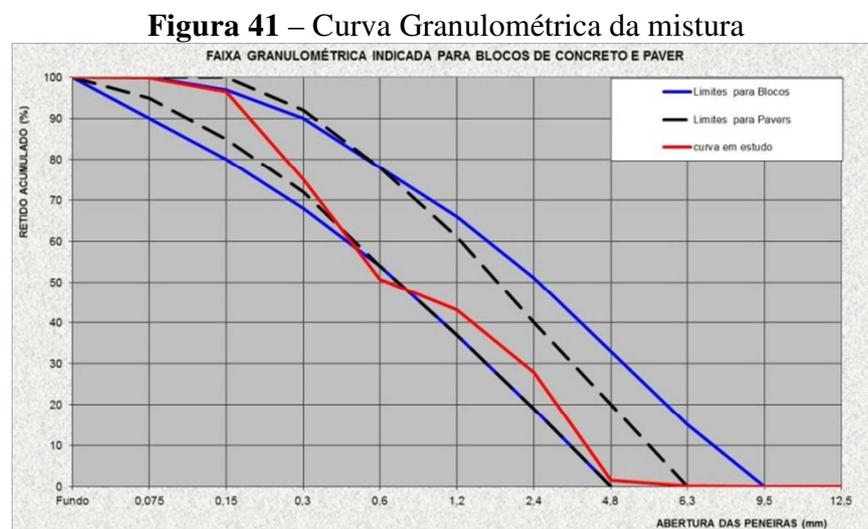
| Parâmetros | Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004(Anexo G) | Concentração (mg/l) |
|-------------------|---|--------------------------------|
| Alumínio | 0,20 | 3,22300 |
| Arsênio | 0,01 | 0,00000 |
| Bário | 0,70 | 0,00000 |
| Cádmio | 0,006 | 0,0013 |
| Chumbo | 0,01 | 0,14265 |
| Cloreto | 250,00 | Nd |
| Cobre | 2,00 | 0,00000 |
| Cromo | 0,05 | Nd |
| Ferro | 0,30 | 0,00945 |
| Fluoreto | 1,50 | Nd |
| Manganês | 0,10 | 0,02510 |
| Mercúrio | 0,001 | 0,00200 |
| Nitrato | 10,00 | Nd |
| Prata | 0,05 | Nd |
| Selênio | 0,01 | Nd |
| Sódio | 200,00 | 5,64300 |
| Sulfato | 250,00 | Nd |
| Zinco | 5,00 | Nd |

Os valores do ensaio do extrato lixiviado se mantiveram dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Anexo F da ABNT NBR 10004:2004, classificado assim a CBC como um resíduo “NÃO PERIGOSO”. Os metais Alumínio, Cádmi e Mercúrio, encontrarem-se acima do permitido pela NBR 10004:2004 em seu Anexo F, por isto, este resíduo é enquadrado na classe dos não-inertes. Dessa forma, de acordo com a NBR 10004, todas as amostras do Resíduo de Pneus Inservíveis analisadas podem ser classificadas, pelos parâmetros ora apresentados, como “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte”. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Assim como a CBC, o resíduo de pneu também é um material não-inerte, o que pode acarretar algum tipo de contaminação tanto do solo quanto da água caso seja descartado de forma inadequada no meio ambiente. Para verificar se os contaminantes foram encapsulados pelo concreto foram realizados também os ensaios de solubilização e lixiviação nos *pavers*, buscando confirmar a eficiência da aplicação.

5.2. Dosagem dos Pavers

A dosagem adotada foi a estabelecida por Amadei (2011) e também utilizada por Altoé (2013), o traço tem uma proporção entre aglomerante e agregado 1:4 em massa. De posse das curvas granulométricas dos agregados a dosagem foi ajustada de acordo com a metodologia proposta por Fernandes (2012). A Figura 41 mostra a Curva Granulométrica da Mistura definida de acordo com a metodologia proposta:



A proporção determinada por Amadei (2011) se mostrou adequada à fabricação de *pavers*, de acordo com a curva granulométrica da mistura, estando dentro dos limites da curva ótima determinada por Fernandes (2012). Sendo assim, a proporção definida foi de 55% de agregado miúdo e 45% de agregado graúdo.

Após definida a dosagem foram estabelecidos os teores de substituição em massa, com base nos resultados da pesquisa de Altoé (2013), partindo-se do princípio da máxima utilização dos resíduos propostos, a Tabela 26 traz as dosagens em massa utilizadas para a fabricação dos *pavers*.

Tabela 26 – Dosagem dos *Pavers* em massa (kg)

| TRAÇO | CIMENTO | AREIA | PNEU | CBC | PEDRISCO | A/C | ADITIVO ML |
|--------------|----------------|--------------|-------------|------------|-----------------|------------|-------------------|
| T0 | 1 | 2,65 | 0 | 0 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T1 | 1 | 1,99 | 0 | 0,66 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T2 | 1 | 2,52 | 0 | 0,13 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T3 | 1 | 2,52 | 0,13 | 0 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T4 | 1 | 2,61 | 0,04 | 0 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T5 | 1 | 1,95 | 0,04 | 0,66 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T6 | 1 | 2,48 | 0,04 | 0,13 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T7 | 1 | 1,86 | 0,13 | 0,66 | 1,35 | 0,42 | 2 |
| T8 | 1 | 2,39 | 0,13 | 0,13 | 1,35 | 0,42 | 2 |

Após definidos os traços as peças foram moldadas na Fábrica de Artefatos de Concreto da Universidade Estadual de Maringá.

Os valores adotados para relação água/cimento e aditivo foram mantidos constantes para todos os traços uma vez que durante a moldagem não ocorreram mudanças na trabalhabilidade do concreto que justificasse tal alteração.

5.3. Propriedades Dos *Pavers*

5.3.1. Inspeção Visual

5.3.1.1. Cor e aspecto visual

O aspecto visual dos *pavers* é de extrema importância, uma vez que o material desenvolvido deve apresentar características visuais próximas aos *pavers* comercializados. Segundo o fabricante Maski (2010), o *paver* deve apresentar arestas bem definidas, bom acabamento de superfície e não possuir rebarbas. Além disto, a cor também é um fator estético importante no momento da definição de qual material será aplicado em uma calçada. Por esse motivo foi realizada uma inspeção com a finalidade de verificar a conformidade das peças e se ocorreu alguma variação de cor nas peças fabricadas com resíduos. A Figura 42 apresenta *paver* fabricado usualmente na Fábrica de Artefatos da UEM.

Figura 42 – Paver fabricado usualmente na Fábrica de Artefatos da UEM



A Figura 43 traz as imagens de alguns dos *pavers* fabricados com os resíduos propostos. Não houve uma variação considerável da cor das peças, uma vez que o resíduo aplicado, apesar de apresentar uma coloração mais escura do que o agregado natural, a quantidade substituída não foi o suficiente para influenciar neste quesito.

Figura 43 – Pavers fabricados com incorporação de resíduos

5.3.1.2. Massa das peças

As peças foram pesadas e os valores médios encontrados para cada traço encontram-se na Tabela 27. Os valores de cada peça constam das planilhas do Apêndice A.

Tabela 27 – Massa média das peças (g)

| TRAÇO | | PESO MÉDIO DAS PEÇAS (g) | VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AO T0 % |
|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| T0 | - | 3.277,22 | - |
| T1 | 25% CBC | 3.304,44 | 0,83 |
| T2 | 5% CBC | 3.312,78 | 1,08 |
| T3 | 5% PNEU | 3.086,67 | -5,81 |
| T4 | 2% PNEU | 3.240,00 | -1,14 |
| T5 | 25% CBC 2% PNEU | 3.250,00 | -0,83 |
| T6 | 5% CBC 2 % PNEU | 3.275,56 | -0,05 |
| T7 | 25% CBC 5% PNEU | 3.235,56 | -1,27 |
| T8 | 5% CBC 5% PNEU | 3.242,22 | -1,07 |

Os resultados encontrados demonstram que a substituição da CBC resulta em um pequeno aumento da massa das peças. Isto se pode ser explicado pela diferença de massa

entre os dois resíduos e o agregado natural. Já as peças fabricadas com resíduos de pneus tiveram sua massa reduzida conforme o esperado, mesmo nas peças fabricadas com traços que continham também CBC.

5.3.1.3. Dimensões

A NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) define que a tolerância dimensional dos *pavers* deve ser de 3 mm para largura, comprimento e espessura. Esta exigência se dá, pois a variação dimensional interfere diretamente no alinhamento e no assentamento das peças.

Para a análise deste parâmetro foram realizadas medições em 18 *pavers* confeccionados por traço, para então ser calculada a média das dimensões. Os resultados constam da Tabela 28, sendo que as dimensões dos *pavers* fabricados devem ser de (195x95x8)mm. O Apêndice A traz as dimensões de cada uma das peças fabricadas.

Tabela 28 – Tolerância Dimensional – Valor médio

| TRAÇO | COMPRIMENTO | | LARGURA | | ESPESSURA | |
|-------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Medida (mm) | Variação (mm) | Medida (mm) | Variação (mm) | Medida (mm) | Variação (mm) |
| FORMA | 195 | - | 95 | - | 80 | - |
| T0 | 196 | 1 | 95 | 0 | 79 | -1 |
| T1 | 196 | 1 | 95 | 0 | 81 | 1 |
| T2 | 195 | 0 | 95 | 0 | 80 | 0 |
| T3 | 196 | 1 | 95 | 0 | 80 | 0 |
| T4 | 196 | 0 | 96 | 1 | 80 | 0 |
| T6 | 195 | 0 | 95 | 0 | 80 | 0 |
| T7 | 195 | 0 | 95 | 0 | 80 | 0 |
| T8 | 195 | 0 | 95 | 0 | 80 | 0 |

Todos os traços apresentaram dimensões médias dentro das tolerâncias dimensionais exigidas pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013).

5.3.1.4. Resistência à compressão

Conforme previsto na NBR 9781:2013 (ABNT,2013) e seguindo a metodologia

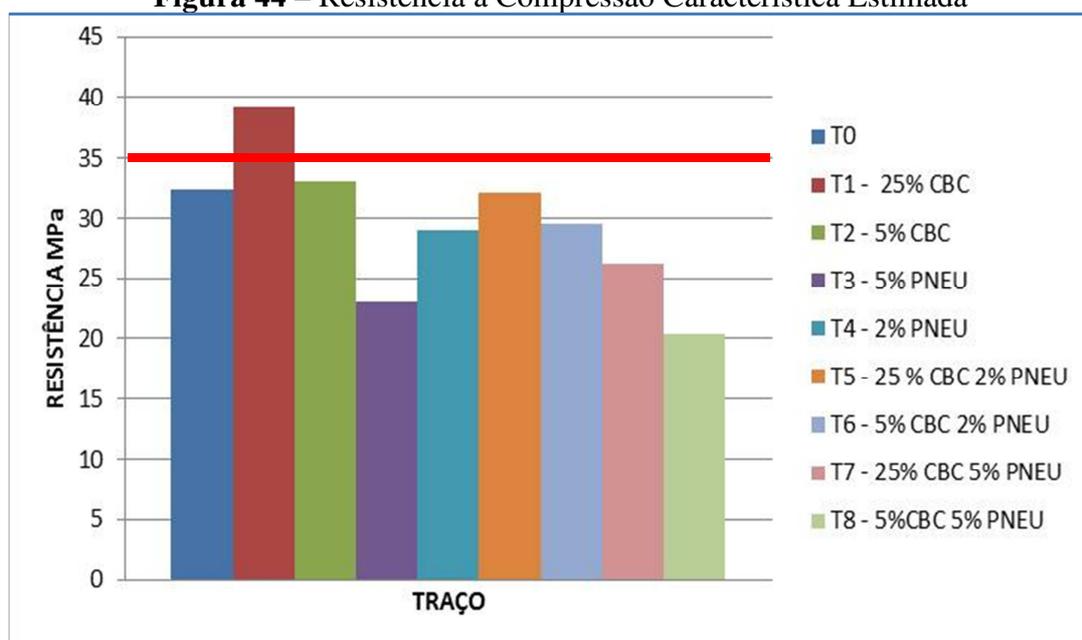
descrita no Anexo A, da referida norma, os *pavers* fabricados com diferentes teores de substituição foram ensaiados à compressão, a fim de determinar a resistência estimada à compressão de cada traço. Os resultados dos ensaios constam na Tabela 29, sendo que os dados completos constam do Apêndice A.

Tabela 29 – Resistência à Compressão média e característica estimada

| TRAÇO | 28 DIAS | |
|-------|----------------------|---------------------------|
| | F _p (MPa) | F _{pk,est} (MPa) |
| T0 | 35,32 | 33,83 |
| T1 | 40,72 | 39,19 |
| T2 | 35,08 | 33,11 |
| T3 | 25,35 | 23,07 |
| T4 | 30,77 | 29,00 |
| T5 | 35,16 | 32,22 |
| T6 | 31,72 | 29,55 |
| T7 | 28,30 | 26,17 |
| T8 | 21,79 | 20,35 |

Para facilitar a análise de dados os resultados foram transferidos para um gráfico, apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Resistência à Compressão Característica Estimada



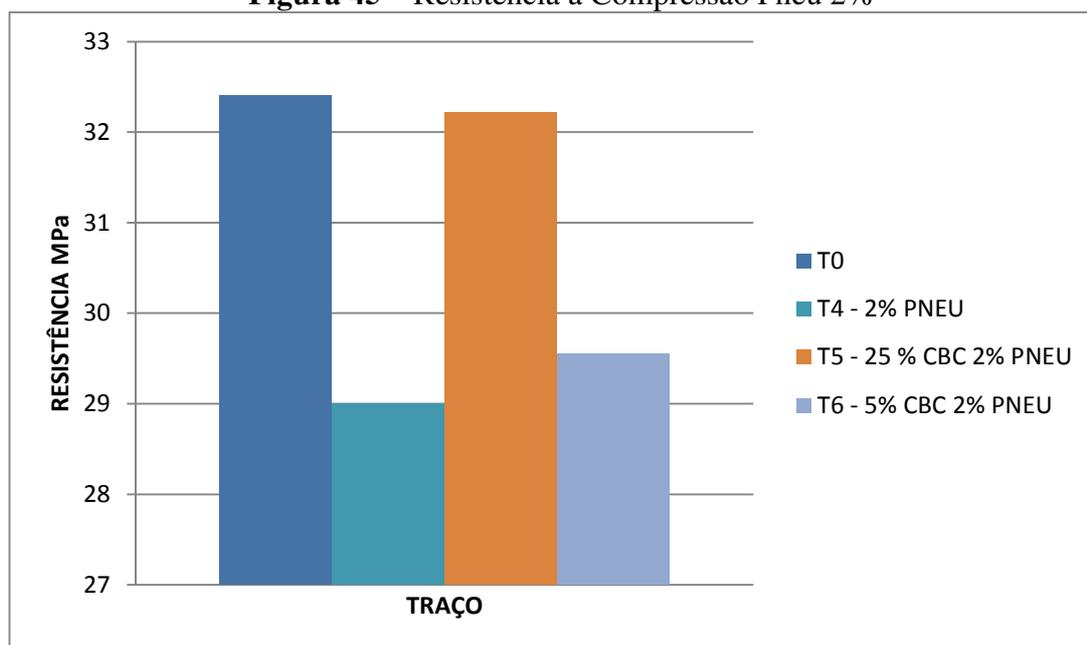
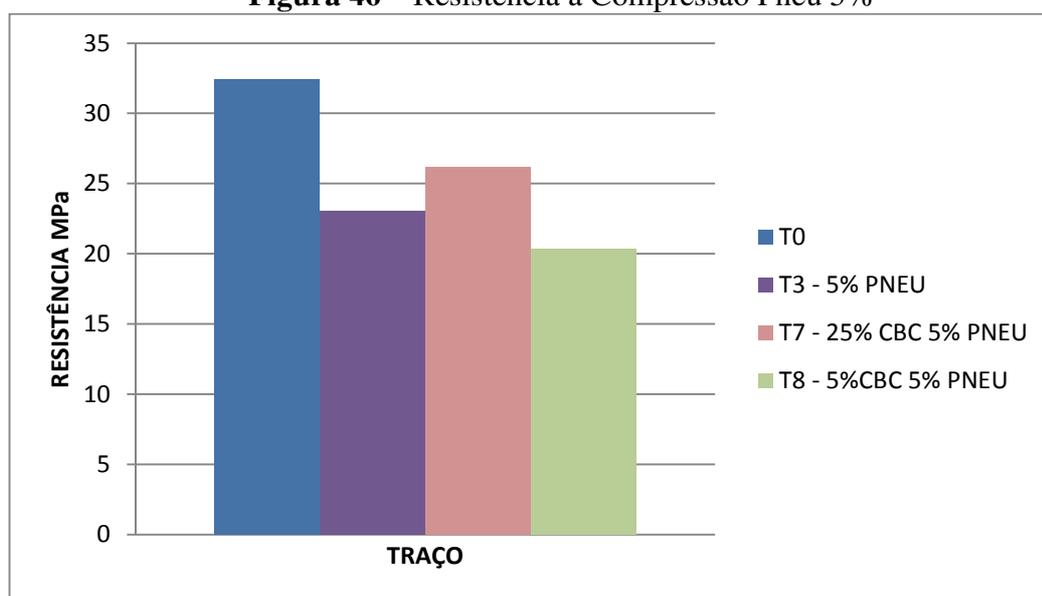
O traço que obteve melhor resultado atendendo aos parâmetros de resistência

exigidos pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013), foi o T1, fabricado com 25% de substituição de areia por CBC, com valor de 39,19 MPa, alcançando um acréscimo de 15,89% em relação ao traço referência. O traço T2 também confeccionado com CBC em substituição à areia apresentou resultado similar ao traço referência. Esses resultados demonstram a viabilidade da utilização deste resíduo na confecção de *pavers*, sem que estes tenham comprometimento da resistência à compressão.

Como já foi apontado em diversas pesquisas ocorre uma diminuição da resistência à compressão quando da substituição da areia por resíduo de pneu. Para esta pesquisa foram estudados traços com 2% e 5% de substituição, e ambos apresentaram redução em relação ao traço T0, com valores de 23,07 MPa e 29 MPa, para T3 e T4, respectivamente. Para a substituição de 2% (T3) a perda de resistência não foi tão expressiva quanto na de 5% (T5), ficando na ordem de 14%, as resistências à compressão obtidas são inferiores ao determinado pela NBR 9781:1987 (ABNT, 1987), porém atingiram valores, que segundo diversos pesquisadores, podem ser indicados para a aplicação em locais sujeitos a solicitações leves, uma vez que, segundo pesquisas, uma resistência de 15 MPa já seria o ideal para este tipo de solicitação (FIORITI, 2007).

Os traços confeccionados com os dois resíduos em conjunto mostram que a mistura de CBC com pneu oferece uma melhora nas propriedades mecânicas do *paver* confeccionado somente com resíduo de pneu. Buscando uma forma de visualizar melhor estes resultados foram confeccionados os gráficos apresentados nas Figuras 45 e 46, onde constam os resultados de 2% e 5% de substituição de areia por Pneu em conjunto com teores de CBC de 5% e 25%.

De acordo com a Figura 45 os *pavers* onde a areia foi substituída por CBC e Pneu alcançaram resultados de resistência à compressão melhores do que onde foi utilizado somente pneu, com um aumento de 11,10% no T5. Outro fator a ser observado foi que este traço apresentou uma redução de menos de 5% em relação a T0. Neste traço o teor total de substituição é de 27% da areia por resíduo, um alto índice se comparado a outros resíduos quando aplicados com a mesma finalidade. No caso dos *pavers* fabricados com teores de 5% de resíduo de pneu, esse comportamento se repete para o teor de CBC de 25%. Já com 5% de CBC os resultados não apresentaram melhora, conforme pode ser visto no Figura 46.

Figura 45 – Resistência à Compressão Pneu 2%**Figura 46 – Resistência à Compressão Pneu 5%**

Um comportamento que pode ser observado diz respeito ao teor de 5% de substituição de CBC nos traços T2, T6 e T8 é que a CBC não influencia na resistência à compressão. Uma maneira de estudar melhor este comportamento pode ser a realização de novos traços com teores intermediários entre 5% e 25%.

Após a análise dos resultados o traço considerado como teor ótimo de substituição é o traço T5, sendo que nele foram substituídos 27% de areia por resíduos (25% por CBC e 2% por Pneu). Este traço alcançou uma resistência de 32,22 MPa, somente 5% inferior ao traço

referência (T0), mostrando-se viável a substituição do agregado pelos resíduos propostos.

Foi realizada uma análise estatística dos resultados individuais de resistência à compressão das peças de pisos intertravados, utilizando a Estatística Descritiva para a análise dos resultados dentro de cada grupo conforme apresentado na Tabela 30. Neste caso, foram considerados os valores individuais de resistência à compressão de cada peça de piso intertravado para o cálculo da média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação.

Tabela 30 – Estatística Descritiva da Resistência à compressão dos *pavers* (Mpa)

| GRUPO | T0 | T01 | T02 | T03 | T04 | T05 | T06 | T07 | T08 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MÉDIA | 35,32 | 40,72 | 35,08 | 25,35 | 30,77 | 35,16 | 31,72 | 28,30 | 21,79 |
| DESVIO PADRAO | 1,73 | 1,76 | 2,28 | 2,64 | 2,05 | 3,41 | 2,52 | 2,47 | 1,68 |
| VARIÂNCIA | 3,00 | 3,11 | 5,22 | 6,95 | 4,21 | 11,62 | 6,35 | 6,09 | 2,81 |
| COEFICIENTE DE VARIÇÃO | 4,90 | 4,33 | 6,51 | 10,40 | 6,67 | 9,69 | 7,94 | 8,72 | 7,70 |

Na Tabela 30 estão apresentados os valores das médias, desvio padrão, variância e coeficiente de variação para cada grupo de misturas e peças ensaiadas aos 28 dias de idade. Analisando-se os valores dos coeficientes de variação, que são uma medida de dispersão dos resultados dos ensaios, observam-se valores baixos, variando de 4,33 a 10,40, nas oito distribuições, em média, indicando homogeneidade dos valores das amostras e, conseqüentemente, consistência dos dados.

Na sequência, procedeu-se à Análise de Variância (ANOVA) para a avaliação dos resultados de resistência à compressão entre os grupos, em função do fator porcentagem de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha. A ANOVA testa se vários grupos têm a mesma média, comparando o afastamento entre as médias amostrais com a variação existente dentro dos grupos. Na Tabela 31 estão apresentados os resultados teste para a resistência à compressão.

Tabela 31 – Resultado Teste ANOVA

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 4834,647 | 8 | 604,3309 | 110,1702 | 1,61E-59 | 1,99939 |
| Dentro dos grupos | 839,2708 | 153 | 5,48543 | | | |
| Total | 5673,918 | 161 | | | | |

A hipótese nula, no teste F da ANOVA, afirma que todas as médias dos grupos são

iguais, já a hipótese alternativa, afirma que nem todas as médias são iguais. Em uma tabela de Distribuição F a 5% ($p=0,05$), pode-se encontrar o F crítico. Se F calculado for maior que F crítico, então rejeita-se a hipótese nula e aceita a hipótese alternativa. Outra forma de avaliar é por meio do p-valor, que é o menor nível de significância com que não se rejeitaria a hipótese nula. Em termos gerais, um p-valor pequeno significa que a probabilidade de obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, levando assim à rejeição da hipótese nula.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 31 permite concluir que há diferença significativa entre os grupos de misturas. Observa-se que F calculado é maior que F crítico, portanto rejeita-se a hipótese nula (que não há diferença entre os grupos) em prol da hipótese alternativa (há diferença entre os grupos) ao risco de 5% (significância de 95%). A análise do p-valor ($2,23E-12$ – muito menor que 0,05) permite rejeitar a hipótese nula de igualdade de médias para qualquer nível de significância, uma vez que o valor é aproximadamente zero, ou seja, as médias diferem entre si com nível de significância de 95%.

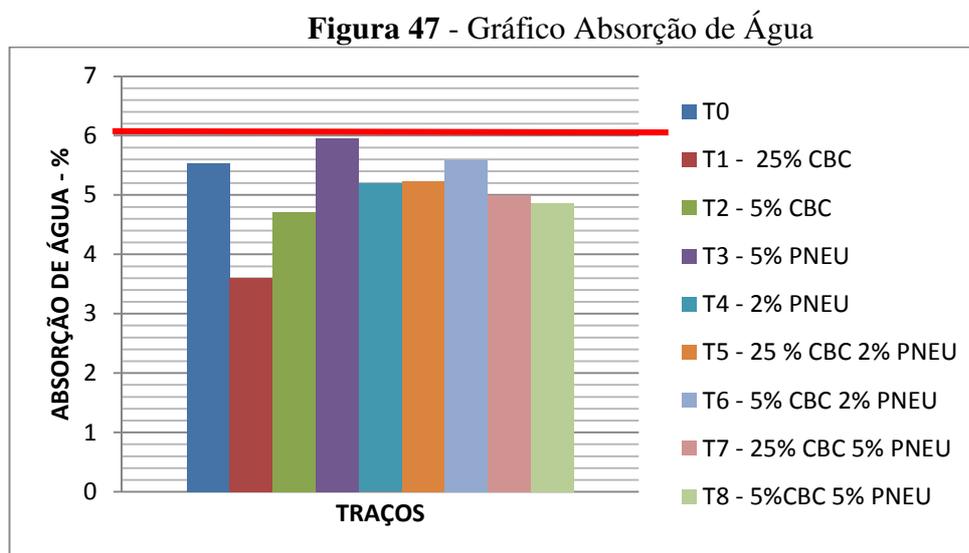
5.3.1.5. Absorção de água

A absorção de água dos *pavers* foi determinada pela metodologia estabelecida na NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) e seguindo a metodologia descrita no Anexo A, para a idade de 28 dias. Os resultados obtidos nos ensaios constam da Tabela 32. Os dados completos dos ensaios estão no Apêndice B.

Tabela 32 – Índice de Absorção de Água

| TRAÇO | | ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) |
|-------|------------------|-------------------------|
| T0 | - | 5,54 |
| T1 | 25% CBC | 3,60 |
| T2 | 5% CBC | 4,71 |
| T3 | 5% PNEU | 5,95 |
| T4 | 2% PNEU | 5,19 |
| T5 | 25 % CBC 2% PNEU | 5,23 |
| T6 | 5% CBC 2% PNEU | 5,59 |
| T7 | 25% CBC 5% PNEU | 5,00 |
| T8 | 5%CBC 5% PNEU | 4,86 |

Os resultados dos ensaios estão representados graficamente na Figura 47. Em todos os traços confeccionados este índice ficou abaixo do máximo permitido pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) que é de 6%.



A absorção de água para os traços confeccionados com CBC foi menor que o obtido no traço referência. Além do mais, o índice de absorção diminuiu com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo por CBC. Este fato pode ser explicado pela baixa porosidade que os pavers fabricados com este resíduo apresentaram. Como a CBC é extremamente fina preenche os vazios entre os outros agregados, diminuindo a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água.

O mesmo não ocorre com os pavers fabricados com resíduos de pneus, o que indica que estas peças possuem uma maior porosidade, apesar de estar dentro dos parâmetros exigidos pela norma. Porém, quando se adiciona CBC à mistura estes índices são reduzidos, o que mostra que a CBC contribuiu para melhorar também esta característica dos pavers.

5.3.1.6. Resistência à Abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado somente para o traço referência e o traço que apresentou melhor resultado no quesito de propriedade mecânica, o traço T5, sendo utilizado um exemplar para cada traço. De cada exemplar foram retiradas duas amostras, e os resultados obtidos constam da Tabela 33 e da Figura 48.

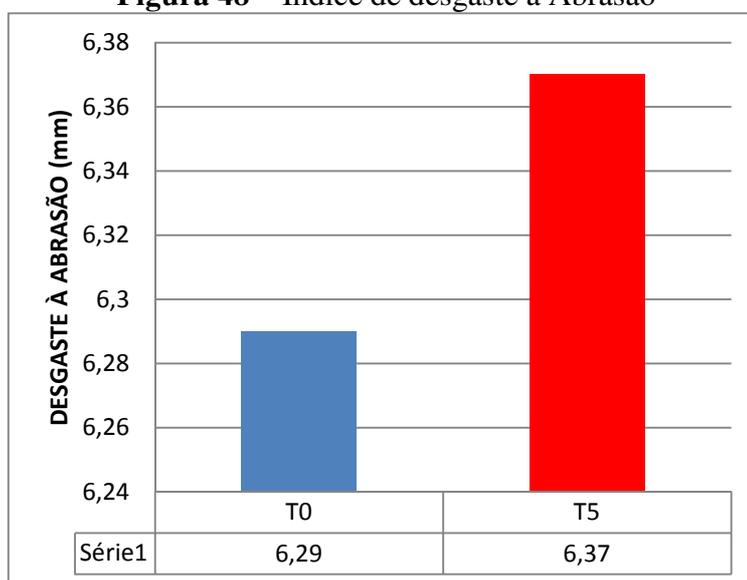
Os resultados obtidos são relativamente altos quando comparados com resultados de outros ensaios. Isto se deve ao fato de que o Método Cientec é tido como o teste mais abrasivo, por utilizar o carbetto de silício, que desgasta todo material mineral que compõe o concreto (Viecili, 2004).

Hood (2006) sugere que seja utilizado como parâmetro o valor obtido no traço referência para Método Cientec, porém, o autor, sugere que o desgaste seja limitado a 15 mm, valor médio atingido por diversos autores. No caso da NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) o desgaste máximo admitido é de 23 mm para *pavers* sujeitos ao tráfego de pedestres, de veículos leves e veículos comerciais de linha.

Tabela 33 – Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)

| Traço | TRAÇO | | INDICE DE DESGASTE (mm) |
|-------|-------|------|-------------------------|
| | CBC | Pneu | |
| T0 | 0% | 0% | 6,29 |
| T5 | 25% | 2% | 6,37 |

Figura 48 – Índice de desgaste à Abrasão



O resultado obtido para o traço referência é compatível com os resultados encontrados por outros pesquisadores que utilizaram o Método Cientec para análise de resistência à abrasão. Amadei (2011) analisou esta característica em sua pesquisa e obteve um desgaste de 6,40 mm em seu traço referência e Hood (2006) atingiu 6,17 mm.

Quanto ao *paver* fabricado com CBC e Pneu os resultados apresentados não demonstram que a substituição tenha influenciado esta característica, mostrando mais uma vez a viabilidade da substituição.

O laudo com resultados dos ensaios encontra-se no Anexo B.

5.3.1.7. *Teor ótimo de substituição*

Com base nos resultados dos ensaios realizados o Traço T05 foi escolhido como o teor ótimo, ou seja, o que apresentou menor influência da substituição do agregado por resíduos nas características analisadas, mesmo utilizando teores máximos de substituição possíveis, 25% de CBC e 2% de pneu, totalizando 27%. O Traço T05 se mostrou o mais próximo do traço referência em termos de resistência e absorção de água.

5.3.1.8. *Lixiviação e Solubilização dos Paviers*

A lixiviação e solubilização são ensaios que tem por objetivo separar certas substâncias contidas nos materiais por meio de lavagem ou percolação com solventes, determinando-se e avaliando-se a estabilidade química dos resíduos, permitindo a identificação e quantificação de contaminantes. As Tabelas 34 e 35 apresentam os teores de íons determinados nos extratos lixiviado e solubilizado, respectivamente, bem como os limites máximos permitidos nesses extratos pela ABNT NBR 10004:2004, que constam nos Anexos F e G da referida norma.

Com os resultados obtidos pode-se classificar os resíduos dos *pavers* fabricados com CBC e resíduos de pneus como: Classe II B – não perigoso e inerte. Sendo assim os contaminantes que faziam com que a CBC e o resíduo de pneu fossem classificados como não-inertes foram estabilizados pela matriz cimentícia, conforme pode ser visto na Tabela 36 onde está calcula a eficiência de retenção de metais.

Tabela 34 - Concentração de ânions no extrato lixiviado – Pavers

| Parâmetros | Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (Anexo F) | Concentração Pavers referência (mg/l) | Concentração Pavers com resíduos (mg/l) |
|-------------------|--|--|--|
| Arsênio | 1,00 | 0,0003 | 0,0002 |
| Bário | 70,00 | 42,43 | 39,93 |
| Cádmio | 0,50 | 0,03 | 0,025 |
| Chumbo | 1,00 | 0,38 | 0,25 |
| Cromo | 5,00 | 0,17 | 0,11 |
| Mercúrio | 0,10 | 0,0008 | 0,0009 |
| Fluoreto | 150,00 | Nd | Nd |
| Prata | 5,00 | 0,008 | 0,007 |
| Selênio | 1,00 | 0,0003 | Nd |

Tabela 35 – Concentração de ânions no extrato solubilizado – Pavers

| Parâmetros | Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (Anexo G) | Concentração Pavers referência (mg/l) | Concentração Pavers com resíduos (mg/l) |
|-------------------|--|--|--|
| Alumínio | 0,20 | 0,15 | 0,13 |
| Cádmio | 0,006 | 0,005 | 0,005 |
| Chumbo | 0,01 | 0,008 | 0,006 |

Tabela 36 – Cálculo da Eficiência de Retenção do Paver

| Parâmetros | Concentração CBC (mg/l) C_{bruto} | Concentração Pneu (mg/l) C_{bruto} | Concentração Tratada (mg/l) $C_{tratado}$ | Eficiência de Retenção (E_{ret}) |
|-------------------|---|--|---|--|
| Alumínio | 2,005 | 3,223 | 0,02 | 99,38% |
| Cádmio | 0,0075 | 0,0013 | 0,00 | 100% |
| Chumbo | 0,1459 | 0,14265 | 0,002 | 98,63% |

Conner (1990) e Wiles (1987) estudaram o tratamento de resíduos sólidos industriais perigosos com pozolanas, cinzas volantes e cimento, verificando os mecanismos de conversão química e retenção física dos contaminantes. De acordo com os autores a imobilização do íon

cádmio (Cd_{2+}) está relacionada à sua precipitação na matriz cimentícia, reagindo com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultando na substituição dos íons Cd_{2+} e gerando o $\text{CdCa}(\text{OH})_4$. Bishop (1986) afirma que a imobilização do chumbo (Pb_{+2}) em cimento deve-se a dois fenômenos: primeiro a precipitação do hidróxido metálico e depois a sua encapsulação na fase C-S-H. De acordo com Bradley e Hanna (1994), em pH alcalino ($\text{pH} > 7$), os cátions Al_{+3} precipitam na forma de hidróxidos insolúveis $[\text{Al}(\text{OH})_3]$.

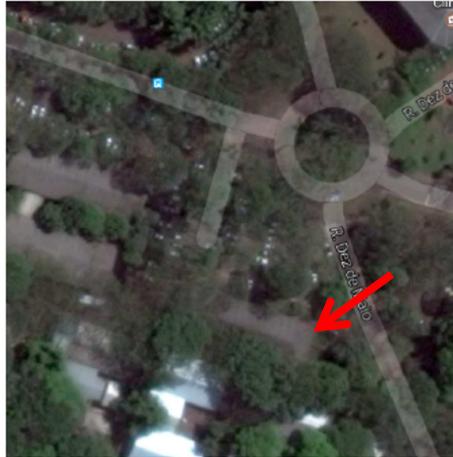
Os mecanismos de precipitação e encapsulamento supracitados podem ser uma explicação para a diminuição da liberação desses metais no solubilizado dos *pavers* fabricados com os resíduos propostos. Os resultados indicaram claramente que esses metais estão sujeitos a um mecanismo de imobilização decorrente do processo de tratamento utilizado, contribuindo dessa forma para a redução de contaminação do ambiente com a disposição do resíduo da forma usualmente adotada.

5.4. Calçada Protótipo

A calçada protótipo foi construída na Universidade Estadual de Maringá na passarela central próximo à entrada de pedestres da Rua 10 de Maio, conforme indicado na Figura 49 (A). A calçada foi executada em um trecho que necessitava de manutenção, como pode ser visto na Figura 49 (B), uma vez que se encontrava muito danificado e impedia a passagem das pessoas, atendendo assim uma solicitação da Prefeitura do Campus e contribuindo para a segurança e conforto da comunidade acadêmica, uma vez que esta entrada é uma das mais movimentadas da universidade. A dimensão do trecho executado é de 4 metros de comprimento por 3 metros de largura.

O trânsito de pessoas nesta entrada é constante, por dar acesso à Passarela Central da universidade. Segundo a Prefeitura do Campus estima-se que em horários de pico passam por ela cerca de 50 pessoas/hora e em horários intermediários cerca de 20 pessoas/hora. Para a pesquisa este dado é de extrema importância, uma vez que o trânsito frequente de pessoas garante dados e condições de uma situação real para o protótipo executado.

Figura 49 – Localização da Calçada (A) e condições do local antes da execução (B)



(A)

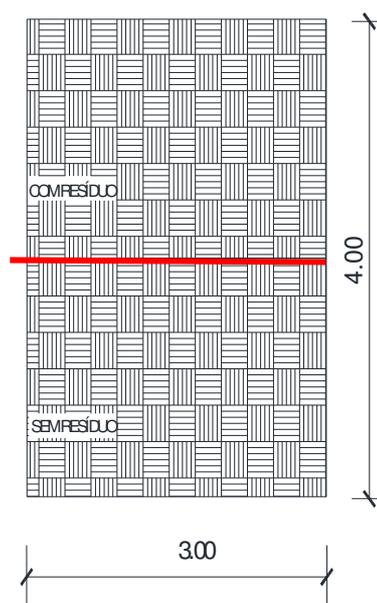


(B)

5.4.1. Execução da Calçada

Após a definição do local de execução, foram realizadas as medições para execução da calçada para a quantificação do material necessário e fabricação do mesmo. O trecho realizado tem 4,00 metros de comprimento por 3,00 metros de largura, sendo que metade do trecho foi executado com *pavers* referência e a outra metade com peças fabricadas com CBC e Pneu, fabricadas com o Traço T05, conforme mostrado no esquema da Figura 50.

Figura 50 – Esquema da Calçada Executada



5.4.1.1. *Fabricação das Peças para a Calçada Protótipo*

Depois de realizadas as medições e quantificado o número necessário de peças para cada trecho da calçada deu-se início à fabricação das mesmas na Fábrica de Artefatos de Concreto da UEM, de acordo com cronograma determinado pela gerência da fábrica. A fabricação ocorreu ao longo de uma semana, em 2 turnos, com auxílio de 4 funcionários, no mês de dezembro de 2016. A Figura 51 mostra o processo de fabricação: concreto seco após as mistura (A), moldagem dos blocos de concreto para pavimentação na vibroprensa pneumática (B) e as peças prontas no pátio da fábrica de artefatos (C).

Assim como os primeiros *pavers* fabricados na fase de análise de propriedades, os *pavers* fabricados para a execução da calçada permaneceram na fábrica durante 48 horas, sendo molhados três vezes ao dia, após este período foram levados ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá onde permaneceram na Câmara Úmida até execução da calçada.

Figura 51 – Fabricação dos pavers da calçada protótipo



5.4.1.2. *Assentamento da calçada*

A execução da calçada durou 7 dias, uma vez que os serviços foram executados e fiscalizados por funcionários da Prefeitura do Campus, no período de 04 a 10 de março de 2017. Esta data foi escolhida, pois o ano letivo de 2017 teve início em abril, desta forma a calçada analisada estaria pronta para o início das aulas e ocorrendo desta forma a utilização plena durante os experimentos.

Inicialmente foi realizada a limpeza e o nivelamento do terreno, com auxílio de enxada, colher e linha de pedreiro. Como este trecho era um reparo em uma calçada já

existente foram retiradas as peças danificadas e o nivelamento seguiu o alinhamento da calçada existente, como pode ser visto na Figura 52.

Figura 52 – Limpeza e nivelamento do terreno



Após a limpeza do terreno e da regularização de toda a área deu-se início à execução da camada de assentamento, constituída por 3 cm de pó-de-pedra. O material foi lançado e espalhado com auxílio de enxada e colher de pedreiro, tendo a altura determinada com auxílio da linha de pedreiro. Vale ressaltar que como o trecho é um complemento de uma calçada já existente, sendo uma reposição de peças danificadas e faltantes, não foi necessária a execução de base e sub-base, e nem mesmo execução de uma compactação da área, já que o terreno estava firme e com boa compactação. A Figura 53 mostra como foi executada a camada de assentamento.

Figura 53 – Execução de Camada de Assentamento



Terminada a camada de assentamento foi dado início ao assentamento das peças, obedecendo o esquadro e nível determinado. O paginação seguiu o modelo tipo trama, com a

finalidade de diferenciar o trecho da calçada protótipo do restante da passarela. Foram utilizadas ferramentas como esquadro, régua, linha e marreta de borracha para executar o assentamento. As juntas obedeceram o espaçamento determinado pela própria peça (ressalto na lateral). A Figura 54 mostra como foi realizado o assentamento das peças.

Figura 54 – Assentamento dos *pavers*



Terminado o assentamento foi executado o rejuntamento com areia média, o material foi espalhado sobre as peças assentadas e varrido, a varrição tem como finalidade de fazer com que a areia penetre nas juntas, conforme mostrado na Figura 55. Após o rejuntamento ainda foi realizada uma leve compactação com auxílio de soquetes, poderia ser utilizada a placa vibratória, porém como a calçada é um complemento de uma já existente e o emprego da placa vibratória poderia danificar as peças já existentes e seu intertravamento.

Figura 55 – Rejuntamento com areia

Para terminar a execução da calçada foram executados os arremates em torno de uma caixa existente , Figura 56 (B), e também no encontro com a calçada existente. Para finalizar foi realizada a contenção lateral evitando assim o deslocamento da lateral livre da calçada, Figura 56 (A) essa contenção foi executada com concreto magro e auxílio de formas.

Figura 56 – Arremates e contenção lateral

Logo após a execução da calçada protótipo foi realizada uma inspeção visual verificando detalhes como: espaçamento entre as juntas, intertravamento das peças, aspecto geral da calçada, diferenças de coloração, acabamento das contenção lateral e dos arremates. A Figura 57 traz o aspecto da calçada terminada.

Figura 57 – Caçada terminada



De maneira geral a execução ficou a contento, sendo que apenas um único detalhe chamou atenção: uma pequena diferença de coloração entre as peças com e sem resíduos, como pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 – Diferença de Coloração



5.4.2. Inspeção Visual

Durante o período de ensaios realizados na calçada foram simultaneamente analisados os aspectos visuais da mesma, comparando-se sempre o trecho executado com *pavers* com e sem resíduos, tentando verificar se existiam alterações importantes que pudessem inviabilizar a utilização dos resíduos.

A primeira observação a ser feita diz respeito à cor: existe uma leve diferença de cor entre as peças. Isto já havia sido notado durante a fabricação e durante o assentamento tornou-se mais evidente. A Figura 59 (A) mostra a diferença no momento do assentamento, após o rejuntamento a mesma não fica tão evidente como mostrado na Figura 59 (B) e (C).

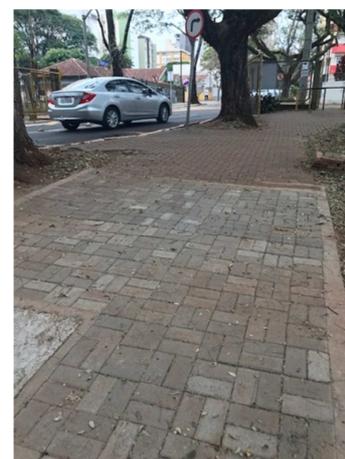
Figura 59 – Coloração da Calçada



(A)



(B)



(C)

Esta característica não influencia na utilização das peças, mesmo porque em peças fabricadas em escala industrial isto também pode ser identificado dependendo do lote ou do fabricante do cimento utilizado. Esta alteração ocorreu, certamente, pela cor mais escura dos resíduos, tanto da CBC quanto do Pneu.

A execução dos dois trechos seguiu a mesma metodologia e foram executados pelos mesmos funcionários, mantendo assim o mesmo padrão de juntas e intertravamento. Como pode ser visto na Figura 60, o aspecto geral permanece o mesmo. Não ocorreram deslocamentos significativos que levassem ao aumento das juntas ou rotações que comprometessem o intertravamento das peças. O comportamento ao tráfego dos dois trechos foi muito similar, ou seja, não houve nenhum fator que distinguisse um do outro.

Figura 60 – Aspecto Geral da Calçada e das peças

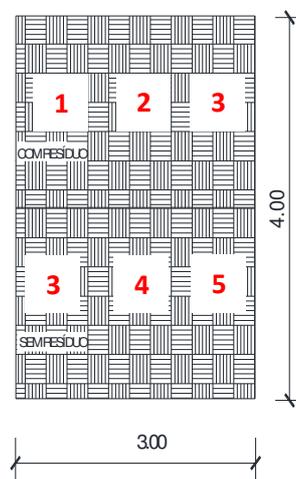


Também não foi verificado nenhum tipo de desgaste das peças durante o período de 4 meses em que foi analisada a calçada, porém isto não pode ser afirmado a longo prazo, por este motivo este fator será analisado por mais tempo por alunos do curso de Engenharia Civil.

5.4.3. Controle de Temperatura Superficial

O controle de temperatura foi iniciado logo após a conclusão da calçada, com auxílio de um termômetro de superfície foram feitas leituras da temperatura superficial dos dois trechos executados. Em cada um deles foram realizadas leituras, em 3 pontos diferentes, conforme mostrado na Figura 61, semanalmente, pela manhã, à tarde e à noite, na tentativa de observar diferenças entre elas.

Figura 61 – Localização dos Pontos de Leitura



A Tabela 37 traz a média das medições de temperatura superficial nos dois trechos da calçada, a medição em cada um dos pontos consta do Apêndice C.

Tabela 37 – Medições da Temperatura Superficial da Calçada Protótipo

| Data da leitura | Horário | Temp. Ambiente °C | Trecho | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| 10/03/2017 | Manhã | 26,8 | CBC+Pneu | 23,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 23,67 | |
| | Tarde | 32,5 | CBC+Pneu | 30,67 | -1,12% |
| | | | Ref | 30,33 | |
| | Noite | 27,2 | CBC+Pneu | 25,33 | 2,58% |
| | | | Ref | 26,00 | |
| 12/03/2017 | Manhã | 23,8 | CBC+Pneu | 21,00 | 1,55% |
| | | | Ref | 21,33 | |
| | Tarde | 31,8 | CBC+Pneu | 26,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 26,67 | |
| | Noite | 33,3 | CBC+Pneu | 27,00 | 1,21% |
| | | | Ref | 27,33 | |
| 19/03/2017 | Manhã | 25,6 | CBC+Pneu | 21,00 | 1,55% |
| | | | Ref | 21,33 | |
| | Tarde | 32,5 | CBC+Pneu | 26,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 26,67 | |
| | Noite | 27,8 | CBC+Pneu | 22,33 | 0,00% |
| | | | Ref | 22,33 | |
| 26/03/2017 | Manhã | 22,4 | CBC+Pneu | 21,00 | -3,30% |
| | | | Ref | 20,33 | |
| | Tarde | 31,2 | CBC+Pneu | 30,00 | 1,09% |
| | | | Ref | 30,33 | |
| | Noite | 31,5 | CBC+Pneu | 29,33 | 0,00% |
| | | | Ref | 29,33 | |
| 01/04/2017 | Manhã | 16,7 | CBC+Pneu | 14,33 | 2,32% |
| | | | Ref | 14,67 | |
| | Tarde | 23,4 | CBC+Pneu | 21,00 | 1,55% |
| | | | Ref | 21,33 | |
| | Noite | 28,1 | CBC+Pneu | 25,33 | 1,32% |
| | | | Ref | 25,67 | |
| 08/04/2017 | Manhã | 21,5 | CBC+Pneu | 19,00 | 1,71% |
| | | | Ref | 19,33 | |
| | Tarde | 23,9 | CBC+Pneu | 21,33 | -3,19% |
| | | | Ref | 20,67 | |
| | Noite | 27,3 | CBC+Pneu | 25,67 | -1,34% |
| | | | | | |

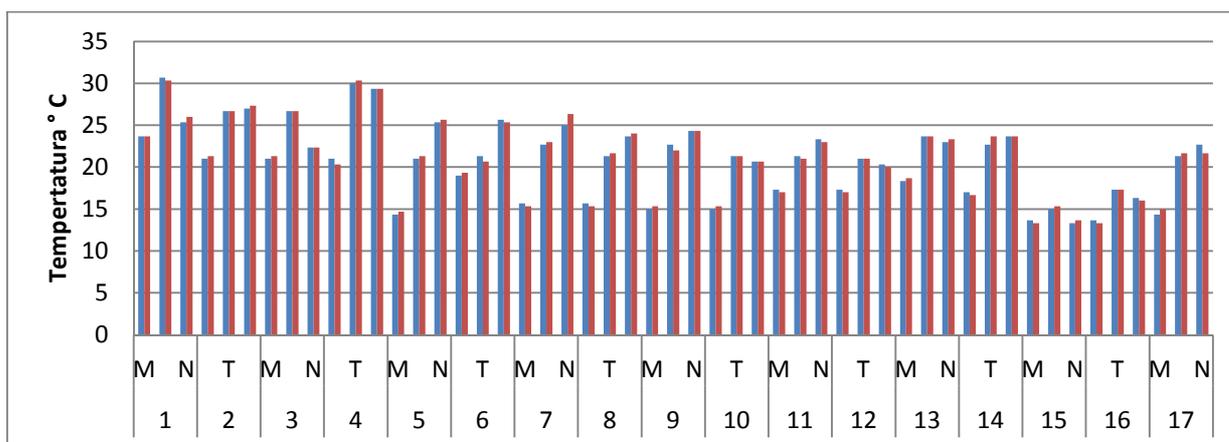
Tabela 37 - Medições da Temperatura Superficial da Calçada Protótipo..Continuação

| Data da leitura | Horário | Temp. Ambiente °C | Trecho | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| 17/04/2017 | Manhã | 18,1 | CBC+Pneu | 15,67 | -2,22% |
| | | | Ref | 15,33 | |
| | Tarde | 24,5 | CBC+Pneu | 22,67 | 1,43% |
| | | | Ref | 23,00 | |
| | Noite | 27,3 | CBC+Pneu | 25,00 | 5,05% |
| | | | Ref | 26,33 | |
| 24/04/2017 | Manhã | 17,3 | CBC+Pneu | 15,67 | -2,22% |
| | | | Ref | 15,33 | |
| | Tarde | 24,4 | CBC+Pneu | 21,33 | 1,57% |
| | | | Ref | 21,67 | |
| | Noite | 26,5 | CBC+Pneu | 23,67 | 1,37% |
| | | | Ref | 24,00 | |
| 02/05/2017 | Manhã | 17,3 | CBC+Pneu | 15,00 | 2,15% |
| | | | Ref | 15,33 | |
| | Tarde | 25,4 | CBC+Pneu | 22,67 | -3,05% |
| | | | Ref | 22,00 | |
| | Noite | 27 | CBC+Pneu | 24,33 | 0,00% |
| | | | Ref | 24,33 | |
| 07/05/2017 | Manhã | 17,5 | CBC+Pneu | 15,00 | 2,15% |
| | | | Ref | 15,33 | |
| | Tarde | 23,7 | CBC+Pneu | 21,33 | 0,00% |
| | | | Ref | 21,33 | |
| | Noite | 24,8 | CBC+Pneu | 20,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 20,67 | |
| 14/05/2017 | Manhã | 19,5 | CBC+Pneu | 17,33 | -1,94% |
| | | | Ref | 17,00 | |
| | Tarde | 23,3 | CBC+Pneu | 21,33 | -1,57% |
| | | | Ref | 21,00 | |
| | Noite | 26,4 | CBC+Pneu | 23,33 | -1,43% |
| | | | Ref | 23,00 | |
| 23/05/2017 | Manhã | 17,9 | CBC+Pneu | 17,33 | -1,94% |
| | | | Ref | 17,00 | |
| | Tarde | 22,8 | CBC+Pneu | 21,00 | 0,00% |
| | | | Ref | 21,00 | |
| | Noite | 22,7 | CBC+Pneu | 20,33 | -1,65% |
| | | | Ref | 20,00 | |

Tabela 37 - Medições da Temperatura Superficial da Calçada Protótipo..Continuação

| Data da leitura | Horário | Temp. Ambiente °C | Trecho | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| 30/05/2017 | Manhã | 20,6 | CBC+Pneu | 18,33 | 1,82% |
| | | | Ref | 18,67 | |
| | Tarde | 25,7 | CBC+Pneu | 23,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 23,67 | |
| | Noite | 26 | CBC+Pneu | 23,00 | 1,41% |
| | | | Ref | 23,33 | |
| 06/06/2017 | Manhã | 19,9 | CBC+Pneu | 17,00 | -1,98% |
| | | | Ref | 16,67 | |
| | Tarde | 24,7 | CBC+Pneu | 22,67 | 4,22% |
| | | | Ref | 23,67 | |
| | Noite | 26,3 | CBC+Pneu | 23,67 | 0,00% |
| | | | Ref | 23,67 | |
| 13/06/2017 | Manhã | 16,1 | CBC+Pneu | 13,67 | -2,55% |
| | | | Ref | 13,33 | |
| | Tarde | 17 | CBC+Pneu | 15,00 | 2,15% |
| | | | Ref | 15,33 | |
| | Noite | 17 | CBC+Pneu | 13,33 | 2,49% |
| | | | Ref | 13,67 | |
| 20/06/2017 | Manhã | 13,5 | CBC+Pneu | 13,67 | -2,55% |
| | | | Ref | 13,33 | |
| | Tarde | 18,4 | CBC+Pneu | 17,33 | 0,00% |
| | | | Ref | 17,33 | |
| | Noite | 18,3 | CBC+Pneu | 16,33 | -2,06% |
| | | | Ref | 16,00 | |
| 27/06/2017 | Manhã | 16,8 | CBC+Pneu | 14,33 | 4,47% |
| | | | Ref | 15,00 | |
| | Tarde | 23,3 | CBC+Pneu | 21,33 | 1,57% |
| | | | Ref | 21,67 | |
| | Noite | 24,1 | CBC+Pneu | 22,67 | -4,61% |
| | | | Ref | 21,67 | |

Como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 37 e na Figura 62 não ocorreram variações na temperatura superficial dos dois trechos. As temperaturas foram muito semelhantes e qualquer diferença observada pode ser facilmente justificada com as condições de luz e sombra no local no momento de medições. Sendo assim, pode-se afirmar que a substituição de agregado miúdo pelos resíduos propostos não interfere nesta característica.

Figura 62 – temperatura Superficial

5.4.4. Drenagem – Teste de Infiltração

Realizou-se o teste de infiltração de água em ambos os trechos da calçada, de modo a configurar a capacidade de infiltração dos mesmos. Para identificar o grau de infiltração dos pavimentos, pois a Norma ASTM C1701 não apresenta valores para comparação resultados obtidos, considerou-se os coeficientes de permeabilidade dos solos (Terzagui; Peck, 1967, apud Sartori; 2013) constantes da Tabela 38 em comparação com os resultados dos ensaios.

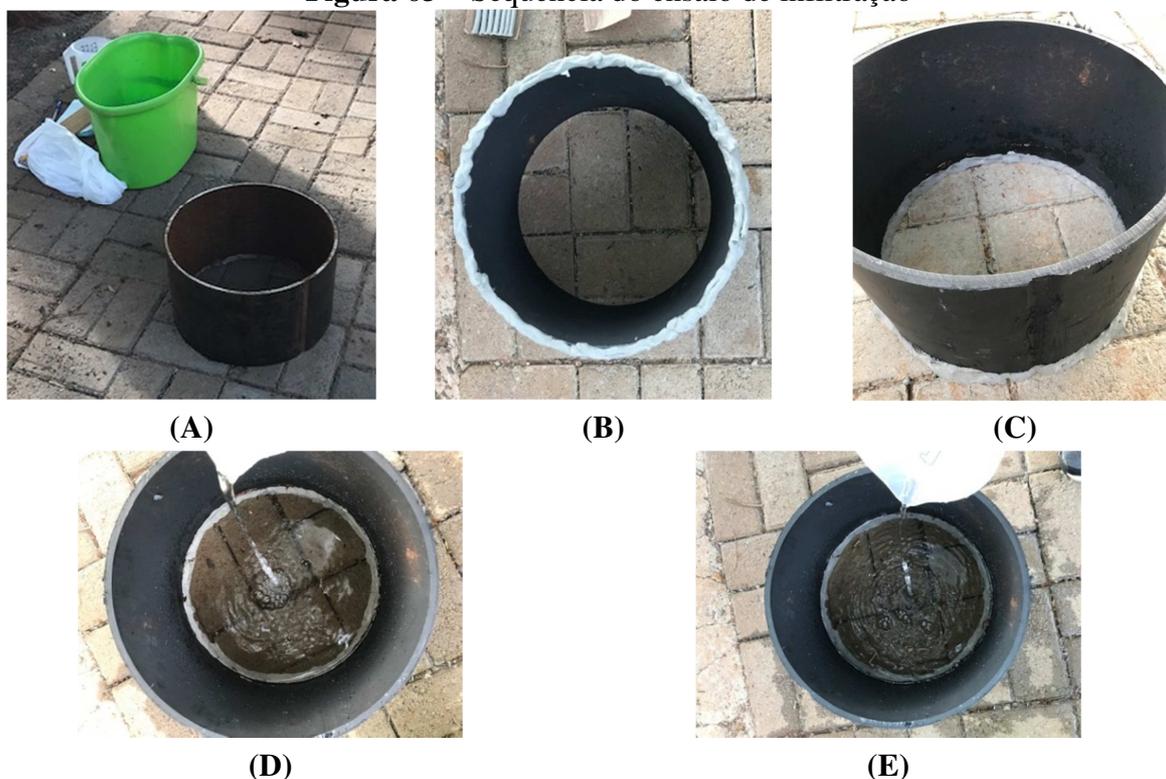
Tabela 38 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade do solo

| Tipo de Solo | Concentração Coeficiente de permeabilidade I (m/s) | Concentração Grau de permeabilidade |
|---|---|--|
| Brita | $>10^{-3}$ | Alta |
| Areia de brita, areia limpa, areia fina | 10^{-3} a 10^{-5} | Média |
| Areia, areia suja e silte arenoso | 10^{-5} a 10^{-7} | Baixa |
| **Silte, silte argiloso | 10^{-7} a 10^{-9} | Muito Baixa |
| Argila | $< 10^{-9}$ | Praticamente Impermeável |

Os testes de infiltração de infiltração foram realizados em um ponto médio de cada

um dos trechos da calçada, sempre no mesmo dia para garantir as mesmas condições climáticas e ambientais para cada um. A sequência de execução do ensaio está mostrada na Figura 63: foram utilizados balde, cilindro e recipiente graduado para a execução do ensaio (A); o cilindro recebeu massa de calafetar em todo seu perímetro para vedação da água (B); o cilindro foi instalado no ponto a ser feito o ensaio, a massa de calafetar foi regularizada interna e externamente (C); inicialmente foi realizada a pré-molhagem com 3,6 litros de água atentando-se para o tempo de infiltração (D e E); após a pré-molhagem foram lançados os 3,6 litros de água necessários para a execução do ensaio, cronometrando o tempo desde o início do ensaio até o completo escoamento da água no interior do cilindro.

Figura 63 – Sequencia do ensaio de infiltração



Os resultados dos testes de infiltração constam da Tabela 39. Os resultados obtidos apresentaram valores superiores a 10^{-5} m/s, equivalente a areia de brita, areia limpa e areia fina. Com isso, os *pavers* apresentam um grau de permeabilidade média, o que é muito importante para este tipo de pavimento. Os resultados obtidos foram condizentes com os resultados de Jabur (2013), que adaptou o método ASTM de infiltração de pisos porosos para pavimentos intertravados.

Tabela 39 - Resultados obtidos pelo teste de infiltração, de acordo com a ASTM C1701

| Data | Horário | Local | Volume (l) | Tempo (s) | Infiltração (mm/h) | Infiltração (m/s) |
|-------|---------|----------|------------|-----------|--------------------|-------------------|
| 12/03 | 9:00 | REF | 3,6 | 617 | 297,16 | 8,32E-5 |
| | | CBC+PNEU | 3,6 | 568 | 322,79 | 9,04E-5 |
| 08/04 | 9:15 | REF | 3,6 | 672 | 272,84 | 7,64E-5 |
| | | CBC+PNEU | 3,6 | 585 | 313,41 | 8,78E-5 |
| 07/05 | 9:05 | REF | 3,6 | 623 | 294,30 | 8,24E-5 |
| | | CBC+PNEU | 3,6 | 302 | 304,56 | 8,53E-5 |
| 13/06 | 9:00 | REF | 3,6 | 743 | 246,77 | 6,91E-5 |
| | | CBC+PNEU | 3,6 | 722 | 253,94 | 7,11E-5 |

Em relação à comparação dos dois tipos de pavers empregados na execução da calçada, nota-se que não ocorreram grandes divergências entre os resultados, enquadrando-se na mesma condição de permeabilidade e capacidade de infiltração. Isto comprova que a substituição do agregado miúdo pelos resíduos propostos não influenciou nesta característica tão importante para pavimentos intertravados, podendo, assim, ser aplicado sem restrição.

5.4.5. Durabilidade – Abrasão e Absorção de Água

Uma das questões mais discutidas quando se propõem a utilização de resíduos em adição ou substituição de agregados naturais na fabricação de concretos ou de peças fabricadas com concreto é a durabilidade, pois o material utilizado não pode interferir na expectativa de vida útil do produto final, garantido assim que sua utilização não implicará em custos com manutenção ou reconstrução antes do previsto. A proposta da construção de uma calçada protótipo vem de encontro com estes questionamentos, pois simula utilização, permitindo assim uma melhor observação e análise do produto proposto, no caso o *paver*.

Na tentativa de avaliar a durabilidade das peças foram analisadas duas características diretamente ligadas a ela: a abrasão e absorção, sendo que os resultados foram comparados entre os dois tipos de *pavers* (com e sem resíduos) e também entre as peças assentadas e as que permaneceram guardadas.

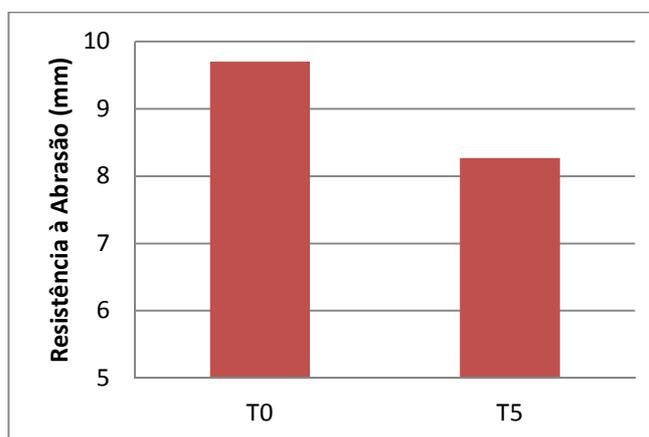
5.3.4.1 Abrasão após 4 meses em uso

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado pelo Método Cientec, conforme já apresentado anteriormente, e os resultados obtidos constam da Tabela 40 e Figura 63.

Tabela 40 – Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)

| Traço | TRAÇO | | ÍNDICE DE DESGASTE (mm) |
|-------|-------|------|-------------------------|
| | CBC | Pneu | |
| T0 | 0% | 0% | 9,70 |
| T5 | 25% | 2% | 8,27 |

Figura 64 - Índice de Desgaste – Resistência à Abrasão (mm)



Os resultados obtidos mostram uma pequena variação entre o Traço referência (T0) e o traço com resíduos (T5) após o período de utilização de 4 meses. A explicação pode estar na melhor distribuição granulométrica do traço T5, o que contribui para um melhor empacotamento da mistura, conferindo a ela uma maior resistência mecânica. Vale ressaltar que quando se compara os valores ainda é atendida a sugestão de Hood (2006) para esse parâmetro, que diz que seja utilizado como parâmetro o valor obtido no traço referência para Método Cientec. Porém, o autor, sugere que o desgaste seja limitado a 15 mm, valor médio atingido por diversos autores.

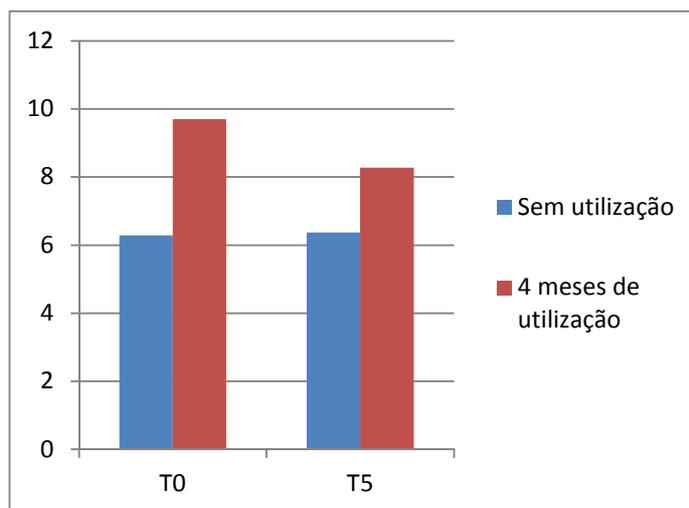
O que mais chama a atenção nos resultados obtidos é que estes são superiores aos resultados obtidos nas peças sem utilização, conforme pode ser visto na Tabela 41 e na Figura 65. Ocorreu um aumento de 54% para o T0 e 30% para o T5. Este comportamento não era esperado, uma vez que o Método Cientec simula um percurso de 500 metros nos corpos de prova, assim sendo, o resultado deveria ser compatível. O resultado obtido demonstra uma

perda na resistência à abrasão com a utilização, resta saber se este comportamento se estabiliza ao longo da vida útil, ou se continua aumentando, demonstrando uma degradação crescente das peças. Para responder a essa questão novos ensaios serão realizados com o decorrer do tempo, uma vez que ainda existem peças estrategicamente assentadas para esta finalidade.

Tabela 41 – Comparação do Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)

| Traço | TRAÇO | | INDICE DE DESGASTE (mm) | |
|-------|-------|------|-------------------------|------|
| | CBC | Pneu | | |
| T0 | 0% | 0% | 6,29 | 9,70 |
| T5 | 25% | 2% | 6,37 | 8,27 |

Figura 65 - Comparação do Índice de desgaste – Resistência à Abrasão (mm)



Por outro lado o comportamento foi observado nos dois traços analisados, tanto ao *paver* fabricado com CBC e Pneu quanto ao *paver* referência. Com isso, pode-se dizer que os resultados apresentados não demonstram que a substituição tenha influenciado a resistência à abrasão, nem contribuído para sua redução nas peças em utilização, mostrando mais uma vez a viabilidade da substituição.

O laudo com resultados dos ensaios encontra-se no Apêndice D.

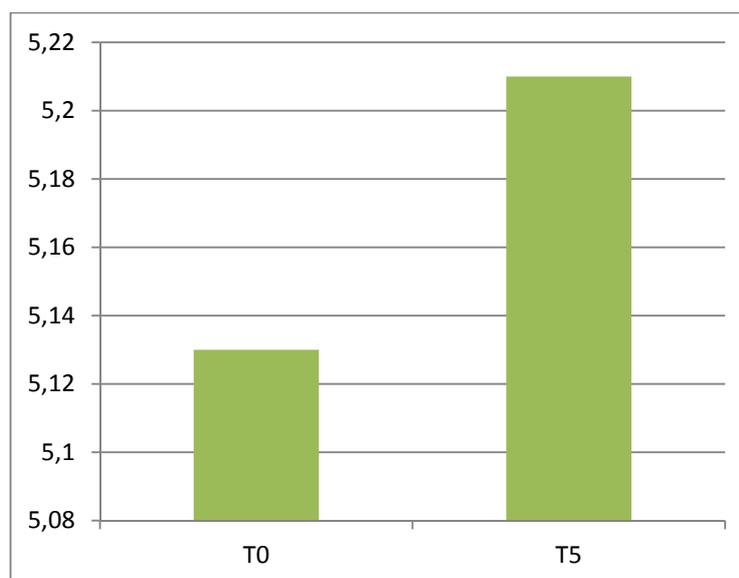
5.3.4.2. Absorção de Água após 4 meses em uso

A absorção de água dos *pavers* foi determinada pela metodologia estabelecida na NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) e seguindo a metodologia descrita no Anexo A. Os resultados obtidos nos ensaios são descritos na Tabela 42 e na Figura 65.

Tabela 42 – Índice de Absorção de Água - Peças com 4 meses de Utilização

| TRAÇO | ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) | ABSORÇÃO MÉDIA DE ÁGUA (%) |
|-------|-------------------------|-------------------------------|
| T0 | 5,22 | 5,13 |
| | 5,15 | |
| | 5,03 | |
| T5 | 5,32 | 5,21 |
| | 5,24 | |
| | 5,06 | |

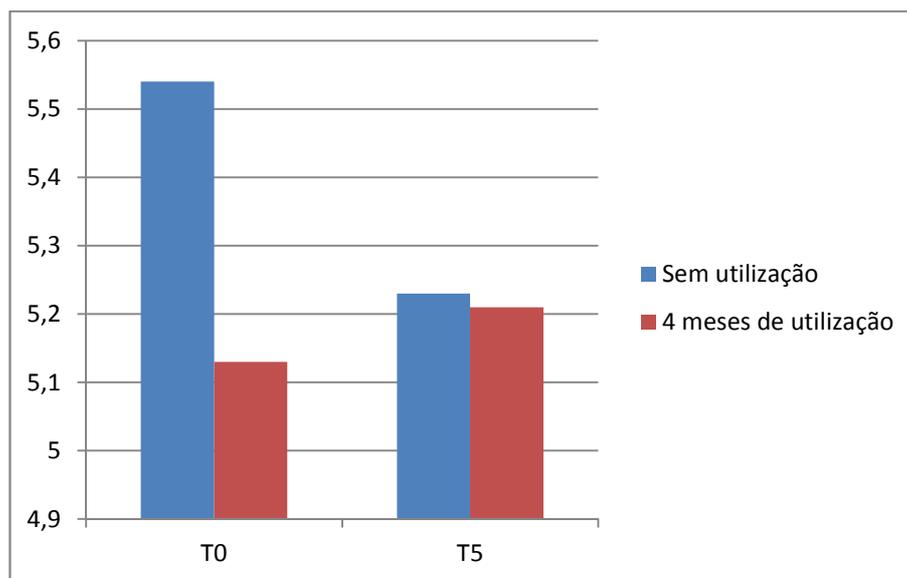
Figura 66 – Índice de Absorção de Água – Peças com 4 meses de Utilização



Nos dois traços os resultados dos ensaios de absorção foram inferiores ao índice de absorção permitido pela NBR 9781:2013 (ABNT, 2013) que é de 6%. Em comparação com os resultados obtidos nas peças sem utilização houve uma pequena redução, como apresentado na Figura 66, o que pode ser explicado pelo fato da absorção de água estar ligada à porosidade das peças, em qualquer estágio durante o processo de hidratação, ao tamanho e à continuidade dos poros, que controlam a permeabilidade do concreto. Com o aumento do tempo de cura e, conseqüente, com o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento,

a maioria dos poros presentes na pasta de concreto terão seus tamanhos reduzidos (devido ao preenchimento dos espaços pelos produtos da hidratação) e perderão suas interconexões, reduzindo, assim, a permeabilidade e absorção de água dos blocos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 67 - Comparação do Índice de Absorção de Água



De uma maneira geral a característica de absorção de água não foi influenciada diretamente pela substituição, uma vez que as peças que continham resíduos apresentaram índices de absorção um pouco acima que as peças referência. Desta forma, pode-se afirmar que a substituição é uma opção viável para os blocos intertravados de concreto para pavimentação.

5.5. Estimativa Do Produto Desenvolvido Sob O Aspecto Sustentável

Para fechar esse Capítulo de Resultados e Discussão cabe uma análise mais apurada dos resultados até aqui apresentados sob o ponto de vista sustentável, se realmente a proposta contribui de forma efetiva quando se trata da sustentabilidade e de seus três pilares: social, econômico e ambiental. Uma espécie de tentativa de responder à seguinte pergunta: qual a real vocação do resíduo para ser utilizado na fabricação dos *pavers*?

5.5.1. Redução no consumo de Recursos Naturais

Quando se inicia uma pesquisa que envolve a substituição de um agregado natural por um resíduo necessita-se determinar quanto de resíduo é possível ser utilizado sem que ocorram grandes influências nas propriedades estudadas, ou seja, determina-se o teor ótimo de substituição. Nesta pesquisa foram aprimorados os traços pesquisados por Altoé (2013), já que o autor citado verificou que o resíduo de pneu prejudicava os resultados. No presente trabalho foram alteradas os teores de forma a atingir os resultados esperados, ou seja, que o *paver* fabricado obtivesse resultados semelhantes ao *paver* referência; o teor ótimo de substituição estabelecido foi de 27%, sendo 25% de CBC e 2% de pneu. Foi comprovado também que a CBC contribui para o aumento da resistência compensando o decréscimo de resistência gerado pelo resíduo de pneu, e as peças apresentaram resistência à compressão, absorção de água e índice de desgaste muito próximos das peças referência.

Com este teor de substituição tem-se uma redução de 27% no consumo de recursos naturais, ou seja, se para 1 m³ de concreto utilizado na fabricação de *paver* são utilizados aproximadamente 1100 kg de agregado miúdo ter-se-ia uma redução de 297 kg na fabricação de 1 m³ de concreto. Esta redução impacta diretamente na conservação e preservação dos recursos naturais utilizados por este tipo de indústria, garantindo, assim, que as próximas gerações também possam utilizar deste recurso.

5.5.2. Neutralização dos metais potencialmente contaminantes presentes nos resíduos

Outro aspecto que deve ser ressaltado também foi a neutralização dos metais, que poderiam se tornar possíveis contaminantes, presentes tanto na CBC quanto no resíduo de pneu, já que ambos os resíduos são classificados como não inertes. Inicialmente, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização mostraram que os dois resíduos por não serem inertes têm a possibilidade de na presença de água contaminar o ambiente à longo prazo. Com isto, chega-se a conclusão de que a forma adotada hoje como disposição adequada, seja como fertilizante no caso da CBC ou em grandes depósitos como os pneus, não seriam das maneiras ideais para a destinação dos mesmos.

Quando da utilização destes resíduos na forma de agregado para concreto para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação observa-se a partir dos mesmos ensaios de lixiviação e solubilização, só que agora do concreto produzidos, que os metais presentes nos resíduos foram neutralizados, com uma eficiência de neutralização de aproximadamente 100%, ficando dentro dos índices aceitáveis que tornam o concreto do *paver* um material não

perigoso e inerte. Desta forma a fabricação de *pavers* pode ser considerada uma forma de destinação adequada para ambos os resíduos.

5.5.3. Emissão de CO₂

A utilização de resíduos na fabricação de *pavers* pode contribuir na solução de questões como a redução do consumo de recursos naturais, mas não é só isso, um outro ponto que pode ser alvo de estudo é a emissão de CO₂, ou seja, verificar se esta substituição pode também contribuir para a redução a emissão deste tipo de gás, além de representar um ganho energético e de créditos de carbono para a indústria da construção civil.

Com objetivo de estimar o benefício ambiental proporcionado pela utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e dos resíduos de pneu em concretos de cimento Portland será apresentado a seguir um estudo baseado no método desenvolvido por Costa (2012) denominado Método para a Quantificação das Emissões de CO₂ (Método QE- CO₂). Esta análise será feita de uma forma simplificada, somente com o intuito de demonstrar esta possibilidade, sem se aprofundar neste estudo.

A fórmula geral do Método QE-CO₂, equação 10, consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte.

$$Emissões_{MT1,j} = QT_j \times FP_j \times (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i}) \quad (\text{Equação 10})$$

$Emissões_{MT1,j}$ = emissões devido à utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂;

QT_j = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas;

FP_j = fator de perda do produto j, adimensional, para concreto 6%;

$Emissões_{TR1,i}$ = emissões de devido ao consumo de energia i para o transporte de matérias primas e do produto j para a edificação, em toneladas / tonelada de produto j;

$Emissões_{EN1,i}$ = emissões devido ao consumo de energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas / tonelada de produto j.

O método proposto por Costa (2012) possui três níveis de avaliação: básico, intermediário e avançado. Para esta pesquisa foi adotado o método básico onde valores foram tabelados e recomendados por Costa (2012).

A Tabela 43 traz os valores de Emissões devido ao consumo de energia para o transporte das matérias-primas e os valores de Emissões devido ao consumo de energia para Extração e Processamento do material. Os valores assinalados na Tabela 43 são tabelados por Costa (2012) e as distâncias foram consideradas do ponto de extração dos materiais até a cidade de Maringá.

Tabela 43 – Emissão de CO₂ dos materiais componentes

| MATERIAL | EMISSION CO ₂ TRANSPORT | | | | EMISSION CO ₂ PRODUÇÃO (*) | EMISSION TOTAL DE CO ₂ (t/kg) |
|-----------------|------------------------------------|----------|-----------|-----------|---------------------------------------|--|
| | DIST.(KM) | Cot. (*) | Feche (*) | TOTAL | | |
| AGREGADO MIÚDO | 370 | 0,0196 | 0,0032 | 0,0232064 | 0,0722 | 0,0954 |
| AGREGADO GRAUDO | 25 | 0,0196 | 0,0032 | 0,001568 | 0,0719 | 0,0735 |
| CIMENTO | 1120 | 0,0196 | 0,0032 | 0,0702464 | 0,6281 | 0,6983 |
| CINZA | 20 | 0,0196 | 0,0032 | 0,0012544 | - | 0,0013 |
| PNEU | 10 | 0,0196 | 0,0032 | 0,0006272 | 0,615 | 0,6156 |

Cot. = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km, no caso adotado um caminhão de 12 a 26 t

Feche = fator de emissão corrigido da energia CO₂, em t / L

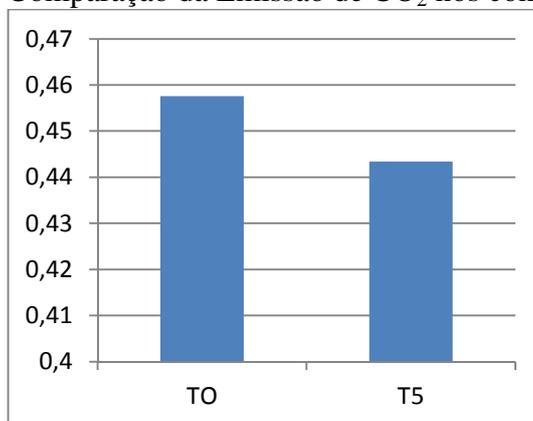
(*) = valores tabelados por Costa (2012)

Com os valores de emissão de CO₂ de cada um dos materiais componentes dos *pavers*, a próxima etapa é calcular quanto 1 m³ de concreto emite de CO₂ para o traço referência, T0, e para o traço contendo resíduos, T5. A Tabela 44 traz os resultados obtidos.

Tabela 44 – Cálculo da Emissão de CO₂ por m³ de concreto

| MATERIAL | TRAÇO T0 | | | TRAÇO T5 | | |
|--|----------------|--|---|----------------|--|---|
| | QTDADA (kg) | EMISSÃO DE CO ₂ (ton./kg) | EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³) | QTDADA (kg) | EMISSÃO DE CO ₂ (ton./kg) | EMISSÃO DO MATERIAL (ton./m ³) |
| AGREGADO MIÚDO | 1092,50 | 0,0954 | 0,1042 | 797,525 | 0,0954 | 0,0761 |
| AGREGADO GRAUDO | 655,50 | 0,0735 | 0,0482 | 655,50 | 0,0735 | 0,0482 |
| CIMENTO | 437,00 | 0,6983 | 0,3052 | 437,00 | 0,6983 | 0,3052 |
| CINZA | 0 | 0,0013 | 0 | 273,125 | 0,0013 | 0,0004 |
| PNEU | 0 | 0,6156 | 0 | 21,85 | 0,6156 | 0,0135 |
| TOTAL (tCO₂/m³) | | | 0,4576 | | | 0,4434 |

A substituição do agregado miúdo por resíduos de pneus e CBC promoveu uma redução da ordem de 3% da emissão de CO₂ em relação ao traço de referência. A Figura traz o gráfico de comparação dos resultados.

Figura 68 – Comparação da Emissão de CO₂ nos concreto

5.5.4. Comparação de Custos

Para a análise do custo de materiais para a produção do concreto foram realizados levantamento de preços dos itens envolvidos conforme apresentado na Tabela 45.

Tabela 45 - Preços unitário a dos componentes do concreto

| Item | Unidade | Preço R\$ | Custo R\$/kg | OBS: |
|-----------------|----------------|-----------|--------------|----------|
| Areia | m ³ | 85,00 | 0,052 | c/ frete |
| Pedrisco | m ³ | 70,00 | 0,046 | c/ frete |
| Cimento CPV-ARI | Saco | 32,00 | 0,80 | c/ frete |
| CBC | Ton. | 15,00 | 0,015 | c/ frete |
| Pneu | Ton. | 200,00 | 0,20 | c/ frete |

Para o cálculo do custo unitário dos agregados foram utilizadas as massas unitárias encontradas no item 5.1, o valor do saco de cimento de 40 kg e o custo da CBC foi considerado zero pelo fato deste ser atualmente tratado como resíduo sem valor comercial. Os valores foram multiplicados pela quantidade dos materiais necessários para produção de 1m³ de concreto, estes custos estão apresentados, em Reais, na Tabela 46.

Tabela 46 – Custos do Concreto (m³)

| MATERIAL | TRAÇO T0 | | | TRAÇO T5 | | |
|-----------------------|--------------|----------|---------------|--------------|----------|---------------|
| | QTDADDE (kg) | R\$ UNIT | R\$ TOTAL | QTDADDE (kg) | R\$ UNIT | R\$ TOTAL |
| AGREGADO MIÚDO | 1092,50 | 0,052 | 56,81 | 797,53 | 0,052 | 41,47 |
| AGREGADO GRAUDO | 655,50 | 0,046 | 30,15 | 655,50 | 0,046 | 30,15 |
| CIMENTO | 437,00 | 0,80 | 349,60 | 437,00 | 0,80 | 349,60 |
| CINZA | 0 | 0,015 | 0 | 273,13 | 0,015 | 4,10 |
| PNEU | 0 | 0,20 | 0 | 21,85 | 0,20 | 4,37 |
| TOTAL (R\$/m3) | | | 436,56 | | | 429,70 |

Do ponto de vista de custo, quando considerado o custo da CBC como zero, observa-se que a variação entre os custos totais de produção foi pequena, sendo reduzidos o percentual de 1,57%.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados nos ensaios realizados e nas informações contempladas na revisão bibliográfica, que deram suporte a esta pesquisa, foram obtidas as conclusões que serão explanadas a seguir de acordo com os objetivos delimitados para a pesquisa.

Em relação à análise das características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e dos resíduos de pneus inservíveis quanto à possibilidade de sua aplicação como agregado miúdo, pode-se concluir:

- De acordo com a caracterização dos dois resíduos, a CBC e o resíduo de pneu, podem ser utilizados para substituir parcialmente o agregado miúdo em concretos tanto pela granulometria, compatível à da areia fina e da areia média, respectivamente, como pela classificação como resíduos não perigosos e não inertes. Porém, a classificação como não inertes, não permite garantir que não ocorrerão contaminações futuras por conterem metais solúveis em água, modificando assim suas propriedades. Por este motivo foi também estudada a neutralização destes metais pela matriz cimentícia, o que foi comprovado pela eficiência de neutralização calculada, garantindo assim que os *pavers* possam ser considerados como uma opção de destinação ambientalmente adequada para estes dois resíduos.

Em relação a influência da substituição parcial do agregado miúdo pelos resíduos propostos na resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão dos *pavers*, pode-se concluir:

- A viabilidade da utilização dos resíduos foi analisada de acordo com ensaios de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão, avaliando assim as características mecânicas e de durabilidade das peças.

A utilização da CBC em substituição parcial ao agregado miúdo mostrou-se viável em todas as características analisadas. Na **resistência à compressão** os *pavers* produzidos com este resíduo, apresentaram um incremento considerável no T1, fabricado com 25% de substituição de areia por CBC, com valor de resistência característica à compressão de 39,19 MPa, alcançando um acréscimo de 15,89% em relação ao traço referência. O traço T2 também confeccionado com CBC em substituição à areia apresentou resultado similar ao traço referência. Esses resultados demonstram a viabilidade da utilização deste resíduo na confecção de *pavers*, sem que estes tenham comprometimento da resistência à compressão em relação ao traço referência, para, apresentando resistências superiores ao exigido pela

norma que é de 35MPa. A substituição também contribuiu para a redução da **absorção de água**, alcançado 3,6% para o teor de 25%, reduzindo significativamente a absorção de água em relação ao traço referência.

Nos *pavers* produzidos com resíduos de pneu a **resistência à compressão** foi inferior à do traço referência, o que já era esperado pelo levantamento bibliográfico realizado, mesmo com teores mínimos de substituição; apesar disto atingiu uma resistência próxima ao indicado para locais de solicitações leves. A **absorção de água** também foi influenciada pela adição dos resíduos de pneu: para o teor de 5% de substituição houve uma queda mais brusca. Com base no experimento, enfatizando-se que para o traço e consumo de cimento utilizado, o resíduo de pneu interferiu de forma negativa nas características mecânicas e de durabilidade, porém isto não implicaria na utilização dos *pavers* em locais de baixas solicitações, como calçadas, praças e canteiros.

Para a combinação de CBC e resíduos de pneu, foco maior da pesquisa, os resultados dos ensaios demonstram que a CBC contribui para a melhora das características dos *pavers*, tanto nas propriedades mecânicas quanto nas de durabilidade. Para as peças confeccionadas com teores de 2% e 5% de resíduos de pneus com a combinação de 5% e 25% de CBC, houve uma melhora significativa da **resistência à compressão**, sendo que o melhor resultado foi de 2% de resíduo de pneu e 25% de CBC. Quanto a **absorção de água** os resultados não apresentaram diferenças relevantes em relação ao traço referência, com isto a viabilidade da utilização de acordo com este parâmetro foi comprovada.

A melhora das características dos *pavers* fabricados com resíduo de pneu e CBC pode ser explicada em relação as peças fabricadas somente com resíduos de pneus, assim como para os *pavers* fabricados somente com CBC, pelo efeito filler da CBC nos concretos, envolvendo melhor as partículas e reduzindo os vazios entre a pasta e os agregados. Além disto, apesar de não possuir uma reatividade significativa que a classifique como pozolana, a CBC mesmo quando queimada em altas temperaturas contribui de forma determinante para o aumento da resistência mecânica.

Em relação ao teor ótimo de substituição a partir dos dados obtidos nos diferentes ensaios realizados com os *pavers*, pode-se concluir:

- A proposta da pesquisa sempre foi a utilização conjunto foi escolhido como traço T5 como teor ótimo de substituição, conseguindo assim um teor de 27%, com 25% de CBC e 2% de resíduos de pneus. Para este traço também foi avaliada a **resistência à abrasão**,

através do índice de desgaste. Os resultados também não evidenciaram influência causada pelas substituições.

Quanto à análise Analisar se os metais presentes na CBC e no resíduo de pneus são neutralizados quando da utilização dos mesmos na confecção de *pavers*, pode-se concluir:

- Quando da utilização destes resíduos na forma de agregado para concreto para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação observa-se a partir dos mesmos ensaios de lixiviação e solubilização, só que agora do concreto produzidos, que os metais presentes nos resíduos foram neutralizados, com uma eficiência de neutralização de aproximadamente 100%, ficando dentro dos índices aceitáveis que tornam o concreto do *paver* um material não perigoso e inerte. Desta forma a fabricação de *pavers* pode ser considerada uma forma de destinação adequada para ambos os resíduos.

Em relação ao comportamento de uma calçada protótipo, propondo uma metodologia e procedimento de avaliação para calçadas que assim como esta sejam executadas com materiais alternativos, pode-se concluir que:

- Com o Traço T5 foram fabricadas as peças necessárias para a construção da Calçada Protótipo, como forma de estudar as peças em condições reais de utilização, comprovando assim a viabilidade da utilização dos resíduos propostos. Através de uma **Inspeção Visual** os dois trechos foram comparados, na tentativa de determinar a existência de diferenças entre eles, a única coisa que chamou a atenção foi uma pequena diferença de coloração, já que p trecho que continha resíduos apresentou uma coloração um pouco mais escura.

Durante um período de 4 meses a Calçada Protótipo foi estudada na tentativa de analisar o comportamento dos dois trechos frente à utilização. Foram efetuadas medições da **temperatura superficial** em pontos determinados da calçada, e estes não apresentaram variações que pudessem evidenciar a influência do resíduo nesta característica. A preocupação com a temperatura surgiu pela presença da borracha do pneu e também pela coloração mais escura, que poderia colaborar para uma maior absorção de calor, mas felizmente este comportamento não foi comprovado pelas medições.

Uma das maiores justificativas para o emprego dos *pavers* em calçadas, praças e ruas é a sua capacidade de infiltração, assim sendo, este parâmetro é de fundamental importância quando do estudo de um protótipo com este tipo de pavimento. Os **testes de infiltração**, realizados mensalmente, e demonstraram que realmente os pisos confeccionados com blocos de concreto para pavimentação apresentam uma elevada taxa de infiltração. Além disto, esta

taxa foi maior no trecho executado com a substituição de resíduos, isto pode ser explicado com auxílio de outro ensaio realizado com as peças sob condições de utilização: a **absorção de água**, que também foi maior neste trecho, mas dentro dos limites exigidos por norma. Desta forma pode-se afirmar que o produto desenvolvido pode contribuir efetivamente para a melhoria nas condições de drenagem urbana das cidades.

Os testes de **resistência à abrasão** mostraram dados que sugerem a necessidade de maiores estudos para delimitar o comportamento das peças ao longo do tempo, uma vez que os índices de desgaste das peças que estavam em utilização aumentaram em relação aos ensaios das peças sem utilização. Mas se a análise for feita observando-se somente a comparação entre as peças com e sem resíduos, a presença dos resíduos não acarretou mudanças nesta característica, como esta é a proposta do presente estudo pode-se dizer que não ocorreram modificações que impedissem a utilização dos resíduos.

Baseado no exposto acima a CBC e os resíduos de pneus podem ser utilizados em substituição o agregado miúdo na confecção de *pavers* sem comprometer as características exigidas para este material. Cabe ressaltar que, tanto os resultados expostos como as conclusões tiradas a partir destes, têm como referência os materiais, equipamentos, técnicas e condições disponíveis locais. Do ponto de ambiental a utilização destes resíduos contribui para a redução da extração de recursos naturais e também promove uma destinação adequada dos mesmos

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise do comportamento da calçada protótipo por um intervalo de tempo maior.
- Avaliar a utilização de aditivos que contribuam para uma melhor utilização do resíduo de pneu.
- Realizar mais experimentos com outros teores de CBC, na busca de avaliar melhor o efeito compensatório entre os resíduos estudados.
- Avaliar a influência da cura térmica nas características estudadas.

REFERÊNCIAS

ALCOPAR – ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BIONERGIA DO ESTADO DO PARANÁ. 2016. Disponível em <http://www.alcopar.org.br/>.2016.

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. INBRACON: CD-ROM.

AKASAKI, J. L.; INO, A.; FIORITI, C. F. 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 15 Jun. 2016.

ALMEIDA, F. C. R. et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, 2015.

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.** 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – UEM. Maringá. 2013.

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 CONCRETE INSTITUTE, Committee ACI. “Cement and concrete terminology”. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Detroit: American Concrete Institute, p73.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005, **Atlas de energia elétrica do Brasil, Biomassa.** 2 ed. Brasília: ANEEL, 243 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Pavimento Intertravado.** In: PALESTRA PAVIMENTO INTERTRAVADO – MKT, 2001. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2001, Cd-rom, 115 slides.

ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002. **Guia básico de utilização do cimento Portland – BT-106;** 7 ed. São Paulo: ABCP, 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e Solo. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE BORRACHA NORTE AMERICANA – RMA. Disponível em <www.rma.org.br>. 2009

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA PNEUMÁTICA - ANIP. **O livro Branco da Indústria de Pneus**. 2016. Disponível em: <http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo>. Acesso em: 23 maio. 2016.

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.

BISHOP, P. L.; BROWN, T. M.; SHIVELY, W. E. Alkalinity releases and the leaching of heavy metals from stabilized/solidified wastes. In: **Studies in Environmental Science**. V. 29, p. 217-233, 1986.

BRADLEY, S. M.; HANNA, J. V. ^{27}Al and ^{23}Na MAS NMR and Powder X-ray Diffraction Studies of Sodium Aluminate Speciation and the Mechanistics of Aluminum Hydroxide Precipitation upon Acid Hydrolysis. In: **Journal of the American Chemical Society**. V.116, p. 7771 – 7783, 1994.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 de Ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 27 Jun. 2016.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 416 de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências.. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616/>. Acesso em: 05 Jul. 2016

BRICKA – SISTEMAS CONSTRUTIVOS. **Pavers - Manual de Pavimentação**. 2010. Disponível em: < <http://www.bricka.com.br/novo/produtos/manuais/>>. Acesso em: 20 Fev. 2012.

CAUÊ Estrutura. Características físicas e químicas do Cimento Portland CP-V ARI. Disponível <<http://www.caue.com.br/Institucional/LinhaCimentos/Paginas/caue-estrutura.aspx>>. Acesso em: 18 Mai. 2016.

CHAUHAN, M. K.; CHAUDAHARY, V. S.; SAMAR, S. K. Evaluation of the life cycle of the sugar industry: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011, p. 3445-3453. Disponível em: <<<http://www.elsevier.com/locate/rensusene>>. 2011. Acesso em 03 Jul. 2016

CHEN, J.C.P., Chou, C. **Cane Sugar Handbook. A manual for cane sugar manufacturers and their chemists**. 12nd.ed. New York John Wiley & Sons, 1993.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Use of bagasse ash as pozzolanic material in concrete. **Building Materials and Construction**, v.23, 2009, P 3352-3358. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/bulmatcont>>. 2009. Acesso em 05 Jul. 2016.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-Açúcar 2016/2017 – Segundo Levantamento**. 2016. http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_p ortugues_-_1o_lev_-_16.pdf. Acesso em: 16 Jul. 2016.

CONNER, J.R. **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes**. New York. Van Nostrand Reinhold, 1990.

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) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

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. P 3301-3303. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/conbuimat>>. 2009. Acesso em 23 Maio. 2016.

CORDEIRO, G.C; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Pozzolanic activity na filler effect of sugarcane bagasse ash in Portland cement na lime mortars. **Cement & Concret Composites**. 2008. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>. 2008. Acesso em 15 Jun. 2016.

COSTA, B, L, C. **Quantificação das emissões de co2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 190 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FERNANDES, I. D. **Blocos & Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. 3. ed. Jaraguá do Sul: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2012a. 182 p. ISBN 978.85.62290-01-5.

FIORITI, C.F.; AKASAKI, J.L.; NIRSHE, G.C. Estudo da viabilidade da produção de blocos estruturais de concreto com adição de resíduos de borracha. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 44, 2002. Belo Horizonte, **Anais ...** Belo Horizonte: Arte Interativa, 2002.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneu como material alternativo**. 202 f. Tese (Doutorado) - 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 15 Jun. 2016.

FRASSON, A.J; OLIVEIRA, A.L; PRUDÊNCIO, L. J. Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural. Caderno técnico alvenaria estrutural –CT10. **Revista Prisma**, São Paulo, 2008.

FRIAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ash from cogeneration industry as active pozzolan for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, 33, 2011, p 490-496. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>. 2011. Acesso em 15 Jun. 2016.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**, 29, 2007, p. 515–524. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>. 2007. Acesso em 15 Jun. 2016.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUD, M. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**. 2007.

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

GRANZOTTO, L. **Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2010.

HOJO, L. C. P. **Análise da atividade pozolânica da cinza volante do bagaço de cana-de-açúcar para substituição parcial do cimento portland**. Tese de Mestrado/Universidade Estadual de Maringá, Maringá/PR, 2014.

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) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** São Paulo: CIB, 2000. 12 p.

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. INBRACON: CD-ROM.

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** (Online), v. 11, p. 201–212, 2011.

LING, T. C. Effects of compression method and content of rubber on the properties of the concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v.28. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/conbuimat>>. 2012. Acesso em 15 Jun. 2016.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2008). Disponível na internet:<<http://www.agricultura.gov.br>>.

MARQUES, A.C. **Estudo da Influência da adição de borracha vulcanizada em concreto a temperatura ambiente e elevada temperatura.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil UNESP/SP. Ilha Solteira/SP, 114f, 2005.

MASKI – PRÉ-FABRICADOS. **Assentamento do pavimento intertravado Práticas recomendadas.** 2011. Disponível em: <<http://www.maski.com.br/prefabricados/assentamento-do-pavimento-intertravado>>. Acessado em: 12 Jan. 2012.

MEHTA, P. K. **Concrete Technology for Sustainable Development.** 1999. Disponível em: <http://www.ecosmartconcrete.com/kbase/filedocs/trmehta99sustdev.pdf>. Acesso em: 23 Maio. 2016.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo. São Paulo. IBRACON, 2006, 3º Edição.

NEVILLE. A. M. **Properties of concrete.** 4 edition, London, Longman, 1995, 844p.

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, 2009.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** 2004. 271 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PAPAKONSTANTINO, C.G.; TOBOLSKI, M.J. Use of tire steel beads in Portland Cement Concrete. **Ciment and Concrete Research.** 2006.

PINTO *et al.* Study of mechanical performance of composites of rubber powder and cement. **Material Science Forum.** 2003. V. 416-418. P 720-724.

RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de Cimento Portland,** 1. ed. Porto Alegre: EdiPucRS, 2002. 166p.

RODRIGUES, P. P .F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação.** 2ª Edição. São Paulo. Associação Brasileira do Cimento Portland, 1995, 20 p.

ROSA, P. A. O. Produção Mais Limpa. Tecnologias Limpas. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2007, Porto Alegre. **Online...** Porto Alegre, 2007. Disponível em: http://www.institutoventuri.com.br/img_forum/palestras/Palestras%20-%2019%20de%20maio%2020Manh_/Paulo%20Rosa.pdf. Acesso em: 13 Jun. 2016.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design,** v. 34, p. 45–50, fev. 2012.

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/nova-norma-de-execucao-destaca-virtudes-do-pavimento-intertravado/>>. Acesso em: 22 Abril. 2016.

SIDDIQUE, R; NAIK, T.R. Proprieties of concrete containing scrap-tire rubber – overview. **Waste Mangement**, 2004.

SGORLON, J. G . **Utilização de resíduos da indústria galvanotécnica no desenvolvimento e fabricação de blocos de concreto para pavimentação intertravada**. 2014. 206 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2014.

SIKA BRASIL. **Ficha do Produto SikaPaver® HC-10**. Edição 02/02/2012

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

SON, K.S.; HAJIRASOULIBA, J.; PILAKALTAS, K. Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concret columns. **Construction and Building Materials**. 2010

SOUZA, G.N.; FORMAGINI, S; CUSTODIO, F.O; SILVEIRA, M.M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 49, 2007. INBRACON **Anais...**, Bento Gonçalves. CD- ROM.

ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo (2009) Disponível na internet:<<http://www.unica.com.br>>.

WILES, C. C. A review of solidification/stabilization technology. In: **Journal of Hazardous Materials**. V. 14, p. 5-21. 1987.

ANEXO A – LAUDO ENSAIO DE POZOLANICIDADE



11

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 091 761-203

CLIENTE: SILVIA PAULA SOSSAI ALTOÉ
CPF 006.824.519-08
Rua Tabacetê, n.º 57 – Jardim Tabacetê.
CEP 87005-140 – Maringá – PR

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de atividade pozolânica.

REFERÊNCIA: Orçamento FIPT N° 5700/17 de 28.04.2017 e aprovação de 21.06.2017.

1 MATERIAL

Um (01) material recebido no IPT em 26.06.2017, identificado e registrado no laboratório conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de identificação do material.

| Dados do Cliente | Dados do IPT | |
|-------------------------------------|--------------|-----------|
| | LMCC N.º | Massa (g) |
| "Cinza do bagaço de cana-de-açúcar" | 367/17 | 300,0 |

2 MÉTODO UTILIZADO

• **Determinação da atividade pozolânica: Método Chapelle Modificado:** conforme diretrizes gerais da NBR 15.895:2010 "Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado" e procedimento IPT123 - CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041 – Revisão 1 de 23.11.2015 "Determinação de atividade pozolânica - Método Chapelle Modificado".

Nota 1: O ensaio foi realizado na amostra moída e passante na peneira de 45 µm (ABNT n° 320).

3 RESULTADO

Atividade pozolânica à (90±5)°C: 137 mg Ca(OH)₂/g amostra.

Nota 2: O resultado do ensaio é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material "pozolânico". Conforme a norma ABNT NBR 15894-1:2010 (Tabela 1) para o material "metacaulim destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta" o índice de atividade pozolânica Chapelle deverá ser maior ou igual a 750mg Ca(OH)₂/g de material. Contudo, não há indicação de valor limite de atividade pozolânica na normalização nacional para outros materiais pozolânicos.

EQUIPE TÉCNICA

Técnico Químico Daniel Polato Malvestuto – FIPT
Engenheiro Químico Sérgio Soares de Lima – IPT

São Paulo, 28 de junho de 2017.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Eng.º Químico Sérgio Soares de Lima
Supervisor de Ensaio
CRQ N.º 64052257 - RE. N.º 9059

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Quím. Dr. Valdecir Angelo Quarconi
Chefe do Laboratório
CRQ N.º 04212773 - RE N.º 6741

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 0 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0.42 | 0% | 0% |

| DADOS DO ENSAIO | 28 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 27/04/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 24/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 25/05/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PCS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 47,70 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 0,00 |
| PNEU | kg | 0,00 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 3 | 3.400 | 196 | 96 | 78 | 19800 | 34,23 | 35,32 | 1,73 | 33,83 | 4,90 |
| 9 | 3.160 | 195 | 98 | 80 | 19750 | 34,14 | | | | |
| 15 | 3.200 | 195 | 97 | 78 | 19800 | 34,23 | | | | |
| 20 | 3.300 | 196 | 98 | 79 | 20250 | 35,00 | | | | |
| 2 | 3.300 | 197 | 98 | 80 | 20000 | 34,57 | | | | |
| 18 | 3.320 | 195 | 95 | 79 | 19300 | 33,36 | | | | |
| 11 | 3.260 | 196 | 95 | 80 | 21100 | 36,47 | | | | |
| 5 | 3.340 | 195 | 75 | 80 | 21800 | 37,68 | | | | |
| 12 | 3.260 | 198 | 97 | 81 | 20400 | 35,26 | | | | |
| 17 | 3.340 | 196 | 96 | 80 | 19800 | 34,23 | | | | |
| 24 | 3.260 | 195 | 96 | 79 | 21850 | 37,77 | | | | |
| 23 | 3.290 | 197 | 97 | 80 | 21150 | 36,56 | | | | |
| 22 | 3.140 | 195 | 95 | 78 | 21850 | 37,77 | | | | |
| 16 | 3.200 | 195 | 95 | 80 | 20300 | 35,09 | | | | |
| 13 | 3.380 | 195 | 95 | 80 | 19250 | 33,28 | | | | |
| 19 | 3.380 | 195 | 95 | 80 | 19550 | 33,79 | | | | |
| 21 | 3.280 | 195 | 95 | 79 | 22400 | 38,72 | | | | |
| 10 | 3.180 | 195 | 95 | 77 | 19450 | 33,62 | | | | |
| MÉDIA | 3.277 | 196 | 95 | 79 | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|-------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 7 | 3.220 | 3.180 | 3.320 | 4,40 | 5,54 | 1,09 | 19,71 |
| 9 | 3.300 | 3.200 | 3.380 | 5,63 | | | |
| 1 | 3.180 | 3.040 | 3.240 | 6,58 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 1 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 25% | 0% |

| DADOS DO ENSAIO | 28 DIAS |
|--------------------------------|----------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 27/04/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 24/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 25/05/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PCS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|-------------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 35,78 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 11,92 |
| PNEU | kg | 0,00 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|--|----------|------------------|-----------|--|--|--|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | | | | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) | cv | | | |
| 9 | 3.320 | 195 | 96 | 82 | 23600 | 40,80 | 40,72 | 1,76 | 39,19 | 4,33 | | | | |
| 13 | 3.300 | 195 | 94 | 81 | 23750 | 41,05 | | | | | | | | |
| 15 | 3.280 | 195 | 96 | 83 | 22900 | 39,59 | | | | | | | | |
| 1 | 3.260 | 196 | 95 | 82 | 23900 | 41,31 | | | | | | | | |
| 4 | 3.300 | 197 | 94 | 82 | 23300 | 40,28 | | | | | | | | |
| 8 | 3.340 | 195 | 94 | 80 | 25000 | 43,22 | | | | | | | | |
| 14 | 3.320 | 198 | 95 | 80 | 25520 | 44,11 | | | | | | | | |
| 11 | 3.380 | 195 | 95 | 80 | 23550 | 40,71 | | | | | | | | |
| 3 | 3.380 | 195 | 95 | 81 | 24650 | 42,61 | | | | | | | | |
| 5 | 3.300 | 197 | 96 | 81 | 23000 | 39,76 | | | | | | | | |
| 12 | 3.360 | 197 | 95 | 82 | 22900 | 39,59 | | | | | | | | |
| 21 | 3.280 | 198 | 94 | 80 | 22350 | 38,63 | | | | | | | | |
| 7 | 3.280 | 195 | 97 | 83 | 21550 | 37,25 | | | | | | | | |
| 6 | 3.260 | 195 | 96 | 80 | 23750 | 41,05 | | | | | | | | |
| 16 | 3.320 | 195 | 96 | 82 | 22950 | 39,67 | | | | | | | | |
| 2 | 3.280 | 195 | 95 | 81 | 25000 | 43,22 | | | | | | | | |
| 23 | 3.260 | 196 | 97 | 80 | 23800 | 41,14 | | | | | | | | |
| 10 | 3.260 | 195 | 96 | 83 | 22500 | 38,89 | | | | | | | | |
| MÉDIA | 3.304 | 196 | 95 | 81 | | | | | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|----------|-----------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 17 | 3180 | 3160 | 3280 | 3,80 | 3,60 | 0,41 | 11,43 |
| 24 | 3120 | 3100 | 3220 | 3,87 | | | |
| 18 | 3200 | 3200 | 3300 | 3,13 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 2 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 5% | 0% |

| DADOS DO ENSAIO | 28 DIAS |
|--------------------------------|----------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 27/04/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 24/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 25/05/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|-------------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 45,32 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 2,38 |
| PNEU | kg | 0,00 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|--|----------|------------------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 10 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 19700 | 34,05 | 35,08 | 2,28 | 33,11 | 6,51 |
| 23 | 3.290 | 195 | 96 | 79 | 19750 | 34,14 | | | | |
| 12 | 3.320 | 195 | 96 | 78 | 20100 | 34,75 | | | | |
| 15 | 3.360 | 195 | 96 | 80 | 22500 | 38,89 | | | | |
| 2 | 3.300 | 195 | 95 | 79 | 20000 | 34,57 | | | | |
| 1 | 3.320 | 195 | 94 | 80 | 20000 | 34,57 | | | | |
| 20 | 3.320 | 195 | 94 | 80 | 19780 | 34,19 | | | | |
| 13 | 3.360 | 195 | 94 | 80 | 18350 | 31,72 | | | | |
| 14 | 3.300 | 194 | 95 | 80 | 18500 | 31,98 | | | | |
| 16 | 3.300 | 196 | 95 | 80 | 22000 | 38,03 | | | | |
| 7 | 3.300 | 194 | 95 | 81 | 22800 | 39,41 | | | | |
| 4 | 3.280 | 194 | 95 | 80 | 21000 | 36,30 | | | | |
| 8 | 3.320 | 195 | 94 | 79 | 19000 | 32,84 | | | | |
| 3 | 3.280 | 195 | 94 | 79 | 21500 | 37,17 | | | | |
| 6 | 3.340 | 195 | 95 | 80 | 19150 | 33,10 | | | | |
| 24 | 3.440 | 195 | 95 | 80 | 19700 | 34,05 | | | | |
| 11 | 3.260 | 195 | 95 | 80 | 19800 | 34,23 | | | | |
| 5 | 3.260 | 195 | 95 | 81 | 21700 | 37,51 | | | | |
| MÉDIA | 3.313 | 195 | 95 | 80 | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|----------|-----------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 18 | 3460 | 3440 | 3580 | 4,07 | 4,71 | 0,66 | 14,01 |
| 21 | 3480 | 3420 | 3580 | 4,68 | | | |
| 17 | 3440 | 3340 | 3520 | 5,39 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 3 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 0% | 5% |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|--------------------------------|---------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 27/04/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 24/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 25/05/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|-------------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 45,32 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 0,00 |
| PNEU | kg | 2,38 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|--|----------|------------------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 2 | 3.020 | 195 | 95 | 80 | 14750 | 25,50 | 25,35 | 2,64 | 23,07 | 10,40 |
| 3 | 3.020 | 196 | 95 | 80 | 14000 | 24,20 | | | | |
| 10 | 3.100 | 196 | 94 | 81 | 14100 | 24,37 | | | | |
| 5 | 3.120 | 197 | 95 | 80 | 12300 | 21,26 | | | | |
| 1 | 3.020 | 195 | 95 | 80 | 12650 | 21,87 | | | | |
| 22 | 3.100 | 195 | 95 | 80 | 16000 | 27,66 | | | | |
| 21 | 3.120 | 195 | 95 | 80 | 15000 | 25,93 | | | | |
| 13 | 3.120 | 195 | 96 | 80 | 17500 | 30,25 | | | | |
| 20 | 3.160 | 196 | 96 | 81 | 14000 | 24,20 | | | | |
| 23 | 3.080 | 196 | 96 | 80 | 15100 | 26,10 | | | | |
| 9 | 3.120 | 197 | 95 | 80 | 15650 | 27,05 | | | | |
| 15 | 3.020 | 197 | 95 | 80 | 16600 | 28,70 | | | | |
| 7 | 3.080 | 194 | 94 | 81 | 12300 | 21,26 | | | | |
| 14 | 3.100 | 195 | 95 | 81 | 16250 | 28,09 | | | | |
| 11 | 3.140 | 195 | 95 | 80 | 15250 | 26,36 | | | | |
| 24 | 3.060 | 195 | 95 | 80 | 14500 | 25,07 | | | | |
| 4 | 3.100 | 196 | 95 | 80 | 12500 | 21,61 | | | | |
| 19 | 3.080 | 196 | 95 | 82 | 15500 | 26,79 | | | | |
| MÉDIA | 3.087 | 196 | 95 | 80 | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|----------|-----------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 8 | 3160 | 3000 | 3180 | 6,00 | 5,95 | 0,09 | 1,51 |
| 18 | 3280 | 3080 | 3260 | 5,84 | | | |
| 16 | 3120 | 3000 | 3180 | 6,00 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 4 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 0% | 2% |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 27/04/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 24/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 25/05/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 46,98 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 0,00 |
| PNEU | kg | 0,72 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 10 | 3.260 | 196 | 95 | 80 | 18600 | 32,15 | 30,77 | 2,05 | 29,00 | 6,67 |
| 12 | 3.240 | 196 | 96 | 82 | 18600 | 32,15 | | | | |
| 4 | 3.260 | 195 | 96 | 79 | 18800 | 32,50 | | | | |
| 3 | 3.220 | 195 | 94 | 80 | 19000 | 32,84 | | | | |
| 7 | 3.280 | 195 | 94 | 79 | 17250 | 29,82 | | | | |
| 22 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 16350 | 28,26 | | | | |
| 21 | 3.240 | 197 | 96 | 80 | 18600 | 32,15 | | | | |
| 13 | 3.240 | 196 | 95 | 81 | 15350 | 26,53 | | | | |
| 20 | 3.200 | 195 | 95 | 81 | 18900 | 32,67 | | | | |
| 23 | 3.180 | 196 | 97 | 80 | 17000 | 29,39 | | | | |
| 9 | 3.280 | 197 | 96 | 80 | 19000 | 32,84 | | | | |
| 15 | 3.200 | 195 | 95 | 81 | 19500 | 33,71 | | | | |
| 7 | 3.260 | 195 | 96 | 80 | 17000 | 29,39 | | | | |
| 14 | 3.200 | 196 | 96 | 80 | 17100 | 29,56 | | | | |
| 11 | 3.260 | 196 | 96 | 80 | 17580 | 30,39 | | | | |
| 24 | 3.240 | 195 | 97 | 82 | 17000 | 29,39 | | | | |
| 4 | 3.260 | 195 | 95 | 80 | 16200 | 28,00 | | | | |
| 19 | 3.220 | 195 | 95 | 80 | 18600 | 32,15 | | | | |
| MÉDIA | 3.240 | 196 | 96 | 80 | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 13 | 3340 | 3220 | 3380 | 4,97 | 5,19 | 0,35 | 6,75 |
| 14 | 3360 | 3220 | 3400 | 5,59 | | | |
| 15 | 3340 | 3200 | 3360 | 5,00 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 5 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 25 % | 2 % |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 04/05/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 31/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 01/06/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 35,05 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 11,93 |
| PNEU | kg | 0,72 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|----|--|--|--|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | | | | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) | cv | | | |
| 6 | 3.240 | 195 | 95 | 80 | 18350 | 31,72 | 35,16 | 3,41 | 32,22 | 9,70 | | | | |
| 10 | 3.260 | 196 | 94 | 80 | 17400 | 30,08 | | | | | | | | |
| 14 | 3.240 | 196 | 95 | 79 | 22620 | 39,10 | | | | | | | | |
| 13 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 17500 | 30,25 | | | | | | | | |
| 21 | 3.260 | 195 | 95 | 79 | 19000 | 32,84 | | | | | | | | |
| 18 | 3.240 | 196 | 95 | 80 | 18090 | 31,27 | | | | | | | | |
| 3 | 3.280 | 197 | 96 | 80 | 21400 | 36,99 | | | | | | | | |
| 2 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 19600 | 33,88 | | | | | | | | |
| 7 | 3.240 | 195 | 95 | 81 | 22000 | 38,03 | | | | | | | | |
| 5 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 22300 | 38,55 | | | | | | | | |
| 4 | 3.280 | 196 | 97 | 80 | 21500 | 37,17 | | | | | | | | |
| 1 | 3.260 | 195 | 95 | 80 | 22850 | 39,50 | | | | | | | | |
| 16 | 3.220 | 197 | 96 | 81 | 18900 | 32,67 | | | | | | | | |
| 19 | 3.220 | 195 | 95 | 80 | 21500 | 37,17 | | | | | | | | |
| 20 | 3.180 | 195 | 95 | 81 | 18750 | 32,41 | | | | | | | | |
| 9 | 3.220 | 195 | 95 | 80 | 23100 | 39,93 | | | | | | | | |
| 25 | 3.240 | 194 | 96 | 79 | 22000 | 38,03 | | | | | | | | |
| 24 | 3.280 | 194 | 97 | 81 | 19250 | 33,28 | | | | | | | | |
| MÉDIA | 3.250 | 195 | 95 | 80 | | | | | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 13 | 3000 | 2880 | 3000 | 4,17 | 5,23 | 0,57 | 8,60 |
| 14 | 2960 | 2820 | 2960 | 4,96 | | | |
| 15 | 2960 | 2740 | 2920 | 6,57 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 6 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 5% | 2% |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 04/05/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 31/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 01/06/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 44,60 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 2,38 |
| PNEU | kg | 0,72 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 1 | 3.320 | 195 | 95 | 80 | 16900 | 29,21 | 31,72 | 2,52 | 29,55 | 7,94 |
| 2 | 3.340 | 195 | 95 | 80 | 16900 | 29,21 | | | | |
| 4 | 3.380 | 195 | 95 | 81 | 16270 | 28,12 | | | | |
| 3 | 3.380 | 194 | 94 | 78 | 16350 | 28,26 | | | | |
| 12 | 3.380 | 195 | 94 | 80 | 18800 | 32,50 | | | | |
| 16 | 3.080 | 195 | 94 | 80 | 18000 | 31,12 | | | | |
| 11 | 3.300 | 196 | 95 | 79 | 20500 | 35,44 | | | | |
| 9 | 3.180 | 195 | 95 | 80 | 17800 | 30,77 | | | | |
| 23 | 3.180 | 195 | 96 | 80 | 18300 | 31,63 | | | | |
| 22 | 3.280 | 196 | 95 | 80 | 17200 | 29,73 | | | | |
| 28 | 3.180 | 197 | 95 | 80 | 16800 | 29,04 | | | | |
| 17 | 3.120 | 195 | 95 | 80 | 18800 | 32,50 | | | | |
| 5 | 3.420 | 195 | 96 | 80 | 19300 | 33,36 | | | | |
| 8 | 3.380 | 196 | 95 | 80 | 18200 | 31,46 | | | | |
| 6 | 3.400 | 195 | 96 | 81 | 18900 | 32,67 | | | | |
| 18 | 3.180 | 195 | 96 | 80 | 20600 | 35,61 | | | | |
| 21 | 3.260 | 195 | 95 | 81 | 20100 | 34,75 | | | | |
| 19 | 3.200 | 195 | 96 | 80 | 20600 | 35,61 | | | | |
| MÉDIA | 3.276 | 195 | 95 | 80 | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 13 | 3680 | 3420 | 3600 | 5,26 | 5,59 | 0,57 | 8,60 |
| 14 | 3580 | 3380 | 3580 | 5,92 | | | |
| 15 | 3500 | 3580 | 3780 | 5,59 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 7 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 25 % | 5 % |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 04/05/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 31/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 01/06/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PCS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 33,39 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 11,93 |
| PNEU | kg | 2,38 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|----|--|--|--|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | | | | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) | cv | | | |
| 2 | 3.240 | 196 | 95 | 80 | 17600 | 30,42 | 28,30 | 2,47 | 26,17 | 8,72 | | | | |
| 10 | 3.220 | 196 | 96 | 82 | 16700 | 28,87 | | | | | | | | |
| 16 | 3.200 | 195 | 95 | 79 | 14500 | 25,07 | | | | | | | | |
| 1 | 3.220 | 195 | 95 | 80 | 16500 | 28,52 | | | | | | | | |
| 3 | 3.280 | 195 | 95 | 79 | 14750 | 25,50 | | | | | | | | |
| 9 | 3.180 | 197 | 95 | 80 | 17300 | 29,91 | | | | | | | | |
| 6 | 3.240 | 195 | 97 | 80 | 15700 | 27,14 | | | | | | | | |
| 14 | 3.180 | 195 | 94 | 80 | 16600 | 28,70 | | | | | | | | |
| 20 | 3.280 | 197 | 94 | 80 | 13400 | 23,16 | | | | | | | | |
| 15 | 3.220 | 195 | 97 | 78 | 18150 | 31,37 | | | | | | | | |
| 11 | 3.200 | 196 | 95 | 77 | 17300 | 29,91 | | | | | | | | |
| 22 | 3.440 | 195 | 95 | 80 | 15000 | 25,93 | | | | | | | | |
| 7 | 3.260 | 195 | 96 | 81 | 17800 | 30,77 | | | | | | | | |
| 13 | 3.160 | 195 | 96 | 81 | 17900 | 30,94 | | | | | | | | |
| 24 | 3.240 | 195 | 97 | 82 | 16900 | 29,21 | | | | | | | | |
| 7 | 3.280 | 195 | 96 | 82 | 17800 | 30,77 | | | | | | | | |
| 19 | 3.180 | 195 | 95 | 82 | 16430 | 28,40 | | | | | | | | |
| 23 | 3.220 | 195 | 95 | 84 | 14350 | 24,81 | | | | | | | | |
| MÉDIA | 3.236 | 195 | 95 | 80 | | | | | | | | | | |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 13 | 3360 | 3220 | 3400 | 5,59 | 5,00 | 0,57 | 8,60 |
| 14 | 3280 | 3240 | 3380 | 4,32 | | | |
| 15 | 3360 | 3140 | 3300 | 5,10 | | | |

| | | | |
|----------------|------------------|------------|-------------|
| TRAÇO 8 | FATOR A/C | CBC | PNEU |
| | 0,42 | 5% | 5% |

| DADOS DO ENSAIO | 7 DIAS |
|-------------------------|------------|
| DATA DA MOLDAGEM | 04/05/2016 |
| DATA DA IMERSÃO EM ÁGUA | 31/05/2016 |
| DATA DO ENSAIO | 01/06/2016 |
| TIPO DE CURA | ÚMIDA |
| AMOSTRA | 18 PÇS |
| FATOR MULTIPLICATIVO | 1 |

| DOSAGEM EM MASSA | | |
|------------------|----|-------|
| CIMENTO | kg | 18,00 |
| AREIA | kg | 42,94 |
| BRITA | kg | 24,30 |
| CBC | kg | 2,38 |
| PNEU | kg | 2,38 |
| ADITIVO | g | 40,00 |
| ÁGUA | lt | 7,56 |

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------|---|-------|-----------|
| IDENT. | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO | | |
| | CP | MASSA (g) | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Carga (kgf) | Fpi (MPa) | Fp (MPa) | S | Fpk (Mpa) |
| 4 | 3.260 | 195 | 95 | 80 | 12900 | 22,30 | 21,79 | 1,68 | 20,35 | 7,70 |
| 7 | 3.220 | 196 | 95 | 80 | 11300 | 19,53 | | | | |
| 6 | 3.240 | 196 | 95 | 78 | 12600 | 21,78 | | | | |
| 9 | 3.200 | 195 | 95 | 80 | 13300 | 22,99 | | | | |
| 13 | 3.280 | 195 | 97 | 82 | 12000 | 20,74 | | | | |
| 14 | 3.260 | 195 | 95 | 80 | 13800 | 23,86 | | | | |
| 8 | 3.240 | 195 | 95 | 80 | 11700 | 20,23 | | | | |
| 15 | 3.280 | 196 | 95 | 80 | 12550 | 21,69 | | | | |
| 16 | 3.200 | 197 | 95 | 81 | 11980 | 20,71 | | | | |
| 20 | 3.200 | 195 | 95 | 80 | 11000 | 19,02 | | | | |
| 18 | 3.220 | 195 | 96 | 80 | 14800 | 25,58 | | | | |
| 21 | 3.260 | 198 | 97 | 80 | 12200 | 21,09 | | | | |
| 1 | 3.220 | 195 | 95 | 80 | 12800 | 22,13 | | | | |
| 3 | 3.280 | 195 | 95 | 80 | 13200 | 22,82 | | | | |
| 11 | 3.200 | 195 | 96 | 80 | 12500 | 21,61 | | | | |
| 12 | 3.260 | 195 | 95 | 79 | 12200 | 21,09 | | | | |
| 2 | 3.260 | 195 | 94 | 78 | 12000 | 20,74 | | | | |
| 5 | 3.280 | 196 | 96 | 80 | 14100 | 24,37 | | | | |
| MÉDIA | 3.242 | 196 | 95 | 80 | | | | | | |

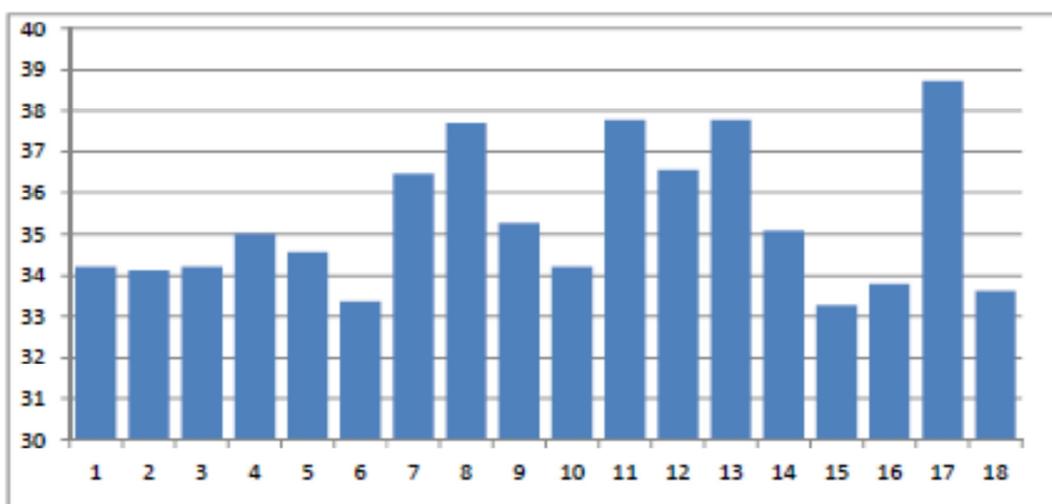
| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------------------|------|------|
| CP | MASSA (g) | MASSA SECA (g) | MASSA SATURADA (g) | ABSORÇÃO (%) | ABSORÇÃO MÉDIA (%) | S | CV |
| 13 | 3080 | 2900 | 3060 | 5,52 | 5,86 | 0,57 | 8,60 |
| 14 | 2960 | 2820 | 3000 | 6,38 | | | |
| 15 | 2960 | 2820 | 2980 | 5,67 | | | |

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS TRAÇOS

TRAÇO T0

| Tensão (Mpa) |
|--------------|
| 34,226 |
| 34,14 |
| 34,226 |
| 35,004 |
| 34,572 |
| 33,362 |
| 36,473 |
| 37,683 |
| 35,263 |
| 34,226 |
| 37,77 |
| 36,56 |
| 37,77 |
| 35,09 |
| 33,275 |
| 33,794 |
| 38,72 |
| 33,621 |

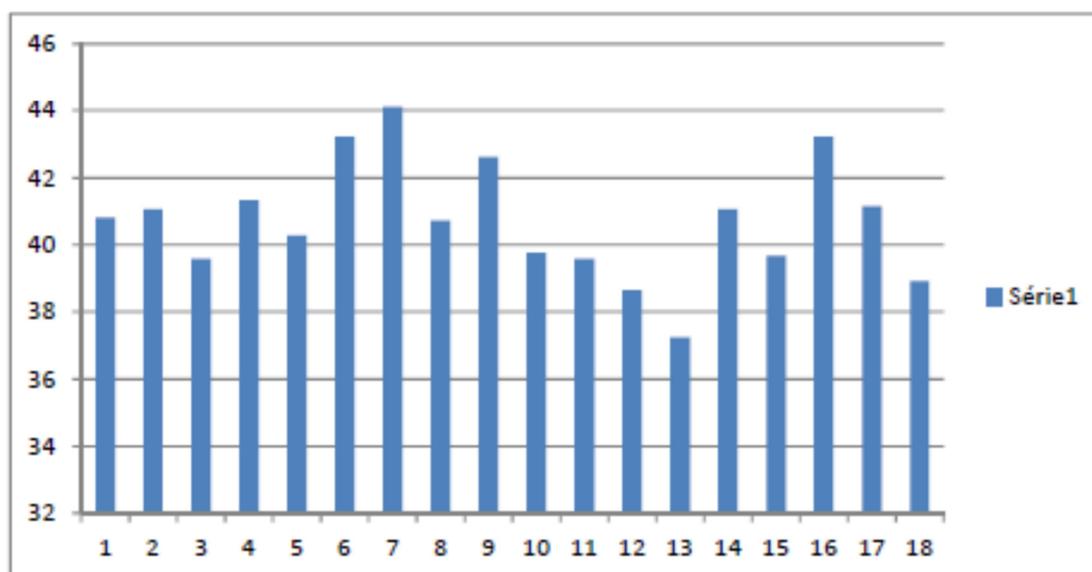
| Coluna1 | |
|---------------------------|----------|
| Média | 35,32083 |
| Erro padrão | 0,408029 |
| Mediana | 34,788 |
| Modo | 34,226 |
| Desvio padrão | 1,731121 |
| Variância da amostra | 2,996779 |
| Coefficiente de Variação | 4,901132 |
| Curtose | -0,87467 |
| Assimetria | 0,697416 |
| Intervalo | 5,445 |
| Mínimo | 33,275 |
| Máximo | 38,72 |
| Soma | 635,775 |
| Contagem | 18 |
| Maior(1) | 38,72 |
| Menor(1) | 33,275 |
| Nível de confiança(95,0%) | 0,860866 |



TRAÇO T1

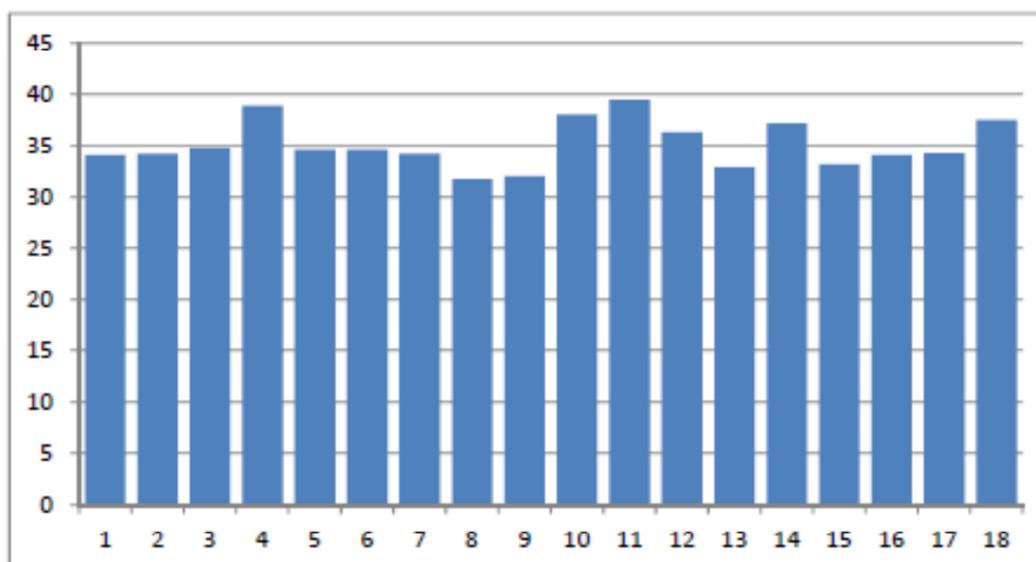
| Tensão (Mpa) |
|--------------|
| 40,795 |
| 41,054 |
| 39,585 |
| 41,313 |
| 40,276 |
| 43,215 |
| 44,114 |
| 40,708 |
| 42,61 |
| 39,758 |
| 39,585 |
| 38,634 |
| 37,251 |
| 41,054 |
| 39,671 |
| 43,215 |
| 41,14 |
| 38,893 |

| Coluna1 | |
|---------------------------|----------|
| Média | 40,71506 |
| Erro padrão | 0,415471 |
| Mediana | 40,7515 |
| Modo | 41,054 |
| Desvio padrão | 1,762695 |
| Variância da amostra | 3,107094 |
| Coefficiente de Variação | 4,329344 |
| Curtose | -0,10673 |
| Assimetria | 0,194219 |
| Intervalo | 6,863 |
| Mínimo | 37,251 |
| Máximo | 44,114 |
| Soma | 732,871 |
| Contagem | 18 |
| Maior(1) | 44,114 |
| Menor(1) | 37,251 |
| Nível de confiança(95,0%) | 0,876568 |



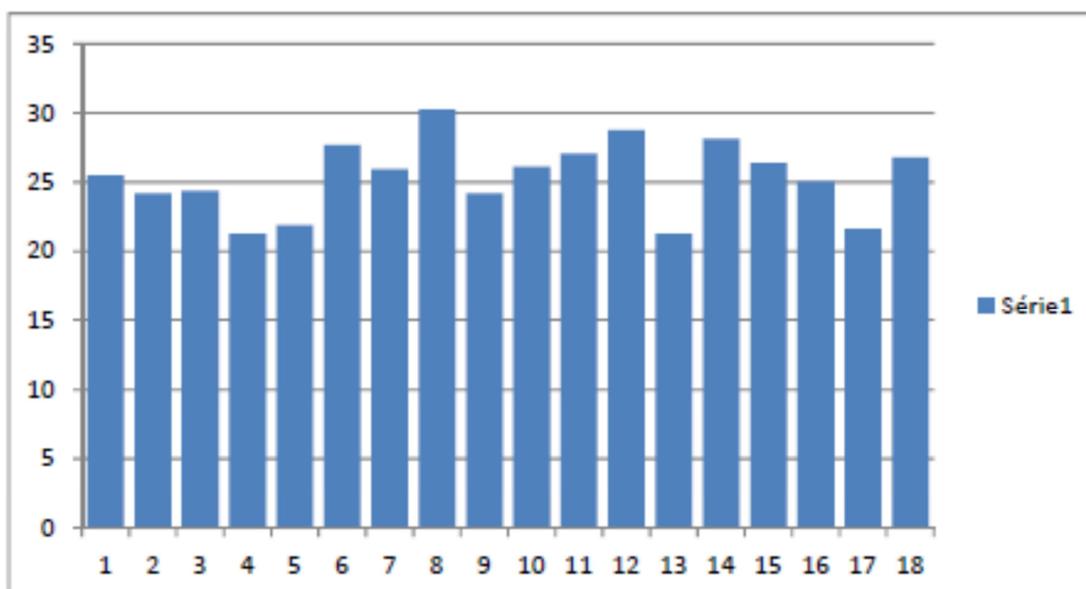
TRAÇO T2

| Tensão (Mpa) | <i>Coluna1</i> | |
|--------------|---------------------------|----------|
| 34,053 | Média | 35,08372 |
| 34,14 | Erro padrão | 0,538395 |
| 34,745 | Mediana | 34,399 |
| 38,893 | Modo | 34,053 |
| 34,572 | Desvio padrão | 2,284215 |
| 34,572 | Variância da amostra | 5,217638 |
| 34,192 | Coefficiente de Variação | 6,510754 |
| 31,72 | Curtose | -0,66187 |
| 31,979 | Assimetria | 0,529284 |
| 38,029 | Intervalo | 7,692 |
| 39,412 | Mínimo | 31,72 |
| 36,3 | Máximo | 39,412 |
| 32,843 | Soma | 631,507 |
| 37,165 | Contagem | 18 |
| 33,103 | Maior(1) | 39,412 |
| 34,053 | Menor(1) | 31,72 |
| 34,226 | Nível de confiança(95,0%) | 1,135913 |
| 37,51 | | |



TRAÇO T3

| Tensão (Mpa) | Coluna1 | |
|--------------|---------------------------|----------|
| 25,497 | | |
| 24,2 | Média | 25,34789 |
| 24,373 | Erro padrão | 0,621504 |
| 21,262 | Mediana | 25,713 |
| 21,867 | Modo | 24,2 |
| 27,657 | Desvio padrão | 2,63682 |
| 25,929 | Variância da amostra | 6,952818 |
| 30,25 | Coefficiente de Variação | 10,40252 |
| 24,2 | Curtose | -0,65314 |
| 26,102 | Assimetria | -0,13377 |
| 27,052 | Intervalo | 8,988 |
| 28,695 | Mínimo | 21,262 |
| 21,262 | Máximo | 30,25 |
| 28,09 | Soma | 456,262 |
| 26,361 | Contagem | 18 |
| 25,065 | Maior(1) | 30,25 |
| 21,607 | Menor(1) | 21,262 |
| 26,793 | Nível de confiança(95,0%) | 1,31126 |

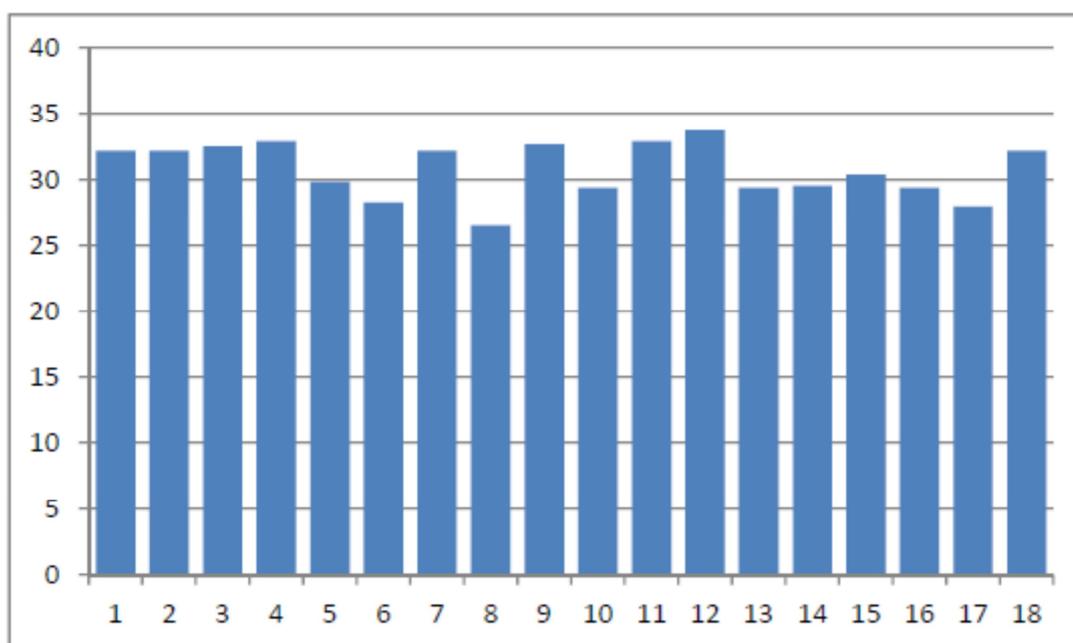


TRAÇO T4

| Tensão (Mpa) |
|--------------|
| 32,152 |
| 32,152 |
| 32,498 |
| 32,843 |
| 29,818 |
| 28,262 |
| 32,152 |
| 26,534 |
| 32,67 |
| 29,386 |
| 32,843 |
| 33,708 |
| 29,386 |
| 29,559 |
| 30,389 |
| 29,386 |
| 28,003 |
| 32,152 |

ESTATISTICA DESCRITIVA

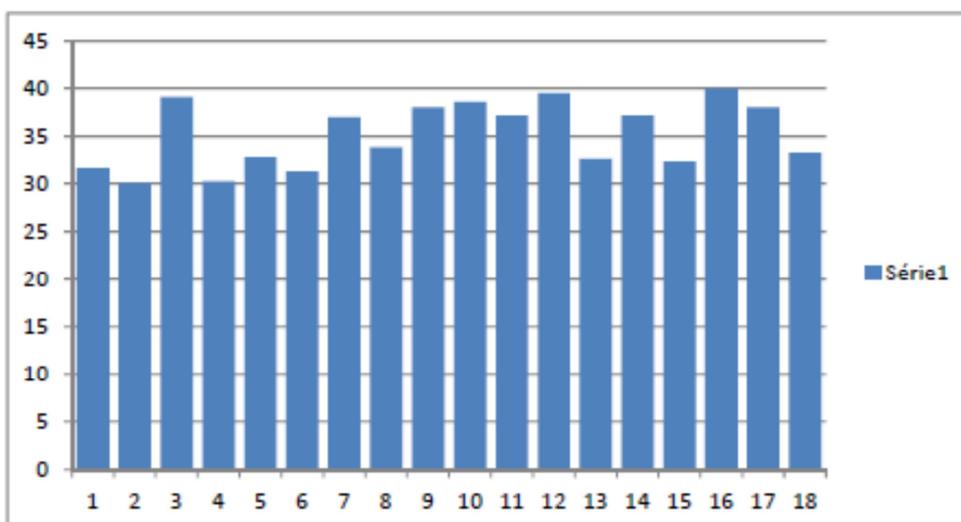
| | |
|---------------------------|----------|
| Média | 30,77183 |
| Erro padrão | 0,483778 |
| Mediana | 31,2705 |
| Modo | 32,152 |
| Desvio padrão | 2,052495 |
| Variância da amostra | 4,212737 |
| Coefficiente de Variação | 6,670045 |
| Curtose | -0,86091 |
| Assimetria | -0,44587 |
| Intervalo | 7,174 |
| Mínimo | 26,534 |
| Máximo | 33,708 |
| Soma | 553,893 |
| Contagem | 18 |
| Maior(1) | 33,708 |
| Menor(1) | 26,534 |
| Nível de confiança(95,0%) | 1,020682 |



TRAÇO T5

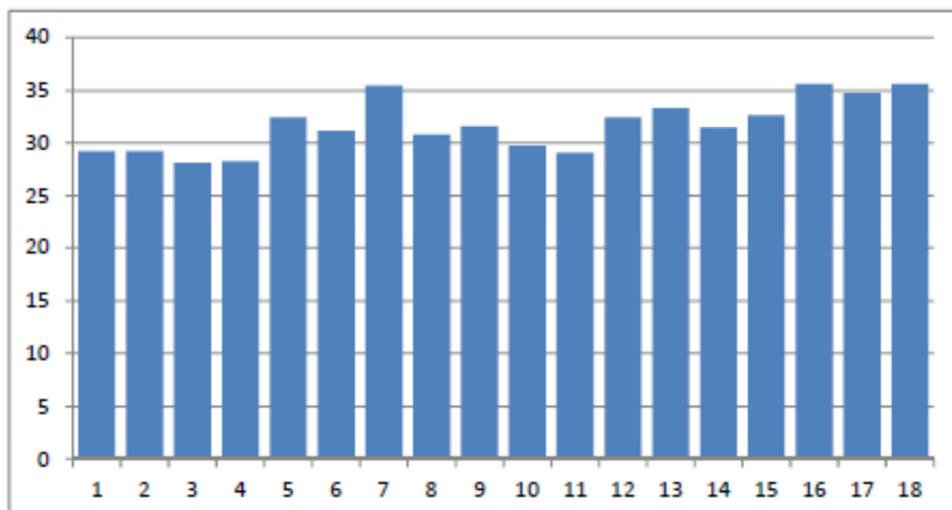
| Tensão (Mpa) |
|--------------|
| 31,72 |
| 30,077 |
| 39,101 |
| 30,25 |
| 32,843 |
| 31,27 |
| 36,992 |
| 33,88 |
| 38,029 |
| 38,548 |
| 37,165 |
| 39,498 |
| 32,67 |
| 37,165 |
| 32,411 |
| 39,93 |
| 38,029 |
| 33,275 |

| ESTATISTICA DESCRITIVA | |
|---------------------------|----------|
| Média | 35,1585 |
| Erro padrão | 0,803724 |
| Mediana | 35,436 |
| Modo | 38,029 |
| Desvio padrão | 3,409913 |
| Variância da amostra | 11,62751 |
| Coefficiente de Variação | 9,698688 |
| Curtose | -1,64024 |
| Assimetria | -0,07689 |
| Intervalo | 9,853 |
| Mínimo | 30,077 |
| Máximo | 39,93 |
| Soma | 632,853 |
| Contagem | 18 |
| Maior(1) | 39,93 |
| Menor(1) | 30,077 |
| Nível de confiança(95,0%) | 1,69571 |



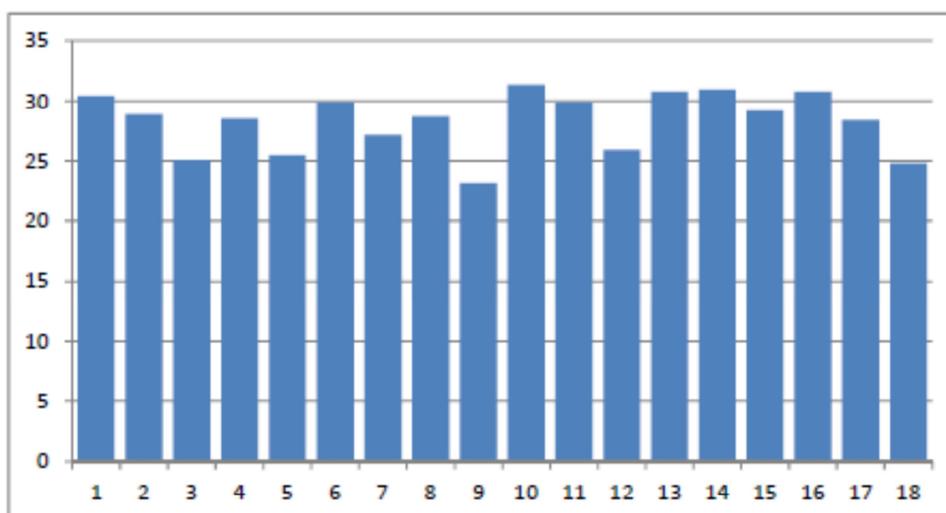
TRAÇO T6

| Tensão (Mpa) | Coluna1 | |
|--------------|---------------------------|----------|
| 29,213 | Média | 31,72156 |
| 29,213 | Erro padrão | 0,593968 |
| 28,124 | Mediana | 31,5465 |
| 28,262 | Modo | 29,213 |
| 32,498 | Desvio padrão | 2,519994 |
| 31,115 | Coefficiente de Variação | 92,09195 |
| 35,436 | Variância da amostra | 6,350372 |
| 30,769 | Curtose | -1,12288 |
| 31,633 | Assimetria | 0,226546 |
| 29,732 | Intervalo | 7,485 |
| 29,04 | Mínimo | 28,124 |
| 32,498 | Máximo | 35,609 |
| 33,362 | Soma | 570,988 |
| 31,46 | Contagem | 18 |
| 32,67 | Maior(1) | 35,609 |
| 35,609 | Menor(1) | 28,124 |
| 34,745 | Nível de confiança(95,0%) | 1,253164 |
| 35,609 | | |



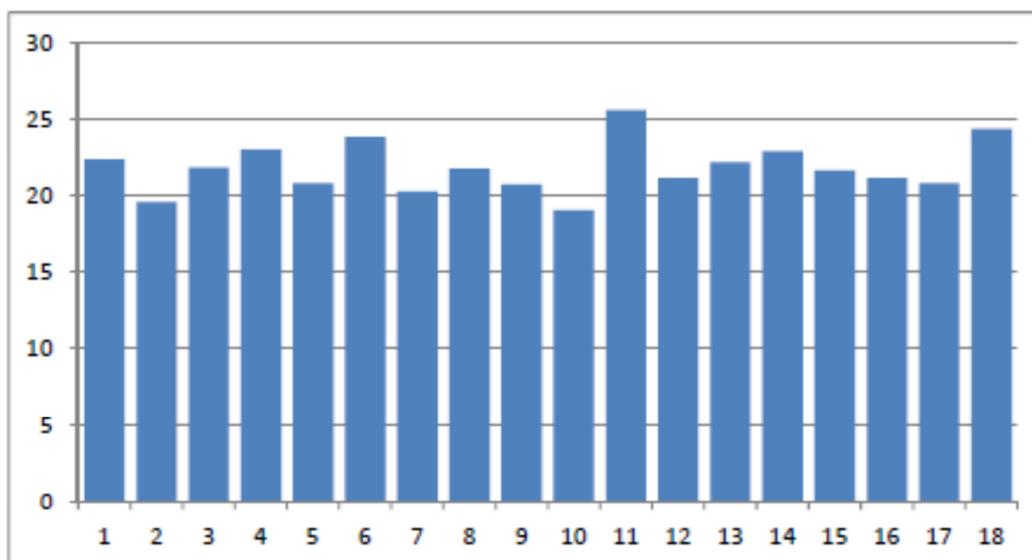
TRAÇO T7

| Tensão (Mpa) | Coluna1 | |
|--------------|---------------------------|----------|
| 30,423 | | |
| 28,867 | Média | 28,29906 |
| 25,065 | Erro padrão | 0,581711 |
| 28,522 | Mediana | 28,781 |
| 25,497 | Modo | 29,905 |
| 29,905 | Desvio padrão | 2,467991 |
| 27,139 | Variância da amostra | 6,090981 |
| 28,695 | | |
| 23,163 | Curtose | -0,68339 |
| 31,374 | Assimetria | -0,67038 |
| 29,905 | Intervalo | 8,211 |
| 25,929 | Mínimo | 23,163 |
| 30,769 | Máximo | 31,374 |
| 30,942 | Soma | 509,383 |
| 29,213 | Contagem | 18 |
| 30,769 | Maior(1) | 31,374 |
| 28,401 | Menor(1) | 23,163 |
| 24,805 | Nível de confiança(95,0%) | 1,227303 |



TRAÇO T8

| Tensão (Mpa) | Coluna1 | |
|--------------|---------------------------|----------|
| 22,299 | | |
| 19,533 | Média | 21,79278 |
| 21,78 | Erro padrão | 0,395316 |
| 22,99 | Mediana | 21,6505 |
| 20,743 | Modo | 20,743 |
| 23,855 | Desvio padrão | 1,677183 |
| 20,225 | Variância da amostra | 2,812942 |
| 21,694 | Coefficiente de Variação | 7,696049 |
| 20,709 | Curtose | 0,285679 |
| 19,015 | Assimetria | 0,592452 |
| 25,583 | Intervalo | 6,568 |
| 21,089 | Mínimo | 19,015 |
| 22,126 | Máximo | 25,583 |
| 22,817 | Soma | 392,27 |
| 21,607 | Contagem | 18 |
| 21,089 | Maior(1) | 25,583 |
| 20,743 | Menor(1) | 19,015 |
| 24,373 | Nível de confiança(95,0%) | 0,834043 |



ANEXO B – LAUDO RESISTÊNCIA À ABRASÃO



Rua Washington Luiz, 575 - CEP 90010-480 - Porto Alegre/RS/Brasil - CNPJ 92.815.685/0001-67
Fone +55 (51) 32872000 - e-mail: faleconosco@cientec.rs.gov.br - www.cientec.rs.gov.br

Documento: **RELATÓRIO DE ENSAIO**

Numero: **6969 - 23202**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao item ou itens ensaiados ou calibrados. Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO

Cliente: **SILVIA PAULA SOSSAI ALTOÉ**
Rua Tabaeté, 57
87.005-140 - Maringá/PR

Material ensaiado: quatro peças de concreto para pavimentação, entregues à CIENTEC pelo Cliente, já identificadas.

Data da entrega do material: 04 de julho de 2017.

Data de realização do ensaio: 06 de julho de 2017.

Método: P.O.703.01.008:2015 rev-00 - Determinação do Índice de desgaste por abrasão em materiais cerâmicos – Método CIENTEC de Desgaste por Abrasão - o ensaio simula um percurso de 500 m percorridos pelo corpo de prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa, sobre pó abrasivo carborundo. O índice de desgaste é expresso como a média entre as alturas iniciais e finais do corpo de prova medidas em cinco pontos.

RESULTADOS:

| Amostra | C.P. (nº) | Índice de desgaste (mm) | | Informações do Cliente | | |
|---------|-----------|-------------------------|-------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| | | Individual | Média | | | |
| 01 | 01A | 6,01 | 6,29 | T0 - 7 | Moldados: 04/05/16 | Tese de Doutorado |
| | 01B | 6,57 | | | | |
| 02 | 02A | 6,47 | 6,37 | T5 - 8 | | |
| | 02B | 6,27 | | | | |
| 03 | 03A | 9,36 | 9,70 | T0 - C | Moldados: 01/12/16 | |
| | 03B | 10,04 | | | | |
| 04 | 04A | 8,99 | 8,27 | T5 - C | | |
| | 04B | 7,55 | | | | |

Este documento cancela e substitui o RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 6969 - 23145 emitido em 07 de julho de 2017, por esta Fundação.

Porto Alegre, 10 de julho de 2017.

Eng. Civil Dr. Fernando Piazza Recena
Gerente do Dep. de Materiais de Construção

Eng. Civil Ricardo Girardi, M.Sc.
Responsável Técnico – CREA/RS nº 184957
Coordenador do Lab. de Mat. de Construção Civil

APÊNDICE C – PLANILHA LEITURAS DE TEMPERATURA

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | | |
| 10/03/2017 | Manhã | 26,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | 23,67 | 0,00% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 24 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 23 | 23,67 | |
| | | | | 5 | 24 | | |
| | | | | 6 | 24 | | |
| | Tarde | 32,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 31 | 30,67 | -1,12% |
| | | | | 2 | 31 | | |
| | | | | 3 | 30 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 31 | 30,33 | |
| | | | | 5 | 30 | | |
| | | | | 6 | 30 | | |
| Noite | 27,2 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 25 | 25,33 | 2,58% | |
| | | | 2 | 25 | | | |
| | | | 3 | 26 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 26 | 26 | | |
| | | | 5 | 26 | | | |
| | | | 6 | 26 | | | |
| 12/03/2017 | Manhã | 23,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21 | 1,55% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 22 | 21,33 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| | Tarde | 31,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 26 | 26,67 | 0,00% |
| | | | | 2 | 27 | | |
| | | | | 3 | 27 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 26 | 26,67 | |
| | | | | 5 | 27 | | |
| | | | | 6 | 27 | | |
| | Noite | 33,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 27 | 27 | 1,21% |
| | | | | 2 | 27 | | |
| | | | | 3 | 27 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 27 | 27,33 | |
| | | | | 5 | 27 | | |
| | | | | 6 | 28 | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | Trecho com CBC e Pneu | | | | |
| 19/03/2017 | Manhã | 25,6 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21 | 1,55% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 22 | 21,33 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| | Tarde | 32,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 26 | 26,67 | 0,00% |
| | | | | 2 | 27 | | |
| | | | | 3 | 27 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 26 | 26,67 | |
| | | | | 5 | 27 | | |
| | | | | 6 | 27 | | |
| Noite | 27,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 22,33 | 0,00% | |
| | | | 2 | 22 | | | |
| | | | 3 | 22 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 22 | 22,33 | | |
| | | | 5 | 22 | | | |
| | | | 6 | 23 | | | |
| 26/03/2017 | Manhã | 22,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21 | -3,30% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 20,33 | |
| | | | | 5 | 20 | | |
| | | | | 6 | 20 | | |
| | Tarde | 31,2 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 30 | 30 | 1,09% |
| | | | | 2 | 30 | | |
| | | | | 3 | 30 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 30 | 30,33 | |
| | | | | 5 | 31 | | |
| | | | | 6 | 30 | | |
| | Noite | 31,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 29 | 29,33 | 0,00% |
| | | | | 2 | 29 | | |
| | | | | 3 | 30 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 30 | 29,33 | |
| | | | | 5 | 29 | | |
| | | | | 6 | 29 | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | |
| 01/04/2017 | Manhã | 16,7 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 14 | 14,33 | 2,32% |
| | | | | 2 | 15 | | |
| | | | | 3 | 14 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 14,67 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 14 | | |
| | Tarde | 23,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21 | 1,55% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 21,33 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 22 | | |
| Noite | 28,1 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 25 | 25,33 | 1,32% | |
| | | | 2 | 25 | | | |
| | | | 3 | 26 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 25 | 25,67 | | |
| | | | 5 | 26 | | | |
| | | | 6 | 26 | | | |
| 08/04/2017 | Manhã | 21,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 19 | 19 | 1,71% |
| | | | | 2 | 19 | | |
| | | | | 3 | 19 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 20 | 19,33 | |
| | | | | 5 | 20 | | |
| | | | | 6 | 18 | | |
| | Tarde | 23,9 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 22 | 21,33 | -3,19% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 20,67 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 20 | | |
| Noite | 27,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 26 | 25,67 | -1,34% | |
| | | | 2 | 26 | | | |
| | | | 3 | 25 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 26 | 25,33 | | |
| | | | 5 | 25 | | | |
| | | | 6 | 25 | | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 16 | | |
| 17/04/2017 | Manhã | 18,1 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 16 | 15,67 | -2,22% |
| | | | | 2 | 16 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 15,33 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 16 | | |
| | Tarde | 24,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 22 | 22,67 | 1,43% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 23 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 23 | 23 | |
| | | | | 5 | 23 | | |
| | | | | 6 | 23 | | |
| Noite | 27,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | 25 | 5,05% | |
| | | | 2 | 26 | | | |
| | | | 3 | 25 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 26 | 26,33 | | |
| | | | 5 | 27 | | | |
| | | | 6 | 26 | | | |
| 24/04/2017 | Manhã | 17,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 16 | 15,67 | -2,22% |
| | | | | 2 | 16 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 15,33 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 16 | | |
| | Tarde | 24,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21,33 | 1,57% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 23 | 21,67 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| Noite | 26,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | 23,67 | 1,37% | |
| | | | 2 | 24 | | | |
| | | | 3 | 23 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 24 | 24 | | |
| | | | 5 | 24 | | | |
| | | | 6 | 24 | | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| 02/05/2017 | Manhã | 17,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 15 | 15 | 2,15% |
| | | | | 2 | 15 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 15,33 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 16 | | |
| | Tarde | 25,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 22,67 | -3,05% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 23 | 22 | |
| | | | | 5 | 22 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| Noite | 27 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | 24,33 | 0,00% | |
| | | | 2 | 25 | | | |
| | | | 3 | 24 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 24 | 24,33 | | |
| | | | 5 | 24 | | | |
| | | | 6 | 25 | | | |
| 07/05/2017 | Manhã | 17,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 15 | 15 | 2,15% |
| | | | | 2 | 15 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 15,33 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 16 | | |
| | Tarde | 23,7 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21,33 | 0,00% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 21,33 | |
| | | | | 5 | 22 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| Noite | 24,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 20 | 20,67 | 0,00% | |
| | | | 2 | 21 | | | |
| | | | 3 | 21 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 21 | 20,67 | | |
| | | | 5 | 21 | | | |
| | | | 6 | 20 | | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| 14/05/2017 | Manhã | 19,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 18 | 17,33 | -1,94% |
| | | | | 2 | 17 | | |
| | | | | 3 | 17 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 16 | 17 | |
| | | | | 5 | 18 | | |
| | | | | 6 | 17 | | |
| | Tarde | 23,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 22 | 21,33 | -1,57% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 21 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| Noite | 26,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 23,33 | -1,43% | |
| | | | 2 | 23 | | | |
| | | | 3 | 24 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 23 | 23 | | |
| | | | 5 | 23 | | | |
| | | | 6 | 23 | | | |
| 23/05/2017 | Manhã | 17,9 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 18 | 17,33 | -1,94% |
| | | | | 2 | 17 | | |
| | | | | 3 | 17 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 16 | 17 | |
| | | | | 5 | 18 | | |
| | | | | 6 | 17 | | |
| | Tarde | 22,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21 | 0,00% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 21 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 21 | 21 | |
| | | | | 5 | 21 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| Noite | 22,7 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 20 | 20,33 | -1,65% | |
| | | | 2 | 20 | | | |
| | | | 3 | 21 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 20 | 20 | | |
| | | | 5 | 20 | | | |
| | | | 6 | 20 | | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 18 | | |
| 30/05/2017 | Manhã | 20,6 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 18 | 18,33 | 1,82% |
| | | | | 2 | 18 | | |
| | | | | 3 | 19 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 19 | 18,67 | |
| | | | | 5 | 18 | | |
| | | | | 6 | 19 | | |
| | Tarde | 25,7 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 24 | 23,67 | 0,00% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 24 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 24 | 23,67 | |
| | | | | 5 | 24 | | |
| | | | | 6 | 23 | | |
| Noite | 26 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 23 | 1,41% | |
| | | | 2 | 23 | | | |
| | | | 3 | 23 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 23 | 23,33 | | |
| | | | 5 | 24 | | | |
| | | | 6 | 23 | | | |
| 06/06/2017 | Manhã | 19,9 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 17 | 17 | -1,98% |
| | | | | 2 | 17 | | |
| | | | | 3 | 17 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 16 | 16,67 | |
| | | | | 5 | 17 | | |
| | | | | 6 | 17 | | |
| | Tarde | 24,7 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 22,67 | 4,22% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 24 | 23,67 | |
| | | | | 5 | 22 | | |
| | | | | 6 | 25 | | |
| | Noite | 26,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 23,67 | 0,00% |
| | | | | 2 | 24 | | |
| | | | | 3 | 24 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 24 | 23,67 | |
| | | | | 5 | 23 | | |
| | | | | 6 | 24 | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Varição de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|----|-------|-------------------------------------|--------------------------|
| 13/06/2017 | Manhã | 16,1 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 14 | 13,67 | -2,55% |
| | | | | 2 | 14 | | |
| | | | | 3 | 13 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 13 | 13,33 | |
| | | | | 5 | 14 | | |
| | | | | 6 | 13 | | |
| | Tarde | 17 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 15 | 15 | 2,15% |
| | | | | 2 | 15 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 16 | 15,33 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 15 | | |
| Noite | 17 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 13 | 13,33 | 2,49% | |
| | | | 2 | 13 | | | |
| | | | 3 | 14 | | | |
| | | Trecho Ref | 4 | 14 | 13,67 | | |
| | | | 5 | 14 | | | |
| | | | 6 | 13 | | | |
| 20/06/2017 | Manhã | 13,5 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 14 | 13,67 | -2,55% |
| | | | | 2 | 14 | | |
| | | | | 3 | 13 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 13 | 13,33 | |
| | | | | 5 | 14 | | |
| | | | | 6 | 13 | | |
| | Tarde | 18,4 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 17 | 17,33 | 0,00% |
| | | | | 2 | 17 | | |
| | | | | 3 | 18 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 18 | 17,33 | |
| | | | | 5 | 17 | | |
| | | | | 6 | 17 | | |
| | Noite | 18,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 16 | 16,33 | -2,06% |
| | | | | 2 | 16 | | |
| | | | | 3 | 17 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 16 | 16 | |
| | | | | 5 | 16 | | |
| | | | | 6 | 16 | | |

| Data da leitura | Horário | Condições Climáticas °C | Temperatura nos pontos determinados °C | | | Temperatura Média de cada trecho °C | Variação de temperatura % |
|-----------------|---------|-------------------------|--|---|----|-------------------------------------|---------------------------|
| 27/06/2017 | Manhã | 16,8 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 14 | 14,33 | 4,47% |
| | | | | 2 | 14 | | |
| | | | | 3 | 15 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 15 | 15 | |
| | | | | 5 | 15 | | |
| | | | | 6 | 15 | | |
| | Tarde | 23,3 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 21 | 21,33 | 1,57% |
| | | | | 2 | 21 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 22 | 21,67 | |
| | | | | 5 | 22 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |
| | Noite | 24,1 | Trecho com CBC e Pneu | 1 | 23 | 22,67 | -4,61% |
| | | | | 2 | 23 | | |
| | | | | 3 | 22 | | |
| | | | Trecho Ref | 4 | 22 | 21,67 | |
| | | | | 5 | 22 | | |
| | | | | 6 | 21 | | |