



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**WEBERT BRASIL CIRILO DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA NO CONCRETO  
UTILIZADO EM BLOCOS INTERTRAVADOS DE PAVIMENTOS**

**FORTALEZA**

**2017**

WEBERT BRASIL CIRILO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA EM BLOCOS  
INTERTRAVADOS DE PAVIMENTOS

Monografia submetida à Coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte.

Orientadora: Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA – CE  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

Silva, Webert Brasil Cirilo da.

Avaliação da aplicação de cinzas de termelétrica em blocos intertravados de pavimentos / Webert Brasil Cirilo da Silva. – 2017.

163 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.

Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

1. Pavimentação. 2. Concreto. 3. Intertravados. 4. Cinzas. 5. Termoelétrica. I. Título.

CDD 620

---

WEBERT BRASIL CIRILO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA EM BLOCOS  
INTERTRAVADOS DE PAVIMENTOS

Monografia submetida à Coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte.

Orientadora: Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sc. Antônio Eduardo Bezerra Cabral  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Ao meu inesquecível avô materno, Raimundo Odimar, a quem eu amo incondicionalmente e que me mostrou que nós podemos viver de um modo muito simples e alegre, desde que estejamos dispostos a enxergar a vida desse modo.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha família e, principalmente, aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional durante esse ano. Muito obrigado por, sempre, me deixarem mais feliz nos dias ruins, portanto, esse trabalho também é de vocês. Saibam que eu os amo muito.

Serei eternamente grato a minha orientadora, professora Suelly, por ser uma profissional e uma mulher incrível. Se não fosse por seus ensinamentos e por sua gentileza, eu, muito provavelmente, não teria conseguido completar esse trabalho. Com isso, eu digo que a professora se tornou uma grande amiga que eu espero manter por muitos anos.

Também agradeço as outras pessoas envolvidas na linha de pesquisa em que eu estou inserido, como o professor Jorge Soares e o coordenador, professor Eduardo Cabral, além de todo o apoio administrativo. Vocês foram essenciais para a realização de essa pesquisa.

Um agradecimento especial aos responsáveis da Usina Termelétrica do Pecém, pertencente às empresas Eneva e EDP, por terem fornecido as cinzas necessárias para esta pesquisa. Também agradeço às empresas OCS e Apodi, onde foram retirados os materiais convencionais para o concreto. Sem essas colaborações, esse trabalho nunca teria acontecido.

Aos meus companheiros e companheiras do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Annie, Assis, Boris, Bruno, Júnior e Ricardo, que apesar do tempo corrido, me ajudaram, para a realização de esse estudo, sou muito grato a vocês. Também agradeço as minhas colegas de laboratório, Sarah, Raimi e Regilene que me ajudaram a me adequar a um ambiente, no qual eu não estava acostumado e, apesar dos atritos e do estresse em alguns dias, é algo que faz parte do trabalho e saibam que eu as respeito muito, vocês são dez.

Aos meus companheiros do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, Anselmo e Eugênio, por terem me ajudado em diversos ensaios, sou muito grato a vocês mesmo.

Aos meus colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Elano, Maurício, Moisés, Vitor, Diego, Lilian e Raphael, Eduarda, Felipe, Gabrielly e Thalisson por toda a ajuda nos últimos seis meses, eu devo muito a todos vocês, me ensinaram bastante.

Um agradecimento especial ao professor Perboyre Barbosa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará do Campus de Fortaleza por ter me emprestado as fôrmas de blocos pavers a serem utilizadas no trabalho. Sou muito grato ao senhor.

Muito obrigado aos meus amigos de graduação de engenharia civil por todo o caminho que trilhamos ao longo dos últimos cinco anos. Nunca vou esquecer-los.

Por fim, obrigado a todos que contribuíram, de alguma forma, para o meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Devido ao fato da geração significativa de cinzas, advindas de uma usina termoelétrica, e do custo crescente de armazenamento de esses resíduos, decidiu-se verificar, através da pesquisa, a incorporação das cinzas pesadas no concreto usado em blocos intertravados para pavimentação. Em primeiro lugar, depois de serem coletados os materiais convencionais e alternativos, foram realizados ensaios ambientais (extrato lixiviado e solubilizado) e de caracterização física (análise granulométrica, densidade real, limites de liquidez e de plasticidade e umidade higroscópica). Através das curvas granulométricas de cada material, percebeu-se que as cinzas poderiam substituir, em massa, até 10% de brita 19,0 mm e de areia, o que originaria dois traços alternativos, além da composição de referência. Após a mistura dos agregados, o concreto fresco, nos três traços, foi submetido ao ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*), o qual foi zero em todos os casos, indicando que se estava trabalhando com um concreto do tipo seco. Depois, este, em estado endurecido, foi separado nos formatos de corpos-de-prova cilíndricos e de blocos pavers, sendo realizado os ensaios de resistência à compressão, de absorção de água, além de outros procedimentos complementares, como o de inspeção visual e de avaliação dimensional. Com relação ao ensaio de absorção de água, os três traços apresentaram valores individuais e médios menores do que 7% e 6%, respectivamente, o que é recomendável. No ensaio de resistência à compressão, no formato de corpos-de-prova cilíndricos, o traço com substituição de 10% de brita 19,0 mm apresentou, aos 28 dias, um valor superior (25,14 MPa) ao do traço de referência (22,43 MPa), enquanto o traço com substituição de areia forneceu um valor, praticamente, idêntico (22,40 MPa), o que é bastante satisfatório para a pesquisa. Como complemento, procedeu-se para uma análise estatística ANOVA dos resultados de resistência à compressão e de absorção de água, seguida do teste de Duncan. Também se procedeu para o dimensionamento, através de métodos empíricos, de um pavimento intertravado idealizado, com uma, conseqüente, análise comparativa de custos e descobriu-se que o uso do traço alternativo com substituição de 10% de areia fez a estrutura ficar mais barata. Conclui-se que os resultados obtidos, a partir do programa experimental, encorajam o emprego das cinzas pesadas em pavimentos intertravados de concreto.

**Palavras-chave:** Pavimentação. Concreto. Intertravados. Cinzas. Termoelétrica.

## ABSTRACT

Due to the significant generation of ashes from a thermoelectric plant and the increasing cost of storage of these wastes, it was decided to verify, through the research, the incorporation of bottom ashes into concrete used in interlocking blocks for paving. Firstly, after the conventional and alternative materials were collected, environmental tests (leached and solubilized extract) and physical characterization tests (grain size analysis, real density, liquidity and plasticity limits and hygroscopic moisture) were performed. Through the grain size curves of each material, it was observed that ashes could replace, by mass, up to 10% of gravel 19,0 mm and sand, which would give rise to two alternative traces, in addition to the reference composition. After mixing the aggregates, the fresh concrete in the three traces was submitted to the slump test, which was zero in all cases, indicating that it was working with a dry type concrete. Then, in the hardened state, it was separated into the formats of cylindrical specimens and blocks pavers, being the tests of resistance to compression, water absorption, and other complementary procedures, such as visual inspection and dimensional evaluation. Regarding the water absorption test, the three traits presented individual and mean values lower than 7% and 6%, respectively, which is recommended. In the test of compressive strength, in the format of cylindrical specimens, the trait with 10% substitution of gravel 19,0 mm presented, at 28 days, a higher value (25,14 MPa) than that of the reference trait (22,43 MPa), while the sand substitution traced gave a practically identical value (22,40 MPa), which is quite satisfactory for the research. As a complement, a statistical ANOVA analysis of the results of compressive strength and water absorption was carried out, followed by the Duncan test. Also proceeded to scale, through empirical methods, of an idealized interlocking pavement with a consequential comparative cost analysis and it turned out that the use of alternate stroke with 10% substitution of sand made the structure be cheaper. It is concluded that the results obtained, from the experimental program, encourage the use of bottom ashes on interlocked concrete pavements.

**Keywords:** Paving. Concrete. Interlocked. Ashes. Thermoelectric.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (Associação Americana de Oficiais Estaduais de Estradas e Transportes)
BCA	<i>British Cement Association</i> (Associação Britânica de Cimento)
BIP	Bloco Intertravado de Pavimento
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia)
CCCM	Cinza de Combustão de Carvão Mineral
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CRBC	Cinza Residual do Bagaço de Cana
DEECC	Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DMC	Dimensão Máxima Característica
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IF	Índice de Forma
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LABOSAN	Laboratório de Saneamento Ambiental
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
NCMA	<i>National Concrete Masonry Association</i> (Associação Nacional de Maçonaria de Concreto)
NM	Norma Mercosur
PCA	<i>Portland Cement Association</i> (Associação de Cimento Portland)
PCP	Pavimento de Concreto Pré-Fabricado
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SEINFRA - CE	Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará

SSS	Saturado Superfície Seca
UFC	Universidade Federal do Ceará
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i> (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)
UTP	Usina Termelétrica do Pecém

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trecho da Via Ápia.....	26
Figura 2 – Peabiru em Itu, São Paulo (a) e Rua 15 de Novembro em Blumenau, Santa Catarina (b).....	28
Figura 3 – Perfil das camadas do pavimento intertravado.....	28
Figura 4 – Tonalidades das peças de concreto.....	30
Figura 5 – Arranjos no intertravamento dos blocos, do tipo fileira (a) e reto (b).....	32
Figura 6 – Arranjos no intertravamento dos blocos, do tipo espinha de peixe (a) e trama (b).....	32
Figura 7 – Exemplos de peças do concreto dos tipos I (a) e II (b).....	33
Figura 8 – Exemplos de peças do concreto dos tipos III (a) e IV (b).....	34
Figura 9 – Praça Sete de Setembro em Belo Horizonte, Minas Gerais (a) e calçada Marechal Deodoro em Jaraguá do Sul, Santa Catarina (b).....	35
Figura 10 – Rodovia industrial em Balsa Nova, Paraná (a) e Terminal de Contêineres em Guarujá, São Paulo (b).....	35
Figura 11 – Execução da sub-base com brita graduada (a) e trecho já executado da estrada (b).....	38
Figura 12 – Blocos sextavados.....	42
Figura 13 – Gráfico comparativo de resistência média à compressão e resistência característica dos corpos-de-prova sextavados para cada traço ensaiado.....	43
Figura 14 – Forma manual de desmoldagem imediata, com as dimensões das peças.....	45
Figura 15 – Dados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos.....	45
Figura 16 – Dados do ensaio de resistência à compressão das peças moldadas.....	46
Figura 17 – Blocos com formato de paralelepípedo.....	47
Figura 18 – Resistência média à compressão dos blocos pavers por tratamento.....	48
Figura 19 – Vista da peça de concreto.....	49
Figura 20 – Espessura necessária de sub-base para BIPs.....	54
Figura 21 – Espessura necessária de base para BIPs.....	55
Figura 22 – Ilustração da seção típica de um pavimento intertravado de acordo com o Procedimento A.....	56
Figura 23 – Ilustração da seção típica de um pavimento intertravado de acordo com o Procedimento B.....	58
Figura 24 – Máquina de misturador do concreto.....	59
Figura 25 – Máquina de vibro-prensa para blocos.....	60
Figura 26 – Processos de definição do alinhamento (a) e salgamento (b) do pavimento.....	61
Figura 27 – Compactação do pavimento por uma placa vibratória (a) e exemplificação de arremates de canto (b).....	61
Figura 28 – Processo de produção de energia em uma usina termelétrica.....	62

Figura 29 – Visão superior das usinas termelétricas no Pecém. ....	63
Figura 30 – Instalações das usinas termelétricas do Pecém. ....	63
Figura 31 – Resistência à compressão para as relações a/c de 0,45 (a) e de 0,55 (b). ....	68
Figura 32 – Aspecto visual das cinzas coletadas. ....	77
Figura 33 – Aspecto visual das britas 12,5 mm (a) e 19,0 mm (b). ....	78
Figura 34 – Aspecto visual das areias artificial (a) e natural (b). ....	78
Figura 35 – Aspecto visual do cimento ....	79
Figura 36 – Módulos I (a) e II (b) de armazenagem das cinzas. ....	80
Figura 37 – Área de mineração. ....	81
Figura 38 – Unidade de moagem e de lavagem das britas (a), e equipamento com uma série de esteiras para transporte de material (b). ....	81
Figura 39 – Pilhas de brita 12,5 mm (a), brita 19,0 mm (b) e areia natural (c). ....	82
Figura 40 – Processo de quarteamento da amostra de cinzas (a) e almofariz com mão de gral (b) ....	83
Figura 41 – Fluxograma experimental da 2ª Etapa para as cinzas. ....	84
Figura 42 – Densímetro (a) e picnômetros (b). ....	85
Figura 43 – Aparelho de Casagrande. ....	86
Figura 44 – Aspecto visual da areia natural antes (a) e após o destorroamento (b). ....	88
Figura 45 – Brita 19,0 mm (a), areia natural (b) e areia artificial (c) imersos em água depois de 24 horas. ....	89
Figura 46 – Consistência pastosa das areias natural (a) e artificial (b). ....	89
Figura 47 – Frasco volumétrico de Le Chatelier. ....	90
Figura 48 – Recipiente cilíndrico de cobre. ....	91
Figura 49 – Aspecto visual da cinza passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm (Tipo I) (a) e da cinza passante na peneira de 2,0 mm (Tipo II) (b). ....	93
Figura 50 – Betoneira tampada (a), concreto antes (b) e após (c) a adição extra de água. ....	94
Figura 51 – Curva de Abrams para concreto seco. ....	94
Figura 52 – Curva Granulométrica da Brita 19,0 mm. ....	95
Figura 53 – Aspecto visual do molde cilíndrico e da fôrma para paver. ....	96
Figura 54 – Haste de compactação (a), aparelho vibrador (b) e mesa para índice de consistência (c). ....	97
Figura 55 – Fluxograma experimental da 3ª Etapa para o concreto. ....	98
Figura 56 – Molde de tronco de cone (a) e medida do abatimento com dimensões em milímetros (b). ....	99
Figura 57 – Área de estacionamento do DEECC. ....	102
Figura 58 – Posição relativa dos Limites de Atterberg e do Índice de Plasticidade. ....	105
Figura 59 – Composição granulométrica da cinza pesada. ....	107

Figura 60 – Curva granulométrica da cinza pesada com um formato específico para a área de pavimentação. ....	108
Figura 61 – Composição granulométrica das frações da cinza pesada.....	109
Figura 62 – Composição granulométrica das britas 19,0 mm e 12,5 mm, junto com as faixas para agregado graúdo.....	113
Figura 63 – Composição granulométrica das areias natural, artificial e da mistura dessas, junto com as faixas para agregado miúdo.....	113
Figura 64 – Curva granulométrica combinada da mistura com os limites da faixa ponderada. ....	115
Figura 65 – Curva granulométrica da mistura com a presença de cinzas Tipo I.....	116
Figura 66 – Curva granulométrica da brita 19,0 mm com a inserção de 10% de cinzas Tipo I. ....	116
Figura 67 – Curva granulométrica da mistura com a presença de cinzas Tipo II.....	117
Figura 68 – Curva granulométrica da areia com a inserção de 10% de cinzas Tipo II. ....	117
Figura 69 – Abatimento do tronco de cone para o traço de referência (a), traço alternativo de brita 19,0 mm (b) e de areia (c). ....	118
Figura 70 – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço de referência. ....	119
Figura 71 – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço alternativo com brita 19,0 mm.....	119
Figura 72 – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço alternativo com areia. ....	120
Figura 73 – Chanfro de uma peça de concreto. ....	121
Figura 74 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Resistência Média à Compressão para corpos-de-prova cilíndricos. ....	122
Figura 75 – Corpo-de-prova cilíndrico rompido (a) e representação da ruptura Tipo C – Colunar com formação de cones (b).....	124
Figura 76 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Resistência à Compressão Característica para pavers.....	125
Figura 77 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Absorção de Água para corpos-de-prova cilíndricos. ....	128
Figura 78 – Variação dos valores médios de resistência à compressão para CP cilíndrico....	129
Figura 79 – Variação dos valores médios de resistência à compressão para Paver. ....	130
Figura 80 – Variação dos valores médios de absorção de água para CP cilíndrico.....	130
Figura 81 – Esquemática do pavimento intertravado dimensionado. ....	132
Figura 82 – Gráfico com as quantidades necessárias de cada material para a obra de estacionamento de 1624 m <sup>2</sup> . ....	134
Figura 83 – Gráfico comparativo de custos no revestimento em BIPs de acordo com o traço utilizado no concreto. ....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de peças de concreto para pavimentação. ....	33
Tabela 2 – Indicação do tipo de tráfego para cada espessura dos blocos. ....	35
Tabela 3 – Critérios para resistência característica à compressão. ....	39
Tabela 4 – Traços dos concretos utilizados para moldagem dos corpos-de-prova sextavados. ....	42
Tabela 5 – Variação da quantidade de agregados naturais e RCD por traço. ....	44
Tabela 6 – Medidas das matérias-primas para cada tratamento. ....	47
Tabela 7 – Traços em volume dos concretos dosados com resíduo de PET. ....	49
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos Traços 1 (padrão) e Traços 2 ao 7 com substituição de PET. ....	50
Tabela 9 – Classificação das vias e parâmetros de tráfego. ....	51
Tabela 10 – Granulometria sugerida para areia de rejuntamento. ....	51
Tabela 11 – Granulometria sugerida para areia de assentamento. ....	52
Tabela 12 – Requisitos para a camada da sub-base, conforme método da Prefeitura de São Paulo para BIPs. ....	53
Tabela 13 – Requisitos para a camada da base, conforme método da Prefeitura de São Paulo para BIPs. ....	53
Tabela 14 – Espessura dos Blocos de Revestimento. ....	54
Tabela 15 – Espessura necessária de base puramente granular ( $H_{BG}$ ). ....	57
Tabela 16 – Traços dos concretos produzidos. ....	66
Tabela 17 – Resistência média à compressão referentes aos 3, 7, 28 e 63 dias. ....	66
Tabela 18 – Consumo de materiais por $m^3$ de concreto. ....	67
Tabela 19 – Traços em massa dos concretos com e sem cinzas de bagaço de cana. ....	69
Tabela 20 – Características dos blocos com e sem cinzas de bagaço de cana. ....	70
Tabela 21 – Informações de trabalhos acadêmicos anteriores que utilizaram resíduos na composição do concreto em pavers. ....	71
Tabela 22 – Ensaios nas realizados nas cinzas com as suas normas vigentes. ....	83
Tabela 23 – Ensaios realizados nos agregados com as suas normas vigentes. ....	87
Tabela 24 – Variação da quantidade de agregados naturais e de resíduos por traço. ....	95
Tabela 25 – Massas utilizadas dos materiais na composição dos traços. ....	96
Tabela 26 – Ensaios no concreto com as suas normas vigentes. ....	97
Tabela 27 – Distribuição das peças de concreto de acordo com o tempo de cura. ....	100
Tabela 28 – Coeficiente de Student em função do número de blocos. ....	100
Tabela 29 – Determinação da densidade real das cinzas pesadas pelo método do picnômetro. ....	103
Tabela 30 – Determinação do índice de plasticidade das cinzas. ....	104

Tabela 31 – Determinação da unidade higroscópica das cinzas.....	105
Tabela 32 – Resultados do extrato lixiviado.....	106
Tabela 33 – Resultados do extrato solubilizado.....	107
Tabela 34 – Separação das cinzas, conforme a distribuição granulométrica.....	108
Tabela 35 – Determinação da massa específica para as areias natural e artificial.....	110
Tabela 36 – Determinação da massa específica para as britas 19 mm e 12,5 mm nas Amostras 1 e 2 e média dos valores.....	110
Tabela 37 – Determinação da massa unitária e outras variáveis para a brita 19,0 mm.....	111
Tabela 38 – Determinação da massa unitária e outras variáveis para a brita 12,5 mm.....	111
Tabela 39 – Determinação da massa unitária para a areia natural.....	112
Tabela 40 – Determinação da massa unitária para a areia artificial.....	112
Tabela 41 – Composição dos traços em massa.....	115
Tabela 42 – Diferenças percentuais, com relação aos valores de Resistência à Compressão para CP's cilíndricos.....	123
Tabela 43 – Diferenças percentuais, com relação aos valores de Resistência à Compressão para blocos pavers.....	126
Tabela 44 – Nível de significância ao se considerar as variáveis de resposta.....	129
Tabela 45 – Características das Misturas.....	131
Tabela 46 – Relação dos volumes dos materiais, para o estacionamento, em suas respectivas camadas no pavimento.....	133
Tabela 47 – Relação dos volumes totais para cada material.....	133
Tabela 48 – Custos comparativos do pavimento intertravado para a área de estacionamento do DEECC.....	136
Tabela 49 – Valores de porcentagens passante e retida acumulada em função do diâmetro das partículas (associada à Figura 59 na página 107).....	150
Tabela 50 – Granulometria da cinza pesada passante na 19,0 mm e retida na 2,0 mm (associada à Figura 61 na página 109).....	150
Tabela 51 – Granulometria da cinza pesada passante na 2,0 mm (associada à Figura 61 na página 109).....	150
Tabela 52 – Granulometria da brita 19,0 mm (associada à Figura 62 na página 113).....	151
Tabela 53 – Granulometria da brita 12,5 mm (associada à Figura 62 na página 113).....	151
Tabela 54 – Granulometria da areia natural (associada à Figura 63 na página 113).....	151
Tabela 55 – Granulometria da areia artificial (associada à Figura 63 na página 113).....	151
Tabela 56 – Granulometria da mistura das areias (associada à Figura 63 na página 113).....	152
Tabela 57 – Zonas Granulométricas para agregados miúdos (associada à Figura 63 na página 113).....	152
Tabela 58 – Zonas Granulométricas para agregados graúdos (associada à Figura 62 na página 113).....	152

Tabela 59 – Granulometria da mistura com os limites inferior e superior da faixa de controle (associada à Figura 64 na página 115).....	153
Tabela 60 – Granulometria da mistura com cinzas Tipo I (associada à Figura 65 na página 116).....	153
Tabela 61 – Granulometria da brita 19,0 m com 10% de cinzas Tipo I (associada à Figura 66 na página 116).....	153
Tabela 62 – Granulometria da mistura com cinzas Tipo II (associada à Figura 67 na página 117).....	154
Tabela 63 – Granulometria da areia com 10% de cinzas Tipo II (associada à Figura 68 na página 117).....	154
Tabela 64 – Dados do ensaio de Resistência à Compressão para os corpos-de-prova cilíndricos (associada à Figura 74 na página 122).....	155
. Tabela 65 – Dados do ensaio de Resistência à Compressão para os pavers (associada à Figura 76 na página 125).....	156
Tabela 66 – Dados do ensaio de Absorção de Água para os corpos-de-prova cilíndricos (associada à Figura 77 na página 128).....	159
Tabela 67 – Resultado da análise estatística ANOVA.....	160
Tabela 68 – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 3 dias para o CP cilíndrico.....	161
Tabela 69 – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 7 dias para o CP cilíndrico.....	161
Tabela 70 – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 28 dias para o CP cilíndrico.....	161
Tabela 71 – Composição do custo/m <sup>3</sup> da camada de sub-base.....	162
Tabela 72 – Composição do custo/m <sup>3</sup> da camada de assentamento.....	163
Tabela 73 – Composição do custo/m <sup>2</sup> do revestimento (traço de referência) com rejuntamento.....	163
Tabela 74 – Composição do custo/m <sup>2</sup> do revestimento(traço alt.c/ br.19mm) com rejuntamento.....	164
Tabela 75 – Composição do custo/m <sup>2</sup> do revestimento (traço alt. c/ areia) com rejuntamento.....	164

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	20
1.2. Problema de Pesquisa e Questões Motivadoras .....	22
1.2.1 Problema de Pesquisa.....	22
1.3 Justificativa .....	23
1.4 Objetivos.....	23
1.4.1 Objetivo Geral .....	23
1.4.2 Objetivos Específicos.....	23
1.5 Estrutura da Monografia.....	24
1.6 Considerações Finais .....	25
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>26</b>
2.1 Considerações Iniciais .....	26
2.2 Histórico do Pavimento Intertravado .....	26
2.3 Definição e Características Gerais do Pavimento Intertravado.....	28
2.3.1 Materiais Empregados nas Peças .....	30
2.3.2 Vantagens e Defeitos no Uso do Pavimento Intertravado .....	31
2.4. Classificações adotadas para os Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs) .....	31
2.4.1 Tipos de Assentamento dos Blocos .....	31
2.4.2 Tipos de Peças do Concreto .....	33
2.4.3 Tipos de Aplicações dos Blocos.....	34
2.5 Algumas Aplicações Nacionais e Internacionais de Pavimento Intertravado .....	36
2.5.1 Experiência na África do Sul.....	36
2.5.2 Experiência na Costa Rica .....	36
2.5.3 Experiência na Colômbia.....	37
2.5.4 Experiência no Brasil .....	37
2.6 Requisitos Técnicos para a Aprovação das Peças de Concreto .....	38
2.7 Dosagem dos Blocos Intertravados de Pavimentos .....	40
2.7.1 Resíduos utilizados na dosagem de BIPs .....	41
2.7.1.1 Dosagem com resíduos de óxido de alumínio (sínter) .....	42
2.7.1.2 Dosagem com RCD.....	44
2.7.1.3 Dosagem com resíduos vítreos.....	47
2.7.1.4 Dosagem com resíduos de garrafa PET.....	48
2.8 Dimensionamento de Pavimentos Intertravados.....	50

2.8.1 Procedimento A – ABCP Estudo Técnico N° 27.....	53
2.8.1.1 Exemplo de Aplicação – Procedimento A.....	55
2.8.2 Procedimento B – Portland Cement Association (PCA).....	56
2.8.2.1 Exemplo de Aplicação – Procedimento B.....	58
2.9 Processo de Fabricação e de Construção dos Pavimentos Intertravados.....	58
2.10 Características Gerais das Usinas Termelétricas.....	61
2.10.1 Usinas Termelétricas: Pecém I e Pecém II.....	62
2.10.2 Vantagens e Defeitos na utilização de Usinas Termelétricas.....	64
2.10.3 Tipos de cinzas originadas de uma termelétrica movida à carvão mineral.....	64
2.11 A Utilização de Cinzas em Peças de Concreto.....	65
2.11.1 Utilização da Cinza da Combustão de Carvão Mineral (CCCM).....	65
2.11.2 Utilização da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar.....	68
2.12 Compilado das pesquisas que utilizaram resíduos em Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs).....	70
2.13 Cinzas e suas implicações no Meio Ambiente.....	74
2.14 Considerações Finais.....	74
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>76</b>
3.1 Considerações Iniciais.....	76
3.2 Materiais.....	77
3.2.1 Cinzas de Carvão Mineral.....	77
3.2.2 Componentes Convencionais do Concreto.....	77
3.2.2.1 Agregado Graúdo.....	77
3.2.2.2 Agregado Miúdo.....	78
3.2.2.3 Cimento.....	79
3.2.2.4 Água.....	79
3.3 Métodos.....	79
3.3.1 Primeira Etapa Metodológica.....	80
3.3.1.1 Coleta das Cinzas de Carvão Mineral.....	80
3.3.1.2 Coleta dos Agregados Graúdos e Miúdos.....	80
3.3.1.3 Coleta do Cimento.....	82
3.3.2 Segunda Etapa Metodológica.....	82
3.3.2.1 Ensaios Realizados nas Cinzas.....	82
3.3.2.1.1 Preparação das Amostras.....	83
3.3.2.1.2 Execução da Análise Granulométrica e da Densidade Real.....	84
3.3.2.1.3 Execução do Limite de Liquidez e de Plasticidade.....	86

3.3.2.1.4 Extrato Lixiviado e Solubilizado.....	87
3.3.2.2 Ensaios Realizados nos Agregados.....	87
3.3.2.2.1 Preparação da Areia Natural.....	87
3.3.2.2.2 Massa Específica e Unitária.....	88
3.3.2.2.3 Composição Granulométrica.....	92
3.3.3 Terceira Etapa Metodológica.....	92
3.3.3.1 Preparação das Cinzas.....	92
3.3.3.2 Confeção dos corpos-de-prova de concreto.....	93
3.3.3.3 Ensaios Realizados no Concreto.....	97
3.3.3.3.1 Procedimentos no Concreto Fresco.....	98
3.3.3.3.2 Procedimentos no Concreto Endurecido.....	99
3.3.4 Quarta Etapa Metodológica.....	101
3.4 Considerações Finais.....	102
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>103</b>
4.1 Considerações Iniciais.....	103
4.2 Resultados e Discussão dos Ensaios de Caracterização e Ambientais – Segunda Etapa.....	103
4.2.1 Resultados das Cinzas.....	103
4.2.2 Resultados dos Agregados.....	109
4.2.3 Resultados da Mistura dos Materiais.....	114
4.3 Resultados e Discussão dos Ensaios no Concreto – Terceira Etapa.....	118
4.3.1 Resultados do Concreto Fresco.....	118
4.3.2 Resultados do Concreto Endurecido.....	119
4.3.2.1 Análise Estatística.....	128
4.4 Resultados e Discussão do Dimensionamento do Pavimento – Quarta Etapa.....	131
4.4.1 Análise Comparativa de Custos.....	135
4.5 Considerações Finais.....	137
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>139</b>
5.1 Considerações Iniciais.....	139
5.2 Principais Contribuições.....	139
5.3 Principais Constatações.....	139
5.3.1 Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização e ambientais nas cinzas e nos agregados convencionais.....	139
5.3.2 Quanto aos resultados dos ensaios nos corpos-de-prova cilíndricos e nos Blocos Intertravados de Pavimentos.....	140
5.3.3 Quanto à proposta de um pavimento experimental para o Campus do Pici/UFC	142

<b>5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>143</b>
<b>5.5 Considerações Finais .....</b>	<b>144</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE A – TABELAS ASSOCIADAS ÀS CURVAS DE GRANULOMETRIA ...</b>	<b>150</b>
<b>ANEXO A – RESULTADOS COMPLETOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA POR MEIO DO SOFTWARE STATISTICA 7.0.....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO B – COMPOSIÇÃO DOS PREÇOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BASE NAS TABELAS DE CUSTO DA SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ (SEINFRA-CE) E EMPRESA OCS162</b>	

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Um pavimento, na sua constituição, pode apresentar agregados, como areia, em suas camadas granulares, e asfalto no seu revestimento. Com relação ao uso de materiais, um tema importante de pesquisa é o aproveitamento de resíduos, advindos de parques industriais, como usinas termelétricas, siderúrgicas e refinarias de petróleo, para o uso nas camadas dos pavimentos. Pode-se escrever que muitas de essas instalações, por apresentarem um grande porte, geram toneladas de rejeitos, que são, diversas vezes, dispostos a céu aberto, ocasionando, provavelmente, problemas ambientais. Dessa forma, esses mesmos resíduos podem ser usados como matéria-prima em obras de engenharia, a fim de se atribuir uma finalidade útil para os mesmos.

Em se tratando da usina termelétrica, citada anteriormente, a mesma merece destaque, pois, devido à utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia, como o carvão mineral, são gerados resíduos, como as cinzas, de forma significativa. Posto isso, no Ceará, está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), que detém as usinas termelétricas mais importantes do estado, Usina Termelétrica Pecém I e Pecém II, que juntas geram, diariamente, um volume de mais de mil toneladas de cinzas (BARROS, 2015). Devido a essa considerável produção, o espaço disponível para o armazenamento desse material está cada vez menor, aliado aos custos do processo de estocagem, o que se constitui como uma problemática atual e que tem mobilizado esforços, a fim de se estudar uma forma ambiental e economicamente viável para a disposição de essas cinzas.

É interessante o conhecimento de que as cinzas, advindas do uso do carvão mineral, podem se dividir em dois tipos principais: cinza leve (*fly ash*) e cinza pesada (*bottom ash*). Segundo Vasconcelos (2016), a cinza leve é um material que apresenta granulometria fina, com propriedades pozolânicas e que é coletado pelos precipitadores eletrostáticos através do fluxo de gases provenientes da combustão do carvão mineral nas termelétricas. De acordo com Leandro e Fabbri (2009), as cinzas pesadas resultam da queima do carvão mineral pulverizado, sendo depositadas no fundo da caldeira.

Contextualizando a problemática a respeito do CIPP, é importante citar, que a Universidade Federal do Ceará (UFC), em 2015, firmou um convênio com a empresa Eneva, por meio da termelétrica Pecém II, em conjunto com a Pecém I, para analisar as possibilidades de aproveitamento das cinzas, provenientes da queima de carvão mineral, produzidas pelas

usinas (ESTUDO..., 2015). Esse estudo contempla diversas aplicações voltadas à área de infraestrutura de transportes. Uma delas foi abordada por Barros (2015), em que foi realizada uma pesquisa a respeito da aplicação de cinzas frescas nas camadas granulares dos pavimentos. Outro estudo foi a de Vasconcelos (2016), que avaliou a heterogeneidade das cinzas de carvão mineral, depositadas no Módulo I, e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos.

Existe, também, a linha de pesquisa, no qual este trabalho está inserido, que visa o estudo da viabilidade da utilização das cinzas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para a pavimentação, o que pode representar uma alternativa econômica, ambiental e social para essa área dos transportes. É interessante a utilização de esses blocos, pois esse tipo de pavimento é objeto de estudo em diversos países em desenvolvimento, como Nicarágua, Costa Rica, Colômbia e África do Sul (RODOVIAS..., 2004).

Com relação à possibilidade do uso de resíduos na composição dos blocos de concreto, existem diversos agregados alternativos já testados para esse fim. Como exemplos, podem ser citados os trabalhos de Souza (2011), que testou a adição de resíduos de óxido de alumínio (sínter) na composição do concreto, em substituição ao agregado pó misto, e o de Sales (2009), no qual os agregados naturais, como a areia de rio e o basalto britado, foram substituídos, gradativamente, por Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

É importante citar que esses blocos são constituídos por agregados, cimento e água, sendo permitido o uso de aditivos e de pigmentos. Com relação a isso, pode-se colocar que o componente de maior custo é, geralmente, o cimento, e, uma vez que as cinzas estudadas possam substituir, em parte, esse material, pode representar uma economia no custo de materiais de construção convencionais. Outra situação é a troca dos agregados por esses resíduos, o que seria uma alternativa para suprir a crescente escassez, em quantidade e qualidade, dos mesmos nas jazidas.

Dessa maneira, tendo em vista a realidade atual, a criação de uma ética ambiental e o aprimoramento das tecnologias industriais para uma maior eficiência ecológica é indispensável. Isso se estende para a pavimentação, na qual o aproveitamento das cinzas das termelétricas pode se tornar uma alternativa cada vez mais interessante, devido as diversas aplicações a serem feitas na área. Dessa forma, este trabalho foi proposto, visando o aproveitamento de essas cinzas como componentes do concreto utilizado em pavimentos intertravados, porém, destaca-se o fato de que precisam ser desenvolvidas pesquisas que comprovem a viabilidade do emprego das mesmas.

## 1.2. Problema de Pesquisa e Questões Motivadoras

### 1.2.1 Problema de Pesquisa

Na Usina Termelétrica Energia Pecém, as cinzas são depositadas em três células de armazenamento. A primeira célula, Módulo I, foi objeto de pesquisa da UFC, pois a mesma se encontrava, praticamente, totalmente preenchida com cinzas, o que ocasionava problemas de vazamento de esse material. A segunda célula, Módulo II, encontra-se, parcialmente, preenchida, havendo a necessidade de ser melhor investigada para futuras aplicações do material. A terceira célula, Módulo III, foi construída, em 2017, para comportar a produção de resíduos. Isso significa que há um espaço limitado para as cinzas, e estas estão sendo produzidas sem receberem um destino útil, o que aumentará os riscos ambientais e os custos de estocagem com o tempo, tornando essencial a elaboração de um plano que proponha uma finalidade sustentável e ecológica para os resíduos presentes no Módulo II, por exemplo.

É importante citar que, segundo Barros (2015), a produção diária de cinzas, no Pecém, chega a ser cerca de 1300 toneladas. Com isso, apesar de algumas empresas já estarem utilizando esses materiais, provenientes das usinas, como a Cimento Apodi, o volume é tão significativo que existe a necessidade de realizar pesquisas que encontrem variadas alternativas para a incorporação de esses resíduos nos mais diversos processos, seja nas camadas granulares ou no revestimento de uma estrada, bem como em outras áreas da engenharia.

Um dos processos, em que podem ser adicionadas as cinzas, é a fabricação do Bloco Intertravado de Pavimento (BIP), os quais são utilizados no revestimento de uma estrada e, normalmente, são feitos de concreto. Este é composto por materiais convencionais, como brita, areia e cimento, assim, existe a possibilidade de as cinzas substituírem algum de esses componentes, desde que sejam feitos os estudos necessários.

Contextualizando a produção de BIPs para a realidade do estado do Ceará, foram coletadas informações da fábrica da OCS, a qual é especializada na fabricação de peças intertravadas e localizada na cidade de Eusébio na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). De acordo com informações verbais do gerente comercial da empresa, no ano de 2017, foi demandada, para a fábrica, uma quantidade mensal de, aproximadamente, 12500 m<sup>2</sup> de piso intertravado e isso equivale a cerca de 1625 toneladas de concreto. Entre as obras mais recentes, em que a empresa esteve inserida, que exigiu o uso de tal tecnologia, destaca-se o shopping Rio Mar Kennedy no município de Fortaleza e a Cidade Alpha Ceará, também, situada no Eusébio.

Dessa forma, a problemática existente consiste na significativa quantidade de cinzas

geradas pela queima do carvão mineral pelas usinas termelétricas. Aliado a isso, devido ao fato de um pavimento ser constituído, geralmente, de múltiplas camadas, como o reforço do subleito, a sub-base, a base e o revestimento, são necessários diversos materiais para compor essa estrutura. A questão é que, às vezes, não é possível encontrá-los na quantidade e qualidade que exigem as normas de engenharia para a execução de uma obra rodoviária por exemplo, o que reforça ainda mais a necessidade de utilização de resíduos que possam substituir, em parte ou totalmente, esses materiais.

### **1.3 Justificativa**

Sabe-se que existe um considerável volume de cinzas de carvão mineral produzido na UTP, o que gera, muitas vezes, passivos ambientais com o eventual descarte inadequado desse material. Tendo em vista esse aspecto, têm sido realizados estudos para um melhor reaproveitamento das cinzas para a aplicação em diversos serviços da área de pavimentação. Com relação a isso, podem ser citados os pavimentos que possuem blocos intertravados de concreto, e na composição deste, existe a possibilidade do aproveitamento de resíduos regionais, o que pode contribuir para a construção de estruturas mais autossustentáveis e econômicas.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo Geral**

Verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas pesadas de carvão mineral, produzidas na Usina Termelétrica Energia Pecém, na fabricação de blocos intertravados de concreto para+ pavimentação.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- (a) Investigar se o BIP incorporado de cinzas podem apresentar resultados iguais ou superiores aos BIPs de mistura padrão (ausência de cinzas), ao se analisar as propriedades físicas e mecânicas;
- (b) Analisar quais materiais a cinza pode substituir, parcial ou totalmente, na constituição do concreto, para a fabricação de blocos que sejam aprovados nas normativas;

- (c) Identificar as diferenças de dosagem dos materiais componentes (agregados, cimento e água) ao se comparar o concreto de mistura padrão (sem cinzas) com o de misturas alternativas;
- (d) Selecionar e produzir, se possível, a melhor mistura alternativa para a fabricação dos BIPs.
- (e) Realizar um dimensionamento de um pavimento intertravado idealizado, através do procedimento utilizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP);
- (f) Realizar uma análise econômica do pavimento dimensionado, comparando o uso de diferentes traços de concreto na produção de BIPs.

### **1.5 Estrutura da Monografia**

Esta monografia é constituída de cinco capítulos. Estes contêm informações a respeito de cada etapa do trabalho, a começar pela Introdução e passando pela Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, e Conclusão.

No Capítulo 1, Introdução, foi feita uma breve abordagem e contextualização do tema em estudo. Além disso, foram apresentados o Problema de Pesquisa, Questões Motivadoras, Justificativa e Objetivos que nortearam este trabalho.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, foram trabalhados alguns tópicos importantes para um melhor entendimento da temática estudada.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, foi descrito a fase laboratorial do estudo, ou seja, a parte prática. No caso, foram detalhados os equipamentos, junto com os materiais, e os ensaios utilizados.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, são colocados os resultados adquiridos a partir dos experimentos realizados anteriormente. Também é inserida uma discussão acerca dos dados obtidos, para que se tenha uma melhor compreensão do significado dos mesmos.

No Capítulo 5, Conclusões, é colocado o que se deduz acerca do estudo realizado neste trabalho, fazendo-se uma correspondência entre os resultados obtidos e os objetivos previamente definidos. Algumas sugestões e recomendações para pesquisas futuras estão inseridas nesse capítulo.

Por fim, ao final do documento, encontram-se as Referências Bibliográficas que foram utilizadas como apoio à pesquisa realizada nesse trabalho.

## **1.6 Considerações Finais**

Neste capítulo, foram inseridos os aspectos introdutórios do tema, em que este foi contextualizado com o intuito de fornecer um embasamento maior para a pesquisa. Além disso, grande parte da motivação para a realização do trabalho é voltada para o aspecto ecológico, a fim de ser proporcionado um destino útil às cinzas produzidas na UTP e, assim, diminuir os custos de tratamento do resíduo e fornecer uma matéria prima secundária ao mercado rodoviário.

No Capítulo 2, intitulado como Revisão Bibliográfica, são apresentados alguns tópicos para uma melhor compreensão do tema, sendo apresentadas informações a respeito do pavimento intertravado e das cinzas.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem a finalidade de apresentar informações a respeito de pavimentos intertravados, em que são colocados certos aspectos, como o histórico, definição e características gerais, tipos de classificação adotadas e aplicações internacionais de essa tecnologia. Além disso, também foram abordados conceitos relacionados aos requisitos técnicos para essas peças, à dosagem do concreto utilizado nos blocos, ao dimensionamento de um pavimento intertravado e, por fim, à construção da estrutura do mesmo pavimento.

Junto a esses tópicos, foram inseridas informações a respeito das usinas termelétricas, das cinzas e das questões ambientais, bem como dos detalhes acerca das suas aplicações em peças de concreto.

### 2.2 Histórico do Pavimento Intertravado

A respeito do histórico do pavimento intertravado, esses, segundo a ABCP, têm sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, executados na Mesopotâmia há quase 5000 a.C. Com relação a isso, segundo Fernandes (2016), um exemplo de aplicação de essa engenharia de pavimentação é a Via Ápia, famoso caminho com 660 km de extensão que cruza a Itália, desde a capital Roma até a cidade de Brindizi no sul daquele país, e essa estrada está ilustrada na Figura 1.

**Figura 1** – Trecho da Via Ápia.



**Fonte:** LOPES (2006).

Segundo Cruz (2003), este tipo de pavimento evoluiu, primeiro, para o uso de pedras talhadas, resultando em pavimentos conhecidos como paralelepípedos, mas, devido às dificuldades de produção artesanal dessas pedras e à falta de conforto de rolamento, foi impulsionado o desenvolvimento da Peça de Concreto Pré-fabricada (PCP). A primeira PCP foi feita no final do século XIX e os primeiros avanços no uso da pavimentação de esse bloco ocorreram na Holanda e na Alemanha no período de reconstrução dos países europeus após a Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, no ano de 1963, de acordo com Fernandes (2016), a cidade de Stuttgart, na Alemanha, foi a primeira ser pavimentada com paver no mundo, destacando que o termo paver remete à PCP para pavimentação. Na década dos anos 60, além de grande parte dos países europeus, o pavimento de PCPs já estava sendo inserido, comercialmente, nas Américas Central e do Sul e na África do Sul. Na década dos anos 70, o seu uso foi intensificado na Austrália, Nova Zelândia, Japão e Estados Unidos da América.

É interessante destacar que, em países europeus, o uso de pavimentos intertravados é predominante e pode ser conferido, principalmente, na Alemanha, que é o maior produtor mundial de paver com mais de 200 milhões de metros quadrados por ano. Na Holanda, provavelmente o segundo maior polo no mundo, foi inventado uma peça que absorve a poluição do ar, chamada de paver fotocatalítico, que recebe uma pintura de dióxido de titânio para possuir essa propriedade (FERNANDES, 2016).

Contextualizando para o Brasil, a utilização de esse recurso, para pavimentação, começou na década dos anos 70, com fabricação artesanal. Posteriormente, foram introduzidas máquinas de produção automatizada, e, assim, atualmente, equipamentos sofisticados e de alta tecnologia permitem produzir peças de qualidade considerável com formas e cores diversas e, conseqüentemente, mais atrativas do ponto de vista estético, principalmente na região Sul (PAVIMENTO...,2012).

No Brasil, um exemplo antigo de aplicação de essa técnica foram os caminhos de Peabiru de São Tomé, emaranhado de trilhas indígenas que interligavam diversas aldeias do litoral sul brasileiro a outros povos na Bolívia e no Peru. Um trecho é mostrado na Figura 2 (a).

Um exemplo atual de aplicação de pavimento intertravado no Brasil é o caso da Rua 15 de Novembro na cidade de Blumenau, Santa Catarina, que foi, totalmente, revitalizada com a solução no ano de 2000. O layout do piso foi reproduzido com base nas fachadas dos edifícios, as quais foram representadas com diversos blocos de concreto coloridos, conforme é mostrado na Figura 2 (b).

**Figura 2** – Peabiru em Itu, São Paulo (a) e Rua 15 de Novembro em Blumenau, Santa Catarina (b).



(a) Peabiru em Itu, São Paulo.



(b) Rua 15 de Novembro em Blumenau, Santa Catarina.

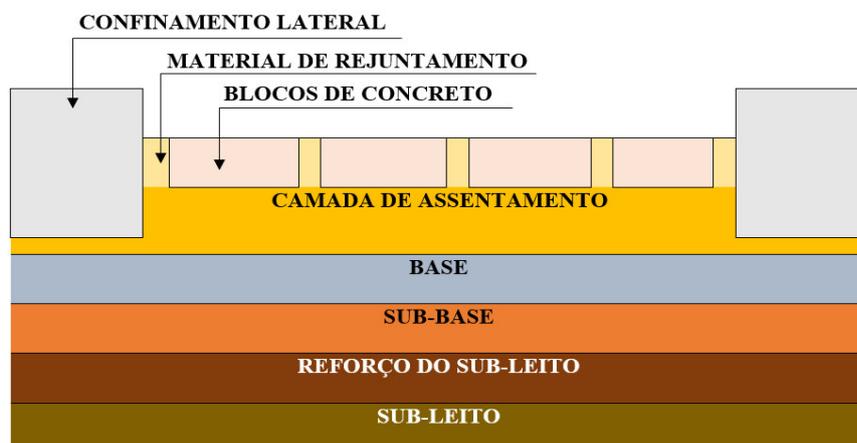
Fonte: CAPELETTO (2015).

Fonte: RIBEIRO (2010).

### 2.3 Definição e Características Gerais do Pavimento Intertravado

O pavimento intertravado, segundo a NBR 9781/2013 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é do tipo flexível cuja estrutura é formada, geralmente, pelas seguintes camadas: o reforço do subleito (opcional), a sub-base e a base, constituídas por material granular; o assentamento, também formado por material granular e que tem a função de acomodar as peças de concreto, e o revestimento, o qual é constituído pelas mesmas peças justapostas e pelo material de rejuntamento. O revestimento e a camada de assentamento são contidos lateralmente, em geral, por meio-fios. É importante destacar que mais detalhes a respeito do material de rejuntamento e da camada de assentamento serão fornecidos nas páginas 51 e 52. A Figura 3 representa a estrutura típica de um pavimento intertravado, conforme foi descrita anteriormente.

**Figura 3** – Perfil das camadas do pavimento intertravado.



Fonte: AUTOR (2017).

Conforme a ABCP (2010), o conceito de intertravamento é a capacidade que os blocos adquirem de resistir aos movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos. Para que se consiga o intertravamento, é preciso que haja contenção lateral, a qual impede o deslocamento lateral dos blocos da camada de rolamento, e junta preenchida com areia, que proporciona a transferência de esforços entre as peças de concreto, permitindo que elas suportem as cargas solicitadas.

Segundo Ary Junior (2007), os pavimentos intertravados são interessantes por apresentarem características funcionais que proporcionam simplicidade aos seus processos de construção e de controle. Com relação a isso, pode-se citar a versatilidade do material, a facilidade de estocagem e a homogeneidade.

A calçada de pavimento intertravado, para ambientes externos, deve levar em consideração os aspectos de uso, tais como: abrasão, tráfego de veículos e intempéries. De acordo com a ABCP (2010), as principais características desse tipo de pavimento são:

- (a) superfície antiderrapante: o concreto proporciona segurança aos pedestres, mesmo em condições de piso molhado;
- (b) conforto térmico: a utilização das peças de concreto com pigmentação clara proporciona menor absorção de calor, melhorando o conforto térmico das calçadas;
- (c) liberação ao tráfego: imediato, após a compactação final do pavimento;
- (d) resistência e durabilidade: a elevada resistência do concreto confere grande durabilidade à calçada;
- (e) produto ecológico: os produtos à base de cimento podem ser, totalmente, reciclados e reutilizados na produção de novos materiais, ajudando na preservação de jazidas de calcário e evitando a saturação de aterros;
- (f) diversidade de cores: as peças de concreto podem ser fabricadas com uma variedade de cores e texturas, conforme é mostrado na Figura 4, e essa característica, inclusive, pode impactar na diminuição dos custos de iluminação em uma estrada, em que o uso de diferentes cores nos blocos pode sinalizar regiões de tráfego específicas.

**Figura 4** – Tonalidades das peças de concreto.



Fonte: PISO (2012).

### 2.3.1 Materiais Empregados nas Peças

Com relação aos materiais utilizados na composição de um pavimento intertravado, pode-se citar que o concreto utilizado nas peças deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Conforme a ABNT NBR 9781/2013, deve-se obedecer à alguns requisitos para o uso de esses elementos, como:

- (a) o cimento Portland pode ser de qualquer tipo e classe, devendo obedecer às NBR 5732, 5733, 5735, 5736, 11578 e 12989;
- (b) os agregados podem ser naturais, industriais ou reciclados, obedecendo à NBR 7211 ou outras Normas Brasileiras pertinentes;
- (c) a água de assentamento deve atender à NBR 15900-1;
- (d) os aditivos devem atender à NBR 11768;
- (e) os pigmentos devem ser de base inorgânica e atender à ASTM C 979/C 979 M.

É interessante constatar que os blocos, em certas aplicações, não são constituídos de concreto, podendo-se utilizar outros materiais na confecção de essas peças. Segundo Ary Júnior (2007), também são usadas pedras talhadas no formato de paralelepípedo, tijolos cerâmicos e madeiras. É importante citar que, posteriormente, na seção 2.7.1, é dado um destaque aos diferentes tipos de resíduos que já foram incorporados ao concreto para a fabricação de blocos, por meio da realização de pesquisas acadêmicas.

### **2.3.2 Vantagens e Defeitos no Uso do Pavimento Intertravado**

O pavimento intertravado, ao longo da sua execução, pode apresentar prós e contras que devem ser levados em consideração, a fim de se determinar a viabilidade de tal obra. A começar pelas vantagens, Ferreira *et al.* (2011) afirmam que essa estrutura, no geral, possui alta durabilidade; superfície regular e antiderrapante, proporcionando conforto ao usuário; menor consumo de iluminação pública, devido à coloração mais clara da estrutura de concreto, e menor absorção de energia, minimizando o efeito da ilha de calor. Além de esses aspectos já citados, a execução não exige uma mão-de-obra especializada e as peças, ainda, podem ser reaproveitadas, caso haja a necessidade de manutenção. Por fim, os pavimentos intertravados de concreto também podem ser projetados para serem permeáveis, pois, pela capacidade de drenagem, o sistema permite a infiltração de água, colaborando com a diminuição das superfícies impermeabilizadas nas cidades e reduzindo o escoamento superficial.

Com relação às desvantagens de esse pavimento, Ferreira *et al.* (2011) consideram que o sistema precisa ser bem dimensionado e exige uma camada de base bem executada, assim, o custo inicial da obra é cerca de 15% superior ao pavimento asfáltico. Caso esses cuidados não sejam tomados, a estrutura, como um todo, se deforma com mais facilidade, principalmente se houver tráfego de caminhões pesados. Além disso, há a necessidade de um considerável número de operários na execução, devido à pouca mecanização, o que aumenta o tempo de construção do sistema.

## **2.4. Classificações adotadas para os Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs)**

Com relação às classificações adotadas, estão colocadas, não só aquelas que consideram o bloco individualmente, mas, também, as que tratam do pavimento intertravado como um todo. Dessa forma, estão expostos os tipos de assentamento, de peças e de aplicações, com relação ao paver.

### **2.4.1 Tipos de Assentamento dos Blocos**

Cada padrão de assentamento deve obedecer a uma determinada sequência de montagem dos blocos, de modo a atingir o máximo de rendimento. É importante que essa sequência permita a presença de mais de um colocador, para que o trabalho seja realizado em um menor tempo. Para conseguir a necessária coordenação, é importante definir a forma de colocação, a qual varia de acordo com o padrão de posicionamento e com o alinhamento

escolhido (ABCM, 2010). É possível classificar o pavimento com os seguintes tipos de arranjo no intertravamento dos blocos: fileira → Figura 5 (a); reto → Figura 5 (b); espinha de peixe → Figura 6 (a) e trama → Figura 6 (b).

Segundo Cruz (2003), o tipo de modelo escolhido para o assentamento definirá a aparência estética do pavimento intertravado. Mesmo que não haja consenso entre os pesquisadores a respeito da interferência do formato dos blocos no pavimento, existe a concordância de que o arranjo influi em sua durabilidade. Faria (2011) informa que o arranjo espinha de peixe é indicado para locais com trânsito de veículos comerciais (automóveis e motocicletas, por exemplo), considerando que o tempo de contato das rodas com as juntas é menor, o que reduz a tendência de deslocamento horizontal das peças e aumenta a durabilidade do pavimento.

**Figura 5** – Arranjos no intertravamento dos blocos, do tipo fileira (a) e reto (b).



(a) Arranjo do tipo fileira.



(b) Arranjo do tipo reto.

Fonte: ABCP (2010).

**Figura 6** – Arranjos no intertravamento dos blocos, do tipo espinha de peixe (a) e trama (b).



(a) Arranjo do tipo espinha de peixe.



(b) Arranjo do tipo trama.

Fonte: ABCP (2010).

## 2.4.2 Tipos de Peças do Concreto

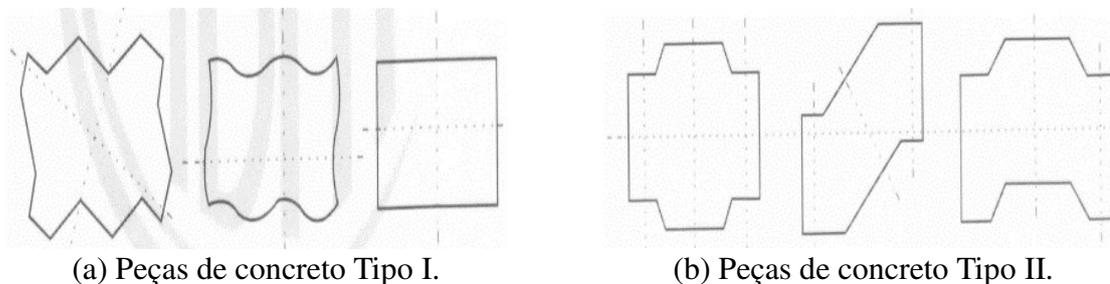
As peças de concreto podem ser produzidas em diferentes formatos. Estes são agrupados, conforme mostrado na Tabela 1, de acordo com a nomenclatura adotada pela NBR 9781/2013 da ABNT.

**Tabela 1** – Tipos de peças de concreto para pavimentação.

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ilustração</b>
I	Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinhas de peixe.	Figura 7 (a)
II	Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinhas de peixe.	Figura 7 (b)
III	Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos e triedros, com massas superiores a 4 kg.	Figura 8 (a)
IV	Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser usadas com um ou mais padrões de assentamento.	Figura 8 (b)

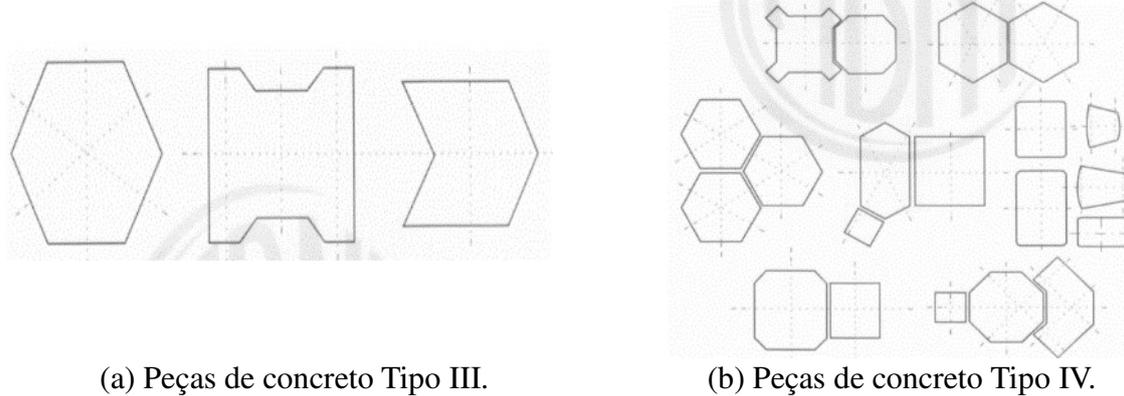
Fonte: ABNT NBR 9781/2013. Elaborado pelo autor.

**Figura 7** – Exemplos de peças do concreto dos tipos I (a) e II (b).



Fonte: ABCP (2010).

**Figura 8** – Exemplos de peças do concreto dos tipos III (a) e IV (b).



(a) Peças de concreto Tipo III.

(b) Peças de concreto Tipo IV.

Fonte: ABCP (2010).

### 2.4.3 Tipos de Aplicações dos Blocos

Ao se construir um pavimento intertravado, é preciso levar, em consideração, o volume de tráfego na região em específico, onde vai ser implementado o sistema. Segundo Faria (2011), para que se possa aplicar os blocos em diferentes ambientes, é necessário dedicar maior atenção na escolha da espessura da peça, pois, na prática, quanto maior for essa medida, mais significativo é o intertravamento.

Conforme a NBR 9781/2013, a espessura é de, no mínimo, 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm, com isso, os valores comumente adotados são: 60 mm, 80 mm e 100 mm. A Tabela 2 relaciona o tipo de tráfego com o bloco em específico e, para uma melhor exemplificação, as aplicações para cada tipo de trânsito são ilustradas da seguinte forma: leve → Figura 9 (a); médio → Figura 9 (b); pesado → Figura 10 (a) e especial → Figura 10 (b). Também será apresentado o número “N” característico para cada tipo de tráfego, para que se tenha uma noção quantitativa das solicitações do trânsito, e é preciso destacar que o parâmetro “N” informa quantas repetições de carga-padrão (8,2 tf) o pavimento irá receber ao longo da sua vida útil. No caso, as informações a respeito do número “N” foram retiradas da Tabela 9, presente na página 51.

**Tabela 2** – Indicação do tipo de tráfego para cada espessura dos blocos.

<b>Tipo de Tráfego</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Calçadas, praças, pátios (tráfego leve) → $N = 1 \times 10^5$	60
Ruas e avenidas de tráfego moderado, postos de combustível urbanos, estacionamento (tráfego médio) → $N = 5 \times 10^5$	80
Corredores de ônibus, postos de combustível em estradas, pedágios (tráfego pesado) → $N = 2 \times 10^7$	100
Portos, pátios de indústria pesada, aterros de resíduos de construção (tráfego especial) → $N = 5 \times 10^7$	80 ou 100

**Fonte:** FARIA (2011). Elaborado pelo autor.

**Figura 9** – Praça Sete de Setembro em Belo Horizonte, Minas Gerais (a) e calçada Marechal Deodoro em Jaraguá do Sul, Santa Catarina (b).

(a) Praça Sete de Setembro em Belo Horizonte, Minas Gerais.



(b) Calçada Marechal Deodoro em Jaraguá do Sul, Santa Catarina.

**Fonte:** FARIA (2011).

**Figura 10** – Rodovia industrial em Balsa Nova, Paraná (a) e Terminal de Contêineres em Guarujá, São Paulo (b).

(a) Rodovia industrial em Balsa Nova, Paraná.



(b) Terminal de Contêineres em Guarujá, São Paulo.

**Fonte:** FARIA (2011).

## **2.5 Algumas Aplicações Nacionais e Internacionais de Pavimento Intertravado**

Diversas aplicações já foram realizadas, no âmbito nacional e mundial, no que se refere ao uso do pavimento intertravado. Pode-se colocar que os principais motivos para a construção de estradas com essa tecnologia são: uso intensivo de mão-de-obra, execução facilitada, manutenção reduzida e os insumos ecologicamente estáveis, com considerável vida útil e recicláveis, caso necessário (RODOVIAS..., 2004). Nesse tópico, optou-se por dar destaque às iniciativas de países em desenvolvimento, como África do Sul, Costa Rica, Colômbia e Brasil, que possuem um renovado interesse em explorar essa tecnologia de pavimentação internacional.

### **2.5.1 Experiência na África do Sul**

A partir dos anos 1990, o país da África do Sul iniciou programas de pavimentação de rodovias com blocos de concreto financiados pelo Banco de Desenvolvimento do Sul da África. Com relação às obras executadas, podem ser citadas: a Rodovia Principal 127, que liga as cidades de Boston a Impedele, em Kwazulu Natal, com 12 km de extensão; a rodovia em Beñabela, Warmbaths, com 14 km e a rodovia que liga várias cidades ao centro industrial de Phuthditijhaba, em Qwa Qwa, com extensão total de 10,9 km (RODOVIAS, 2004).

Para o governo sul-africano, a construção do pavimento com blocos oferecia alta geração de empregos, devido à exigência de mão-de-obra, maior durabilidade, e a possibilidade de produzir as peças ao longo da estrada, por meio de fabricantes comerciais instalados nas localidades vizinhas. Ao fim dos trabalhos, em janeiro do ano de 1995, foram contabilizados 79000 dias-homem de trabalho, e decorridos 8,5 anos, em 2003, as estradas não apresentavam afundamentos ou vazios, além do fato de que a espessura do pavimento não se reduzira e o conforto do rolamento continuava excelente (RODOVIAS..., 2004).

### **2.5.2 Experiência na Costa Rica**

Devido à boa capacidade de permeabilização do solo, os pisos intertravados foram considerados a cobertura ideal para uma rodovia que percorre 7 km de extensão na província de Guacaste. Essa estrada faz parte do projeto Eco-desenvolvimento Papagayo, localizado na costa do Pacífico e que corta uma floresta tropical semi-úmida (RODOVIAS..., 2004).

A estrutura da rodovia conforma-se numa base granular de 600 mm de espessura e 40 mm de areia para assentamento dos blocos, de 80 mm de espessura, com três formatos

diferentes: 100 mm × 100 mm; 100 mm × 200 mm e 200 mm × 200 mm. As peças foram colocadas, seguindo um padrão, aparentemente, aleatório, sendo que, no último trecho, dentro da propriedade do hotel *Four Seasons*, foram usadas peças retangulares de 100 mm × 200 mm, colocadas de acordo com o arranjo espinha de peixe. Para essa obra, os projetos de engenharia e pavimento, bem como o controle, foram realizados pela DEHC, empresa localizada em San José, Costa Rica, já com relação à fabricação dos blocos intertravados, a empresa Productos de Concreto foi a responsável (RODOVIAS..., 2004).

### **2.5.3 Experiência na Colômbia**

No início de 2004, foi concluída a construção de 680 m de uma estrada de montanha, na parte elevada da cidade de Envigado, que fica a sudeste do município de Medellín. A obra, no caso, permite o acesso a várias casas rurais e ao Parque Ecoturístico El Salado (RODOVIAS..., 2004).

A estrada foi executada com blocos de concreto de 80 mm de espessura, assentados sobre uma camada de areia de 40 mm e uma base granular compactada de 360 mm. A estrutura é confinada por uma borda-guia de concreto, pré-fabricada em peças de 800 mm de comprimento. Para atender ao projeto paisagístico do parque, a estrada foi realizada em peças com formato retangular, com 200 mm × 100 mm, montadas segundo o arranjo espinha de peixe com algumas peças pretas distribuídas uniformemente. A obra foi realizada pela construtora Agill, para o município de Envigado, com blocos fornecidos pela empresa Indural, de Medellín e a montagem do pavimento foi realizada manualmente, em 2,5 meses, durante a estação mais chuvosa do ano. Após a conclusão, a estrutura é submetida a ensaios de avaliação dimensional a cada seis meses (RODOVIAS..., 2004).

### **2.5.4 Experiência no Brasil**

No Brasil, uma obra finalizada recentemente no ano de 2016 e que se utilizou da tecnologia de pavimento intertravado foi a estrada-parque Paraty-Cunha (RJ – 165) com 9,4 km de extensão. A mesma está localizada na Serra da Bocaina e foi traçada para encurtar o caminho de moradores e de turistas entre o município de Cunha no estado de São Paulo e o município de Paraty no estado do Rio de Janeiro (ROCHA, 2016).

Segundo Rocha (2016), a obra foi solicitada pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro, tendo sido iniciada em 2013. Na pavimentação, os BIPs foram fornecidos pela empresa

Valguará – Pré-fabricados de Concreto, em que os mesmos possuíam 10 cm de espessura e resistência à compressão de 35 MPa, ilustrados na Figura 11 (a). O projeto ficou por conta do Consórcio Serra da Bocaina que especificou uma sub-base de brita graduada tratada com cimento, mostrada na Figura 11 (b), para suportar os esforços. Para o controle da poluição do ar ao longo da obra, foram colocados quatro aparelhos de medição de material particulado em suspensão e, no caso da poluição sonora, relatórios de impacto foram enviados ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA).

**Figura 11** – Execução da sub-base com brita graduada (a) e trecho já executado da estrada (b).



(a) Sub-base com brita graduada.



(b) Trecho executado da estrada.

Fonte: ROCHA (2016).

No contexto do estado do Ceará, é preciso destacar o uso de pavimento intertravado no Porto do Pecém, onde estão ocorrendo as obras da segunda fase da expansão do mesmo porto. Essa ampliação, hoje 85% concluída, é de responsabilidade do consórcio formado pela empresa Marquise, junto à construtora Ivaí e, atualmente, está orçada em R\$ 750 milhões, assim, espera-se que a mesma seja finalizada até o fim de 2017. No caso, essa obra, iniciada no ano de 2013, precisou do fornecimento de 70000 m<sup>2</sup> de piso intertravado (COSTA, 2017).

## 2.6 Requisitos Técnicos para a Aprovação das Peças de Concreto

Para a peça de concreto ser aprovada nas especificações presentes na norma ABNT NBR 9781/2013, é preciso definir as principais propriedades físicas e mecânicas do bloco, assim, é necessário testá-lo e analisá-lo. Caso haja a necessidade de se mudar alguma característica do concreto, é preciso estudar a constituição do mesmo para saber que componente pode ser alterado, e, dessa forma, propor a solução de menor custo.

Na Tabela 3, foram colocados os valores do número “N” de acordo com o tipo de solicitação e esses dados, que vão ser explicados com mais detalhes na seção 2.8, foram retirados da Prefeitura do Município de São Paulo (2004). Com relação aos requisitos técnicos, a peça de concreto pode ser submetida a três ensaios específicos, sendo dois obrigatórios e um facultativo, os quais são:

- (a) Resistência característica à compressão: os critérios de aprovação estão evidenciados na Tabela 3 a seguir e, para que tais valores sejam alcançados, é preciso uma idade de cura de 28 dias ou mais das peças de concreto;
- (b) Absorção de água: o valor médio deve ser menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%;
- (c) Resistência à abrasão: a determinação de esses valores não é obrigatória, mas, quando especificada, os critérios de aprovação, expressos pela cavidade máxima, devem ser atendidos e esses estão presentes, também, na Tabela 3.

**Tabela 3** – Critérios para resistência característica à compressão.

<b>Tipos de Solicitação</b>	<b>Resistência característica à compressão (<math>f_{pk}</math>) aos 28 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à Abrasão → Capacidade máxima (mm)</b>	<b>Absorção de Água (%)</b>
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha → $N = 2,7 \times 10^4$ a $6,8 \times 10^5$	35	23	Valor Médio $\leq 6$
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados → $N > 1,4 \times 10^6$	50	20	Valor Individual $< 7$

**Fonte:** ABNT NBR 9781/2013. Adaptado pelo autor.

Além de esses ensaios, existe um requisito mais subjetivo pelos quais as peças de concreto, também, precisam ser aprovadas. No caso, a inspeção visual que, segundo a NBR 9781/2013, consiste na investigação visual dos blocos, visando a identificação de defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

Também pode-se citar o ensaio de avaliação dimensional, em que a peça de concreto precisa atender às medidas de comprimento, largura e espessura. No caso, o comprimento máximo é de 250 mm, a largura mínima é de 97 mm e a menor espessura é de 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm.

## 2.7 Dosagem dos Blocos Intertravados de Pavimentos

Com relação ao aspecto específico da dosagem de um BIP, é um tópico que pode ser abordado de diferentes formas a depender da pesquisa realizada na peça de concreto e no tipo de resíduo a ser adicionado na constituição do bloco. Segundo Neville (1995), esse processo é definido como a escolha adequada dos materiais do concreto e a determinação de suas quantidades relativas, com a finalidade de fabricar o bloco de concreto o mais econômico possível, atendendo propriedades necessárias, como resistência, durabilidade e tipo de consistência requerida.

Com relação à técnica de produção adotada para essas peças, as fábricas, em sua maioria, utilizam máquinas de vibro-prensa, as quais requerem que o concreto esteja, suficiente, seco e coeso, para que o mesmo se mantenha íntegro até seu endurecimento, sem sofrer desmoronamentos. A coesão necessária é atingida, principalmente, ao se dosar a correta quantidade de finos em conjunto com a vibração e a pressão de adensamento, exercidas pelo equipamento no momento da moldagem dos BIPs, o que acarreta um menor volume de vazios na mistura (ABREU, 2002).

Segundo Cruz (2003), as máquinas de dosagem exercem grande influência nas características do BIP, com isso, é preferível que os métodos de dosagem utilizados sejam inferidos, diretamente, nas instalações industriais da fábrica produtora. Dessa forma, para esse tipo de aplicação, é incomum, através de pesquisas bibliográficas, encontrar a descrição de métodos, mesmo esses sendo empíricos.

Tango (1994) apresenta um método de dosagem, descrito em cinco etapas, que é uma adaptação do processo utilizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em que é usado concreto de consistência de terra úmida, a fim da obtenção de traços econômicos para a confecção de blocos estruturais. Os cinco passos são descritos a seguir resumidamente:

- (a) 1º Passo - Ajuste nos agregados: trabalhar com dimensão máxima do agregado inferior à metade da espessura das paredes dos blocos e obter, experimentalmente, a melhor relação de mistura entre os agregados graúdos e miúdos para atingir a máxima massa unitária expressa em quilograma por bloco ou peça produzida;
- (b) 2º Passo – Estabelecimento da Resistência Média Requerida: utilizar, na resistência de dosagem, os parâmetros estatísticos, definindo o tipo de controle de fabricação pelo uso da Equação 1.

$$f_p = f_{pk,est} + t \times s \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

$f_p$ : resistência média das peças (MPa);

$f_{pk,est}$ : resistência característica estimada à compressão (MPa);

t: coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra, conforme Tabela 27 na página 97;

s: desvio padrão da amostra (MPa).

(c) 3º Passo – Estimativa dos teores de agregado/cimento: definir, para execução, de, pelo menos, três traços de concreto, sendo um rico, médio e pobre em cimento, pois este material apresenta um consumo variável, e dependendo do número de dias desde a produção dos blocos, esses traços deverão estar dentro dos limites esperados de resistência;

(d) 4º Passo – Determinação do teor de argamassa e umidade ótima do traço médio: utilizando o teor de agregado/ traço médio, deve-se produzir blocos, mudando o teor de argamassa seca e optar pelo traço que ofereça um bom aspecto visual, a massa unitária mais elevada e uma aceitável trabalhabilidade. A quantidade de água deverá ser o bastante, para que os blocos não se desfaçam e não apresentem dificuldade de desforma por aderência da mistura aos moldes;

(e) 5º Passo – Confeção de misturas experimentais: de posse dos dados definidos nos passos anteriores, confeccionar concretos com os traços rico, médio e pobre em cimento, com quantidade suficiente para a moldagem das amostras necessárias para os ensaios pré-estabelecidos.

### **2.7.1 Resíduos utilizados na dosagem de BIPs**

A seguir, estão expostas algumas pesquisas relacionadas com a dosagem dos blocos de concreto destinados à pavimentação, em que foram testados alguns resíduos. Esses substituíram, na composição do concreto, os agregados, seja o graúdo ou o miúdo e, no caso, foram testados os seguintes resíduos: óxido de alumínio, RCD, pó de vidro e garrafa PET, assim, registraram-se as alterações do traço com a adição de esses materiais. Também serão registrados alguns resultados adquiridos com o uso de esses resíduos na composição do concreto e o que se pode concluir com o uso dos traços alternativos. É interessante colocar que as aplicações com o uso de cinzas na composição do concreto a ser utilizado em BIPs serão colocadas, posteriormente, na seção **2.11** deste trabalho.

### 2.7.1.1 Dosagem com resíduos de óxido de alumínio (sínter)

Com relação às experiências anteriores de dosagem de BIPs, pode-se citar que Souza (2011) testou a adição de resíduos de óxido de alumínio (sínter) na composição do concreto para a aplicação em BIPs, em substituição do agregado miúdo pó misto, o qual é composto por processos naturais de desintegração de rochas, pedregulhos e areias. Foram adicionadas porcentagens de 10%, 20% e 30% do novo material, em que o cimento usado era do tipo CP V – ARI, e, assim, os traços, em massa, utilizados na moldagem das peças de concreto estão colocados na Tabela 4. No caso, foram confeccionados corpos-de-prova sextavados, com altura de 80 mm e dimensão comercial de 250 × 250 mm, conforme é mostrado na Figura 12.

**Tabela 4** – Traços dos concretos utilizados para moldagem dos corpos-de-prova sextavados.

Concreto	Traço em massa			
	Cimento CP V - ARI	Pó misto	Sínter	Relação a/c
Convencional	1	6,0	-	0,9
Sínter – 10%	1	5,4	0,6	0,9
Sínter – 20%	1	4,8	1,2	0,9
Sínter – 30%	1	4,2	1,8	0,9

Fonte: SOUZA (2011). Adaptado pelo autor.

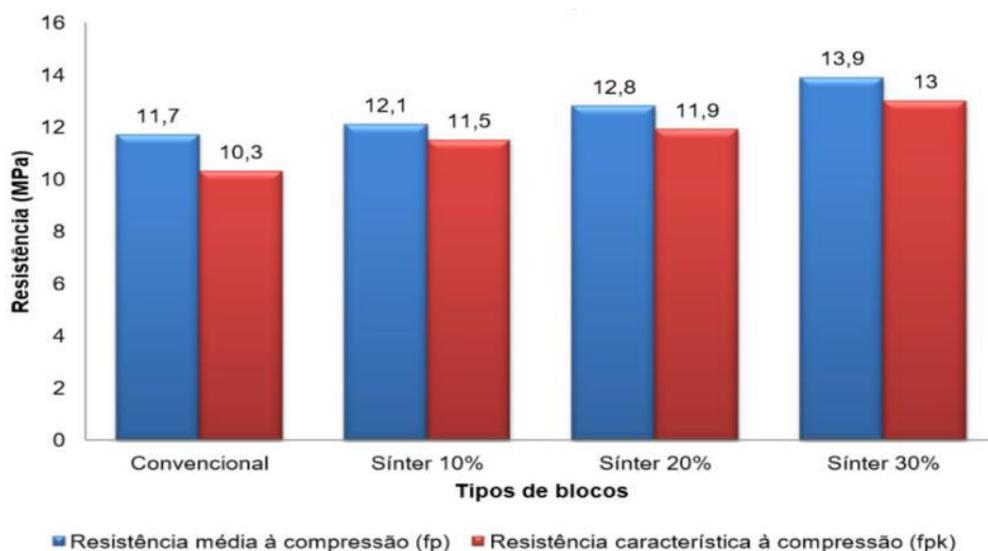
**Figura 12** – Blocos sextavados.



Fonte: SOUZA (2011).

Com relação aos resultados adquiridos, foram moldados seis corpos-de-prova sextavados para cada traço de concreto e os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para a idade de sete dias. A Figura 13 ilustra os valores das resistências adquiridos com a execução de esse ensaio.

**Figura 13** – Gráfico comparativo de resistência média à compressão e resistência característica dos corpos-de-prova sextavados para cada traço ensaiado.



**Fonte:**

SOUZA (2011).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 13, pode-se observar que o concreto teve sua resistência à compressão alterada de forma diretamente proporcional à taxa de substituição do pó misto pelo material sínter. Um dos motivos para isso, segundo Souza (2011), é que o excesso de finos do sínter se comparados com o pó misto, provavelmente provocou o preenchimento dos poros do concreto aumentando sua resistência.

A questão é que nenhum dos quatro tipos de concreto atingiu a resistência mínima de 35 MPa exigida pela norma ABNT NBR 9781/2013 e esse problema, de acordo com Souza (2011) acontece para blocos analisados pelo laboratório e oriundos de diversas fábricas da região, mostrando o baixo nível tecnológico da maioria das pequenas indústrias de pré-moldados. Outro provável motivo é que os blocos curaram por sete dias, sendo que a idade padrão é de 28 dias, assim, o concreto acabou não atingindo uma resistência maior para esse ensaio.

### 2.7.1.2 Dosagem com RCD

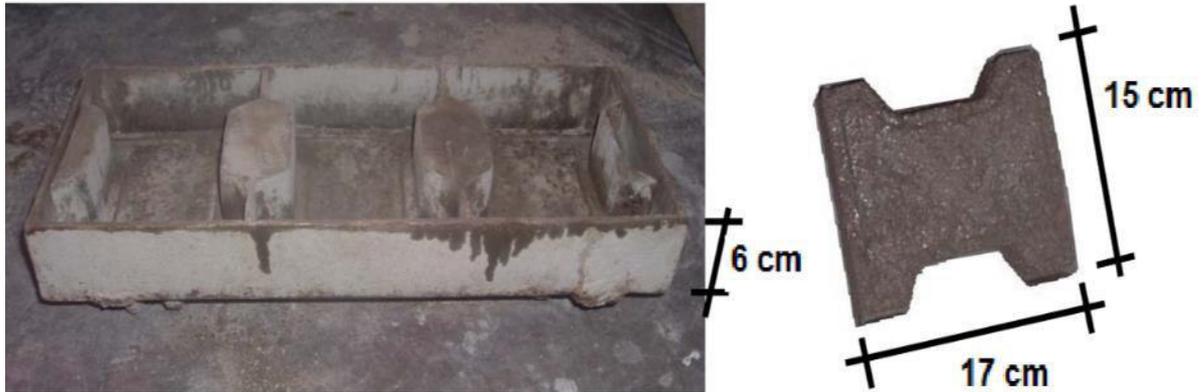
Outra experiência realizada em BIPs foi a utilização de RCD, conforme Sales (2009), em que o traço, em massa, definido para a confecção das peças foi 1:3:2,4:0,5 (cimento: agregado graúdo: agregado miúdo: relação água/cimento). No caso, o cimento utilizado foi do tipo CP II Z 32, que é adicionado de pozolana; o agregado miúdo foi areia de rio e o graúdo foi basalto britado. No estudo, foram estabelecidos nove traços, nos quais os agregados naturais foram substituídos, gradativamente, por agregados de RCD, conforme é mostrado na Tabela 5. Com relação ao concreto, esse foi confeccionado em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e em peças, cujas dimensões são  $17 \times 15 \times 6$  (comprimento, largura e altura, respectivamente, em centímetros), ilustrados na Figura 14.

**Tabela 5** – Variação da quantidade de agregados naturais e RCD por traço.

<b>Substituição gradativa de agregados naturais por RCD</b>					
<b>Traços</b>	<b>Agregado miúdo</b>		<b>Agregado graúdo</b>		<b>Relação água/cimento</b>
	<b>Natural (%)</b>	<b>RCD (%)</b>	<b>Natural (%)</b>	<b>RCD (%)</b>	
1°	100	0	100	0	0,5
2°	100	0	75	25	0,5
3°	100	0	50	50	0,5
4°	75	25	100	0	0,5
5°	75	25	75	25	0,5
6°	75	25	50	50	0,5
7°	50	50	100	0	0,5
8°	50	50	75	25	0,5
9°	50	50	50	50	0,5

Fonte: SALES (2009). Adaptado pelo autor.

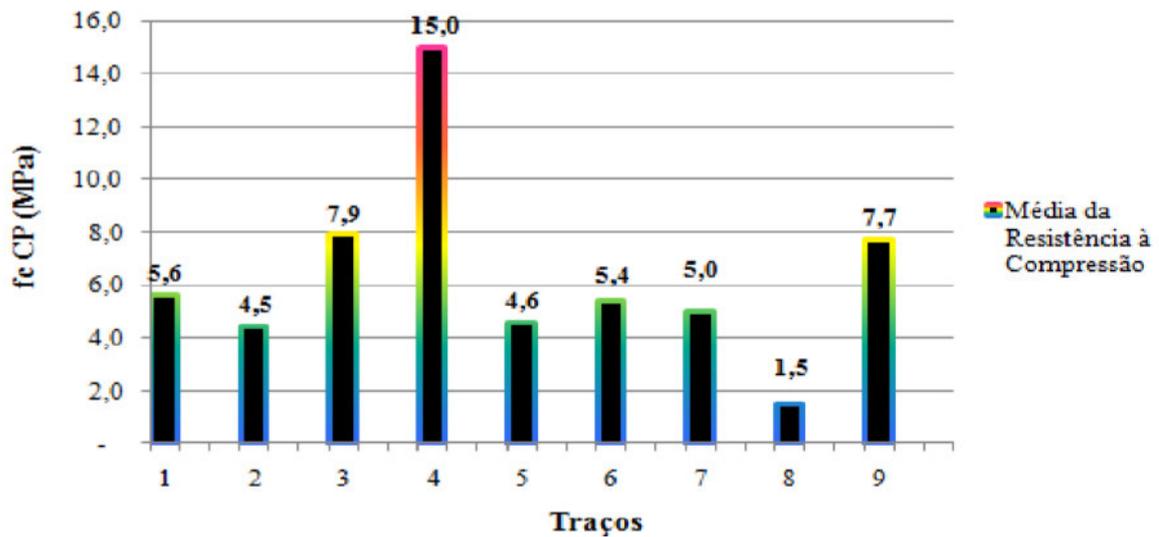
**Figura 14** – Forma manual de desmoldagem imediata, com as dimensões das peças.



Fonte: SALES (2009).

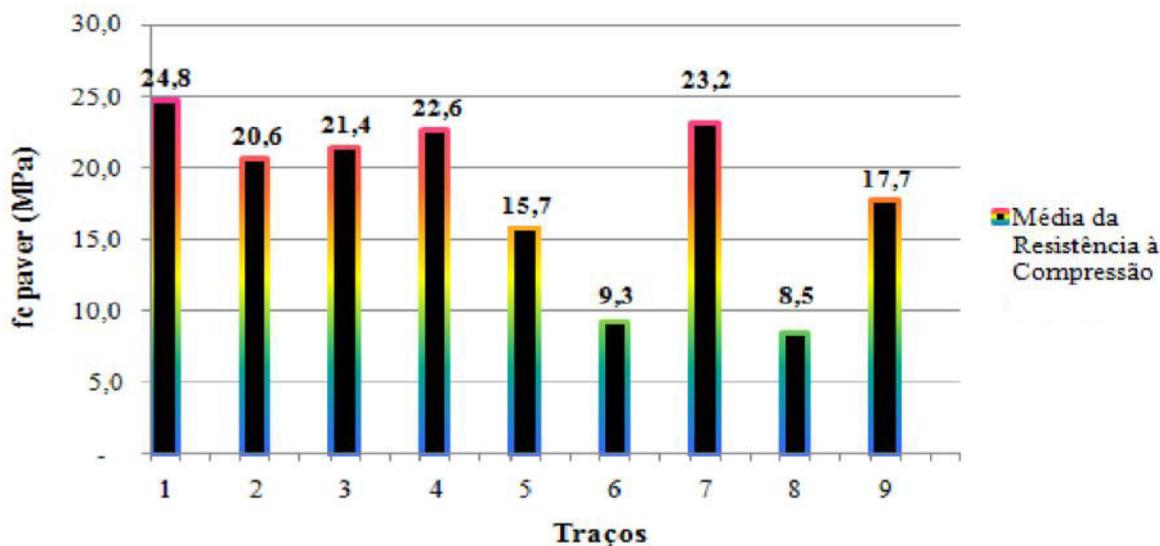
Com relação aos resultados adquiridos, foram moldados seis corpos-de-prova para cada traço de concreto, sendo três com o formato cilíndrico e os outros três com o formato da peça, e, assim, os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para a idade de 28 dias. As Figuras 15 e 16 ilustram os valores de resistência adquiridos com a execução de esse ensaio.

**Figura 15** – Dados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: SALES (2009).

**Figura 16** – Dados do ensaio de resistência à compressão das peças moldadas.



Fonte: SALES (2009).

De acordo com os resultados, o uso de agregados reciclados diminui efetivamente a resistência. Segundo os estudos de Gonçalves (2007), a utilização de agregados reciclados para teores acima de 50% resulta em resistências que podem ser discrepantes em até 20%, com relação ao valor do traço de referência, mas, ao utilizar os teores de 0% a 50%, como se observa, a diferença não é tão expressiva, exceto quando empregados em conjunto (agregado graúdo e miúdo), de acordo com os resultados dos traços 5, 6, 8 e 9. Um fator que pode explicar tais ocorrências é a absorção de água mais elevada por parte dos agregados reciclados ao se comparar com os naturais, pois o RCD, em geral, possui uma alta porosidade e permeabilidade, podendo afetar a resistência e influenciar na trabalhabilidade do concreto.

Um detalhe a ser percebido é que, em todos os traços, a resistência à compressão das peças moldadas foi maior do que os corpos-de-prova cilíndricos, demonstrando que a mistura se mostrou melhor compactada nas peças de concreto. Também pode-se colocar que os blocos, por possuírem uma espessura menor (6 cm) do que os CP' cilíndricos (20 cm), apresentam uma dificuldade maior de rompimento e um aumento da rigidez na estrutura.

Também pode-se observar que os valores de resistência à compressão não atingem o mínimo de 35 MPa exigido pela NBR 9781/2013 para a fabricação das peças para pavimentação. Porém, a questão é que essa norma deve ser revisada, a fim de classificar o material em classes de resistência, privilegiando valores mais baixos para contemplar obras, cuja exigência de cargas seja mais modesta.

### 2.7.1.3 Dosagem com resíduos vítreos

De acordo com o trabalho de Lodi, Gambin e Weit (2014) foi testada a adição do resíduo de pó de vidro na massa cimentícia nas porcentagens de 10%, 20% e 30%. Para que o artefato continuasse com a sua massa original, o correspondente ao pó de vidro a ser adicionado foi diminuído proporcionalmente da massa do agregado miúdo areia fina. No caso, o componente gráudo da mistura era o pedrisco e o cimento utilizado, no concreto, foi o CP II – Z – 32. Assim, foram estudados quatro traços em massa que estão apresentados na Tabela 6. Para os ensaios, o concreto foi colocado em fôrmas com as dimensões de 6 cm × 10 cm × 20 cm, sendo a altura, a largura e o comprimento, respectivamente, conforme é ilustrado na Figura 17.

**Tabela 6** – Medidas das matérias-primas para cada tratamento.

Concreto	Traço em massa				
	Cimento	Pedrisco	Areia	Pó de vidro	Relação a/c
Convencional	1	3,71	4,30	-	0,10
Pó de vidro – 10%	1	3,71	3,87	0,25	0,10
Pó de vidro – 20%	1	3,71	3,44	0,50	0,10
Pó de vidro – 30%	1	3,71	3,01	0,75	0,10

Fonte: LODI; GAMBIN; WEIT (2014). Elaborado pelo autor.

**Figura 17** – Blocos com formato de paralelepípedo.

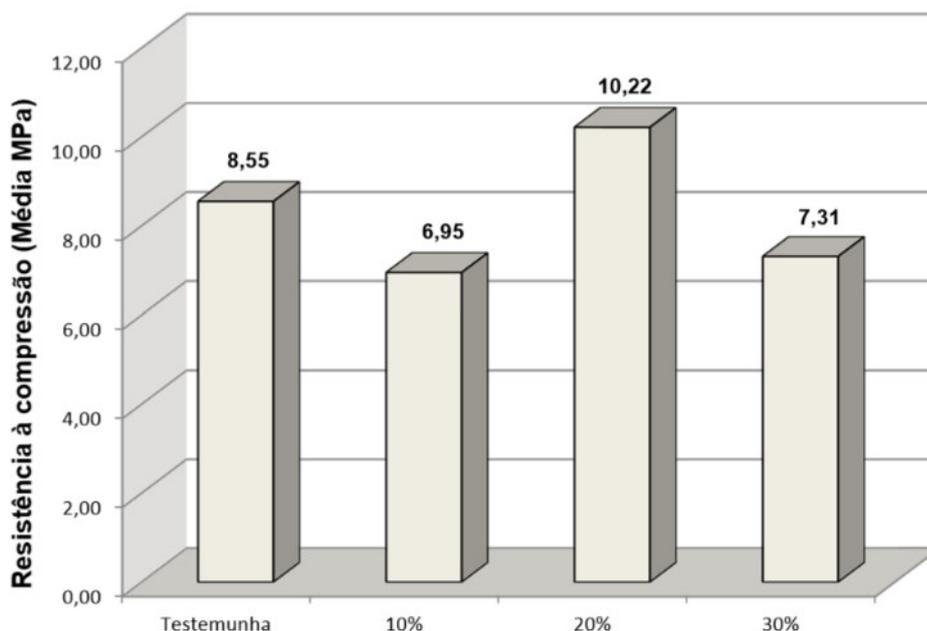


Fonte: LODI; GAMBIN; WEIT (2014).

Com relação aos resultados experimentais adquiridos, foram moldados seis blocos pavers para cada traço de concreto e os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à

compressão para a idade de dez dias. A Figura 18 ilustra os valores adquiridos de resistência com a execução de esse ensaio.

**Figura 18** – Resistência média à compressão dos blocos pavers por tratamento.



Fonte: LODI; GAMBIN; WEIT (2014).

Com relação aos resultados apresentados, esses indicaram que, independente do tratamento avaliado, os corpos de prova não apresentaram conformidade com a NBR 9781/2013, que requer uma resistência mínima à compressão de 35 MPa para a aplicação em pavimentos intertravados. Pode-se considerar que o período de cura de dez dias para os corpos-de-prova não foi o suficiente, para que os mesmos adquirissem uma resistência adequada. Assim, essas amostras poderiam curar pelo tempo padrão de 28 dias, o qual é colocado pela NBR 9781/2013 para o ensaio de resistência à compressão.

#### **2.7.1.4 Dosagem com resíduos de garrafa PET**

É interessante citar o trabalho de Pires (2015), que avaliou a adição de resíduos de garrafa PET na dosagem do concreto para a fabricação de blocos intertravados, em que, no total, foram testados seis traços alternativos e um de referência. Parte dos agregados naturais foram substituídos, em volume, nas proporções definidas de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% pelo resíduo de PET, sendo que, na dosagem, o cimento utilizado foi o CP V – ARI, o agregado graúdo foi a brita 1 e o miúdo foi composto por areia natural de rio e material britado, sendo,

assim, uma areia artificial, e os aditivos utilizados foram o plastificante Muraplast FK 840 e o superplastificante MC PowerFlow 1180. Na Tabela 7, estão apresentados os traços em volume utilizados nesse estudo, e o formato escolhido para os blocos foi o do Tipo I, que possui, segundo a NBR 9781/2013, uma forma próxima ao retangular e as dimensões são de 60 mm × 105 mm × 240 mm, sendo a altura, a largura e o comprimento, respectivamente, de acordo com a Figura 19.

**Tabela 7** – Traços em volume dos concretos dosados com resíduo de PET.

Concreto	Traço 1	Traço 2 10%	Traço 3 20%	Traço 4 30%	Traço 5 40%	Traço 6 50%	Traço 7 60%
Cimento	1	1	1	1	1	1	1
Areia 1 - Natural	0,74	0,66	0,60	0,52	0,44	0,37	0,29
Areia 2 - Artificial	1,73	1,55	1,39	1,21	1,04	0,87	0,69
Brita 1	3,42	3,07	2,73	2,39	2,08	1,73	1,38
PET - Granulado	0	0,59	1,18	1,76	2,34	2,93	3,52
Aditivo 1 (0,5%)	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Aditivo 2 (0,2%)	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Relação a/c	0,49	0,48	0,46	0,45	0,44	0,43	0,43

Fonte: PIRES (2015). Elaborado pelo autor.

**Figura 19** – Vista da peça de concreto.



Fonte: PIRES (2015).

Para a avaliação das resistências à compressão das peças, foram moldados, para cada um dos traços, um total de quatro blocos, sendo dois corpos-de-prova para cada idade de 7 e de 28 dias. A Tabela 8 ilustra os valores de resistência adquiridos com a execução de esse ensaio.

**Tabela 8** – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos Traços 1 (padrão) e Traços 2 ao 7 com substituição de PET.

Ensaio de Resistência à Compressão Axial em Peças de Concreto para Pavimento														
Idade	Traço 1		Traço 2		Traço 3		Traço 4		Traço 5		Traço 6		Traço 7	
	CP 1	CP 2												
7 dias	56,3	56,0	49,1	48,1	43,1	43,6	37,5	38,5	26,2	25,9	24,0	24,7	14,5	15,4
28 dias	58,1	58,4	53,7	50,6	46,5	44,6	40,8	42,9	28,5	28,7	25,1	25,2	15,7	16,1

Fonte: PIRES (2015).

Na medida que foi sendo feita a substituição dos agregados naturais por PET, a resistência foi declinando sistematicamente. Apesar da perda de resistência até o Traço 4 (substituição de 30% por PET), foram obtidos resultados bastante elevados quando comparados a um concreto convencional, sendo que os resultados variaram entre 53,7 MPa com 10% de PET até 16,1 MPa com 60% de PET. Provavelmente, essa variação tenha ocorrido em função da diminuição dos teores de agregados naturais, que possuem uma resistência própria, em detrimento do resíduo de PET que não apresenta resistência significativa em sua propriedade.

## 2.8 Dimensionamento de Pavimentos Intertravados

A camada de rolamento, formada por blocos de concreto, não atua sozinha, com isso, é essencial dimensionar, precisa e corretamente, as camadas que receberão as cargas provenientes do tráfego, para que se construa um pavimento adequado ao uso final. Dessa forma, de acordo com a empresa T & A - Blocos e Pisos (2004), são necessários alguns dados de projeto, como:

- (a) *California Bearing Ratio* (CBR), conhecido, no Brasil, como Índice de Suporte Califórnia, o qual informa a capacidade de suporte do solo;
- (b) o tipo de carga que estará presente no pavimento, a quantidade, a frequência e a configuração;
- (c) tempo de projeto a ser empregado.

Com relação ao tráfego, é importante que as vias sejam classificadas, segundo alguns parâmetros, como o número “N”. Esse número significa a quantidade de solicitações do eixo simples padrão, o qual transmite uma carga total de 8,2 tf (80 kN), informando, assim, quantas repetições de carga-padrão o pavimento irá receber ao longo da sua vida útil. A Tabela 9 apresenta essas informações.

**Tabela 9** – Classificação das vias e parâmetros de tráfego.

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto (anos)	Volume inicial da faixa mais carregada		Equivalente/ Veículo	N característico
			Veículo leve	Caminhão/ Ônibus		
Via Local	LEVE	10	100 a 400	4 a 20	1,5	$1 \times 10^5$
Via Local e Coletora	MÉDIO	10	401 a 1500	21 a 100	1,5	$5 \times 10^5$
Vias Coletoras e Estruturais	MEIO PESADO	10	1501 a 5000	101 a 300	2,3	$2 \times 10^6$
	PESADO	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,9	$2 \times 10^7$
	MUITO PESADO	12	>10000	1001 a 2000	5,9	$5 \times 10^7$
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12	-	< 500	-	$1 \times 10^7$
	VOLUME PESADO	12	-	> 500	-	$5 \times 10^7$

Fonte: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2004). Adaptado pelo autor.

Com a realização do dimensionamento, são determinadas as espessuras e os materiais a serem empregados nas camadas de sub-base, base e revestimento, por exemplo, do pavimento. Dessa maneira, de acordo com a Empresa T & A – Blocos e Pisos (2004), é interessante constatar que a camada de rejuntamento deve ser constituída por areia fina ou pó de pedra, seguindo a granulometria apresentada na Tabela 10, e a contenção lateral deve ser composta de elementos que compõem o meio-fio (ou guias). Além disso, a camada de assentamento deve apresentar uma espessura de 3,0 cm a 5,0 cm, sendo recomendada o uso de uma areia limpa, sem finos plásticos, material orgânico ou argila, com a granulometria sugerida na Tabela 11.

**Tabela 10** – Granulometria sugerida para areia de rejuntamento.

Peneira		% Passante
Nº 16	1,18 mm	100
Nº 200	0,075 mm	10

Fonte: EMPRESA T & A - BLOCOS E PISOS (2004). Adaptado pelo autor.

**Tabela 11** – Granulometria sugerida para areia de assentamento.

Peneira		% Passante
3/8 in	9,5 mm	100
Nº 4	4,75 mm	95 – 100
Nº 8	2,38 mm	80 – 100
Nº 16	1,18 mm	50 – 85
Nº 30	0,60 mm	25 – 60
Nº 50	0,30 mm	10 – 30
Nº 100	0,15 mm	5 – 15
Nº 200	0,075 mm	0 – 10

Fonte: EMPRESA T & A - BLOCOS E PISOS (2004). Adaptado pelo autor.

É importante constatar que, segundo Shackel (1990) e Hallack (1998), os métodos de dimensionamento dos pavimentos intertravados podem ser divididos em quatro categorias: (i) baseados em experiências de campo ou experiências locais; (ii) em dados empíricos; (iii) em modificações dos métodos existentes para pavimentos flexíveis através da modelagem de equivalência dos materiais e (iv) em modelos computacionais mecanísticos. A questão é que Hallack (1998) informa que a grande dificuldade de dimensionamento ou de verificação estrutural dos pavimentos com BIPs é a determinação do valor do módulo de elasticidade do revestimento composto pelo BIP e o colchão de areia.

Dessa forma, segundo Cruz (2003), a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos intertravados vem de adaptações da metodologia de cálculo para pavimentos flexíveis, onde o conceito de camadas equivalentes, necessariamente, é utilizado. Duas importantes academias mundiais, a Americana e a Britânica, promovem atualmente esta metodologia. Nos Estados Unidos, a *National Concrete Masonry Association* (NCMA), fez a adaptação do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da *American Association of State Highway of Transportation Officials* (AASHTO) para utilização em blocos intertravados. Na Inglaterra, um processo semelhante foi implementado para pavimentos rodoviários e, em separado, foram feitas adaptações específicas para o dimensionamento de pistas de aeroportos.

Existem dois métodos de dimensionamento de pavimento intertravado recomendados pela ABCP, e a escolha de tal procedimento será em função do número “N” de solicitações do eixo simples padrão (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2004). Os dois métodos serão mais detalhados a seguir.

### 2.8.1 Procedimento A – ABCP Estudo Técnico N° 27

Conforme a Prefeitura do Município de São Paulo (2004), este método foi adaptado pela ABCP do trabalho original proposto pela *British Cement Association* (BCA), com o uso de bases cimentadas. O mesmo é mais recomendado para vias de tráfego leve com “N” típico até  $1,0 \times 10^5$  solicitações do eixo simples padrão, por não necessitar da camada de base, e para vias de tráfego meio pesado a pesado com “N” típico superior a  $1,5 \times 10^6$ , em função do emprego de bases cimentadas. Com relação à camada de sub-base, o método apresenta os requisitos na Tabela 12.

**Tabela 12** – Requisitos para a camada da sub-base, conforme método da Prefeitura de São Paulo para BIPs.

Número “N”	CBR do Subleito natural	CBR da Sub-Base	Espessura da Sub-Base
$N < 5 \times 10^5$	$\geq 20\%$	$\geq 20\%$	Dispensável
$N \geq 5 \times 10^5$	$\geq 30\%$	$\geq 30\%$	Dispensável
$N < 5 \times 10^5$	$\leq 20\%$	$\geq 20\%$	Gráfico na Figura 20
$N \geq 5 \times 10^5$	$\leq 30\%$	$\geq 30\%$	Gráfico na Figura 20

Fonte: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2004). Elaborado pelo autor.

Com relação à camada de base, o método apresenta os requisitos mostrados na Tabela 13. Com relação à camada de assentamento, é utilizada uma areia compactada com espessura de 5 cm. Por fim, na camada de revestimento, a espessura dos blocos varia de 6 cm a 10 cm, em função do volume de tráfego atuante, conforme é mostrado na Tabela 14.

**Tabela 13** – Requisitos para a camada da base, conforme método da Prefeitura de São Paulo para BIPs.

Número “N”	Espessura da Base
$N < 1,5 \times 10^6$	Dispensável
$1,5 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$	10 cm no mínimo
$N \geq 1 \times 10^7$	Gráfico na Figura 21

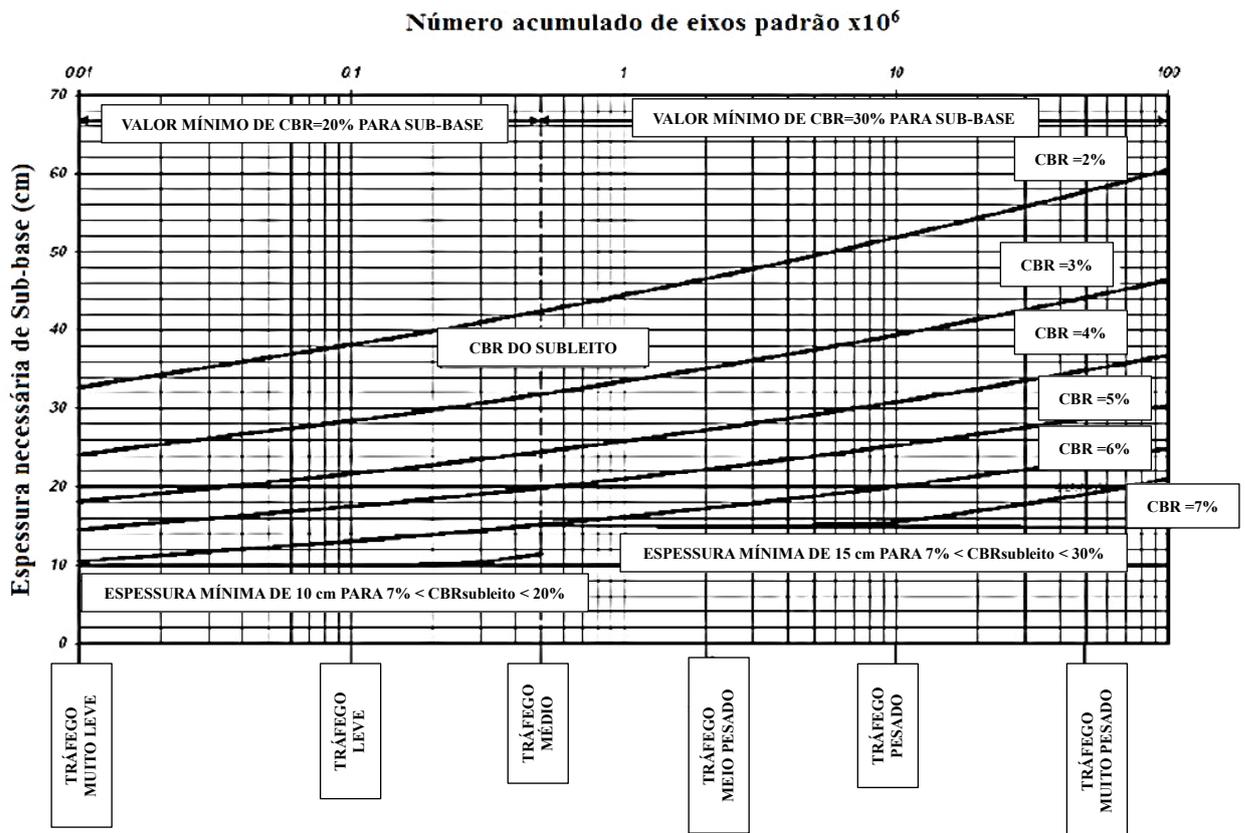
Fonte: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2004). Elaborado pelo autor.

**Tabela 14** – Espessura dos Blocos de Revestimento.

Número “N” do Tráfego	Espessura do Revestimento (cm)
$N \leq 5 \times 10^5$	6,0
$5 \times 10^5 < N < 1 \times 10^7$	8,0
$N \geq 1 \times 10^7$	10,0

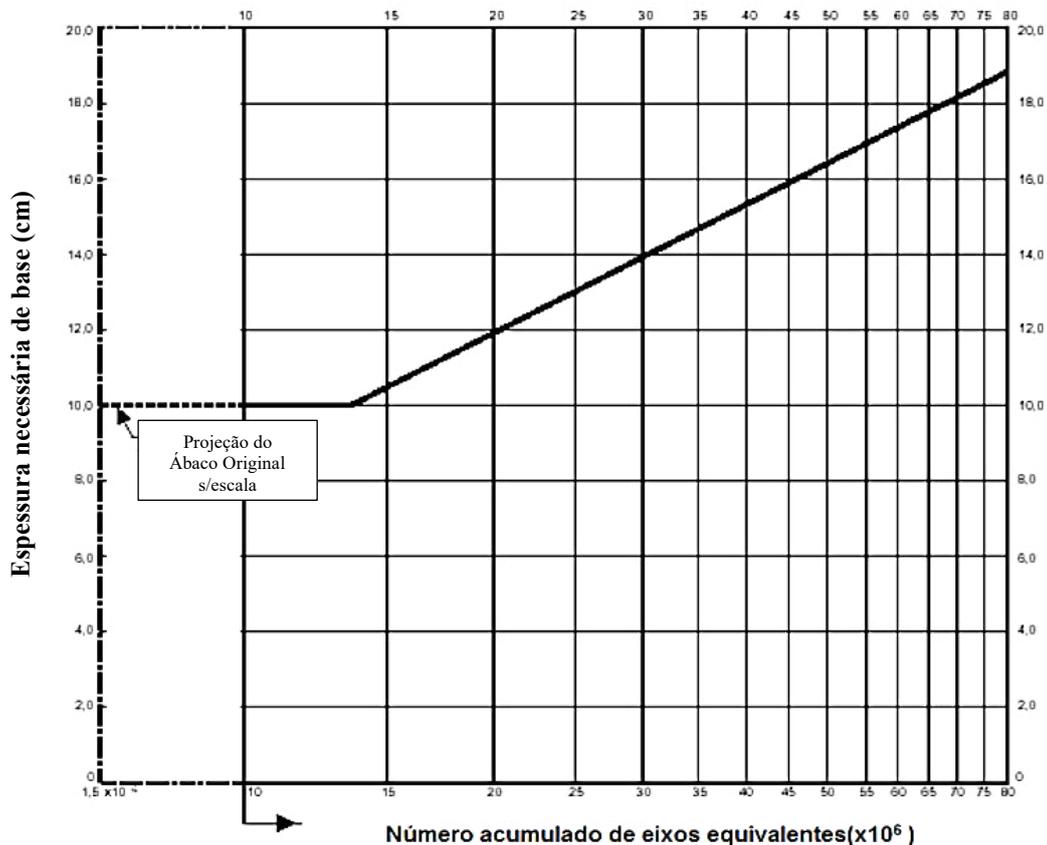
Fonte: PREFEITURA DO MUNÍCIPIO DE SÃO PAULO (2004). Adaptado pelo autor.

**Figura 20** – Espessura necessária de sub-base para BIPs.



Fonte: PREFEITURA DO MUNÍCIPIO DE SÃO PAULO (2004).

**Figura 21** – Espessura necessária de base para BIPs.



Fonte: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2004).

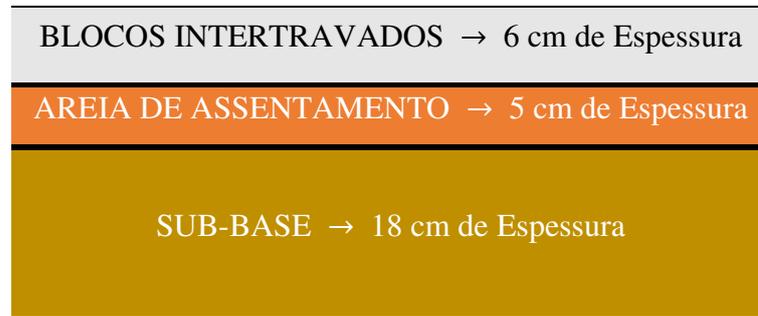
### 2.8.1.1 Exemplo de Aplicação – Procedimento A

Em uma via pública a ser pavimentada com blocos pré-moldados de concreto, classificada como via de Tráfego Leve ( $N_{\text{TÍPICO}} = 1 \times 10^5$ , conforme indicado na Tabela 9), com relação à expectativa de solicitações do eixo padrão, para um período de dez anos. Os estudos geotécnicos indicaram um valor de  $\text{CBR}_{\text{SUBLEITO}} = 5,0\%$ , portanto, de acordo com a Tabela 12, haverá a necessidade de adoção de uma camada de sub-base com  $\text{CBR} \geq 20\%$ . Os passos a serem seguidos são:

- Determinação da espessura da sub-base ( $e_{\text{SB}}$ ) → Da Figura 20, obtêm-se 18 cm com material de CBR mínimo igual a 20%;
- Determinação da espessura da camada da base ( $e_{\text{B}}$ ) → Da Tabela 13, para o valor de  $N_{\text{TÍPICO}} = 1 \times 10^5$ , portanto inferior a  $1,5 \times 10^6$ , não é necessária a camada de base;
- Camada de assentamento de areia compactada fica com 5 cm de espessura, conforme mencionada na página 53;

- Camada de rolamento com blocos pré-moldados definida em função do tráfego com o valor de  $N_{TÍPICO} = 1 \times 10^5$ , conforme a Tabela 14, possui 6,0 cm de espessura;
- Seção Típica na Figura 22:

**Figura 22** – Ilustração da seção típica de um pavimento intertravado de acordo com o Procedimento A.



Fonte: AUTOR (2017).

### 2.8.2 Procedimento B – *Portland Cement Association (PCA)*

Segundo a Prefeitura do Município de São Paulo (2004), esse método tem base em pesquisas desenvolvidas em vários países, como a Austrália, África do Sul e Estados Unidos da América, o que inclui observações feitas no laboratório e pistas de testes, sendo o desenvolvimento do procedimento efetuado pelo *United States Army Corps of Engineers (USACE)*. O mesmo é mais recomendado para vias de tráfego médio a meio pesado com “N” típico entre  $1,0 \times 10^5$  e  $1,5 \times 10^6$  solicitações, em função do uso de bases granulares que geram estruturas mais seguras.

Um parâmetro importante é a espessura da base puramente granular ( $H_{BG}$ ), que depende do número “N” e do CBR do subleito, e essa variável, determinada através da Tabela 15, corresponde à camada de base assentada. O valor de  $H_{BG}$  pode ser subdividido em dois, adotando-se a sub-base puramente granular e a base cimentada, com espessuras mínimas preferíveis de 15 cm e de 10 cm, respectivamente, sendo que essa última terá uma espessura calculada, em função do coeficiente de equivalência estrutural adotado ( $K_B = 1,65$ ), conforme é mostrado na Equação 2.

$$H_{CR} = \frac{H_{BG} - H_{SBG}}{K_B} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$H_{CR}$ : espessura da base de concreto (cm);

$H_{BG}$ : espessura da base granular (cm);

$H_{SBG}$ : espessura da sub-base granular (cm);

$K_B$ : fator de equivalência estrutural da base cimentadas. Adotado o valor de 1,65.

Com relação à camada de assentamento, é utilizada uma areia compactada com espessura de 5 cm. Dessa forma, na camada de revestimento, a espessura dos blocos varia de 8 cm a 10 cm, sendo essa medida adotada para condições mais severas de carregamento, o que deve ser avaliado pelo projetista.

**Tabela 15** – Espessura necessária de base puramente granular ( $H_{BG}$ ).

Nº de Solicitações equivalente do eixo-padrão de 8,2 tf (número N)	ESPESSURA DA BASE GRANULAR ( $H_{BG}$ ) EM cm										
	Valor do CBR (%) do Subleito										
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	15,0	20,0
$1 \times 10^3$	27	21	17								
$2 \times 10^3$	29	24	20	17							
$4 \times 10^3$	33	27	23	19	17						
$8 \times 10^3$	36	30	25	22	19						
-											
$1 \times 10^4$	37	31	26	23	20						
$2 \times 10^4$	41	34	29	25	22	17					
$4 \times 10^4$	44	37	32	28	24	19					
$8 \times 10^4$	48	40	35	30	27	21	17				
-											
$1 \times 10^5$	49	41	36	31	28	22	18				
$2 \times 10^5$	52	44	38	34	30	24	19				
$4 \times 10^5$	56	47	41	36	32	26	21				
$8 \times 10^5$	59	51	44	39	34	28	23				
-											
$1 \times 10^6$	60	52	45	40	35	29	23	16			
$2 \times 10^6$	64	55	47	42	38	30	25	17			
$4 \times 10^6$	68	58	50	45	40	33	27	19			
$8 \times 10^6$	71	61	53	47	42	34	29	20			
-											
$1 \times 10^7$	72	62	54	48	43	35	30	21			

Valor Mínimo de 15

Fonte: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2004). Adaptado pelo autor.

### 2.8.2.1 Exemplo de Aplicação – Procedimento B

O dimensionamento a seguir será proposto para uma via pública com as seguintes características:

- Via de tráfego meio pesado com  $N_{TÍPICO} = 1 \times 10^6$  solicitações, conforme recomendações na seção **2.8.2**;
- Índice de Suporte Califórnia do subleito:  $CBR_{SUBLEITO} = 5,0\%$ ;

É estudada a alternativa para o dimensionamento, em que adota-se uma base puramente granular. Os passos a serem seguidos são:

- Determinação da espessura de base puramente granular → Com os valores de  $N_{TÍPICO} = 1 \times 10^6$  e  $CBR_{SUBLEITO} = 5,0\%$ , tem-se da Tabela 15 →  $H_{BG} = 29$  cm;
- Camada de assentamento de areia compactada fica com 5 cm de espessura, conforme mencionada na página 57;
- Camada de rolamento com blocos pré-moldados definida em função do tráfego com o valor de  $N_{TÍPICO} = 1 \times 10^6$ , conforme a Tabela 14, possui 8,0 cm de espessura;
- Seções Típicas nas Figura 23 (a) para a 1ª Alternativa e (b) para a 2ª Alternativa:

**Figura 23** – Ilustração da seção típica de um pavimento intertravado de acordo com o Procedimento B.



Fonte: AUTOR (2017).

## 2.9 Processo de Fabricação e de Construção dos Pavimentos Intertravados

A peça de concreto, que constitui o pavimento, necessita de etapas específicas para a sua fabricação. Segundo a empresa T & A - Blocos e Pisos (2004), existem cinco fases principais:

- (a) dosagem do concreto: de acordo com o tipo de produto a ser fabricado, um traço é desenvolvido pela equipe técnica, através das pesquisas em laboratório e, assim, os agregados, seja graúdo ou miúdo, o aglomerante, a água e o aditivo são dosados em massas previamente definidas, de acordo com o mesmo traço.
- (b) mistura: consiste na transferência da matéria-prima para um equipamento específico, como o misturador, exemplificado na Figura 24, para que haja a homogeneização dos compostos e a, conseqüente, formação do concreto.
- (c) moldagem: o concreto recém-produzido precisa adquirir uma forma característica para a futura realização de ensaios, assim, o material é encaminhado para uma máquina de vibro-prensa, exemplificada na Figura 25, onde ocorrerá a prensagem e a vibração, que devem ser realizadas com significativa energia de compactação.
- (d) cura: a fim de se obter um ambiente com temperatura e umidade controladas, as peças de concreto seguem para as câmaras de cura, onde devem permanecer pelo tempo necessário para garantir uma maior hidratação do cimento e, assim, obter uma qualidade maior para o produto.
- (e) estocagem: finalizados os processos anteriores, as peças de concreto são identificadas quanto ao lote e, em seguida, seguem para o estoque, onde serão armazenadas até serem solicitadas pelo cliente.

**Figura 24** – Máquina de misturador do concreto.



Fonte: ÚNICA [201-?].

**Figura 25** – Máquina de vibro-prensa para blocos.



Fonte: MÁQUINA (2013).

Com a obra de um pavimento intertravado em curso, no qual as peças de concreto são dispostas entre si, é necessário, novamente, uma série de processos a serem seguidos. Conforme informa Rossi (2014), a começar pelos serviços preliminares, estes devem estar finalizados antes de assentar o bloco, sendo esses: o tratamento do subleito, da sub-base e da base com brita corrida, e ensaios de compactação Proctor Normal nas camadas granulares (base e sub-base) dentro da especificação de projeto.

Em seguida, é colocada a camada de assentamento, a qual é representada por um colchão de areia, podendo esse ser mais fino à medida que a base estiver melhor tratada com brita corrida. Com relação ao alinhamento, esse é definido por uma linha esticada e, geralmente, é paralelo ao meio fio da rua a ser calçada, para que as peças fiquem perpendiculares com o meio-fio, travando, assim, todo o pavimento. Ao longo do alinhamento, os bloquetes são assentados lado a lado, restando o arremate para ser executado posteriormente. Com relação às juntas entre um bloco e outro, as mesmas são preenchidas por areia, sendo essa a mesma utilizada no colchão, e o processo, no caso, é denominado de salgamento.

Realizadas essas etapas, todos os blocos intertravados devem ser compactados, através de uma placa vibratória, para que o revestimento assente mais fortemente sobre o colchão de areia. Dessa forma, os arremates podem ser feitos, os quais consistem no corte, através de uma serra ou guilhotina, dos bloquetes, para que esses se encaixem nas extremidades, e isso vai possibilitar o travamento da estrutura. Por fim, deve ser realizada a varrição do excesso de areia sobre o piso para, posteriormente, o pavimento ser liberado para o tráfego. Alguns dos processos descritos serão ilustrados da seguinte forma: definição do alinhamento → Figura 26 (a); salgamento do pavimento → Figura 26 (b); compactação da estrutura → Figura 27 (a) e arremates de canto → Figura 27 (b).

**Figura 26** – Processos de definição do alinhamento (a) e salgamento (b) do pavimento.



(a) Definição do alinhamento.



(b) Salgamento do pavimento.

Fonte: ROSSI (2011).

**Figura 27** – Compactação do pavimento por uma placa vibratória (a) e exemplificação de arremates de canto (b).



(a) Compactação da estrutura.



(b) Arremates de canto.

Fonte: ROSSI (2011).

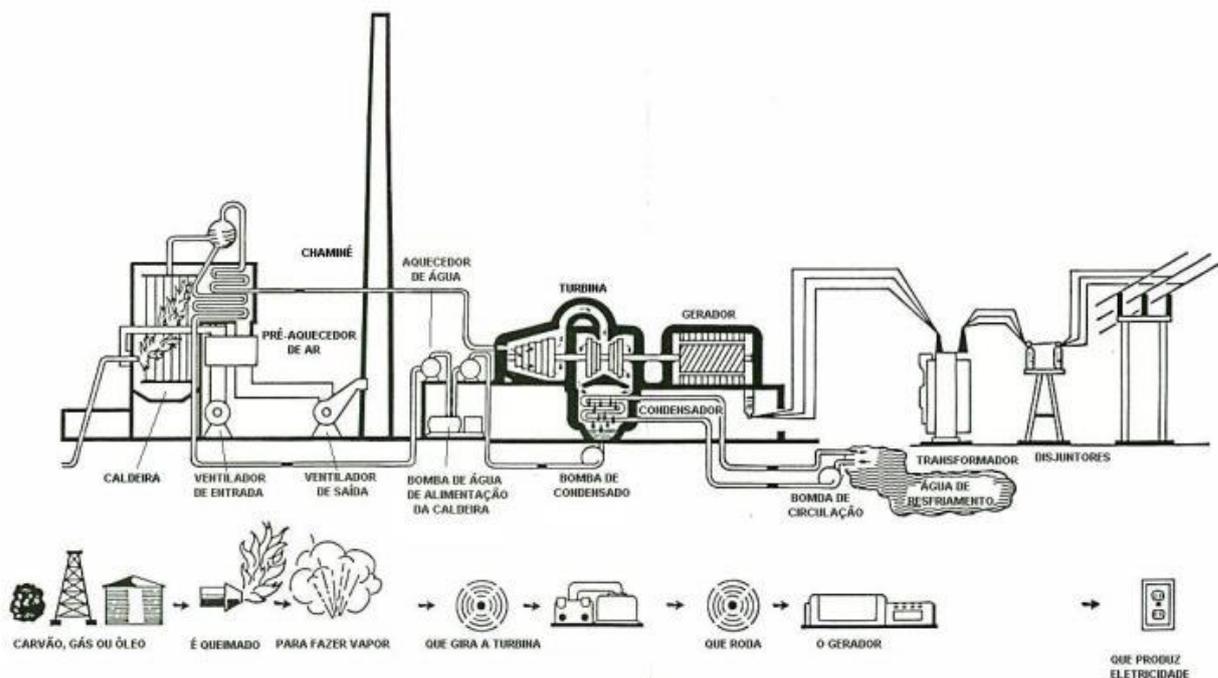
## 2.10 Características Gerais das Usinas Termelétricas

Pelo fato das cinzas serem resíduos advindos do funcionamento da usina termelétrica, é interessante que sejam colocadas informações a respeito de esse tipo de instalação. Primeiramente, esse tipo de indústria é uma instalação que gera energia a partir do calor produzido pela queima de combustíveis fósseis, por exemplo o carvão mineral. Com relação ao seu funcionamento, Diniz (2015) informa que a produção de energia é feita de acordo com as etapas a seguir, e que está representada na Figura 28.

- (a) O calor gerado na queima de combustão é utilizado para aquecer a água de uma caldeira;

- (b) A água se transforma em vapor, o qual é superaquecido e conduzido às pás das turbinas, em que o impacto do vapor contra as turbinas produz a rotação do eixo da turbina;
- (c) O gerador é acoplado ao eixo da turbina produzindo a energia à medida que a mesma gira;
- (d) Um transformador é ligado ao gerador, para que as características elétricas dessa corrente sejam levadas aos valores ideais para a distribuição da energia;
- (e) Existe um sistema de refrigeração que permite reconverter o vapor de água, que passou pelas turbinas, para o estado líquido, reiniciando, assim, o ciclo de energia térmica obtida pelos combustíveis.

**Figura 28** – Processo de produção de energia em uma usina termelétrica.



Fonte: DINIZ (2015).

### 2.10.1 Usinas Termelétricas: Pecém I e Pecém II

As usinas termelétricas presentes no Pecém são empreendimentos pertencentes ao CIPP, que aglomera várias estruturas e companhias industriais, sendo um dos mais importantes responsáveis pelo desenvolvimento empresarial no estado do Ceará. O Complexo está localizado nos municípios de Caucaia e de São Gonçalo do Amarante, distante cerca de 50 km da cidade de Fortaleza (VASCONCELOS, 2016).

Com relação às centrais termelétricas, a usina Pecém I pertence ao Grupo EDP e

recebeu um investimento total de R\$ 3 bilhões, possuindo uma capacidade total de 720 MW, já a Pecém II pertence à empresa Eneva com capacidade de 365 MW (ESTUDO..., 2015). Com relação à localização, ambas estão situadas no município de São Gonçalo do Amarante. As Figuras 29 e 30 mostram, respectivamente, uma vista superior das usinas e a estrutura das mesmas.

**Figura 29** – Visão superior das usinas termelétricas no Pecém.



Fonte: GOOGLE MAPS (2017).

**Figura 30** – Instalações das usinas termelétricas do Pecém.



Fonte: IMAGENS [2013?].

Com relação ao carvão mineral utilizados nessas indústrias, esse é importado da

Colômbia desde o ano de 2011 e depois do descarregamento no Porto do Pecém, o combustível é levado por correia transportadora fechada, tipo tubular, com extensão de aproximadamente 12,5 km, desde o Porto até a Usina. Na fábrica, o carvão é armazenado em um pátio e recebe uma série de cuidados especiais, evitando a contaminação do lençol freático da região e as pilhas do material são umedecidas através de um processo específico, com o propósito de evitar a dispersão de partículas no ar (CARVÃO..., 2013).

### **2.10.2 Vantagens e Defeitos na utilização de Usinas Termelétricas**

A geração de energia por usina termelétrica pode apresentar uma série de fatores que representam as vantagens e as desvantagens na utilização de tal indústria. Com relação aos aspectos positivos, essa instalação pode ser construída próxima de centros urbanos, reduzindo o desperdício de energia nas linhas de transmissão e, além disso, é uma opção interessante para países carentes de outras fontes energéticas, pois pode atender demandas emergenciais a médio e curto prazo, e subprodutos, como a palha de arroz, podem ser usados enquanto fonte de calor (USINA..., 2014). De acordo com Vasconcelos (2016), também pode ser ressaltado que essa indústria produz uma quantidade constante de energia elétrica durante o ano inteiro, ao contrário das hidrelétricas, que têm a produção dependente do nível dos rios.

Com relação aos aspectos negativos, pode-se colocar que os gases residuais do processo de queima do combustível, como o dióxido de carbono, monóxido de carbono e o dióxido de enxofre, são poluentes que contribuem para o aquecimento global, além de provocarem chuvas ácidas. O alto custo de manutenção também pode ser destacado, visto que essas usinas precisam de material para ser queimado constantemente (USINA..., 2014). Outra desvantagem a ser citada é a geração significativa de resíduos sólidos, como as cinzas, advindos do processo de queima do combustível, em que os mesmos podem ser armazenados em locais inapropriados, como bacias de sedimentação, o que pode vir a ocasionar problemas ambientais.

### **2.10.3 Tipos de cinzas originadas de uma termelétrica movida à carvão mineral**

Vasconcelos (2016) informa que, durante a combustão do carvão no processo de geração de energia da usina, cerca de 40% dos resíduos produzidos correspondem à fração das cinzas, sendo desses 60% referentes à porção leve (*fly ash*) e 40% à porção pesada (*bottom ash*). Com relação à destinação dos dois tipos de resíduos, Kniess (2005) coloca que as cinzas leves são coletadas por meio de precipitadores eletrostáticos, sendo transportadas pneumáticamente até os silos de armazenagem, e no geral, os consumidores finais para esse tipo de cinza são as

indústrias de cimentos. Já para as cinzas pesadas, por essas possuírem uma granulometria mais grossa, acabam caindo para o fundo das fornalhas e de gaseificadores, de onde são retiradas por fluxo de água e, apesar de as mesmas passarem por um sistema de redução do tamanho de suas partículas, o destino final de esse material ainda continua sendo depósitos a céu aberto, agredindo o ecossistema local.

Com relação à composição química, Farias (2005) informa que a composição química das cinzas pesadas é controlada pela fonte do carvão mineral, sendo, em geral, composta por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), as quais correspondem a cerca de 50% e de 30%, respectivamente, na composição em massa do material, sendo o restante formado por outros óxidos e por metais como chumbo, mercúrio e sulfatos. As cinzas volantes apresentam materiais, na sua grande parte, amorfos (sílica de vidro), com percentagens baixas de componentes cristalinos. Segundo Barros (2015), a constituição química dessas cinzas é, em geral, muito variável, com predominância de sílica (em torno de 40%), alumina entre 15% a 40%, ferro entre 5% a 14% e cálcio (cerca de 10%).

## **2.11 A Utilização de Cinzas em Peças de Concreto**

As cinzas representam um tipo de resíduo que, tanto pode ser utilizado para fins na área de infraestrutura, como na construção civil. No caso, a cinza pode ser incorporada na constituição do concreto, o qual pode ser usado na fabricação de blocos estruturais para edificações e de peças destinadas para pavimento intertravado. A seguir, são explanadas algumas aplicações das cinzas na composição do concreto, para que seja de um melhor entendimento as consequências do uso das mesmas.

### **2.11.1 Utilização da Cinza da Combustão de Carvão Mineral (CCCM)**

Voltado para a construção civil, o trabalho realizado por Araújo (2016) apresentou os seguintes materiais para a composição do concreto: cimento CP – VARI, agregado miúdo areia natural, agregado graúdo brita Nº 1, água, aditivo plastificante Muraplast FK 110 NE e cinzas de carvão mineral, advindas da UTP e separadas nas amostras compostas AC – 1, AC – 2 e AC – 3. No caso, foram produzidos, ao todo, sete traços de concreto, tendo as cinzas do tipo AC – 1, AC – 2 e AC – 3, cada uma, em substituição, em volume absoluto, ao Cimento Portland nos teores 7,5% e 15% com a relação água/aglomerante, em volume, constante e igual a 0,5. Os traços são, assim, denominados: AC – 1 – 7,5%, AC – 1 – 15%, AC – 2 – 7,5%, AC – 2 – 15%, AC – 3 – 7,5% e AC – 3 – 15%. Além disso, foi produzido um traço de referência sem a

cinza em estudo, definidos como REF. A Tabela 16 apresenta o consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto e, no caso, esse foi moldado em corpos-de-prova com formato cilíndrico, possuindo diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm.

**Tabela 16** – Traços dos concretos produzidos.

Traço	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza (kg/m <sup>3</sup> )	Ag. Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Ag. Graúdo (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)
REF	360,000	0,000	693,900	1077,120	180,000	2,480
AC – 1 – 7,5%	333,000	21,429	693,900	1077,120	180,000	4,670
AC – 1 – 15%	306,000	42,858	693,900	1077,120	180,000	4,110
AC – 2 – 7,5%	333,000	21,312	693,900	1077,120	180,000	3,410
AC – 2 – 15%	306,000	42,624	693,900	1077,120	180,000	4,650
AC – 3 – 7,5%	333,000	21,384	693,900	1077,120	180,000	3,300
AC – 3 – 15%	306,000	42,768	693,900	1077,120	180,000	3,300

Fonte: ARAÚJO (2016).

Com relação aos resultados adquiridos, foram moldados dois corpos-de-prova para cada traço de concreto e os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para as idades de 3, 7, 28 e 63 dias. A Tabela 17 ilustra os valores adquiridos com a execução de esse ensaio.

**Tabela 17** – Resistência média à compressão referentes aos 3, 7, 28 e 63 dias.

Traço	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 63 dias (MPa)
REF	26,8	24,5	40,4	42,5
AC – 1 – 7,5%	27,6	36,1	41,0	50,3
AC – 1 – 15%	24,8	34,1	36,4	47,1
AC – 2 – 7,5%	27,9	34,4	39,5	47,3
AC – 2 – 15%	30,6	34,5	41,0	46,1
AC – 3 – 7,5%	25,8	31,5	37,4	42,7
AC – 2 – 15%	23,7	31,5	37,6	43,1

Fonte: ARAÚJO (2016).

Pode-se constatar que, após 28 dias, houve ganho de resistência para os concretos com cinza, enquanto o concreto do traço de referência obteve uma menor taxa de incremento. É possível, também, verificar que, aos 63 dias, todos os traços produzidos com cinza superaram o concreto referência. A explicação para essa diferença foi atribuída ao fato de que as cinzas utilizadas nessa pesquisa possuem quantidades consideráveis de material amorfo, podendo conter sílica, que reage com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do concreto, em períodos mais avançadas, formando componentes com propriedades cimentícias.

Outro trabalho realizado no âmbito da construção civil, que foi o de Melo Vieira *et al.* (2012), apresentou que, na composição do concreto, foi utilizado o cimento CP II F – 32, o agregado graúdo pedra britada, o agregado miúdo areia fina, a água, o aditivo redutor de água polifuncional MIRA 94 do fabricante *Grace Construction Products* e a Cinza da Combustão de Carvão Mineral (CCCM), a qual foi cedida por uma empresa proprietária de usina termelétrica em Portugal. No caso, foram analisados seis traços de concreto, tendo a CCCM em substituição em volume absoluto ao Cimento Portland nos teores 3%, 6% e 9%, em duas relações de água/cimento pré-definidas: 0,45 e 0,55, aqui denominados: T3 – 0,45; T6 – 0,45; T9 – 0,45; T3 – 0,55; T6 – 0,55 e T9 – 0,55. Além disso, foram produzidos dois traços de referência sem a cinza em estudo, definidos como REF – 0,45 e REF – 0,55. A Tabela 18 apresenta o consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto e, no caso, esse foi moldado em corpos-de-prova com formato cilíndrico, possuindo diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm.

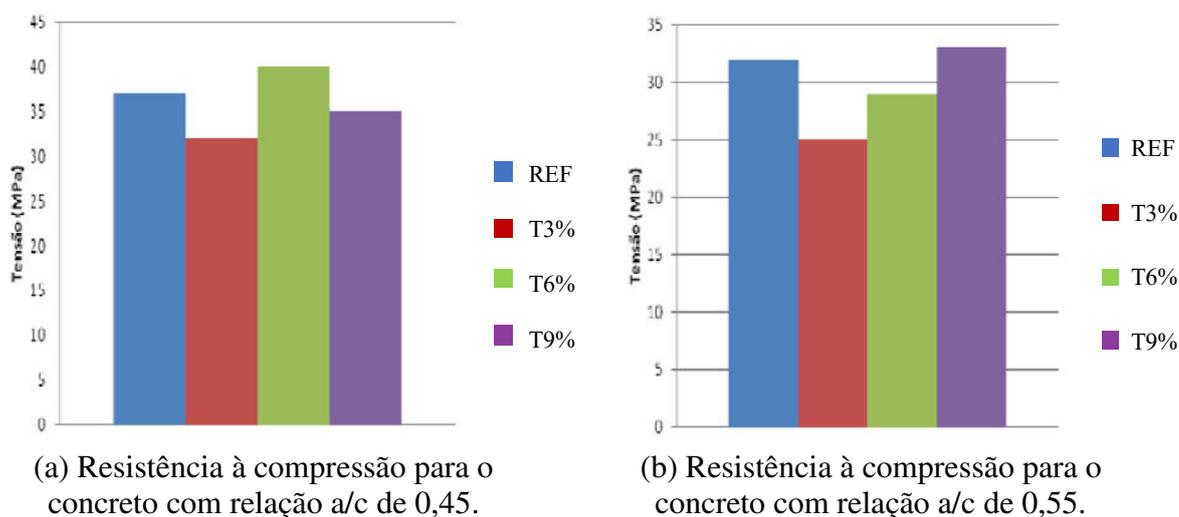
**Tabela 18** – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto.

Traço	Cimento (kg)	CCCM (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)
REF – 0,45	432,75	0,00	714,04	1025,62	194,74	458,29
T3 – 0,45	419,77	9,95	714,04	1025,62	193,37	444,85
T6 – 0,45	406,79	19,90	714,04	1025,62	192,01	690,52
T9 – 0,45	393,80	29,85	714,04	1025,62	190,64	185,75
REF – 0,55	354,50	0,00	779,90	1024,51	194,98	261,46
T3 – 0,55	343,87	7,75	779,90	1024,51	193,39	172,63
T6 – 0,55	333,23	15,50	779,90	1024,51	191,80	272,26
T9 – 0,55	322,60	23,25	779,90	1024,51	190,22	317,48

Fonte: MELO VIEIRA *et al.* (2012).

Com relação aos resultados adquiridos, foram moldados sete corpos-de-prova para cada traço de concreto e os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para a idade de 28 dias. As Figuras 31 (a) e (b) ilustram os valores adquiridos com a execução de esse ensaio para as relações a/c de 0,45 e 0,55, respectivamente.

**Figura 31** – Resistência à compressão para as relações a/c de 0,45 (a) e de 0,55 (b).



Fonte: MELO VIEIRA *et al.* (2012).

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 28 (a) e (b), observa-se que os concretos com relação a/c de 0,45 nos teores de 3% e de 9% tiveram resistência à compressão aos 28 dias menor do que o traço de referência e apenas o concreto com adição de 6% teve uma melhora em torno de 8%. Nos concretos com a/c de 0,55 apenas o teor de 9% de adição de cinza obteve incremento na resistência em torno de 3%, sendo que os demais obtiveram valores menores. Uma observação interessante a ser feita é que apenas os traços com a/c de 0,55 apresentaram uma tendência de ganho de resistência se comparados entre si à medida que o teor de cinza aumentou. Pode-se colocar que os traços alternativos apresentaram, de um modo geral, resultados inferiores aos valores das misturas de referência, pois existe um alto teor de ar incorporado nos concretos com cinzas e a quantidade de cimento diminuiu à medida que o teor do resíduo aumentava.

### 2.11.2 Utilização da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar

De acordo com o trabalho realizado por Zacarias Nascimento e Formagini (2008), foi estudada a aplicação de cinzas residuais de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao Cimento Portland para a fabricação de concreto para blocos pavers *Stockholm* de pavimentos

intertravados. No caso, esse formato de peça é o mesmo adotado na pesquisa de Pires (2015) no item 2.7.1.4 e os materiais utilizados no concreto foram: Cimento Portland do tipo CP II F – 32, os agregados miúdos areia de quartzo natural e areia de brita artificial, os agregados graúdos pedrisco e brita 1, água e a Cinza Residual do Bagaço de Cana (CRBC). No total, foram analisados três traços de concreto, em que a CRBC substituiu, em massa, o cimento nos teores 0%, 20% e 40%, assim, a composição dos concretos dos blocos em kg/m<sup>3</sup> é apresentada na Tabela 19.

**Tabela 19** – Traços em massa dos concretos com e sem cinzas de bagaço de cana.

Componentes	Peso específico dos materiais (kg/m <sup>3</sup> )		
	CB0	CB20	CB40
Cimento	300	240	180
CRBC	0	60	120
Areia natural	485	485	485
Areia artificial	240	240	240
Pedrisco	250	250	250
Brita 1	1020	1020	1020
Água	148	148	148
Relação água/cimento	0,49	0,62	0,82

Fonte: ZACARIAS NASCIMENTO; FORMAGINI (2008).

Com relação aos resultados adquiridos, foram moldados seis corpos-de-prova para cada traço de concreto e os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para as idades de 7 e de 28 dias. Em seguida, é apresentada a Tabela 20 que mostra os valores determinados com a execução de esse ensaio.

**Tabela 20** – Características dos blocos com e sem cinzas de bagaço de cana.

Blocos de concreto	Resistência (MPa)	
	7 dias	28 dias
CB0	29,1	40,5
CB20	27,0	35,5
CB40	19,7	26,4

Fonte: ZACARIAS NASCIMENTO; FORMAGINI (2008).

De acordo com o que foi exposto, pode-se colocar que o uso do concreto CB20 (teor de substituição de 20%) possibilitou a confecção de blocos intertravados com resistência média à compressão de 35,5 MPa aos 28 dias, representando 88% da resistência do bloco produzido com o concreto de referência (CB0), que foi de 40,5 MPa. Com relação aos blocos produzidos com teor de substituição de 40% (CB40), esses apresentaram resistência, aos 28 dias, de 26,4 MPa, alcançando 65% da resistência dos blocos produzidos com o traço de referência. Dessa forma, pode-se observar que o valor de esse parâmetro declinou, conforme o teor de resíduo aumentava, o que indica que a presença da CRBC não possui uma resistência própria significativa, quanto a do cimento.

Além disso, esse resultado demonstra que a cinza residual, na forma como ela foi beneficiada, pode ser utilizada na fabricação de concretos destinados a blocos intertravados para pavimentação. Porém, conclui-se que os blocos do traço CB40 não atenderam às condições estabelecidas na NBR 9781/2013, a qual estipula que o valor da resistência característica estimada à compressão das peças deva ser superior a 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha. No entanto, os blocos produzidos com o traço CB40, com redução 40% no consumo de cimento, podem ser aplicados na construção de pavimentos intertravados para serem utilizados em calçadas de pedestres sem a passagem de veículos comerciais de linha.

## **2.12 Compilado das pesquisas que utilizaram resíduos em Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs)**

Nas seções 2.7.1 e 2.11, foi dada ênfase em diversos trabalhos acadêmicos que utilizaram diferentes tipos de resíduos, como óxido de alumínio, RCD, pó de vidro e cinzas da cana-de-açúcar, na composição do concreto a ser utilizado em BIPs. Com o intuito de fornecer uma visão geral a respeito dessas pesquisas, será colocada a Tabela 21, que representa o compilado de todas essas informações.

**Tabela 21** – Informações de trabalhos acadêmicos anteriores que utilizaram resíduos na composição do concreto em pavers.

<b>Autor do Trabalho de Pavimento Intertravado</b>	<b>Resíduo Utilizado</b>	<b>Nº de Traços Alternativos</b>	<b>Descrição dos Traços Alternativos</b>	<b>Resistência à Compressão Média das Peças (MPa)</b>	<b>Aplicação das Peças de Concreto</b>
SOUZA (2011)	Óxido de Alumínio (Sínter)	3	<p>→ Traço 1 – Substituição, em massa, de 10% de sínter em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 2 – Substituição, em massa, de 20% de sínter em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 3 – Substituição, em massa, de 30% de sínter em relação ao agregado miúdo</p>	<p>→ Traço de Referência = 10,30</p> <p>→ Traço 1 = 11,50</p> <p>→ Traço 2 = 11,90</p> <p>→ Traço 3 = 13,00</p> <p>*Nota: aos 7 dias</p>	Passesios de pedestres e ciclovias
SALES (2009)	Resíduo de Construção e Demolição (RCD)	8	<p>→ Traço 1 – Substituição, em massa, de 25% de RCD em relação ao agregado graúdo</p> <p>→ Traço 2 – Substituição, em massa, de 50% de RCD em relação ao agregado graúdo</p> <p>→ Traço 3 – Substituição, em massa, de 25% de RCD em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 4 – Substituição, em massa, de 25% de RCD em relação ao agregado miúdo e de 25% em relação ao graúdo</p>	<p>→ Traço de Referência = 24,80</p> <p>→ Traço 1 = 20,60</p> <p>→ Traço 2 = 21,40</p> <p>→ Traço 3 = 22,60</p> <p>→ Traço 4 = 15,70</p> <p>*Nota: aos 28 dias</p>	Calçadas para pedestres, praças e ciclovias

Autor do Trabalho de Pavimento Intertravado	Resíduo Utilizado	Nº de Traços Alternativos	Descrição dos Traços Alternativos	Resistência à Compressão Média das Peças (MPa)	Aplicação dos Blocos de Concreto
SALES (2009)	Resíduo de Construção e Demolição (RCD)	8	<p>→ Traço 5 – Substituição, em massa, de 25% de RCD em relação ao agregado miúdo e de 50% em relação ao graúdo</p> <p>→ Traço 6 – Substituição, em massa, de 50% de RCD em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 7 – Substituição de 50% de RCD em relação ao agregado miúdo e de 25% em relação ao graúdo</p> <p>→ Traço 8 – Substituição de 50% de RCD em relação ao agregado miúdo e de 50% em relação ao graúdo</p>	<p>→ Traço 5 = 9,30</p> <p>→ Traço 6 = 23,20</p> <p>→ Traço 7 = 8,50</p> <p>→ Traço 8 = 17,70</p> <p>*Nota: aos 28 dias</p>	Calçadas para pedestres, praças e ciclovias
LODI; GAMBIN; WEIT (2014)	Pó de vidro	3	<p>→ Traço 1 – Substituição, em massa, de 10% de pó de vidro em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 2 – Substituição, em massa, de 20% de pó de vidro em relação ao agregado miúdo</p> <p>→ Traço 3 – Substituição, em massa, de 30% de pó de vidro em relação ao agregado miúdo</p>	<p>→ Traço de Referência = 8,55</p> <p>→ Traço 1 = 6,95</p> <p>→ Traço 2 = 10,22</p> <p>→ Traço 3 = 7,31</p> <p>*Nota: aos 10 dias</p>	Calçadas para pedestres

Autor do Trabalho de Pavimento Intertravado	Resíduo Utilizado	Nº de Traços Alternativos	Descrição dos Traços Alternativos	Resistência à Compressão Média das Peças (MPa)	Aplicação dos Blocos de Concreto
PIRES (2015)	Garrafa PET	6	<p>→ Traço 1 – Substituição, em volume, de 10% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p> <p>→ Traço 2 – Substituição, em volume, de 20% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p> <p>→ Traço 3 – Substituição, em volume, de 30% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p> <p>→ Traço 4 – Substituição, em volume, de 40% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p> <p>→ Traço 5 – Substituição, em volume, de 50% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p> <p>→ Traço 6 – Substituição, em volume, de 60% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p>	<p>→ Traço de Referência = 58,25</p> <p>→ Traço 1 = 52,15</p> <p>→ Traço 2 = 45,55</p> <p>→ Traço 3 = 41,85</p> <p>→ Traço 4 = 28,60</p> <p>→ Traço 5 = 25,15</p> <p>→ Traço 6 = 15,90</p> <p>*Nota: aos 28 dias</p>	Calçadas para pedestres e estradas para veículos leves e veículos comerciais de linha
ZACARIAS NASCIMENTO; FORMAGINI (2008)	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar	2	<p>→ Traço 1 – Substituição, em massa, de 20% de cinzas em relação ao cimento</p> <p>→ Traço 2 – Substituição, em volume, de 20% de resíduo de PET em relação ao agregado graúdo e miúdo</p>	<p>→ Traço de Referência = 40,50</p> <p>→ Traço 1 = 35,50</p> <p>→ Traço 2 = 45,55</p> <p>*Nota: aos 28 dias</p>	Calçadas de pedestres sem a passagem de veículos comerciais de linha

Fonte: AUTOR (2017).

### **2.13 Cinzas e suas implicações no Meio Ambiente**

As usinas termelétricas à carvão geram toneladas de cinzas e a sua disposição inadequada pode causar a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas. De acordo com Magdalena e Fungaro (2012), o baixo nível de consumo das cinzas de carvão, para a fabricação e incorporação ao cimento por exemplo, se deve aos altos custos de transporte.

As cinzas de carvão mineral podem ser definidas como resíduos sólidos originados das indústrias termelétricas, e o potencial poluidor das mesmas, de acordo com Lopes (2011), depende da concentração e do grau de solubilização dos elementos tóxicos, como metais pesados, no ambiente natural. É importante a realização de ensaios ambientais, como o de lixiviação e o de solubilização, para que as cinzas de carvão sejam classificadas, quanto aos riscos potenciais ao meio externo.

Uma classificação adotada é a que está presente na NBR 10004/2004, em que os resíduos são classificados em dois tipos: classe I (perigosos), que inclui características, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, e classe II (não-perigosos), que pode ser subdividido em: classe II-A (não-inertes) e classe II-B (inertes). Os materiais inertes são apresentados como compostos que, em água destilada ou desionizada, não possuem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Já os materiais não-inertes possuem propriedades, como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Lopes (2011) e Barros (2015), através das pesquisas com cinza volante e pesada, classificaram-na em resíduos do tipo classe II-A. Apesar da classificação, Lopes (2011) informa que as cinzas ainda podem ser usadas na pavimentação, desde que, no ensaio de lixiviação, o qual representa o potencial de percolação e de infiltração das águas das chuvas no solo, os parâmetros estudados estejam dentro dos limites permitidos.

Com o objetivo de intensificar o processo de reciclagem, foi editada, em 2 de agosto de 2010, a lei específica de política nacional de resíduos sólidos, que veio a integrar a política nacional do meio ambiente. Essa tem o papel de instituir leis que resultem na regulamentação de sistemas de tratamento de todos os resíduos gerados e na instituição de responsabilidades bem definidas, segundo esses tipos de materiais (MAGDALENA; FUNGARO, 2005).

### **2.14 Considerações Finais**

Neste capítulo, foram apresentados alguns aspectos necessários para uma melhor compreensão da pesquisa desenvolvida. Na primeira parte da Revisão Bibliográfica, decidiu-se

dissertar a respeito do pavimento intertravado em si, em que, no início, foram colocados tópicos com um conteúdo mais teórico a respeito de essa tecnologia, como histórico, características gerais, classificações adotadas e aplicações em obras. Depois, foram abordados assuntos mais técnicos a respeito de esse tipo de pavimento, como os ensaios a serem realizados, a dosagem do concreto e o processo de dimensionamento e de construção do pavimento intertravado.

Na segunda parte da Revisão Bibliográfica, foi dado mais destaque às cinzas que seriam utilizadas na composição dos blocos de concreto. De um modo geral, foram abordados tópicos, em que foi dissertado a respeito das usinas termelétricas, que acabam gerando esse tipo de resíduo, as implicações das cinzas no meio ambiente, além das suas aplicações em peças de concreto.

No Capítulo 3, intitulado como Materiais e Métodos, são apresentados os materiais utilizados, o programa experimental e a metodologia adotada na presente pesquisa.

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Considerações Iniciais**

Este capítulo possui a finalidade de apresentar os materiais utilizados durante a pesquisa, junto com os métodos aplicados para a realização dos ensaios laboratoriais. Além do programa experimental, também foram feitas coletas dos materiais, que estão inseridas na metodologia, a qual está dividida em quatro partes.

Na primeira parte, partiu-se para as coletas dos materiais que seriam necessários para a fabricação do concreto a ser utilizado em BIPs, por exemplo, areia, brita e cimento. Aliado a isso, também foram retiradas quantidades de resíduos (cinzas) que pudessem suprir a demanda na composição do concreto. Procurou-se buscar esses materiais em empresas que estivessem inseridas, pelo menos, na RMF, a fim de que o processo de transporte de material fosse de menor custo

Na segunda etapa, as cinzas e os agregados componentes do concreto foram caracterizadas, além de terem sido realizados alguns ensaios ambientais nos resíduos. No caso do material alternativo, foram testados os limites de liquidez e de plasticidade, a densidade real, a composição granulométrica, o extrato lixiviado e solubilizado, já para as britas e as areias, foram determinadas a massa específica e unitária, além da granulometria dos materiais. Para as cinzas, os experimentos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN) da UFC, já para as britas e as areias, os ensaios foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Na terceira etapa, procedeu-se para a dosagem e moldagem do concreto a ser usado como BIP. Com relação às propriedades a serem testadas, preferiu-se executar os ensaios de resistência à compressão e de absorção de água. Além desses, foram avaliados os requisitos específicos de inspeção visual e de avaliação dimensional. Para efeito de informação, a produção do concreto foi feita no LMCC, enquanto a separação granulométrica das cinzas foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC.

Na quarta etapa, procedeu-se para o dimensionamento de um pavimento intertravado idealizado, com o intuito de serem determinados os volumes aproximados de cada material componente da estrutura. Com relação ao custo provável para a construção da obra, foram comparados os valores ao se utilizar os traços de referência e os alternativos para os BIPs.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Cinzas de Carvão Mineral

No caso deste trabalho, foram utilizadas cinzas pesadas (*bottom ash*) para a realização da pesquisa. Na Figura 32, é possível visualizar o aspecto visual de esse resíduo sem estar modificado.

**Figura 32** – Aspecto visual das cinzas coletadas.



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.2.2 Componentes Convencionais do Concreto

#### 3.2.2.1 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados consistiram das britas 12,5 mm e 19,0 mm. Esses valores representam a Dimensão Máxima Característica (DMC) do material e essa variável será abordada, posteriormente, nos ensaios de granulometria. Por fim, esses agregados podem ser visualizados nas Figuras 33 (a) e (b).

**Figura 33** – Aspecto visual das britas 12,5 mm (a) e 19,0 mm (b).



(a) Brita 12,5 mm.



(b) Brita 19,0 mm.

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.2.2.2 Agregado Miúdo

Os agregados miúdos utilizados consistiram da areia natural, que se originou da lavagem das britas, e da artificial, que foi resultado de um processo de britagem dos agregados graúdos. De um modo geral, a areia natural possui uma granulometria mais fina do que a artificial. Esses dois agregados podem ser visualizados nas Figuras 34 (a) e (b).

**Figura 34** – Aspecto visual das areias artificial (a) e natural (b).



(a) Areia artificial.



(b) Areia natural.

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.2.2.3 Cimento

O cimento usado foi o da classe CP V – ARI. Decidiu-se utilizar esse material em específico, pois o mesmo, pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, ao reagir com água, adquire elevadas resistências com maior velocidade, o que é indicado para a produção de BIPs. A Figura 35 ilustra esse tipo de material.

**Figura 35** – Aspecto visual do cimento CP V – ARI.



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.2.2.4 Água

A água usada foi coletada no LMCC da UFC e por se tratar de água de abastecimento público, de acordo com a NBR 15900 – 1/2009, a mesma é adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada.

## 3.3 Métodos

Como já foi escrito, adotou-se uma sequência metodológica composta de quatro etapas e definiu-se um programa experimental com diferentes ensaios a serem realizados nos materiais em estudo e nas misturas idealizadas.

### 3.3.1 Primeira Etapa Metodológica

#### 3.3.1.1 Coleta das Cinzas de Carvão Mineral

Na pesquisa, foram coletadas cerca de 500 kg de cinzas, as quais estavam presentes na Usina Termelétrica Energia Pecém, situada no CIPP. Este está localizado no município de São Gonçalo do Amarante, distante de 50 km em relação à Fortaleza.

Na Usina Termelétrica Energia Pecém, existem, atualmente, três módulos de armazenagem em que são despejadas as cinzas oriundas do processo de queima do carvão mineral. Os Módulos I e II, os quais estão representados nas Figuras 36 (a) e (b), respectivamente, estão, praticamente, preenchidos com cinzas. Já o Módulo III, construído em 2017, se encontra parcialmente preenchido, continuando a receber as cinzas provenientes da queima do carvão na usina. No caso, o resíduo foi coletado no Módulo II em sua superfície sem ter sido feita uma extração em profundidade e na chegada de esse material em Fortaleza, o mesmo foi colocado em uma série de baldes plásticos.

**Figura 36** – Módulos I (a) e II (b) de armazenagem das cinzas.



(a) Módulo I.



(b) Módulo II.

**Fonte:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (2015).

#### 3.3.1.2 Coleta dos Agregados Graúdos e Miúdos

Os agregados graúdos e miúdos foram coletados na empresa da OCS, localizada no município de Eusébio, situado na RMF. No caso, foram coletados cerca de 150 kg de areia natural e artificial cada uma, 30 kg de brita 19,0 mm e 90 kg de brita 12,5 mm. Nos terrenos dessa fábrica, existe uma área de mineração, ilustrada na Figura 37, em que, geralmente, são usados explosivos nas rochas, as quais são do tipo fonólito, que surgem após o resfriamento do magma expelido, em forma de lava, por vulcões. Assim, esses materiais se fragmentam e fornecem as britas e essas são

realocadas para unidades de moagem e de lavagem, ilustradas na Figura 38 (a), onde são originadas as areias. Por fim, esses materiais, por meio de uma série de esteiras, como na Figura 38 (b), são destinados a áreas específicas, formando pilhas de agregado graúdo, ilustradas nas Figuras 39 (a) e (b), e miúdo, como na Figura 39 (c). Na chegada desse material em Fortaleza, o mesmo foi colocado em uma série de sacos de rafia.

**Figura 37** – Área de mineração.



Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 38** – Unidade de moagem e de lavagem das britas (a), e equipamento com uma série de esteiras para transporte de material (b).



(a) Unidade de moagem e de lavagem das britas.



(b) Série de esteiras para transporte de material.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 39** – Pilhas de brita 12,5 mm (a), brita 19,0 mm (b) e areia natural (c).



(a) Pilhas de brita 12,5 mm.

(b) Pilhas de brita 19,0 mm.

(c) Pilha de areia natural.

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.1.3 Coleta do Cimento

O cimento do tipo CP V – ARI foi buscado, na quantidade de 160 kg, na empresa Cimento Apodi, localizada, também, no município de Eusébio, situado na RMF. No caso, o material estava em um Centro de Distribuição, contido em sacos de 40 kg cada. Na chegada de esse material em Fortaleza, o mesmo foi colocado em uma série de sacos plásticos.

## 3.3.2 Segunda Etapa Metodológica

### 3.3.2.1 Ensaios Realizados nas Cinzas

Os ensaios realizados nas cinzas pesadas foram seguidos, conforme a metodologia estabelecida em normas da ABNT e do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e, atualmente, denominado de Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A Tabela 22 apresenta as normas utilizadas para a realização de esses ensaios.

**Tabela 22** – Ensaios nas realizadas nas cinzas com as suas normas vigentes.

ENSAIOS	NORMAS VIGENTES
Preparação de Amostras para Ensaios de Caracterização	DNER – ME 041/1994
Análise Granulométrica	DNER – ME 051/1994
Densidade Real	DNER – ME 093/1994
Limite de Liquidez	DNER – ME 122/1994
Limite de Plasticidade	DNER – ME 082/1994
Extrato Lixiviado	ABNT NBR 10005/2004
Extrato Solubilizado	ABNT NBR 10006/2004

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.2.1.1 Preparação das Amostras

De um modo resumido, ao seguir os procedimentos da norma DNER – ME 041/1994, deve-se, primeiramente, secar o material em uma estufa para, assim, realizar o processo de quartearamento, como na Figura 40 (a), a fim de selecionar uma amostra representativa de, aproximadamente, 2000 g. Esse material, em seguida, deve ser destorroado no almofariz com a mão de gral, os quais são mostrados na Figura 40 (b), de maneira que evite reduzir o tamanho natural das partículas individuais das cinzas. Dessa forma, na Figura 41, são mostradas as quantidades que devem ser destinadas para cada ensaio de caracterização citado anteriormente. Uma observação importante é que a determinação da umidade higroscópica é feita durante o ensaio de análise granulométrica para o material passante na peneira de 2,0 mm.

**Figura 40** – Processo de quartearamento da amostra de cinzas (a) e almofariz com mão de gral (b)



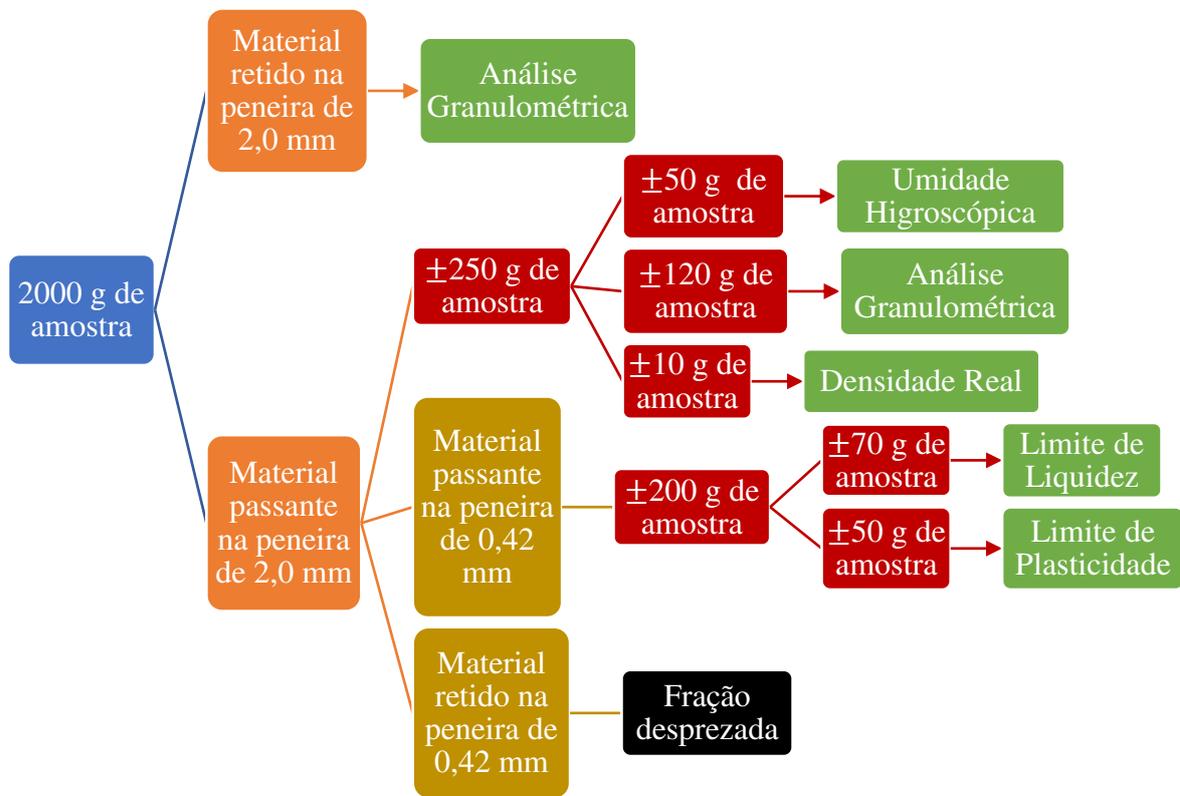
(a) Amostra quarteadada.



(b) Almofariz com mão de gral.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 41** – Fluxograma experimental da 2ª Etapa para as cinzas.



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.2.1.2 Execução da Análise Granulométrica e da Densidade Real

A análise granulométrica dos materiais foi realizada conforme norma DNER-ME 051/1994. De acordo com o procedimento, foi realizado o processo de peneiramento e de sedimentação. O material retido na peneira de 2 mm foi submetido ao peneiramento grosso com a utilização de peneiras com aberturas de 38,10 mm; de 25,40 mm; de 19,10 mm; de 12,27 mm; de 9,52 mm; de 4,76 mm e de 2,00 mm, enquanto que o material passante foi submetido ao peneiramento fino com as peneiras de 1,19 mm; 0,590 mm; 0,420 mm; 0,297 mm; 0,149 mm e 0,075 mm e utilizado no ensaio de sedimentação.

Para a análise granulométrica ser realizada, empregou-se a solução hexametáfosfato de sódio como defloculante e o densímetro, em que esse é mostrado na Figuras 42 (a). Também é importante citar que a umidade higroscópica foi determinada, nesse ensaio, de acordo com a Equação 3 através da média de, pelo menos, três medições, em que foram utilizadas amostras de 50 g cada.

Com relação à densidade real, esta é regida pela norma DNER – ME 093/1994 e para a determinação de essa variável, são aplicadas as Equações 4 e 5. Um aparelho necessário para a realização de esse ensaio é o picnômetro mostrado na Figura 42 (b).

**Figura 42** – Densímetro (a) e picnômetros (b).



(b) Densímetro.

(c) Picnômetro.

Fonte: AUTOR (2017).

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \text{ (Equação 3)}$$

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \text{ (Equação 4)}$$

$$D_{20} = k_{20} \times D_t \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

h: teor de umidade, em porcentagem;

$D_t$ : densidade real do solo a temperatura t;

$D_{20}$ : densidade real do solo a 20 °C;

$P_h$ : peso do material úmido (g);

$P_s$ : peso do material seco em estufa a 105 °C – 110 °C até constância de peso (g);

$P_1$ : peso do picnômetro vazio e seco (g);

$P_2$ : peso do picnômetro mais amostra (g);

$P_3$ : peso do picnômetro mais amostra e água (g);

$P_4$ : peso do picnômetro mais água (g);

$k_{20}$ : razão entre a densidade relativa da água à temperatura  $t$  e a densidade relativa da água a 20 °C.

### 3.3.2.1.3 Execução do Limite de Liquidez e de Plasticidade

O limite de liquidez é regido pela norma DNER – ME 122/1994. De acordo com o método de referência, é utilizado o aparelho de Casagrande, ilustrado na Figura 43, para se registrar o número de golpes em uma porção da amostra e é utilizada a Equação 3 para se calcular a umidade de essa porção. São lançados, pelo menos, três pontos em um sistema de eixos ortogonais para o traçado de uma reta, no qual, na ordenada, em escala aritmética, são representados os teores de umidade e na abscissa, em escala logarítmica, os correspondentes números de golpes. O limite de liquidez, expresso em teor de umidade, é o valor da ordenada do ponto da reta correspondente à abscissa de 25 golpes.

Com relação ao limite de plasticidade, de acordo com a norma DNER – ME 082/1994, molda-se uma porção de amostra até o formato de um cilindro padrão e este, ao ser fragmentado, tem os seus pedaços transferidos para um recipiente, a fim de ser determinada a umidade pela Equação 3. O limite de plasticidade é expresso pela média de, pelo menos, três teores de umidade e, por fim, calcula-se o índice de plasticidade do material pela diferença entre o limite de liquidez e o de plasticidade.

**Figura 43** – Aparelho de Casagrande.



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.2.1.4 Extrato Lixiviado e Solubilizado

Nos dois ensaios ambientais, serão determinadas as concentrações de compostos presentes nos resíduos, em que, no extrato solubilizado, é usada a água destilada para entrar em contato com as cinzas. Já no extrato lixiviado, são utilizadas soluções de extração, as quais podem conter ácido acético glacial e nítrico, e água destilada. Dependendo dos resultados desses ensaios, os resíduos podem ser classificados na Classe I – Perigosos ou na Classe II – Não perigosos, em que essa é subdividida em materiais inertes (II B) e não inertes (II A).

### 3.3.2.2 Ensaios Realizados nos Agregados

Os ensaios realizados nos agregados foram seguidos conforme a metodologia estabelecida em normas da ABNT. A Tabela 23 apresenta as normas utilizadas para a realização de esses ensaios.

**Tabela 23** – Ensaios realizados nos agregados com as suas normas vigentes.

ENSAIOS	NORMAS VIGENTES
Massa Específica para Agregado Graúdo	ABNT NBR NM 53/2009
Massa Específica para Agregado Miúdo	ABNT NBR NM 52/2003
Massa Específica para Cimento	ABNT NBR 16605/2017
Massa Unitária	ABNT NBR NM 45/2006
Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248/2003

Fonte: AUTOR (2017).

#### 3.3.2.2.1 Preparação da Areia Natural

Antes da execução dos ensaios de caracterização, percebeu-se que a areia natural continha um considerável número de torrões, o que pode ser explicado pela significativa quantidade de finos presentes nesse material, em que os mesmos, por meio da coesão, se aderiram, devido à presença de umidade no local de coleta do agregado miúdo. Diante disso, foi feito o processo de destorroamento, para que a areia voltasse a sua forma original, assim, o aspecto visual do material, antes e após esse procedimento, pode ser visualizado nas Figuras 44 (a) e (b), respectivamente.

**Figura 44** – Aspecto visual da areia natural antes (a) e após o destorroamento (b).



(a) Areia natural não destorroada.



(b) Areia natural destorroada.

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.2.2 Massa Específica e Unitária

Para os agregados graúdos, seguiram-se os procedimentos da norma ABNT NBR NM 53/2009 para a determinação da massa específica dos materiais, em que a brita 19,0 mm foi submersa em água por 24 horas, conforme é mostrado na Figura 45 (a), depois pesada na condição saturada com superfície seca, imersa em água e totalmente seca. No geral, são aplicadas as Equações 6, 7, 8 e 9 para a determinação das variáveis, sendo o resultado a média de duas determinações, e uma observação importante é a consideração de que as britas 19,0 mm e 12,5 mm, por terem se originado da mesma rocha em uma determinada área de mineração, possuem a mesma massa específica. Com relação aos agregados miúdos, seguiram-se os procedimentos da norma ABNT NBR NM 52/2003 para a determinação da mesma incógnita, em que ocorre a imersão em água por 24 horas, mas a questão é que essas areias possuem um teor de finos significativo, apresentando uma consistência pastosa depois de misturadas com água de acordo com as Figuras 46 (a) e (b) e, chegando ao ponto do líquido apresentar uma coloração diferenciada nas Figuras 45 (b) e (c). Dessa forma, visto que o procedimento atual era inadequado, procedeu-se para uma adaptação do procedimento da norma ABNT NBR 16605/2017, que trata, especificamente, da massa específica do Cimento Portland e de outros materiais em pó. No caso, a variável é calculada pela Equação 10 para uma única determinação e um aparelho importante para a realização do ensaio é o frasco volumétrico de *Le Chatelier*, que pode ser visualizado na Figura 47.

**Figura 45** – Brita 19,0 mm (a), areia natural (b) e areia artificial (c) imersos em água depois de 24 horas.



(a) Brita 19,0 mm depois da imersão em água.



(b) Areia natural depois da imersão em água.



(c) Areia artificial depois da imersão em água.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 46** – Consistência pastosa das areias natural (a) e artificial (b).



(a) Areia natural com consistência pastosa.



(b) Areia artificial com consistência pastosa.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 47** – Frasco volumétrico de *Le Chatelier*.



Fonte: AUTOR (2017).

$$d = \frac{m}{m - m_a} \text{ (Equação 6)}$$

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \text{ (Equação 7)}$$

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \text{ (Equação 8)}$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \text{ (Equação 9)}$$

$$\rho = \frac{m'}{V} \text{ (Equação 10)}$$

Onde:

d: massa específica do agregado seco ( $\text{g/cm}^3$ );

$d_s$ : massa específica do agregado na condição saturado superfície seca ( $\text{g/cm}^3$ );

$d_a$ : massa específica aparente do agregado seco ( $\text{g/cm}^3$ );

A: absorção de água, em porcentagem;

$\rho$ : massa específica do material ensaiado ( $\text{g/cm}^3$ );

m: massa ao ar da amostra seca (g);

$m_s$ : massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$m_a$ : massa em água da amostra na condição saturada superfície seca (g);

$m'$ : massa do material ensaiado (g);

$V$ : volume deslocado pela massa do material ensaiado ( $\text{cm}^3$ ).

Com relação à massa unitária, para todos os agregados, foi seguido o procedimento da norma ABNT NBR NM 45/2006, referente ao Método C, em que a variável é calculada de acordo com a Equação 11 em, pelo menos, três determinações. No caso dos agregados graúdos, é possível a determinação da massa unitária na condição saturada e superfície seca, da massa específica relativa do agregado seco e do índice de volume de vazios, segundo as Equações 12, 13 e 14. Uma observação importante é que a variável  $d_1$  a seguir se refere à massa específica relativa do agregado seco. Um equipamento indispensável para esse ensaio é o recipiente cilíndrico de cobre com capacidade de 15 litros, que é mostrado na Figura 48.

**Figura 48** – Recipiente cilíndrico de cobre.



Fonte: AUTOR (2017).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar}}{V} \quad (\text{Equação 11})$$

$$\rho_{as} = \rho_{ap} \times \left[ 1 + \frac{A}{100} \right] \quad (\text{Equação 12})$$

$$d_1 = \frac{d}{p_w} \quad (\text{Equação 13})$$

$$E_V = \frac{100 \times [(d_1 \times p_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \times p_w} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$\rho_{ap}$ : massa unitária do agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{as}$ : massa unitária do agregado na condição saturada e superfície seca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$d_1$ : massa específica relativa do agregado seco;  
 $E_v$ : índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;  
 $m_{ar}$ : massa do agregado (kg);  
 $V$ : volume do recipiente ( $m^3$ );  
 $A$ : absorção, em porcentagem, conforme a Equação 9;  
 $d$ : massa específica do agregado seco, conforme a Equação 6 ( $kg/m^3$ );  
 $\rho_w$ : massa específica de água ( $kg/m^3$ ).

### 3.3.2.2.3 Composição Granulométrica

A composição granulométrica dos materiais foi realizada conforme norma ABNT NBR NM 248/2003. De acordo com o procedimento, foi realizado o processo de peneiramento, em que são utilizadas duas amostras e o resultado final consiste na média das porcentagens retidas em cada peneira, além de também serem determinadas a DMC e o Módulo de Finura (MF). O MF é determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 e quanto maior esse valor, mais granular é o material. Já a DMC corresponde à abertura nominal, em m

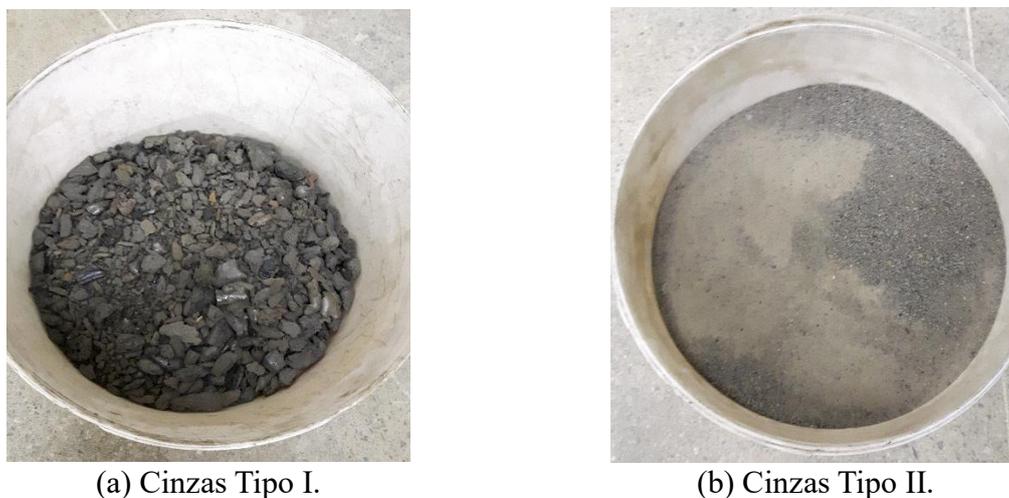
ilímetros, da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. As malhas utilizadas, para o ensaio, têm abertura de 25,0 mm; 19,0 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm.

## 3.3.3 Terceira Etapa Metodológica

### 3.3.3.1 Preparação das Cinzas

No processo de dosagem dos traços alternativos de concreto com a adição de cinzas, decidiu-se fazer uma separação granulométrica do resíduo em três partes, em que foram usadas as peneiras de 19,0 mm e de 2,0 mm. Primeiramente, o material retido na peneira 19,0 mm foi descartado para fins de dosagem, devido a sua granulometria grosseira e, em seguida, a porção passante na peneira de 19,0 mm e retido na de 2,0 mm foi armazenada para ser inserida na composição dos agregados graúdos e, por fim, a quantidade passante na peneira de 2,0 m também foi preservada para substituir, em parte, os agregados miúdos. As Figuras 49 (a) e (b) mostram o aspecto visual de duas porções das cinzas citadas anteriormente.

**Figura 49** – Aspecto visual da cinza passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm (Tipo I) (a) e da cinza passante na peneira de 2,0 mm (Tipo II) (b).



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.3.2 Confeção dos corpos-de-prova de concreto

Foi utilizado um traço de referência em massa da empresa da OCS que é especializada em fabricar blocos intertravados e, no caso, esse traço é usado, para que o concreto atinja uma resistência de 35 MPa aos 28 dias de cura do concreto, sendo o mesmo 1,00 : 2,33 : 2,33 : 1,97 : 0,45 : 0,73, representando, respectivamente, cimento, areia natural, areia artificial, brita 12,5 mm, brita 19,0 mm e relação água/cimento. Com a preparação de esse concreto na betoneira, a qual está representada na Figura 50 (a), percebeu-se que o mesmo era bastante seco e não apresentava uma trabalhabilidade razoável, o que era contornado na empresa, devido à presença da máquina de vibro-prensa. Nas condições do laboratório, decidiu-se colocar mais água, pois segundo Fernandes (2016), na curva de Abrams, que relaciona a resistência à compressão com a relação água/cimento, ao contrário do concreto plástico, o tipo seco aumenta a sua resistência com o acréscimo de água até certo ponto (Figura 51) e isso acontece, pois a mistura mais úmida possui uma facilidade maior em ser compactada, o que ocasiona menor quantidade de vazios no interior do concreto em virtude de uma melhor acomodação das partículas. Dessa forma, o traço de referência foi modificado para 1,00 : 2,33 : 2,33 : 0,45 : 1,97 : 0,85 e nas Figuras 50 (b) e (c), é possível visualizar o concreto antes e depois da adição extra de água.

**Figura 50** – Betoneira tampada (a), concreto antes (b) e após (c) a adição extra de água.



(a) Betoneira tampada.



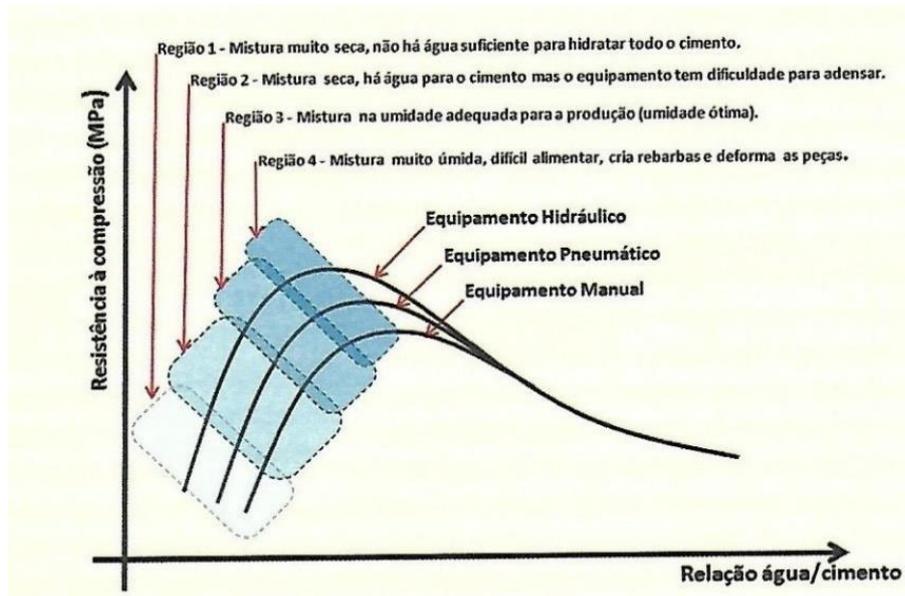
(b) Concreto antes da adição extra de água.



(c) Concreto depois da adição extra de água.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 51** – Curva de Abrams para concreto seco.

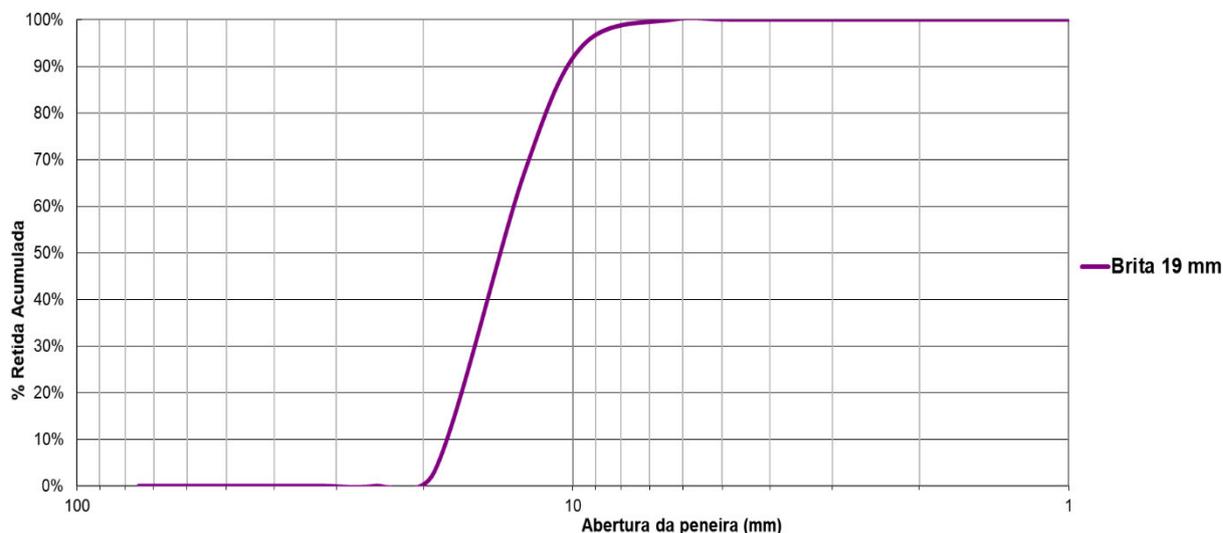


Fonte: FERNANDES (2016).

Para a avaliação do desempenho do concreto com a inclusão das cinzas pesadas, foram feitas duas substituições de materiais, com base nas curvas granulométrica dos agregados, do resíduo, sendo a curva da brita 19,00 mm mostrada na Figura 52 como um exemplo. A cinza passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm, denominada de Tipo I, substituiu, em 10%, a massa de brita 19,0 mm, enquanto a cinza passante na peneira de 2,0 mm, intitulada de Tipo II, substituiu, em 10%, a massa de areia (50% natural mais 50% artificial em massa). Isso pode ser conferido na Tabela 24 e é importante citar o fato de que no processo de moldagem do concreto

do 3º Traço, foi necessário colocar um pouco mais de água, a fim de que o produto final fosse mais trabalhável, com isso, a relação água/cimento foi de 0,94.

**Figura 52** – Curva Granulométrica da Brita 19,0 mm.



Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 24** – Variação da quantidade de agregados naturais e de resíduos por traço.

TRAÇO	AREIA		BRITA 19,0 mm		Relação água/cimento
	Original (%)	Resíduo (%)	Original (%)	Resíduo (%)	
1º	100	0	100	0	0,85
2º	100	0	90	10	0,85
3º	90	10	100	0	0,94

Fonte: AUTOR (2017).

Para cada traço, o concreto foi produzido em quantidade suficiente para doze moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e seis fôrmas para pavers do Tipo I com dimensões de 10 cm : 20 cm : 6 cm (largura : comprimento : espessura), totalizando um volume de trinta litros aproximadamente. Os consumos de materiais por m<sup>3</sup> de concreto, para essa produção, estão disponíveis na Tabela 25, já o aspecto visual das fôrmas está ilustrado nas Figuras 53 (a) e (b).

**Tabela 25** – Massas utilizadas dos materiais na composição dos traços.

TRAÇO	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Natural (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Artificial (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 12,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 19,0 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza Tipo I (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza Tipo II (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
1º	279,95	652,43	652,43	551,34	126,10	0	0	238,49
2º	279,95	652,43	652,43	551,34	113,49	12,61	0	238,49
3º	277,16	581,33	581,33	545,84	124,84	0	129,18	261,56

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 53** – Aspecto visual do molde cilíndrico e da fôrma para paver.

(a) Molde cilíndrico.



(b) Fôrma para paver.

Fonte: AUTOR (2017).

Na confecção dos corpos-de-prova cilíndricos, seguiu-se o procedimento da norma ABNT NBR 5738/2015, na qual o processo de adensamento do concreto pode ser manual ou mecânico a depender do abatimento do tronco de cone (*slump test*), o qual é regido pela norma ABNT NBR NM 67/1998. Caso o processo seja manual, serão desferidos 12 golpes, através da haste de compactação na Figura 54 (a), para duas camadas, enquanto que, para o processo mecânico, só é necessária uma camada com o uso do aparelho vibrador, ilustrado na Figura 54 (b). Com relação à confecção dos pavers, o ideal seria o uso de uma máquina de vibro-prensa, a qual consegue compactar o concreto mesmo em estado seco, porém como o equipamento não encontrava-se disponível nos laboratórios da UFC, decidiu-se adaptar esse processo ao se seguir a norma ABNT NBR 13276/2016. No caso, é utilizada uma mesa para índice de consistência, que está presente na Figura 54 (c), para a aplicação de trinta golpes em três camadas cada, levando cerca de trinta segundos para cada camada.

**Figura 54** – Haste de compactação (a), aparelho vibrador (b) e mesa para índice de consistência (c).



(a) Haste de compactação.



(b) Aparelho vibrador.



(c) Mesa para índice de consistência.

Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.3.3 Ensaios Realizados no Concreto

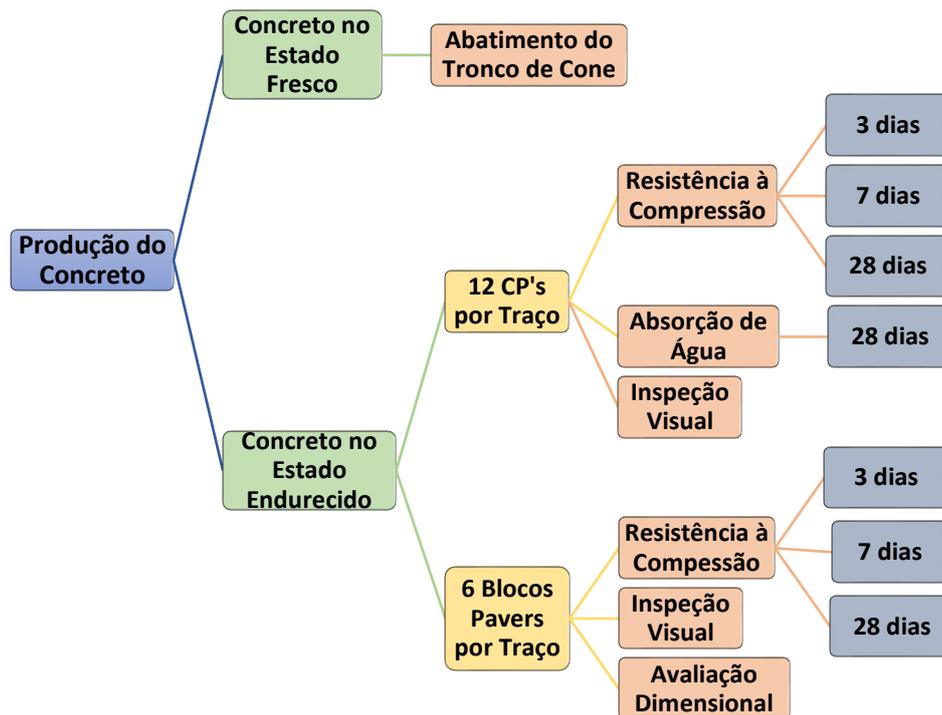
Os ensaios realizados nos agregados foram seguidos, conforme o método estabelecido em normas da ABNT. A Tabela 26 apresenta as normas utilizadas para a realização de esses ensaios e a Figura 55 apresenta um fluxograma que informa a sequência executada de esses procedimentos.

**Tabela 26** – Ensaios no concreto com as suas normas vigentes.

ENSAIOS	NORMAS VIGENTES
Resistência à compressão para corpo-de-prova cilíndrico	ABNT NBR 5739/2007
Resistência à compressão para bloco	ABNT NBR 9781/2013
Absorção de água para corpo-de-prova cilíndrico e para bloco	ABNT NBR 9781/2013
Avaliação dimensional para bloco	ABNT NBR 9781/2013
Inspeção visual para corpo-de-prova cilíndrico e para bloco	ABNT NBR 9781/2013
Abatimento do tronco de cone ( <i>slump test</i> ) no concreto fresco	ABNT NBR NM 67/1998

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 55** – Fluxograma experimental da 3ª Etapa para o concreto.



Fonte: AUTOR (2017).

### 3.3.3.3.1 Procedimentos no Concreto Fresco

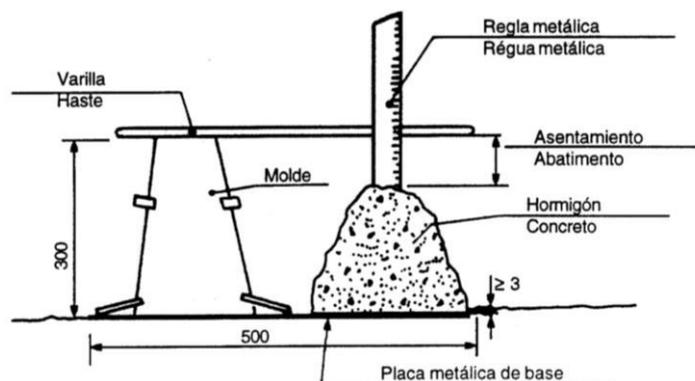
Na produção do concreto no estado fresco, para que possa existir o controle de qualidade do mesmo, um dos procedimentos a se seguir é o descrito na norma ABNT NBR NM 67/1998, que trata do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.

No concreto dosado com o traço de referência, foi preciso aumentar a relação água/cimento para conferir uma maior trabalhabilidade para o material, então, decidiu-se, para efeito de teste, aplicar o *slump test*. Na execução do ensaio, é colocado o molde de tronco de cone, o qual está presente na Figura 56 (a), sobre uma placa metálica e, assim, o concreto é despejado no interior do aparelho, em que cada camada de material é compactada com 25 golpes até o total preenchimento do molde. Após a retirada deste, é medido o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do recipiente e do corpo-de-prova desmoldado, conforme a Figura 56 (b).

**Figura 56** – Molde de tronco de cone (a) e medida do abatimento com dimensões em milímetros (b).



(a) Molde de tronco de cone.



(b) Medida do abatimento com dimensões em mm.

Fonte: AUTOR (2017).

Uma observação importante a ser feita a respeito do concreto no estado fresco é que, pelo mesmo se tratar de um tipo seco, é recomendável a realização do ensaio de determinação da consistência do concreto pelo consistômetro “VeBe”, regido pela norma DNIT 064/2004 – ME. Esse método mede o tempo necessário, para que um tronco de cone de concreto fresco amolde-se a um cilindro, sob ação de vibração padronizada. O problema é que esse aparelho se encontra, somente, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) no Campus de Fortaleza e por questões de tempo com o transporte de equipamento e material entre a UFC e o IFCE, decidiu-se não realizar esse ensaio.

### 3.3.3.2 Procedimentos no Concreto Endurecido

No concreto em estado endurecido, foram feitas uma série de ensaios, tanto nos corpos-de-prova cilíndricos, como nos blocos pavers. A começar pela resistência à compressão, os corpos-de-prova cilíndricos e os blocos pavers foram submetidos aos ensaios regidos pelas normas ABNT NBR 5739/2007 e ABNT NBR 9781/2013, respectivamente. Antes do rompimento em uma máquina de prensa, as amostras foram submetidas à condição de cura por submersão em água por 3, 7 e 28 dias, sendo que a Tabela 27 mostra a distribuição das peças para cada período citado, onde pode-se observar que foram produzidos um total de nove corpos de prova cilíndricos (três para cada traço) e seis blocos pavers (dois para cada traço).

Pode-se, também, ressaltar que a Equações 15 foi aplicada, a fim de se calcular a resistência individual para corpos-de-prova cilíndricos, assim, em seguida, foi determinado o valor médio. Observe-se que as Equações 16 e 17 foram usadas para se obter a resistência característica

para blocos pavers. É importante destacar que os requisitos para esse ensaio podem ser visualizados na Tabela 3 na seção 2.6.

**Tabela 27** – Distribuição das peças de concreto de acordo com o tempo de cura.

Período de Cura antes do Rompimento	Nº de corpos-de-prova cilíndricos por Traço	Nº de blocos pavers por Traço
3 dias	3	2
7 dias	3	2
28 dias	3	2

Fonte: AUTOR (2017).

$$f_c = \frac{4 \times f}{\pi \times D^2} \text{ (Equação 15)}$$

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \text{ (Equação 16)}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \text{ (Equação 17)}$$

Onde:

$f_c$ : resistência à compressão (MPa);

$f_{pk,est}$ : resistência característica estimada à compressão (MPa);

$s$ : desvio-padrão da amostra (MPa);

$f$ : força máxima alcançada (N);

$D$ : diâmetro do corpo-de-prova (mm);

$f_p$ : resistência média dos blocos (MPa);

$t$ : coeficiente de Student em função do tamanho da amostra, conforme Tabela 28;

$f_{pi}$ : resistência individual dos blocos (MPa);

$n$ : número de blocos da amostra.

**Tabela 28** – Coeficiente de Student em função do número de blocos.

Coeficiente de Student (t)	1,376	1,061	0,978	0,941	0,920	0,906	0,896	0,889	0,883
Número de blocos da amostra (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fonte: ABNT NBR 9781/2013. Adaptado pelo autor.

Com relação à absorção de água, os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos ao ensaio regido pela norma ABNT NBR 9781/2013, sendo o procedimento uma adaptação. Aos 28 dias de cura do concreto, foram destinadas três amostras por traço para esse ensaio e foi aplicada a Equação 9 na seção 3.3.2.2.2, a fim de se calcular a absorção para corpos-de-prova cilíndricos, assim, em seguida, foi determinado o valor médio. Os requisitos para esse ensaio, também, podem ser visualizados na Tabela 3 na seção 2.6.

Foram realizados, nos blocos pavers, os ensaios de inspeção visual e de avaliação dimensional, que são regidos pela norma ABNT NBR 9781/2013. Com relação às dimensões, as peças devem apresentar um comprimento nominal máximo de 250 mm, uma largura de no mínimo 97 mm e a uma espessura mínima de 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm, com tolerância de 3 mm para cada medida, além de um Índice de Forma (IF) menor ou igual a 4. Na inspeção, ocorre a investigação visual dos blocos, visando a identificação de defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

Por fim, foi realizada uma análise estatística dos resultados de resistência à compressão e de absorção de água, através do software Statistica 7.0. Através da análise ANOVA e do teste de Duncan, pretendia-se descobrir se a substituição dos agregados pelas cinzas influenciou, significativamente, sobre os resultados dos ensaios e se esses diferem de forma considerável ao se comparar os traços analisados. É importante frisar que essa análise é feita com um grau de confiança de 95%.

#### **3.3.4 Quarta Etapa Metodológica**

Na quarta etapa, depois de obtidos os resultados dos ensaios mecânicos para as amostras de concreto, procede-se para o dimensionamento de um pavimento intertravado a ser construído na área de estacionamento do Bloco do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil (DEECC), localizado no Campus do Pici da UFC. Esse terreno possui uma área total de, aproximadamente, 1624 m<sup>2</sup>, sendo composto por duas partes menores de 280 m<sup>2</sup> e de 1344 m<sup>2</sup>, conforme pode ser visualizado na Figura 57.

**Figura 57 – Área de estacionamento do DEECC.**



Fonte: GOOGLE MAPS (2017).

Foi realizado um pré-dimensionamento pelo procedimento empírico A da ABCP, explicado na seção 2.8.1, pois, por se tratar de uma área de estacionamento, onde, geralmente, trafegam veículos de pequeno porte, como automóveis e motocicletas, decidiu-se que o tráfego atuante na região seria leve com o número “N” igual a  $3 \times 10^5$ , em que esse valor foi considerado de acordo com a Tabela 3 na página 39. Com relação às outras camadas do pavimento, como a sub-base, adotou-se os materiais considerados no trabalho de Vasconcelos (2016) que, justamente, avaliou o emprego de cinza leve (*fly ash*) no solo utilizado em camadas granulares.

Depois do dimensionamento, foram determinados os volumes aproximados de cada material utilizado nas camadas e, por fim, realizou-se uma avaliação econômica da estrutura de pavimento idealizada. No caso, foram comparados os custos do pavimento intertravado ao se utilizar o traço de referência e os alternativos.

### 3.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram colocadas as descrições dos materiais utilizados, junto com os métodos aplicados neste trabalho. No caso, foram seguidas três etapas metodológicas, as quais representavam o nível de avanço da pesquisa, em que foi realizado, primeiramente, a coleta de materiais em empresas específicas, depois foram realizados os ensaios de caracterização nos agregados e nas cinzas e, por fim, foram executados os ensaios no concreto produzido pela junção dos materiais coletados.

No Capítulo 4, intitulado como Resultados e Discussão, são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados, junto com a discussão dos mesmos, para que eles sejam avaliados devidamente os motivos da obtenção de determinados resultados.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados adquiridos através dos ensaios realizados durante o programa experimental. Primeiramente, serão colocados e discutidos os resultados decorrentes dos ensaios de caracterização, os quais foram feitos nas cinzas pesadas e nos agregados. Em seguida, serão expressos os valores obtidos com os ensaios executados no concreto, tanto no estado fresco, como no endurecido, para que se possa investigar a influência que a cinza pode ter ao ser incorporada na mistura dos materiais convencionais e, assim, analisar a viabilidade do emprego de esse resíduo.

### 4.2 Resultados e Discussão dos Ensaios de Caracterização e Ambientais – Segunda Etapa

Nessa etapa, os ensaios realizados nas cinzas determinaram a densidade real, os limites de liquidez e de plasticidade, a curva granulométrica e a umidade higroscópica. Com relação aos agregados, foram determinadas as massas específica e unitária, além da distribuição granulométrica. Por fim, serão apresentados os resultados referentes à mistura dos agregados com as cinzas, para que se possa avaliar os efeitos desses em um todo.

#### 4.2.1 Resultados das Cinzas

Para a determinação da densidade real, foram aplicadas as Equações 4 e 5, presentes na seção 3.3.2.1.2. O resultado do ensaio está exposto na Tabela 29.

**Tabela 29** – Determinação da densidade real das cinzas pesadas pelo método do picnômetro.

AMOSTRA	PICNÔMETRO	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	Dt	$\Delta Dt$	Dt médio	T <sub>ÁGUA</sub> (°C)	k <sub>20</sub>	D <sub>20</sub>
1	26	52,78	62,91	106,72	101,06	2,266	0,009	2,35	27	0,9983	2,35
	4	41,92	51,97	99,29	93,52	2,348					
	5	26,19	36,30	83,39	77,57	2,357					
	2	35,09	45,20	91,45	85,76	2,287					

Fonte: AUTOR (2017).

É possível perceber que foram utilizados quatro picnômetros durante o ensaio e, devido à diferença entre duas determinações de Dt, nos picnômetros 4 e 5, não ter sido maior do que 0,009, foi possível fazer a média dos dois valores. A água utilizada no ensaio estava a 27 °C e,

ao utilizar o fator de correção  $k_{20}$  para referenciar o valor à água à temperatura de 20°C, achou-se a densidade real final de 2,35. O interessante é que esse valor foi o mesmo encontrado por Vasconcelos (2016) em um dos pontos de amostragem superficial das cinzas leves no Módulo I da UTP. Para efeito de informação, essa variável expressa a relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas, ou seja, refere-se ao volume de sólidos sem considerar a porosidade.

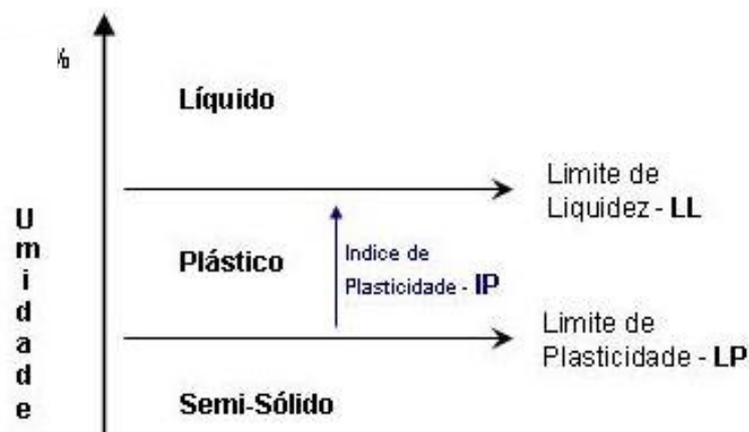
Com relação aos Limites de Liquidez e de Plasticidade, esses não puderam ser determinados. Uma explanação mais detalhada pode ser visualizada na Tabela 30.

**Tabela 30** – Determinação do índice de plasticidade das cinzas

LIMITE DE LIQUIDEZ		LIMITE DE PLASTICIDADE
Nº DE GOLPES	4	Como não foi possível formar um cilindro de diâmetro de 3 mm através da rolagem da cinza, em que esta se desagregava rapidamente, não pôde ser descoberto o limite de plasticidade.
<p><b>MÉTODO DE REFERÊNCIA</b> - Devido ao fato do número de golpes, no caso 4, ter sido inferior ao número necessário, que são 25, não se pôde determinar o limite de liquidez.</p> <p><b>MÉTODO EXPEDITO</b> - Devido ao fato do número de golpes, no caso 4, ter sido inferior ao número mínimo que são 20, não se pôde determinar o limite de liquidez.</p>		
LIMITE DE LIQUIDEZ (LL): Indeterminado		
LIMITE DE PLASTICIDADE (LP): Indeterminado		
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP): NP (NÃO PLÁSTICO)		

Fonte: AUTOR (2017).

Devido à impossibilidade de se obter os valores, o Índice de Plasticidade, definido como a diferença entre o Limite de Liquidez e o de Plasticidade, não pôde ser calculado, o que caracteriza a cinza pesada como não plástica, assim, pode-se escrever que as amostras do resíduo não apresentam características plásticas para a execução dos ensaios. Nos estudos de Farias (2005), Lopes (2011) e Barros (2015), nos quais houve a análise de cinzas leves e pesadas, os resultados dos limites de consistência encontrados demonstraram, também, a não plasticidade dos resíduos, dada a característica granular do material. Como complemento, pode-se colocar que o Limite de Liquidez delimita a fronteira entre o estado líquido e plástico do material, já o de Plasticidade delimita o estado plástico do semissólido, conforme a Figura 58.

**Figura 58** – Posição relativa dos Limites de Atterberg e do Índice de Plasticidade.

Fonte: SANTANA (2007).

Na determinação da umidade higroscópica, essa foi calculada durante o ensaio de análise granulométrica, por meio do uso da Equação 3 na seção 3.3.2.1.2. Dessa forma, obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 31.

**Tabela 31** – Determinação da umidade higroscópica das cinzas.

<b>Dados para o cálculo da Umidade Higroscópica</b>			
Nº Cápsula	17	10	85
Solo + Tara + Água (g)	52,43	56,70	52,81
Solo + Tara (g)	52,38	56,66	52,77
Tara (g)	14,02	13,12	15,18
Solo + Água → Ph (g)	38,41	43,58	37,64
Solo → Ps (g)	38,36	43,54	37,60
Umidade → h (%)	0,11	0,09	0,10
<b>MÉDIA DAS UMIDADES (%)</b>	<b>0,10</b>		

Fonte: AUTOR (2017).

Pode-se visualizar que o valor final é de 0,10%, mostrando, dessa forma, que a cinza possui uma massa seca, praticamente, idêntica ao da massa com umidade residual. Esta permanece na amostra, mesmo a deixando secar por um longo período, o que caracteriza uma umidade que o material exibe quando seco ao ar.

Com relação aos ensaios ambientais de extrato lixiviado e solubilizado, foram detectadas as concentrações de alguns compostos nas cinzas *in natura*, como fluoreto (F<sup>-</sup>), cloreto (Cl<sup>-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Muitos dessas substâncias, devido à toxicidade, podem oferecer riscos ao meio ambiente, o que aumenta a importância da realização desses ensaios e, no caso, será colocada a Tabela 32, que mostra os resultados do extrato lixiviado. As concentrações limites dos compostos foram retirados do Anexo F da norma ABNT NBR 10004/2004 e é

importante frisar que, para esses ensaios, as análises foram referentes a um só ponto de extração de cinzas e ocorreram, apenas, para os ânions, devido às limitações do equipamento utilizado.

**Tabela 32** – Resultados do extrato lixiviado.

	<b>Fluoreto</b> F <sup>-</sup> <b>(mg/L)</b>	<b>Cloreto</b> Cl <sup>-</sup> <b>(mg/L)</b>	<b>Nitrato</b> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <b>(mg/L)</b>	<b>Sulfato</b> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <b>(mg/L)</b>
Amostra	287,68	21,73	1,90	62,76
Limite	150,00	–	–	–

Fonte: AUTOR (2017).

Pode-se perceber que, dos quatro compostos detectáveis no ensaio de extrato lixiviado, somente um possui valor limite presente na norma, e, no caso, a cinza pesada apresenta uma concentração do ânion fluoreto acima do permitido, o que, teoricamente, classifica o resíduo como Classe I (perigoso). É importante destacar que, segundo Barros (2015), o excesso de fluoreto pode causar vários danos ao organismo humano, como fluorose dentária, queda de cabelos crônica, varizes, catarata, dentre outros problemas de saúde. Esse resultado mostra a necessidade de cuidados no que se refere à destinação final dessas cinzas e à sua utilização, mas a questão é que precisam ser feitas algumas considerações, como o fato de que, nos dois traços alternativos, os resíduos estão substituindo os agregados convencionais em teores de 10%, o que não é uma porcentagem, relativamente, significativa. Isso pode fazer que o concreto, como um todo, não seja prejudicado de forma excessiva pelo grau de periculosidade das cinzas e é preciso considerar a possibilidade de que, devido ao fenômeno de encapsulamento, em que as partículas dos resíduos são envolvidas pelo concreto, essas frações podem apresentar uma diminuição na velocidade de lixiviação das substâncias nocivas. Posto isso, será colocada a Tabela 33, que expressa os resultados do extrato solubilizado, em que as concentrações limites dos compostos foram extraídos do Anexo G da norma ABNT NBR 10004/2004.

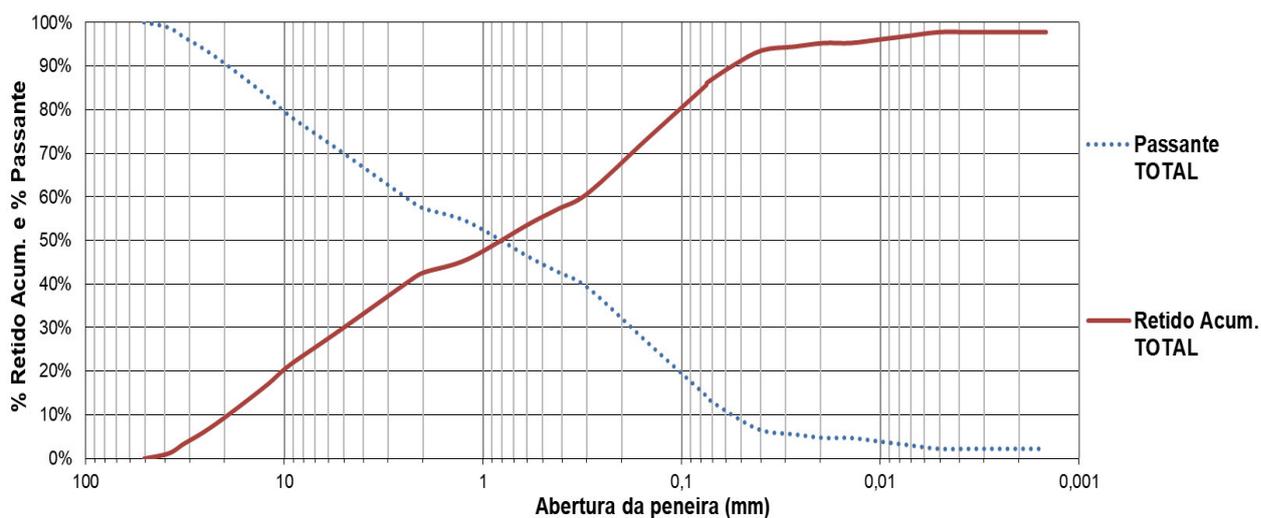
**Tabela 33** – Resultados do extrato solubilizado.

	<b>Fluoreto</b> <b>F<sup>-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Cloreto</b> <b>Cl<sup>-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Nitrito</b> <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Brometo</b> <b>Br<sup>-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Nitrato</b> <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Fosfato</b> <b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b> <b>(mg/L)</b>	<b>Sulfato</b> <b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> <b>(mg/L)</b>
Amostra	1,74	8,04	0,58	1,59	1,06	2,76	426,63
Limite	1,50	250,00	–	–	10,00	–	250,00

Fonte: AUTOR (2017).

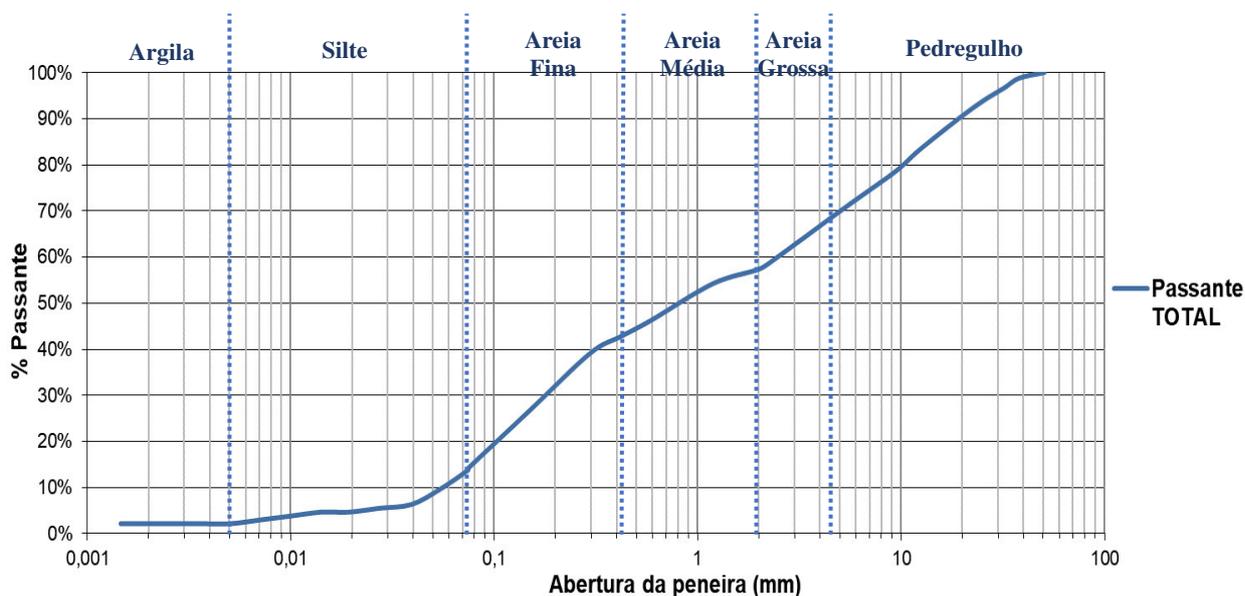
Pode-se perceber que a cinza pesada possui as concentrações dos ânions fluoreto e sulfato acima do permitido, assim, sem levar em conta os resultados do extrato lixiviado, o resíduo seria classificado com Classe II A (não inerte). É importante destacar que a amostra estar inserida nessa categoria não desclassifica o seu uso nas camadas constituintes do pavimento.

Para a composição granulométrica das cinzas, realizaram-se os processos de peneiramento e de sedimentação, e, no fim, obteve-se a curva ilustrada na Figura 59, em que a Tabela 49, contendo os pontos desse gráfico, está disponível no **APÊNDICE A**. É importante destacar que o gráfico da Figura 59 ilustra, tanto a porcentagem passante, como a retida acumulada, para que se possa ter uma visão mais ampla da distribuição granulométrica do resíduo. Também foi colocada a Figura 60 que mostra o mesmo gráfico, mas com um formato mais característico para a área de pavimentação.

**Figura 59** – Composição granulométrica da cinza pesada.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 60** – Curva granulométrica da cinza pesada com um formato específico para a área de pavimentação.



Fonte: AUTOR (2017).

Com os resultados da granulometria apresentados nas Figuras 59 e 60, percebe-se que a cinza possui uma pequena parte bastante fina em sua composição, pois cerca de 2% do material possui um diâmetro menor do que 0,005 mm. Assim, para que fiquem mais claros os valores apresentados anteriormente, elaborou-se a Tabela 34, que divide o resíduo nas porções: pedregulho, areia grossa, média e fina, silte e argila.

**Tabela 34** – Separação das cinzas, conforme a distribuição granulométrica.

RESUMO DA SEDIMENTAÇÃO		
Pedregulho	Acima de 4,8 mm	31 %
Areia Grossa	4,8 mm - 2,00 mm	12 %
Areia Média	2,00 mm - 0,42 mm	15 %
Areia Fina	0,42 mm - 0,074 mm	28 %
Silte	0,074 mm - 0,005 mm	12 %
Argila	Abaixo de 0,005 mm	2 %

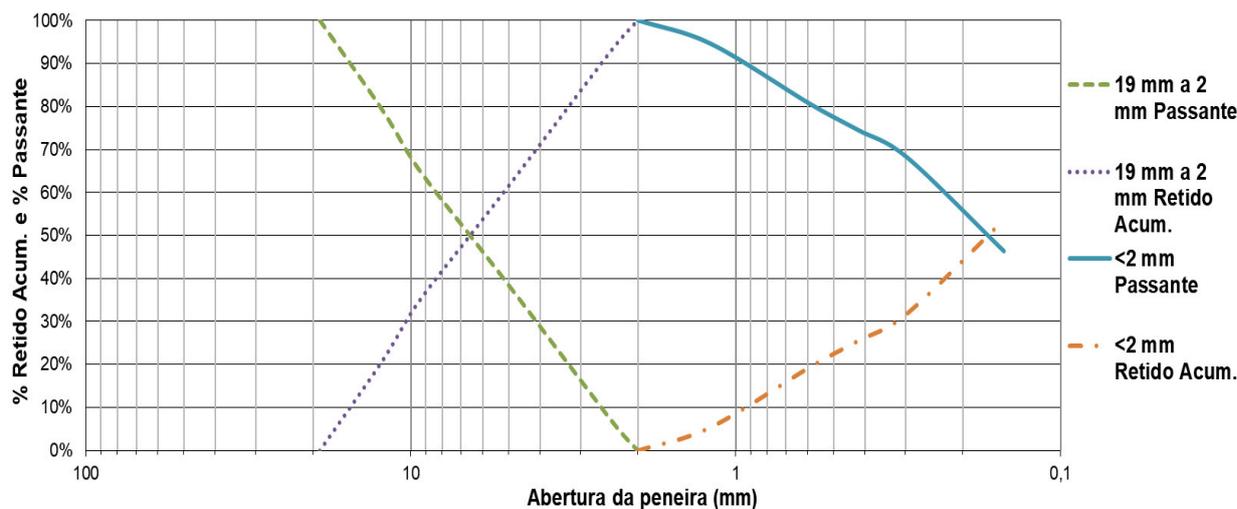
Fonte: AUTOR (2017).

Exposta a Tabela 34, pode-se analisar que a cinza pesada possui, predominantemente em sua composição, pedregulho com 31% e areia fina com 28%. Dessa maneira, isso é uma evidência de que esse resíduo, ao ser incorporado na composição do concreto para blocos intertravados, pode vir a substituir o agregado graúdo, como a brita, ou o miúdo, como a areia.

É importante destacar que, no processo de adição das cinzas ao concreto, o resíduo foi separado em duas frações granulométricas, a fim de facilitar a sua substituição como um agregado

gráudo ou miúdo. Assim, a primeira porção do material consistiu no mesmo passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 2 mm, já a segunda porção abrangeu a cinza passante na peneira de 2 mm. Para que fique mais claro, será exposta a Figura 61 que ilustra as curvas granulométricas das duas frações, já as Tabelas 50 e 51, as quais mostram os pontos das mesmas e, também, o DMC e o MF das duas porções, estão disponíveis no **APÊNDICE A**.

**Figura 61** – Composição granulométrica das frações da cinza pesada.



Fonte: AUTOR (2017).

É possível constatar, logicamente, que a porção passante na peneira de 2 mm possui DMC e MF menores do que a fração passante na 19 mm e retido na 2 mm, e isso contribui no aspecto de que existem os materiais específicos para serem colocados no lugar da brita ou da areia. Uma questão interessante é que o DMC da parte mais granular da cinza é igual a 19 mm, o que pode indicar que seja mais recomendável substituir a brita 19 mm por esse resíduo, mas esse assunto será mais discutido ao se analisar as faixas granulométricas da mistura dos materiais apresentadas na seção **4.2.3**.

#### 4.2.2 Resultados dos Agregados

Primeiramente, será aplicada a Equação 10 para a determinação da massa específica dos agregados miúdos e essa equação está presente na seção **3.3.2.2.2**. O resultado do ensaio está exposto na Tabela 35.

Em seguida, serão usadas as Equações 6, 7, 8 e 9 para o cálculo das seguintes variáveis, com relação aos agregados gráudos: massa específica do agregado seco e na condição saturado

superfície seca (SSS), massa específica aparente do agregado seco e absorção de água. As equações citadas estão na seção 3.3.2.2.2 e o resultado do experimento está colocado na Tabela 36.

**Tabela 35** – Determinação da massa específica para as areias natural e artificial.

MASSA ESPECÍFICA		
Tipo de Material:	Areia Natural	Areia Artificial
Massa do Material Ensaiado → $m'$ (g)	60,00	60,10
Leitura Inicial - V1 (cm <sup>3</sup> )	0,5	0,6
Leitura Final - V2 (cm <sup>3</sup> )	22,8	23,7
Volume Deslocado → V (cm <sup>3</sup> ) = V2 - V1	22,3	23,1
Massa Espec. Le Chatelier → $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,691	2,602

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 36** – Determinação da massa específica para as britas 19 mm e 12,5 mm nas Amostras 1 e 2 e média dos valores.

MASSA ESPECÍFICA - BRITA 19,0 mm e 12,5 mm						
Tipo de Material:	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2	Média Amostras 1 e 2
			$ME_{Agreg.Seco} \rightarrow d$ (g/cm <sup>3</sup> ) =	2,50	2,50	2,50
Massa Super. Seca → $m_s$ (g) =	3000	3000	$ME_{Agreg.SSS} \rightarrow d_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) =	2,47	2,47	2,47
Massa Submersa → $m_a$ (g) =	1786	1787	$ME_{Agreg.Aparente} \rightarrow d_a$ (g/cm <sup>3</sup> ) =	2,45	2,45	2,45
Massa Seca → $m$ (g) =	2973	2975	Absorção de água → A (%) =	91,0	84,0	87,0

Fonte: AUTOR (2017).

De acordo com os resultados mostrados anteriormente, pode-se perceber que as areias possuem massas específicas, relativamente, próximas, o que faz sentido, já que esses materiais foram coletados em uma mesma área de mineração e esses valores, além do mais, são maiores do que os apresentados pelas britas, o que indica que as substâncias componentes dos agregados miúdos são mais densas do que as dos grãos. Para efeito de informação, é interessante colocar que a diferença entre a massa específica seca e a aparente é que nesta estão inclusos os poros permeáveis, já naquela os mesmos são excluídos.

Na determinação da massa unitária, foi aplicada a Equação 11, presente na seção 3.3.2.2.2, e, no caso, dos agregados grãos, também é possível calcular a massa unitária na

condição SSS e o índice do volume de vazios, através das Equações 12 e 14, respectivamente, na mesma seção 3.3.2.2.2, lembrando que, nesse processo, é preciso descobrir a massa específica relativa por meio da Equação 13. Os valores estão expostos nas Tabelas 37, 38, 39 e 40.

**Tabela 37** – Determinação da massa unitária e outras variáveis para a brita 19,0 mm.

<b>BRITA 19,0 mm</b>	<b>Amostra</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>		
	Volume do recipiente → V (m <sup>3</sup> )	0,015	0,015	0,015		
	Massa de brita → mar (kg)	20,240	20,356	20,574		
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1349,333	1357,067	1371,600		
<b>Massa Unitária média → pap (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1359,333</b>	Absorção → A (%)	87,0	Massa Esp. Rel. → d1	2,51	
Limite Inferior (kg/m <sup>3</sup> )	1345,740	T <sub>ÁGUA</sub> (°C)	28,0	<b>Massa Unit. sss → pas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2541,953</b>	
Limite Superior (kg/m <sup>3</sup> )	1372,927	Massa Esp.ÁGUA → ρ <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	996,22	<b>Índice de Vazios → Ev (%)</b>	<b>46</b>	

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 38** – Determinação da massa unitária e outras variáveis para a brita 12,5 mm.

<b>BRITA 12,5 mm</b>	<b>Amostra</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>		
	Volume do recipiente → V (m <sup>3</sup> )	0,015	0,015	0,015		
	Massa de brita → mar (kg)	21,690	21,630	21,898		
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1446,000	1442,000	1459,867		
<b>Massa Unitária média → pap (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1449,289</b>	Absorção → A (%)	87,0	Massa Esp. Rel. → d1	2,51	
Limite Inferior (kg/m <sup>3</sup> )	1434,796	T <sub>ÁGUA</sub> (°C)	28,0	<b>Massa Unit. sss → pas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2737,272</b>	
Limite Superior (kg/m <sup>3</sup> )	1463,782	Massa Esp.ÁGUA → ρ <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	996,22	<b>Índice de Vazios → Ev (%)</b>	<b>42</b>	

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 39** – Determinação da massa unitária para a areia natural.

<b>AREIA Natural</b>	<b>Amostra</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>
	Volume do recipiente → V (m <sup>3</sup> )	0,015	0,015	0,015
	Massa de brita → mar (kg)	20,990	21,283	21,333
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1399,333	1418,867	1422,200
	<b>Massa Unitária média → ρ<sub>ap</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1413,467</b>		
	Limite Inferior (kg/m <sup>3</sup> )	1399,332		
	Limite Superior (kg/m <sup>3</sup> )	1427,601		

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 40** – Determinação da massa unitária para a areia artificial.

<b>AREIA Artificial</b>	<b>Amostra</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>
	Volume do recipiente → V (m <sup>3</sup> )	0,015	0,015	0,015
	Massa de brita → mar (kg)	21,940	21,895	22,085
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1462,667	1459,667	1472,333
	<b>Massa Unitária média → ρ<sub>ap</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1464,889</b>		
	Limite Inferior (kg/m <sup>3</sup> )	1450,240		
	Limite Superior (kg/m <sup>3</sup> )	1479,538		

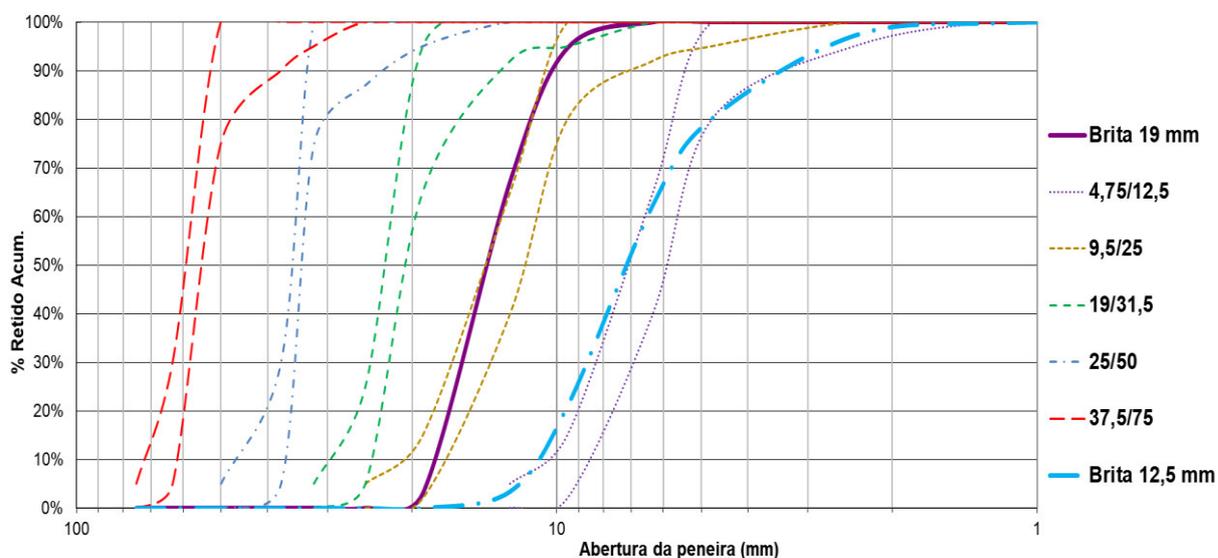
Fonte: AUTOR (2017).

De acordo com os resultados, ao se analisar, individualmente, os agregados graúdos percebe-se que a brita 19,0 mm possui uma massa unitária menor do que o da brita 12,5 mm e isso se explica pelo fato de que este, por ter um aspecto menos grosso, possui menos vazios entre os grãos, o que ocasiona, também, um menor do índice de volume de vazios. Com relação às areias, essas possuem, por exemplo, uma massa unitária maior do que a brita 19,0 mm, o que faz sentido, pois as mesmas possuem um aspecto mais fino e, assim, os grãos estão mais próximos uns dos outros.

Na execução do ensaio de distribuição granulométrica, foram elaboradas as curvas para cada um dos agregados, através do processo de peneiramento, que estão ilustradas nas Figuras

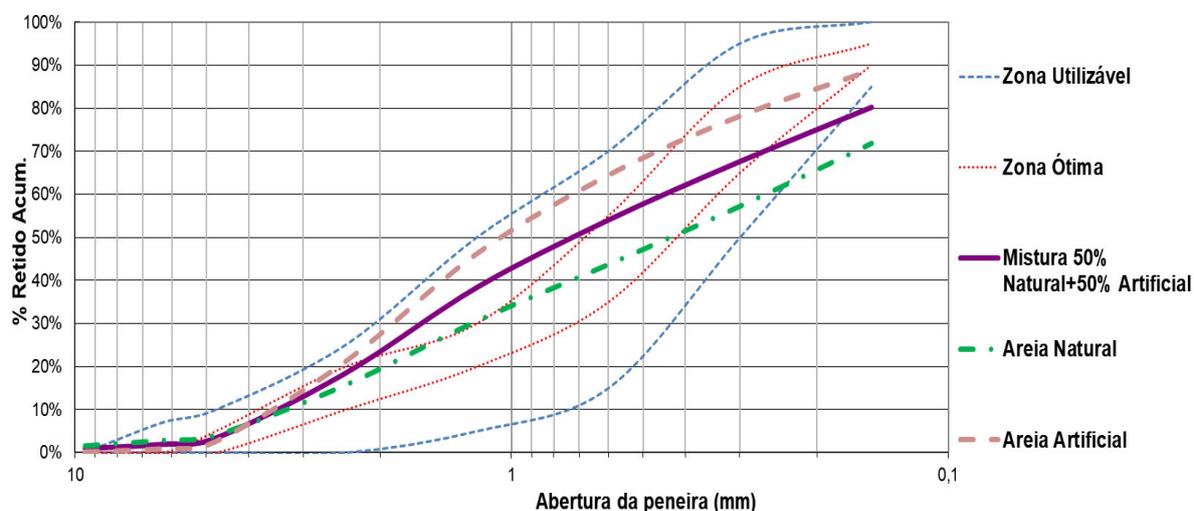
62 e 63, em que as Tabelas 52, 53, 54, 55 e 56, associadas a esses gráficos, estão disponíveis no **APÊNDICE A** e, dessa vez, os gráficos ilustram, somente, a porcentagem retida acumulada com os valores de DMC e MF. Uma informação importante é que, também, estão inseridas, nas duas últimas Figuras citadas, as faixas granulométricas para agregados graúdo e miúdo, as quais estão presentes na norma ABNT NBR 7211/2009, e expressas, mais detalhadamente, nas Tabelas 57 e 58, presentes, também, no **APÊNDICE A**.

**Figura 62** – Composição granulométrica das britas 19,0 mm e 12,5 mm, junto com as faixas para agregado graúdo.



Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 63** – Composição granulométrica das areias natural, artificial e da mistura dessas, junto com as faixas para agregado miúdo.



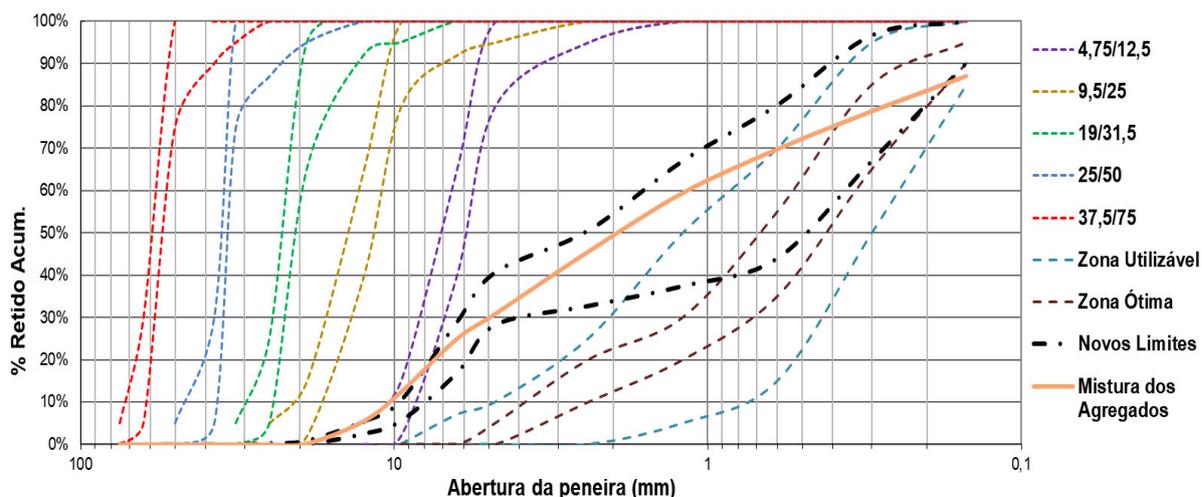
Fonte: AUTOR (2017).

É importante esclarecer que as zonas granulométricas adotadas para os agregados graúdos são divididas, conforme a menor (d) e a maior (D) dimensões de esse agregado. É possível visualizar, na Figura 67, que a brita 19,0 mm está situada próxima da zona 9,5/25, o que é coerente, pois a DMC de esse material está dentro dos limites de essa faixa, enquanto que a brita 12,5 mm está inserida, aproximadamente, na zona 4,75/12,5, o que, também, faz sentido pelos mesmos motivos anteriores. Com relação ao MF, os resultados são plausíveis, pois, logicamente, a brita 19,0 mm (6,98) possui um aspecto mais grosso do que a 12,5 mm (5,97).

Ao se analisar as areias, na Figura 68, percebe-se que estão inseridas, na maior parte da curva, na zona utilizável ou ótima, o que atende a esse requisito da norma e, apesar de apresentarem o mesmo DMC de 4,75 mm, o MF da areia natural (2,25) é menor do que o da artificial (3,02), o que indica que essa é menos fina do que aquela. Por fim, os dois tipos são misturados, sendo 50% de um e 50% do outro em massa e isso resulta em um material que continua, na maior parte da curva, dentro das zonas utilizável e ótima e que apresenta o mesmo DMC de 4,75 mm e um MF intermediário (2,63) entre os dois valores citados anteriormente.

#### **4.2.3 Resultados da Mistura dos Materiais**

De acordo com o traço de referência, o qual é 1,00 : 2,33 : 2,33 : 1,97 : 0,45 : 0,85 (Cimento : Areia Natural : Areia Artificial : Brita 12,5 mm : Brita 19,0 mm : Relação água/cimento), é possível descobrir a proporção de cada componente e, ao se verificar, somente, entre os agregados, calcula-se que existe 65,82% de areia, 6,36% de brita 19,0 mm e 27,82% de brita 12,5 mm. Em paralelo, utilizando essas proporções, foram utilizados os limites inferiores e superiores das zonas 4,75/12,5; 9,5/25 (agregado graúdo) e utilizável (agregado miúdo) para compor uma faixa granulométrica ponderada para a mistura. Com relação a esta, foi feita uma curva combinada dos agregados presentes no traço, seguindo as proporções dos mesmos. Os resultados podem ser vistos na Figura 64, em que a Tabela 59, a qual contém os pontos das novas curvas, está presente no **APÊNDICE A**.

**Figura 64** – Curva granulométrica combinada da mistura com os limites da faixa ponderada.

Fonte: AUTOR (2017).

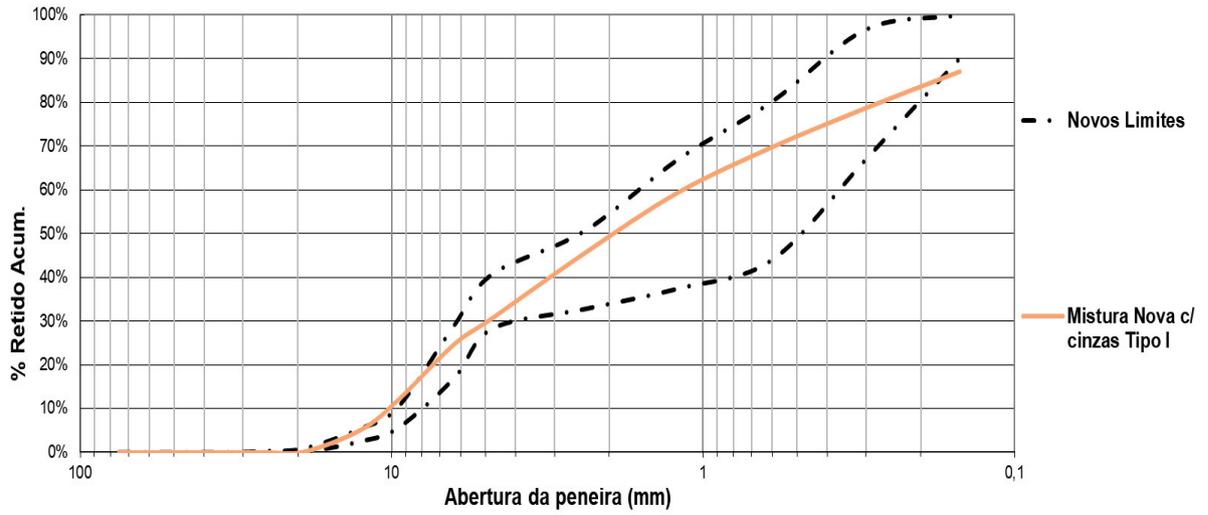
Pode-se visualizar que a curva da mistura está, em sua maior parte, dentro dos limites da faixa, o que é interessante do ponto de vista granulométrico. Em seguida, deve-se testar a incorporação de cinzas na composição do concreto, respeitando a granulometria da mistura original e do agregado que o resíduo venha a substituir parcialmente. Após alguns testes, percebeu-se que a cinza do Tipo I, a qual é passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm, poderia substituir, em 10%, a massa de brita 19,0 mm, enquanto a cinza do Tipo II, a qual é passante na peneira de 2,0 mm, poderia substituir, também, em 10%, a massa de areia, originado, assim, dois traços alternativos, os quais estão colocados na Tabela 41 (Traços 2 e 3). Para que se possa visualizar melhor o efeito de essas substituições, serão expostas as Figuras 65, 66, 67 e 68, que ilustram, tanto a curva da mistura, como a do agregado específico após a inserção dos resíduos. As Tabelas 60, 61, 62 e 63, que são associadas a esses quatro últimos gráficos, podem ser visualizadas no **APÊNDICE A**.

**Tabela 41** – Composição dos traços em massa.

TRAÇO	Cimento	Areia Natural	Areia Artificial	Brita 12,5 mm	Brita 19,0 mm	Cinza Tipo I	Cinza Tipo II	Relação a/c
1	1	2,33	2,33	1,97	0,45	0	0	0,85
2	1	2,33	2,33	1,97	0,41	0,05	0	0,85
3	1	2,09	2,09	1,97	0,45	0	0,47	0,94

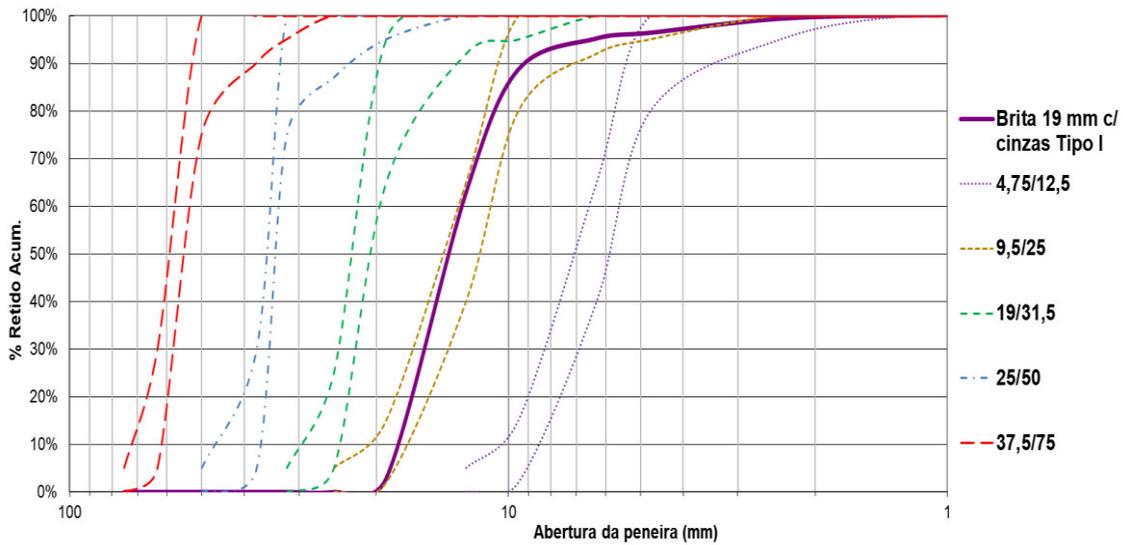
Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 65** – Curva granulométrica da mistura com a presença de cinzas Tipo I.



Fonte: AUTOR (2017).

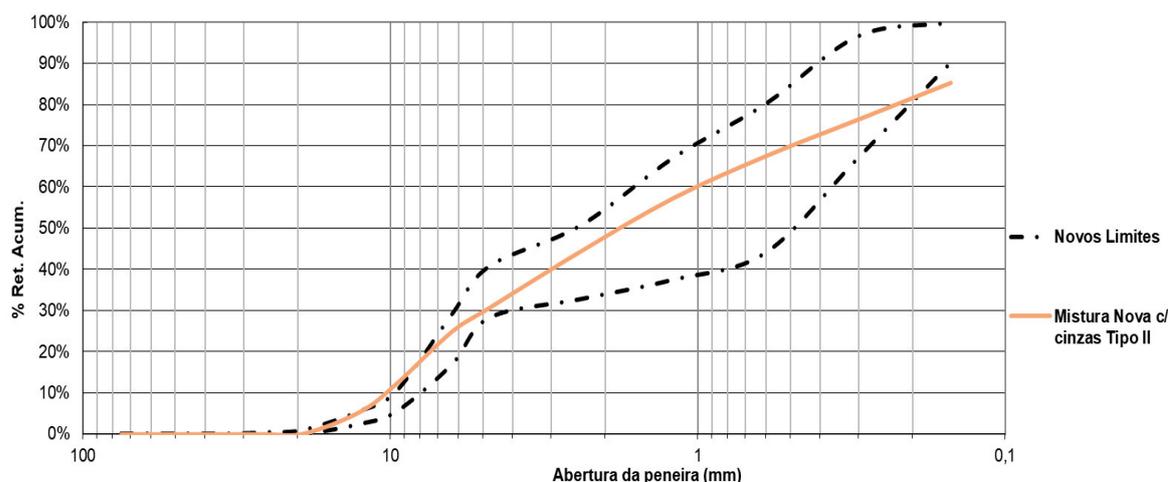
**Figura 66** – Curva granulométrica da brita 19,0 mm com a inserção de 10% de cinzas Tipo I.



Fonte:

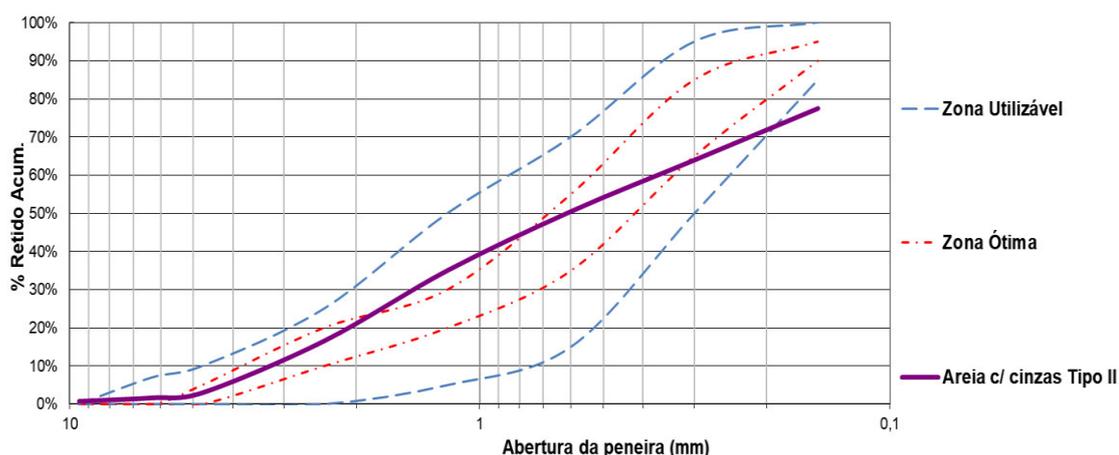
AUTOR (2017).

**Figura 67** – Curva granulométrica da mistura com a presença de cinzas Tipo II.



Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 68** – Curva granulométrica da areia com a inserção de 10% de cinzas Tipo II.



Fonte: AUTOR (2017).

A partir da análise mais ampla a respeito da inserção das cinzas na mistura, pode-se verificar que as curvas combinadas nos dois traços alternativos, praticamente, não apresentam diferenças significativas, com relação ao do traço de referência, o que é importante para a continuação do uso de 10% de resíduo, porém constatou-se que os valores de MF diminuíram, o que mostra, nos dois traços alternativos, que a mistura ficou um pouco mais fina. É importante destacar que essa taxa de substituição é, relativamente, pequena, assim, previa-se que essa inserção das cinzas não traria significativas mudanças do ponto de vista granulométrico, considerando o total.

Com uma análise mais específica a respeito das mudanças ocorridas nos agregados individualmente, é possível fazer algumas constatações. Começando pela brita 19,0 mm, a substituição de parte desta por 10% de cinza Tipo I fez que o agregado graúdo se encaixasse melhor

na zona 9,5/25, pois o resíduo, por ser menos granular, tornou essa brita com uma granulometria mais graduada. Com relação à areia, a incorporação de 10% da cinza Tipo II também trouxe benefícios, como aproximar, em algumas regiões, a curva do agregado miúdo à zona ótima, mas a questão é que isso fez que o traçado saísse, mais acentuadamente, dos limites da zona utilizável nos tamanhos menores de peneiras. Isso pode ser explicado pelo aspecto mais fino de esse resíduo, provocando a diminuição do MF da areia.

### 4.3 Resultados e Discussão dos Ensaio no Concreto – Terceira Etapa

Nessa etapa, o concreto foi testado em seu estado fresco, sendo realizado o abatimento do tronco de cone (*slump test*), a fim de observar a consistência e determinar o método de adensamento na conseqüente moldagem dos corpos-de-prova. Já no estado endurecido, foram realizados os ensaios que determinaram a resistência à compressão e a absorção de água, além de outras características, como o aspecto visual e a avaliação dimensional.

#### 4.3.1 Resultados do Concreto Fresco

Logo após a mistura dos materiais na betoneira, o concreto, ainda fresco, foi submetido ao ensaio de abatimento do tronco de cone, destacando o fato de que esse processo foi feito na preparação dos três traços estudados, sendo um de referência e dois alternativos. Pelo fato do concreto ser seco, nas três ocasiões, o abatimento foi, praticamente, zero e isso pode ser visualizado na Figura 69. Dessa forma, decidiu-se usar o método de adensamento mecânico com o aparelho vibrador, o qual acreditou-se ser mais eficiente na retirada dos vazios do concreto.

**Figura 69** – Abatimento do tronco de cone para o traço de referência (a), traço alternativo de brita 19,0 mm (b) e de areia (c).



(a) *Slump test* no traço de referência.



(b) *Slump test* no traço alternativo com brita 19 mm.



(c) *Slump test* no traço alternativo com brita areia.

Fonte: AUTOR (2017).

### 4.3.2 Resultados do Concreto Endurecido

Após o concreto fresco ser colocado nos moldes cilíndricos e nas fôrmas para pavers, esperou-se um intervalo de 24 horas, para que o material endurecesse. Após isso, todos os corpos-de-prova foram submetidos a uma cura em solução saturada de hidróxido de cálcio, permanecendo, nesse ambiente, até o período de 28 dias.

Primeiramente, com relação à inspeção visual, para cada um dos três traços utilizados, percebeu-se que o aspecto dos corpos-de-prova cilíndricos e dos pavers, durante os períodos de 3, de 7 e de 28 dias, se manteve, praticamente, constante. Para uma melhor visualização, verificar as Figuras 70, 71 e 72, as quais mostram, respectivamente, os visuais das amostras, aos 28 dias, do traço de referência, do alternativo com brita 19,0 mm e com areia.

**Figura 70** – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço de referência.



(a) CP's cilíndricos do traço de referência.



(b) Blocos pavers do traço de referência.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 71** – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço alternativo com brita 19,0 mm.



(a) CP's cilíndricos do traço com brita 19,0 mm.



(b) Blocos pavers do traço com brita 19,0 mm.

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 72** – Aspecto visual dos CP's cilíndricos (a) e dos blocos pavers (b), com relação ao traço alternativo com areia.



(a) CP's cilíndricos do traço com areia.

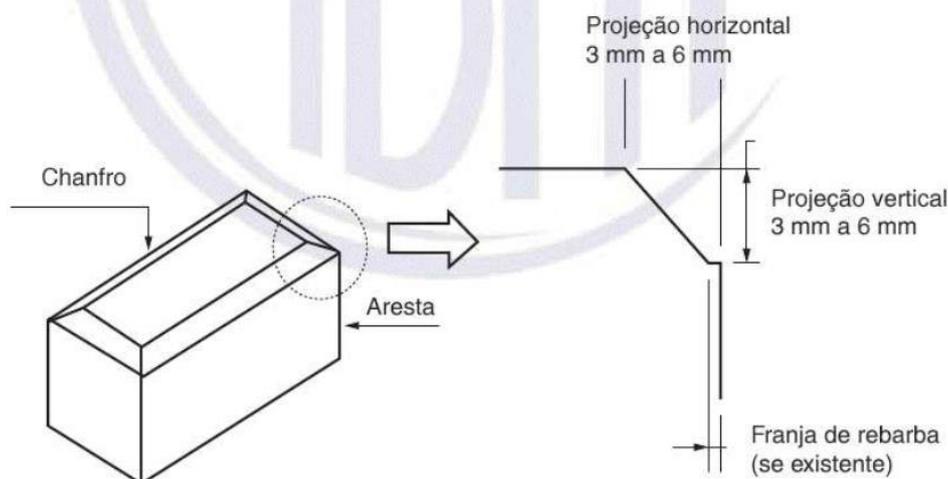
(b) Blocos pavers do traço com areia.

Fonte: AUTOR (2017).

Com relação ao aspecto visual dos CP's cilíndricos, pode-se observar que essas amostras, no geral, foram adensadas adequadamente sem possuírem defeitos significativos ao longo de suas superfícies, com exceção de alguns vazios que permaneceram, externamente, nos corpos-de-prova. Isso mostra que o uso do aparelho vibrador foi bastante útil, a fim de proporcionar um melhor acabamento para os CP's cilíndricos. Um detalhe a ser mencionado é que as manchas escuras presentes em alguns corpos-de-prova são decorrentes da retirada dos mesmos do local de armazenamento preenchido com água.

No que diz respeito aos pavers, é importante destacar que os visuais das peças correspondentes ao traço de referência e alternativo com areia estão satisfatórios, porém o aspecto dos blocos do traço alternativo com brita 19,0 mm mostrou-se mais heterogêneo, caracterizando uma situação, na qual o adensamento não foi bem executado. Tal fato aconteceu, pois, para a produção dos concretos alternativos em um mesmo dia, foi necessária a desmoldagem dos pavers do traço com substituição de brita 19,0 mm em menos de 24 horas. Isso, provavelmente, prejudicou o espalhamento de esse concreto nas fôrmas, sem contar o fato de que o material final era seco, assim, é necessário o tempo de espera de 24 horas, para que, no processo de desmoldagem, o corpo-de-prova apresente uma aparência mais adequada. Ainda com relação aos pavers, é possível constatar que os de aspecto visual mais satisfatório possuem arestas regulares nas paredes laterais e nas faces superior e inferior, o ângulo de inclinação igual a 90° e o chanfro com projeção horizontal e vertical de 5 mm, o que está de acordo com a norma ABNR NBR 9781/2013, através da Figura 73.

**Figura 73** – Chanfro de uma peça de concreto.

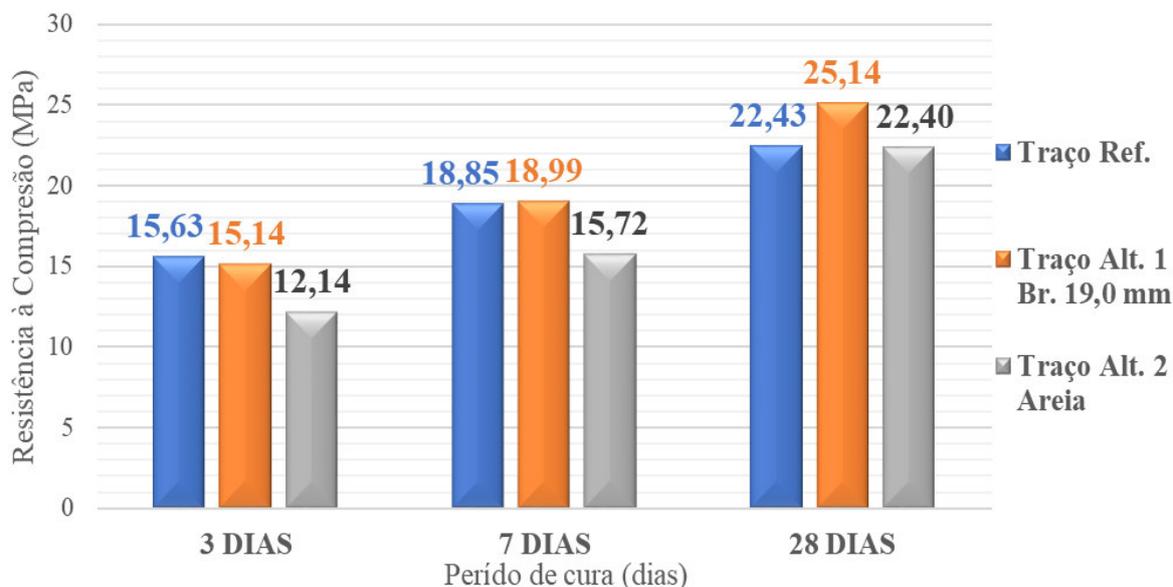


Fonte: ABNT NBR 9781/2013.

Com relação à avaliação dimensional das peças de concreto, as mesmas possuem comprimento, largura e espessura de 200 mm, de 100 mm e de 60 mm, respectivamente, o que está de acordo com os limites e as tolerâncias dimensionais impostos pela norma ABNT NBR 9781/2013. Com relação ao IF, este é definido como a razão entre o comprimento e a espessura do bloco, resultando, assim, em um valor de 3,3, o qual está de acordo com a mesma norma.

No que diz respeito à resistência à compressão, esse ensaio foi realizado nos pavers e nos corpos-de-prova cilíndricos. Para tanto, foi aplicada a Equação 15, presente na seção 3.3.3.3.2, em que se determinaram os valores individuais para cada CP e, em seguida, calculou-se a média dos mesmos para cada período de cura do concreto. Nesse caso, a área de carregamento corresponde à base circular de 100 mm de diâmetro, presentes em todas essas amostras, e os resultados médios, para cada traço, encontram-se na Figura 74, já a Tabela 64, associada a esse gráfico, está presente no **APÊNDICE A**.

**Figura 74** – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Resistência Média à Compressão para corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: AUTOR (2017).

Depois de expostos esses dados, é possível averiguar que o comportamento apresentado pelo concreto do traço alternativo 1 (Brita 19,0 mm) se assemelha com o do traço de referência, chegando a superar a resistência deste aos 7 e 28 dias de cura (18,99 MPa > 18,85 MPa e 25,14 MPa > 22,43 MPa), o qual é uma constatação importante. Isso mostra que a substituição de 10%, em massa, de brita 19,0 mm por cinzas Tipo I (passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm) foi benéfica, em que o resíduo desempenha bem o papel do agregado convencional.

No comportamento do concreto do traço alternativo 2 (Areia), percebe-se que, apesar de, no período de 3 e de 7 dias, o concreto ter demonstrado os menores resultados, aos 28 dias, a resistência à compressão é, praticamente, idêntica ao valor do traço de referência, o que é bastante satisfatório. Além disso, pode-se observar que os traços com cinzas apresentam taxas de incremento maiores com o passar do tempo, principalmente a mistura com substituição de areia, e isso é uma característica interessante que precisa ser melhor analisada. Os incrementos percentuais estão mais bem colocadas na Tabela 42.

**Tabela 42** – Diferenças percentuais, com relação aos valores de Resistência à Compressão para CP's cilíndricos.

<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>3 DIAS</b>	<b>7 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>
<b>Traço Referência</b>	<b>15,63</b>	<b>18,85</b> → Aumento de <b>20,60%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(15,63)</b>	<b>22,43</b> → Aumento de <b>18,99%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(18,85)</b>
<b>Traço Alternativo Brita 19,0 mm</b>	<b>15,14</b> → Diminuição de <b>3,13%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(15,63)</b>	<b>18,99</b> → Aumento de <b>25,43%</b> , com relação ao Tr. Alt. Br. 19 3 DIAS <b>(15,14)</b>  → Aumento de <b>0,74%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(18,85)</b>	<b>25,14</b> → Aumento de <b>32,38%</b> , com relação ao Tr. Alt. Br. 19 7 DIAS <b>(18,99)</b>  → Aumento de <b>12,08%</b> , com relação ao Tr. Ref. 28 DIAS <b>(22,43)</b>
<b>Traço Alternativo Areia</b>	<b>12,14</b> → Diminuição de <b>22,33%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(15,63)</b>	<b>15,72</b> → Aumento de <b>29,49%</b> , com relação ao Tr. Alt. Ar. 3 DIAS <b>(12,14)</b>  → Diminuição de <b>16,60%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(18,85)</b>	<b>22,40</b> → Aumento de <b>42,49%</b> , com relação ao Tr. Alt. Ar. 7 DIAS <b>(15,72)</b>  → Diminuição de <b>0,13%</b> , com relação ao Tr. Ref. 28 DIAS <b>(22,43)</b>

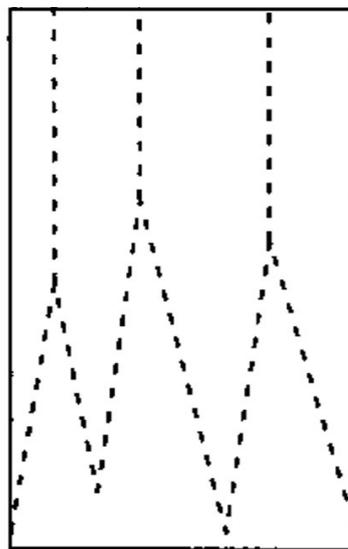
Fonte: AUTOR (2017).

Com relação ao tipo de ruptura dos corpos-de-prova cilíndricos, recorre-se às informações presentes na norma ABNT NBR 5739/2007. A posse de esse tipo de informação é útil, pois informa se a amostra rompe em uma região específica ou em uma área abrangente, e o segundo caso é mais vantajoso pelo fato de que o carregamento se distribui mais uniformemente ao longo da extensão do corpo-de-prova. No caso, o tipo de ruptura, para as amostras no geral, se encaixa melhor no Tipo C – Colunar com formação de cones, conforme é mostrado nas Figuras 75 (a) e (b), o que é interessante, porque demonstra que a ruptura se alastrou por toda a extensão do concreto.

**Figura 75** – Corpo-de-prova cilíndrico rompido (a) e representação da ruptura Tipo C – Colunar com formação de cones (b).



(a) CP cilíndrico rompido.

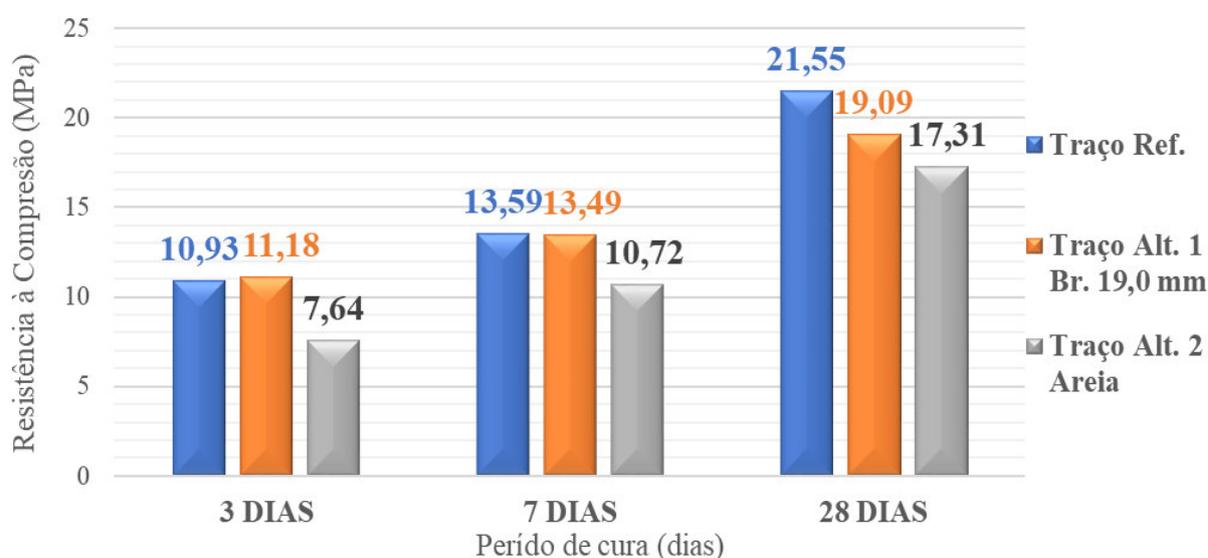


(b) Representação da ruptura Tipo C.

Fonte: AUTOR (2017).

Já nos pavers, foram aplicadas as Equações 16 e 17, presentes na seção 3.3.3.3.2, para o cálculo da resistência característica e do desvio-padrão da amostra e é importante destacar que os valores individuais para cada bloco são multiplicados por um fator  $\rho$ , o qual é igual a 0,95 para espessuras de peça iguais a 60 mm. Dessa vez, a área de carregamento corresponde à uma base circular metálica de 90 mm de diâmetro, a qual foi a região de pressão aplicada nos blocos, e os resultados, para cada traço, encontram-se na Figura 76, já a Tabela 65, associada a esse gráfico, está presente no **APÊNDICE A**.

**Figura 76** – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Resistência à Compressão Característica para pavers.



Fonte: AUTOR (2017).

Com a análise de esses dados, é possível averiguar, novamente, que o comportamento apresentado pelo concreto do traço alternativo 1 (Brita 19,0 mm) se assemelha com o do traço de referência, chegando a superar a resistência deste aos 3 dias de cura (11,18 MPa > 10,93 MPa), o qual é uma constatação importante. Apesar de nos 28 dias, o traço de referência ter mostrado um desempenho superior (21,55 MPa > 19,09 MPa), essa diferença precisa ser analisada estatisticamente. Sendo assim, isso mostra que a substituição de 10%, em massa, de brita 19,0 mm por cinzas Tipo I (passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm), de um modo geral, foi benéfica, em que o resíduo desempenha bem o papel do agregado convencional.

No comportamento do concreto do traço alternativo 2 (Areia), apesar de os resultados, nos três períodos de cura, serem inferiores as outras misturas, destacam-se as maiores taxas de incremento no decorrer do tempo, devido ao significativo teor de finos, com isso, é interessante avaliar, posteriormente, os resultados de resistência à compressão com um período maior de cura, como dois ou seis meses. Com relação aos resultados serem inferiores as outras misturas, um dos motivos para isso é que, como se constatou no ensaio de massa específica, os dois tipos de areia possuem um valor maior do que as britas, então a retirada, em 10% de massa, do agregado miúdo, por este ser mais denso do que o grão, pode ter comprometido a estrutura rígida do concreto durante os períodos de cura. Os incrementos percentuais nos valores de resistência à compressão estão mais bem colocadas na Tabela 43.

**Tabela 43** – Diferenças percentuais, com relação aos valores de Resistência à Compressão para blocos pavers.

<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>3 DIAS</b>	<b>7 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>
<b>Traço Referência</b>	<b>10,93</b>	<b>13,59</b> → Aumento de <b>24,34%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(10,93)</b>	<b>21,55</b> → Aumento de <b>58,57%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(13,59)</b>
<b>Traço Alternativo Brita 19,0 mm</b>	<b>11,18</b> → Aumento de <b>2,23%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(10,93)</b>	<b>13,49</b> → Aumento de <b>20,66%</b> , com relação ao Tr. Alt. Br. 19 3 DIAS <b>(11,18)</b>  → Diminuição de <b>0,74%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(13,59)</b>	<b>19,09</b> → Aumento de <b>41,51%</b> , com relação ao Tr. Alt. Br. 19 7 DIAS <b>(13,49)</b>  → Diminuição de <b>11,42%</b> , com relação ao Tr. Ref. 28 DIAS <b>(21,55)</b>
<b>Traço Alternativo Areia</b>	<b>7,64</b> → Diminuição de <b>30,10%</b> , com relação ao Tr. Ref. 3 DIAS <b>(10,93)</b>	<b>10,72</b> → Aumento de <b>40,31%</b> , com relação ao Tr. Alt. Ar. 3 DIAS <b>(7,64)</b>  → Diminuição de <b>21,12%</b> , com relação ao Tr. Ref. 7 DIAS <b>(13,59)</b>	<b>17,31</b> → Aumento de <b>61,47%</b> , com relação ao Tr. Alt. Ar. 7 DIAS <b>(10,72)</b>  → Diminuição de <b>19,67%</b> , com relação ao Tr. Ref. 28 DIAS <b>(21,55)</b>

Fonte: AUTOR (2017).

A partir da Tabela 43, é possível fazer uma constatação importante, em que a taxa de crescimento, para os três traços, do período de 3 para 7 dias foi menor do que a taxa de 7 para 28 dias. Esse é um dado interessante, pois, normalmente, para concretos plásticos, o ritmo de acréscimo da resistência à compressão vai decaindo com o passar dos dias, chegando, praticamente, a estabilizar aos 28 dias. Isso demonstra que, para o concreto seco analisado, principalmente os traços alternativos, apesar das altas relações água/cimento, as reações de hidratação dos compostos de cimento duraram mais tempo, o que fez com que as mesmas tivessem uma significância maior após os 7 dias de cura. Isso reforça, mais uma vez, a necessidade de se realizar uma avaliação com um maior tempo de cura, pois, assim, os traços alternativos, por exemplo, podem vir a superar a resistência do traço de referência com uma taxa de incremento crescente.

De posse dos dados de resistência à compressão para CP's cilíndricos e para pavers, pode-se perceber que os valores destes, para cada período de cura, de um modo geral, são menores do que aqueles. Para justificar isso, recorre-se ao método de adensamento utilizado para cada tipo de molde. No caso dos pavers, utilizou-se a mesa para índice de consistência com a aplicação de trinta golpes em três camadas cada, enquanto que, para os CP's cilíndricos aplicou-se o aparelho vibrador, assim, por este ser mais eficiente na retirada dos vazios da mistura, fez com que esse tipo de concreto fosse mais bem compactado e, conseqüentemente, apresentasse uma resistência mecânica mais acentuada.

Uma observação a ser feita é que, tanto as resistências médias para os CP's cilíndricos, como as características para os pavers são valores inferiores ao necessário de 35 MPa exigido na norma ABNR NBR 9781/2013 para tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha. Dessa forma, com o intuito de defender os resultados obtidos, é importante a visualização da Tabela 21 nas páginas 71, 72 e 73, que coloca os trabalhos de outros pesquisadores que, também, trabalharam a incorporação de resíduos no concreto utilizados em blocos de pavimento intertravado.

Pode-se perceber que, com as informações da Tabela 21, três dos cinco trabalhos apresentados não conseguiram atingir, em nenhum dos traços, a resistência necessária de 35 MPa, o que fornece certo embasamento aos resultados obtidos nesse ensaio. Apesar de essas pesquisas utilizarem resíduos diferentes, o objetivo geral é o mesmo, o que as coloca no mesmo campo de conhecimento. Assim, nos trabalhos em que os resultados foram abaixo do esperado, sugeriu-se, além da revisão da NBR 9781/2013, pois essa mantém os mesmos valores limites de ensaio desde a sua versão antiga de 1987, a aplicação dos blocos em áreas, cuja solicitação de tráfego seja mais reduzida, como calçadas para pedestres e ciclovias, o que pode se mostrar uma alternativa viável. No caso deste trabalho, a fim de se aumentar a resistência à compressão, podem ser avaliadas mudanças no traço de referência, com o intuito das reações de hidratação acontecerem mais intensa e rapidamente, como a adição extra de cimento CP V – ARI. Também pode ser adicionado mais massa de brita 19,0 mm, a fim de conferir ao concreto uma estrutura mais rígida e resistente.

No que diz respeito à absorção de água, este ensaio foi realizado nos corpos-de-prova cilíndricos. Com relação a estes, foi aplicada a Equação 9 na seção 3.3.2.2.2, em que se determinaram os valores individuais para cada CP e, em seguida, calculou-se a média dos mesmos para o período de cura de 28 dias. É importante frisar que, na determinação das massas saturada e seca, foi respeitado o procedimento da norma ABNT NBR 9781/2013 de se esperar duas horas para a obtenção sucessiva de dois valores, cuja diferença não fosse superior a 0,5%, em relação ao primeiro dado. Os resultados para cada traço encontram-se na Figura 77, em que a Tabela 66,

associada com esse gráfico, está disponível no **APÊNDICE A**.

**Figura 77** – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Absorção de Água para corpos-de-prova cilíndricos.



De posse dos dados de absorção de água, pode-se observar que, com relação aos valores individuais para os três traços, todos são menores do que 7%, o que está de acordo com os limites da norma ABNT NBR 9781/2013. Ao observar as médias, percebe-se que as três porcentagens são menores do que 6%, o que, também, está dentro dos conformes da mesma norma. Uma observação importante a ser feita é que os valores médios de absorção dos dois traços alternativos (3,65% e 4,23%) são maiores do que o do traço de referência (3,61%), o que demonstra que as cinzas, principalmente as do Tipo I (passante na peneira de 19,0 mm e retida na de 2,0 mm), possuem uma porosidade e permeabilidade mais elevadas do que os agregados convencionais. Porém, pela substituição de material ter sido parcial de 10%, fez com que não houvesse um acréscimo significativo nos resultados do ensaio.

#### 4.3.2.1 Análise Estatística

Para averiguar se as substituições de agregados convencionais por cinzas influíram, significativamente, nos resultados dos ensaios de absorção de água e de resistência à compressão, tanto dos CP's cilíndricos, como dos pavers, foi realizada a análise ANOVA e o teste de Duncan. Os resultados completos obtidos, através do software Statistica 7.0, serão colocados no **ANEXO A**. Na Tabela 44, foi colocado se a variável independente, que é o tipo de agregado no traço, em que as cinzas podem ou não estar inseridas, influenciou, consideravelmente, nas variáveis de

resposta, como a resistência à compressão do CP cilíndrico e do paver aos 3, 7 e 28 dias, e a absorção de água do CP cilíndrico aos 28 dias.

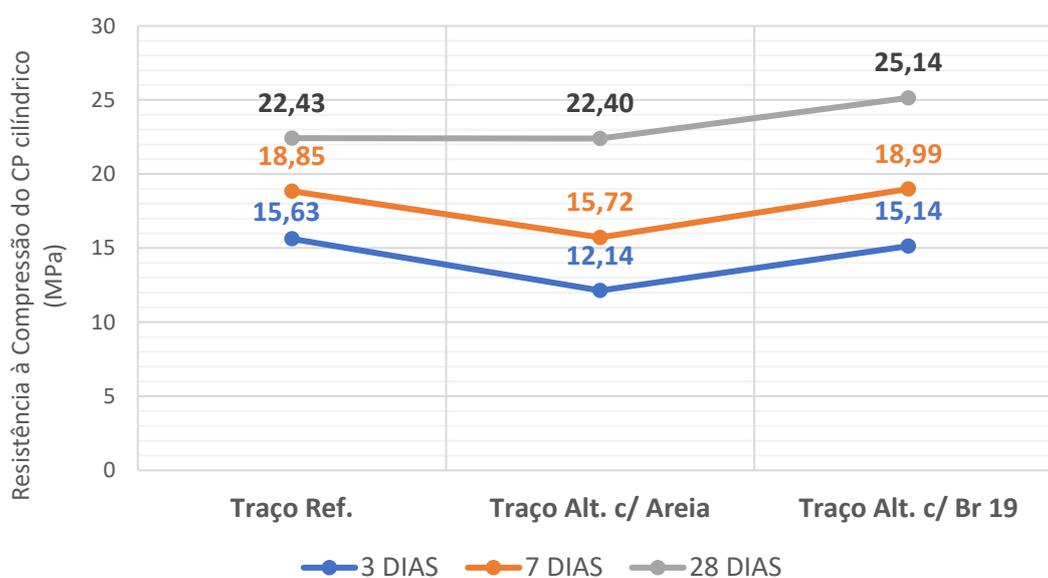
**Tabela 44** – Nível de significância ao se considerar as variáveis de resposta.

Variável Independente	Variável de Resposta	Significância
Tipo de agregado	Resistência à compressão CP com 3 dias	SIM
	Resistência à compressão CP com 7 dias	SIM
	Resistência à compressão CP com 28 dias	SIM
	Resistência à compressão Paver com 3 dias	NÃO
	Resistência à compressão Paver com 7 dias	NÃO
	Resistência à compressão Paver com 28 dias	NÃO
	Absorção de água CP com 28 dias	NÃO

Fonte: AUTOR (2017).

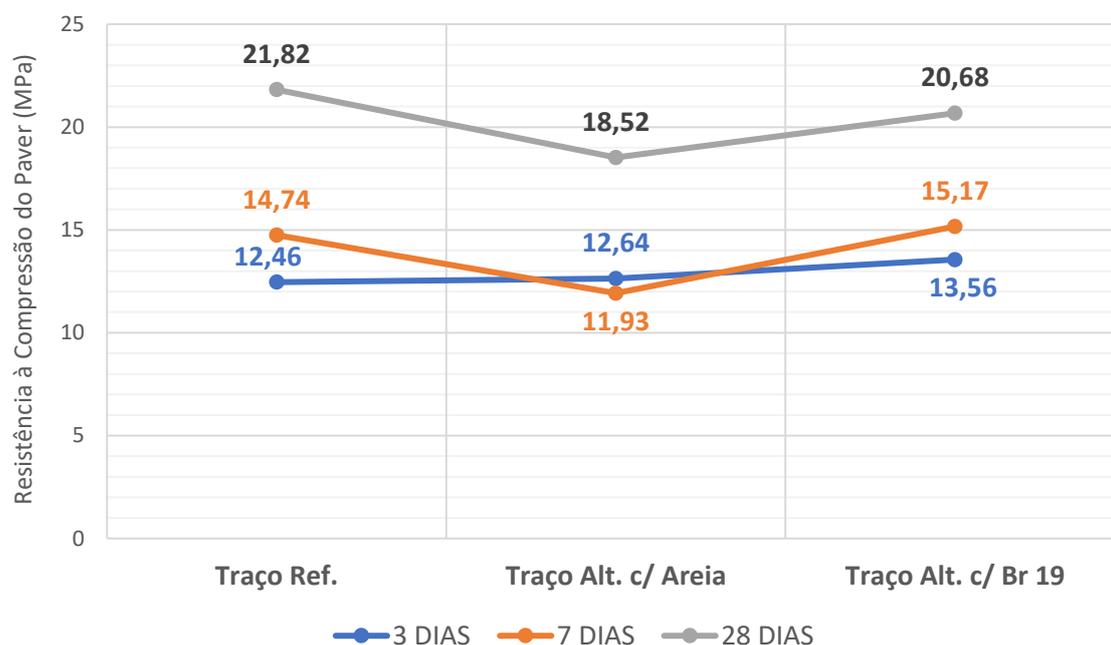
De posse dessas informações, será plotada as Figuras 78, 79 e 80 que ilustram a variação dos valores médios de resistência à compressão e de absorção de água, de acordo com o corpo-de-prova utilizado e com o período de cura. É importante essa ilustração, para que fique mais claro o quanto os valores médios de cada traço estão próximos ou distantes entre si.

**Figura 78** – Variação dos valores médios de resistência à compressão para CP cilíndrico.



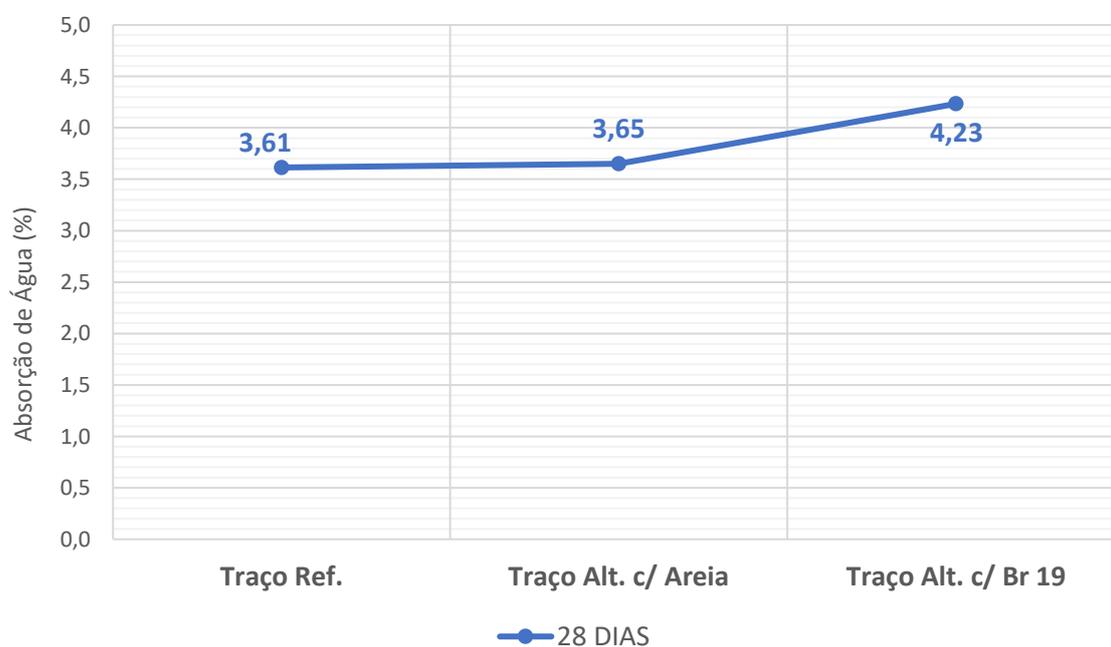
Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 79** – Variação dos valores médios de resistência à compressão para Paver.



Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 80** – Variação dos valores médios de absorção de água para CP cilíndrico.



Fonte: AUTOR (2017).

De posse dessas informações, pode-se concluir que, para os resultados de resistência à compressão em paver nos períodos de 3, 7 e 28 dias, e para a absorção de água em CP cilíndrico aos 28 dias, a mudança de agregado não influenciou, significativamente, sobre os valores dos ensaios, em que esses não diferiram de forma considerável. Já para a resistência à compressão em

CP cilíndrico aos 3, 7 e 28 dias, existe a influência na substituição dos agregados convencionais pelas cinzas, em que, nos períodos de 3 e 7 dias, o valor referente ao traço alternativo com areia estava, do ponto de vista estatístico, menor do que os valores dos outros dois traços, o que indica que a substituição de areia por cinzas influenciou negativamente o comportamento do corpo-de-prova nessas idades de cura. Já, aos 28 dias, o resultado do traço alternativo com brita 19,0 mm, do ponto de vista estatístico, estava maior do que as resistências dos outros dois traços, significando, dessa vez, que a substituição de brita 19,0 mm por cinzas foi positiva para o CP cilíndrico.

#### 4.4 Resultados e Discussão do Dimensionamento do Pavimento – Quarta Etapa

Os materiais utilizados, para esse dimensionamento, foram baseados nos dados do trabalho de Vasconcelos (2016), que avaliou o emprego de cinza leve no solo utilizado em camadas granulares. Primeiramente, para o subleito local, adotou-se um CBR de 10% e com relação à sub-base, utilizou-se a mistura M3, que é composta por 50% de solo regional, localizado no município de Caucaia na RMF, e por 50% de cinzas presentes na UTP. Nas camadas de assentamento e no material de rejuntamento, pelo fato da norma ABNT NBR 15953/2011 não especificar quanto ao CBR ou expansão, decidiu-se utilizar a mistura M1, que é composta por 100% de solo regional.

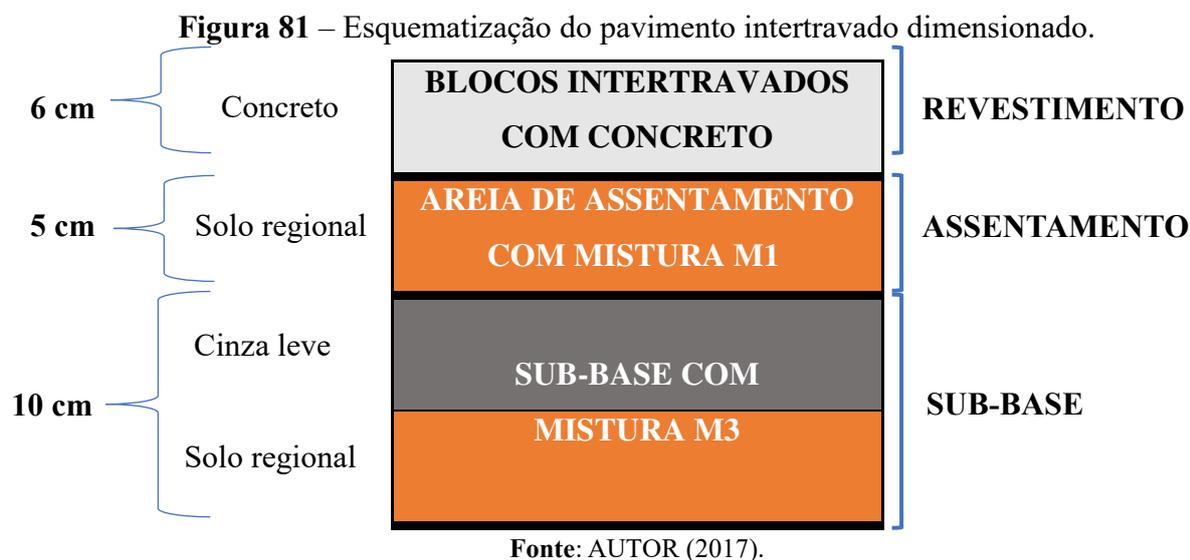
É importante citar que, ao final da pesquisa, as cinzas utilizadas por Vasconcelos (2016) foram aprovadas nos ensaios ambientais de extrato lixiviado e solubilizado, e compõem a mistura M2, composta por 100% de resíduo. Com relação à mistura M3, essa atende aos requisitos do DNIT por apresentar um CBR de 21%, sendo maior do que 20% e uma expansão de 0,95%, que é menor do que 1% para a camada de sub-base. Para um maior esclarecimento, a Tabela 45 apresenta as principais características de cada uma das misturas citadas.

**Tabela 45** – Características das Misturas.

MISTURAS	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	UMIDADE ÓTIMA (%)	MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA (g/cm <sup>3</sup> )	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)
M1	20	0,00	15,1	1,97	25	7
M2	4	1,37	35,5	1,20	Não determinado	NP (Não Plástico)
M3	21	0,95	18,0	1,62	–	–

Fonte: VASCONCELOS (2016). Adaptado pelo autor.

Obtidas as informações, procedeu-se para a execução do procedimento A da ABCP, explicado e exemplificado na seção 2.8.1, para a determinação das espessuras de cada camada. Através da Tabela 13, com relação à base, pelo número “N” adotado ( $3 \times 10^5$ ) ser menor do que o exigido ( $1,5 \times 10^6$ ) para a execução dessa camada, a mesma é dispensável. Na sub-base, por meio da Figura 20 e da Tabela 12, pelo número “N” adotado ( $3 \times 10^5$ ) ser menor do que o valor  $5 \times 10^5$ , pelo CBR dessa camada (21%) ser maior do que 20% e pelo CBR do subleito local (10%) ser maior do que 7%, é exigido uma espessura 10 cm. Por fim, no revestimento de BIPs, através da Tabela 14, pelo “N” ser menor do que o valor mínimo de  $5 \times 10^5$ , é necessária uma altura de 6 cm para os blocos pavers. A Figura 81 ilustra a seção transversal desse pavimento intertravado dimensionado.



Dessa forma, com as espessuras das camadas determinadas e a área de estacionamento do DEECC medida, que é de, aproximadamente, 1624 m<sup>2</sup>, é possível calcular os volumes de materiais a serem utilizados na execução da obra. Com relação à areia de rejuntamento, recorreu-se às composições da tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA – CE), e descobriu-se que, para a construção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento de BIPs (10 cm × 20 cm → Seção Transversal), é preciso 0,15 m<sup>3</sup> desse material. Dessa forma, as Tabelas 46 e 47 apresentam os volumes de materiais necessários para a construção do pavimento intertravado.

**Tabela 46** – Relação dos volumes dos materiais, para o estacionamento, em suas respectivas camadas no pavimento.

CAMADAS	MATERIAIS	ESPESSURA (cm)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOLUME (m <sup>3</sup> )
SUB-BASE	Cinza leve	10 cm	1624	81,20
	Solo regional			81,20
ASSENTAMENTO	Solo regional	5 cm		81,20
REVESTIMENTO	Concreto	6 cm		97,44
REJUNTAMENTO	Solo regional	–		243,60

Fonte: AUTOR (2017).

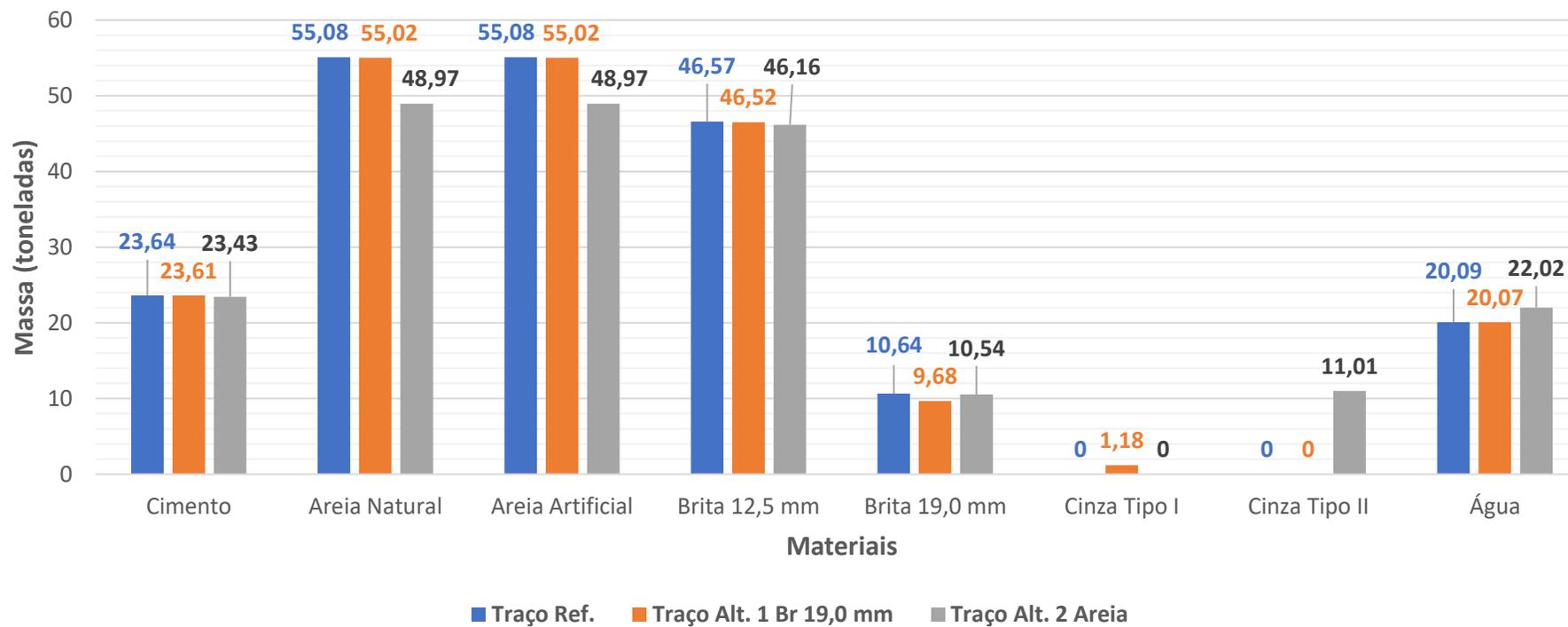
**Tabela 47** – Relação dos volumes totais para cada material.

MATERIAIS	VOLUME TOTAL (m <sup>3</sup> )
Cinza leve	81,20
Solo regional	406,00
Concreto	97,44

Fonte: AUTOR (2017).

No caso da cinza leve, o volume de 81,20 m<sup>3</sup> é equivalente a, aproximadamente, 130 toneladas, já no concreto, é interessante o conhecimento da massa correspondente, para que, assim, sejam determinadas as quantidades de cada agregado componente da mistura. Primeiramente, o volume de cada paver utilizado nesse pavimento é igual a 1200 cm<sup>3</sup> (20 cm × 10 cm × 6 cm) e por meio de informações coletadas no setor de produção da fábrica da OCS, onde esses blocos são fabricados, a massa média de cada unidade é de 2,6 kg para o traço com resistência de 35 MPa aos 28 dias, que foi o mesmo utilizado na pesquisa como traço de referência. Dessa forma, calcula-se que sejam necessários cerca de 81200 pavers para o estacionamento e, assim, uma massa de, aproximadamente, 211,12 toneladas de concreto. Considerando essa massa para os três traços estudados, a Figura 82 apresenta as quantidades de cada agregado e cinza pesada para a obra do estacionamento.

**Figura 82** – Gráfico com as quantidades necessárias de cada material para a obra de estacionamento de 1624 m<sup>2</sup>.



Fonte: AUTOR (2017).

Expostos esses dados, percebe-se que pode ser interessante a inserção das cinzas na composição do pavimento, seja nas camadas granulares ou no concreto usado em BIPs para revestimento, pois o custo de aquisição de esses resíduos, geralmente, é inferior ao dos materiais convencionais. Assim, para uma obra de considerável porte, pode representar uma economia significativa para a empresa responsável, além da finalidade útil que é dada para as cinzas.

#### **4.4.1 Análise Comparativa de Custos**

Para compor os custos do pavimento intertravado e, posteriormente, comparar os valores para cada traço estudado, foi utilizada a tabela de custos sem desoneração da SEINFRA – CE) em conjunto com a tabela de preços, no ano de 2016, dos produtos da empresa OCS. No caso, foi considerado que as cinzas leve e pesada tiveram custo de aquisição nulo.

Dessa forma, na camada de revestimento, o custo vai variar de acordo com a mistura utilizada no concreto, em que o traço de referência não possui cinzas, o alternativo com substituição de brita 19,0 mm tem 0,56%, em massa, de resíduo e o alternativo com substituição de areia possui 5,22%, em massa de cinzas. Sendo assim, com o custo de aquisição das cinzas sendo zero, será feita uma relação inversamente proporcional entre o preço de venda do paver padrão e a porcentagem de resíduo na mistura, com o intuito de estimar os custos do concreto para os três traços analisados no trabalho.

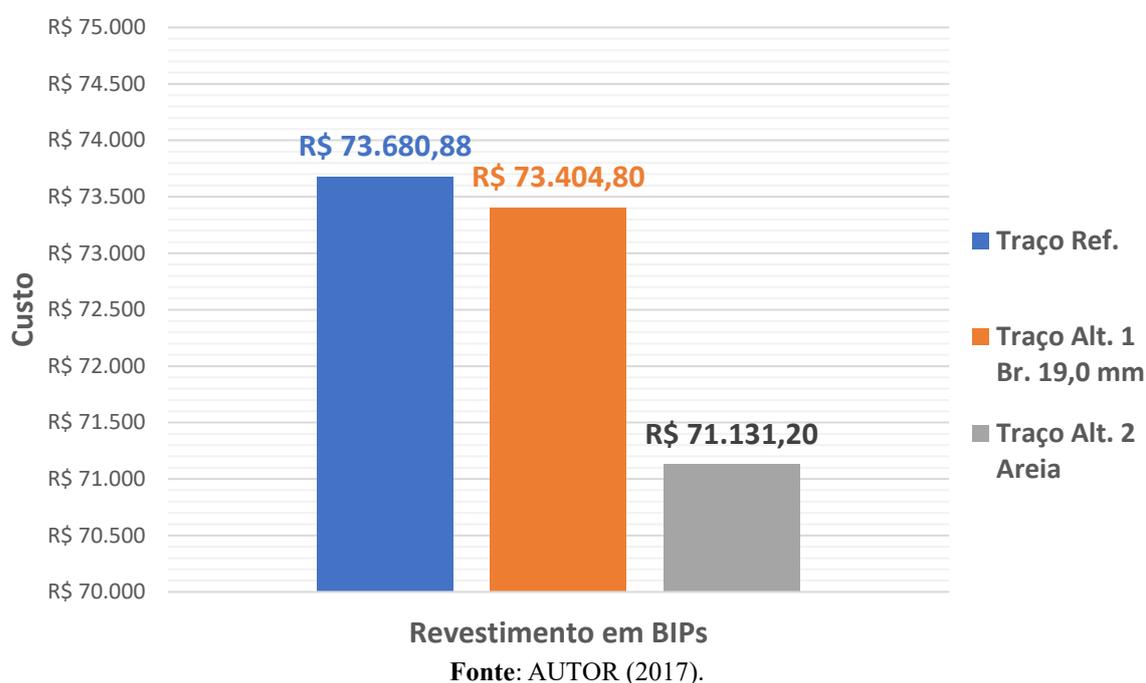
Dessa forma, na Tabela 48, foi feita a composição de preço, por camada, para a construção do pavimento teórico na área de estacionamento do DEECC e na Figura 83, foi colocado um gráfico que ilustra as diferenças de custo do revestimento para cada traço de concreto. Maiores detalhes a respeito da formação dos preços unitários estão inseridos no **ANEXO B**.

**Tabela 48** – Custos comparativos do pavimento intertravado para a área de estacionamento do DEECC.

SERVIÇOS	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO (R\$)	QUANTIDADE	PREÇO PARCIAL (R\$)
Sub-base (Solo regional + cinza leve)	m <sup>3</sup>	17,10	162,40	2.777,04 (I)
Assentamento (Solo regional)	m <sup>3</sup>	28,70	81,20	2.330,44 (II)
Revestimento com rejuntamento → Traço de Ref.	m <sup>2</sup>	45,37	1624,00	73.680,88 (III)
Revestimento com rejuntamento → Traço Alt c/ Br. 19,0 mm	m <sup>2</sup>	45,20	1624,00	73.404,80 (IV)
Revestimento com rejuntamento → Traço Alt c/ Areia	m <sup>2</sup>	43,80	1624,00	71.131,20 (V)
PREÇO TOTAL (R\$) → Traço de Ref.				78.788,36 (I + II + III)
PREÇO TOTAL (R\$) → Traço Alt c/ Br. 19,0 mm				78.512,28 (I + II + IV)
PREÇO TOTAL (R\$)→ Traço Alt c/ Areia				76.238,68 (I + II + V)

Fonte: AUTOR (2017).

**Figura 83** – Gráfico comparativo de custos no revestimento em BIPs de acordo com o traço utilizado no concreto.



É possível perceber, na Tabela 48, que o custo majoritário da construção do pavimento intertravado advém da execução do revestimento em BIPs com o rejuntamento, pois, para esse cálculo, foi considerado que os blocos pavers eram comprados prontos diretamente da fábrica da OCS. A questão é que esse custo pode ser reduzido, desde que haja uma linha de produção no interior da obra para a fabricação própria dos pavers, assim, seria necessário, somente, a compra dos materiais componentes da mistura. Também é necessário perceber que o uso dos traços alternativos barateou o preço da execução do revestimento em BIPs, principalmente o uso da mistura com substituição de areia (R\$ 76.238,68), que utilizou um teor maior de cinzas na massa total (5,22%). Devido ao custo de aquisição das cinzas ser nulo, pode-se colocar que, do ponto de vista econômico, é vantajoso, para esse caso, a construção do pavimento dimensionado com revestimento composto por materiais convencionais e cinzas pesadas.

#### 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram colocados e discutidos os resultados obtidos, através da execução do programa experimental. Primeiramente, foram apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das cinzas e dos agregados convencionais, para que se pudesse tecer comentários a respeito do comportamento individual de cada material. Em seguida, foram colocadas as curvas granulométricas, correspondentes à mistura sem e com a presença de resíduos, assim, foram

avaliados os efeitos da substituição de cinzas por agregados convencionais. Depois, avaliou-se o comportamento do concreto no estado fresco e endurecido, para que houvesse a discussão se os traços alternativos poderiam apresentar resultados similares ou superiores aos do traço de referência. Por fim, foi dimensionado um pavimento intertravado idealizado, com o intuito de determinar a quantidade de materiais a serem utilizados e comparar os custos totais da estrutura a depender do traço aplicado para o concreto.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com este trabalho, em que serão colocadas as contribuições, junto com as sugestões para trabalhos futuros, a fim de dar continuidade ao tema da pesquisa.

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES**

### **5.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões mais significativas acerca do desenvolvimento do presente trabalho, em que são mostradas as principais contribuições que a pesquisa pode oferecer, além das constatações observadas durante a execução do programa experimental. Também serão colocadas algumas sugestões para trabalho futuros, com o intuito de avançar ainda mais a pesquisa e englobar outros campos de conhecimento relacionados ao tema.

### **5.2 Principais Contribuições**

A principal contribuição desta pesquisa foi verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas de carvão mineral, produzidas na UTP, na fabricação de blocos intertravados de concreto na área de pavimentação. Dessa forma, espera-se ter proposto uma finalidade sustentável, econômica e ambientalmente satisfatória para os resíduos que são armazenados nos módulos da usina. Verificou-se que as cinzas coletadas substituíram, parcialmente, os agregados convencionais componentes do concreto usado em peças para pavimento intertravado. Então, o intuito é conseguir resultados satisfatórios com esse reaproveitamento de material alternativo, para que os custos de tratamento e de disposição final do resíduo diminuam, além de poder oferecer matéria-prima secundária ao mercado rodoviário.

### **5.3 Principais Constatações**

#### **5.3.1 Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização e ambientais nas cinzas e nos agregados convencionais**

Com relação às cinzas, foram obtidas amostras superficiais, sendo a densidade real igual a 2,35; umidade higroscópica de 0,10%; limites de liquidez e de plasticidade não determinados, o que caracteriza o material como não líquido e não-plástico. A cinza pesada foi classificada como resíduo Classe I (perigoso), no entanto, considerando que os teores de cinzas, nos traços alternativos, são de, apenas, 10% ao considerar a mistura total, é possível que o concreto não seja tão prejudicado pelo grau de periculosidade desses resíduos. Ainda mais, existe a possibilidade das cinzas apresentarem uma diminuição na velocidade de lixiviação das substâncias nocivas, ao serem envolvidas pelas partículas do concreto, assim, não considerando o extrato

liviado e, sim, o solubilizado, o resíduo é classificado como Classe II-A (não inerte), o que não inviabiliza o seu uso na construção de um pavimento. Na análise granulométrica, as cinzas pesadas coletadas possuem 31% de pedregulho (grãos acima de 4,8 mm) e 28% de areia fina (grãos entre 0,42 mm e 0,074 mm). Dessa forma, as cinzas foram separadas em duas frações utilizáveis, sendo o Tipo I passante na peneira de 19,0 mm e retido na de 2,0 mm e o Tipo II passante na peneira de 2,0 mm.

Com relação aos agregados convencionais, as massas específicas foram iguais a: 2,691 g/cm<sup>3</sup> (areia natural), 2,602 g/cm<sup>3</sup> (areia artificial) e 2,500 g/cm<sup>3</sup> (brita 19,0 mm e 12,5 mm). Já para a massa unitária, esta corresponde aos seguintes valores: 1359,333 kg/m<sup>3</sup> (brita 19,0 mm), 1449,289 kg/m<sup>3</sup> (brita 12,5 mm), 1413,467 kg/m<sup>3</sup> (areia natural) e 1464,889 kg/m<sup>3</sup> (areia artificial). Na granulometria dos materiais, percebeu-se que a brita 19,0 mm se encaixou, mais adequadamente, na zona 9,5/25, enquanto que a brita 12,5 se situou na zona 4,75/12,5, o que faz sentido, devido às dimensões de esses materiais. Já no caso da areia, depois da mistura, em massa, de 50% do tipo natural e de 50% do tipo artificial, constatou-se que a curva do agregado miúdo resultante estava inserida, quase que inteiramente, dentro dos limites da zona utilizável, o que está de acordo com a norma ABNT NBR NM 248/2003.

Para o conhecimento dos teores de cinzas que poderiam ser aplicados, procedeu-se para a combinação granulométrica dos agregados de acordo com as suas quantidades nos traços analisados. No decorrer do processo, optou-se por substituir 10%, em massa, de brita 19,0 mm e de areia por cinzas do Tipo I e II, respectivamente, originando duas composições alternativas, assim, essas substituições se mostraram viáveis do ponto de vista granulométrico.

### **5.3.2 Quanto aos resultados dos ensaios nos corpos-de-prova cilíndricos e nos Blocos Intertravados de Pavimentos**

Depois de feita a mistura dos materiais em uma betoneira, realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) nos três traços para avaliar a consistência do concreto ainda no estado fresco. Em todos os casos, o abatimento foi igual a zero, o que demonstra que o concreto é do tipo seco e, assim, precisa-se de uma quantidade maior de água para torná-lo trabalhável sem o uso de aditivo. É interessante fazer a constatação de que, usualmente, para esse tipo de mistura, o valor de água adicionado ao traço é uma porcentagem da massa total da mistura e, para os três traços, esse valor foi em torno de 10%.

No concreto em estado endurecido, foi realizado o ensaio de avaliação dimensional nos pavers, em que estes apresentaram as dimensões correspondentes as suas fôrmas, sendo 100

mm de largura, 200 mm de comprimento e 60 mm de espessura. Na inspeção visual, tanto os CP's cilíndricos, quanto os blocos apresentarem um aspecto sem muitos defeitos, com exceção de alguns vazios superficiais, mas é preciso destacar o fato de que a desmoldagem mais apressada dos pavers correspondentes ao traço alternativo com substituição de brita 19,0 mm fez com que as amostras apresentassem consideráveis vazios ao longo de sua extensão, mostrando que o concreto seco precisa, preferencialmente, de um tratamento via máquina de vibro-prensa, para que as suas características mecânicas não sejam prejudicadas ao ser feita uma desforma rápida.

Quanto aos resultados dos ensaios de resistência à compressão, foi calculado o valor médio para os CP's cilíndricos que, no caso, foram: (a) 15,63 MPa (3 dias), 18,85 MPa (7 dias), 22,43 MPa (28 dias) para o traço de referência; (b) 15,14 MPa (3 dias), 18,99 MPa (7 dias), 25,14 MPa (28 dias) para o traço alternativo com substituição de brita 19,0 mm e (c) 12,14 MPa (3 dias), 15,72 MPa (7 dias), 22,40 MPa (28 dias) para o traço alternativo com substituição de areia. Com relação aos pavers, foi determinada a resistência característica para cada período de cura, como: (d) 10,93 MPa (3 dias), 13,59 MPa (7 dias), 21,55 MPa (28 dias) para o traço de referência; (e) 11,18 MPa (3 dias), 13,49 MPa (7 dias), 19,09 MPa (28 dias) para o traço alternativo com substituição de brita 19,0 mm e (f) 7,64 MPa (3 dias), 10,72 MPa (7 dias), 17,31 MPa (28 dias) para o traço alternativo com substituição de areia. Percebe-se que o traço alternativo com brita 19,0 mm foi o que mais se aproximou do comportamento da mistura de referência e um dos motivos para isso é que a distribuição granulométrica da cinza Tipo I se assemelha ao da brita 19,0 mm a ponto das DMCs serem iguais, o que mostra que esse resíduo é capaz de desempenhar a função do agregado graúdo em questão. Com relação ao traço alternativo com areia, é importante citar que foi a mistura que manifestou as maiores taxas de incremento de resistência no decorrer dos dias, pois, provavelmente, o elevado teor de finos propiciou a continuação das reações de hidratação por mais tempo. Isso fez, por exemplo, com que, aos 28 dias, apresentasse um valor (22,40 MPa), praticamente, idêntico ao do traço de referência (22,43 MPa), o que levanta a necessidade de se avaliar essas amostras com um período de cura ainda mais elevado, fazendo com que o incremento de resistência continue a agir nos traços alternativos.

Ainda com relação à resistência à compressão, é possível observar que os resultados são inferiores ao mínimo de 35 MPa colocado na norma ABNT NBR 9781/2013. Com relação a isso, com base em outros trabalhos acadêmicos, é possível destinar os pavers com essa dosagem para áreas menos solicitantes de tráfego, como ciclovias, por exemplo e, também, é interessante que os valores limites na norma citada sejam revisados, pois são parâmetros existentes desde a versão antiga de 1987. Para serem alcançados valores mais elevados, também, pode-se proceder

para alterações no traço de referência, como a adição de mais cimento, por exemplo, o que é algo que precisa ser pesquisado em testes futuros.

No que diz respeito ao ensaio de absorção de água, os valores individuais e médios obtidos para os CP's cilíndricos foram: (i) 4,05%, 3,39%, 3,41% e 3,61% (Média) para o traço de referência; (ii) 3,87%, 3,97%, 4,87% e 4,23% (Média) para o traço alternativo com substituição de brita 19,0 mm e (iii) 3,85%, 3,56%, 3,55% e 3,65% (Média) para o traço alternativo com substituição de areia. Observa-se que todos esses valores estão de acordo com os limites impostos pela norma ABNT NBR 9781/2013, o que é um resultado satisfatório, porém é importante destacar que as porcentagens médias dos traços alternativos foram maiores do que as do traço de referência, o que indica, provavelmente, que as cinzas possuem mais poros permeáveis dos que os agregados convencionais.

Também destaca-se a análise estatística realizada nos resultados dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, seja no CP cilíndrico ou no paver. Foi constatado, por exemplo, que, na absorção de água para CP cilíndrico e na resistência à compressão para pavers, a substituição dos agregados convencionais pelas cinzas não influenciou, significativamente, nos resultados. Já na resistência à compressão dos CPs cilíndricos, a mudança de material inferiu, de forma considerável, nos resultados, por exemplo, aos 28 dias, foi observado que a inserção de cinzas no traço alternativo com brita 19,0 mm foi positiva para a mistura.

### **5.3.3 Quanto à proposta de um pavimento experimental para o Campus do Pici/UFC**

Foi idealizado uma estrutura de pavimento intertravado a ser construída em uma região de estacionamento de 1624 m<sup>2</sup> aproximadamente, localizada nos arredores do DECC no Campus do Pici/UFC, onde foi considerado um tráfego leve de "N" =  $3 \times 10^5$ . Com o intuito de especificar os materiais presentes nas camadas granulares do pavimento, foram utilizados os resultados obtidos por Vasconcelos (2016). No caso, foi utilizada a mistura M3 (50% cinza leve e 50% solo regional) como sub-base, a mistura M1 (100% solo regional) como camada de assentamento e rejuntamento, e no revestimento, foram testados os três traços estudados para os BIPs, em que uma comparação de custos foi feita.

Com o dimensionamento, descobriu-se que, para essa região específica do DECC, seriam consumidas cerca de 130 toneladas de cinza leve e, com o uso dos traços alternativos com substituição de brita 19,0 mm e de areia, 1 e 11 toneladas de cinza pesada, respectivamente. Além do elevado consumo de resíduos, é preciso considerar o viés econômico, em que a utilização dos traços alternativos no revestimento fez a estrutura do pavimento ser de menor custo, sem contar

que esse valor pode ser reduzido ainda mais, desde que exista uma linha de produção dentro da obra capaz de fabricar os próprios pavers com a resistência necessária.

Conclui-se que a mistura proposta de cinzas, sejam essas leves ou pesadas, é apta do ponto de vista econômico para ser empregada na construção de pavimentos intertravados.

#### **5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros**

De forma a complementar o estudo desenvolvido graças à pesquisa do reaproveitamento de cinzas, serão colocadas algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros. O objetivo é fornecer possibilidades de prosseguimento ao trabalho de reutilização de esse resíduo em blocos de concreto intertravados e em outras áreas relacionadas à pavimentação, como:

- (a) coletar cinzas de outras áreas dos Módulos II e III, pois esses são locais de armazenamento que podem fornecer um maior volume de resíduos a serem empregados na pavimentação;
- (b) aplicar e expandir a metodologia utilizada nesta pesquisa para o uso de cinzas leves, em que é interessante a avaliação de suas propriedades para se estudar a inserção de esse resíduo em BIPs;
- (c) utilizar outros agregados convencionais de origem distinta da RMF, a fim de se determinar as suas características para compor um traço de referência igual ou modificado ao que foi mostrado neste trabalho;
- (d) aplicar um processo de produção para o concreto com maior nível de qualidade, em que possa ser utilizado, por exemplo, uma máquina de vibro-prensa, a fim de fornecer uma compactação mais satisfatória para a mistura;
- (e) propor mudanças nos traços alternativos utilizados no trabalho, em que possam ser utilizadas maiores porcentagens de cinzas na composição da mistura, seja substituindo o agregado graúdo ou miúdo;
- (f) estudar o tipo de solo que possa ser utilizado nas camadas de rejuntamento e de assentamento em um pavimento intertravado, em que pode ser investigada a incorporação de cinzas a esse solo com uma possível adição de cal ou de cimento;
- (g) acompanhar a construção de um trecho experimental que utilize blocos intertravados de pavimentos com a incorporação de cinzas no concreto, além da possibilidade de serem utilizados esses resíduos nas camadas de rejuntamento e de

assentamento. Além disso, devem ser monitoradas os comportamentos mecânicos e interações ambientais do pavimento no decorrer do tempo.

### **5.5 Considerações Finais**

Depois de toda a execução deste trabalho, pode-se escrever que as cinzas foram um resíduo que pôde ser incorporado na composição do concreto usado em BIPs, em que o traço alternativo com brita 19,0 mm forneceu resultados, como a resistência à compressão, superiores aos do traço de referência.

Conclui-se que o reaproveitamento das cinzas é uma alternativa sustentável e ambientalmente satisfatória para essa aplicação na área de pavimentação, mas é importante frisar que mais testes sejam feitos, a fim de dar mais embasamento para a pesquisa. Além disso, pode ser estudada a incorporação do resíduo a outros elementos componentes do pavimento intertravado, como as camadas de assentamento e de rejuntamento, o que faz com que seja criado um pavimento ecológico com o emprego de cinzas em todas as partes componentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. V. **Estudo de Concreto de Alta Resistência Compactado com Rolo Para Pavimentação**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ARAÚJO, T. G. **Viabilidade de Aplicação das Cinzas da Bacia de Resíduos da Termelétrica do Pecém no Concreto**. 2016. 58 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ARY JUNIOR, I. J. **Pavimento Intertravado como Ferramenta de Moderação do Tráfego nos Centros Comerciais de Travessias Urbanas - Estudo de Caso Guaiúba, CE**. 2007. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Pavimento Intertravado**. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1 – Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BARROS, K.S. **Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos.** 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

CAPELETTO, M. Peabiru – Estrada Inca que Cortava o Brasil. **O Mundo Variável**, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://omundovariavel.blogspot.com.br/2015/06/peabiru-estrada-inca-que-cortava-o.html>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

CARVÃO Mineral. **EDP – Porto do Pecém Geração de energia S/A**, São Gonçalo do Amarante, 2013. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/ceara/energia-pecem/A-Usina/Paginas/Carvao-Mineral.aspx>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

COSTA, L. Obras do Porto do Pecém foram suspensas ontem. **O Povo**, Fortaleza, 14 mar. 2017. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/jornal/economia/2017/03/obras-do-porto-do-pecem-foram-suspensas-ontem.html>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 041:** Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 051:** Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 082:** Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 093:** Solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 122:** Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **064/2004 – ME:** Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

DINIZ, M.F. O impacto das usinas térmicas no meio ambiente. **MD Networking**, set. 2015. Disponível em:

<<https://marisadiniz.wordpress.com/2015/09/16/o-impacto-das-usinas-termicas-no-meio-ambiente/>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

EMPRESA T & A - BLOCOS E PISOS. **Manual Técnico de Piso Intertravado de Concreto**, 2004.

ESTUDO analisa uso de cinzas. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 25 nov. 2015. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/estudo-analisa-uso-de-cinzas-1.1440999>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

FARIA, R. Planejamento: Pavimento Intertravado. **Revista Equipe de Obra**, São Paulo, n. 40, set. 2011. Disponível em:

<<http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/40/pavimento-intertravado-236319-1.aspx>>. Acesso em: 27 maio 2017.

FARIAS, E.R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação – análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. Ribeirão Preto: Ed. Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2016.

FERREIRA, R. *et al.* Construção: Pavimento intertravado de concreto x pavimento asfáltico. **Revista Construção Mercado**, São Paulo, n. 125, dez. 2011. Disponível em:

<<http://construcomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/125/artigo299124-1.aspx>>. Acesso em: 28 maio 2017.

GONÇALVES, P. C. M. **Betão com agregados reciclados: análise comentada da legislação existente**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2007.

GOOGLE MAPS. **Localização do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil**. Disponível em:

<<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

HALLACK, A. **Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais**. 1998. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

IMAGENS. **EDP – Porto do Pecém Geração de energia S/A**, São Gonçalo do Amarante, [2013?]. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/ceara/energia-pecem/A-Usina/Paginas/Imagens.aspx>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

LEANDRO, R.P.; FABBRI, G.T.P. Aproveitamento da cinza pesada de carvão mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis. *In: PANORAMA NACIONAL DA PESQUISA EM TRANSPORTES*, 1., 2009, Vitória. **Anais...** Vitória: 2009.

LODI, A.L.G; GAMBIN, G.R.; WEIT, M.L. **Incorporação de Resíduos Vítreos na Fabricação de Blocos de Concreto para Pavimentação Intertravada**. 2014. 54 f. Dissertação (Graduação

em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

LOPES, L.M. **Olhares**, Itália, 2006. Disponível em: <<https://olhares.uol.com.br/via-apia-pompeia-sicilia-foto982770.html>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

LOPES, L.S.E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de pavimentos**. 2011. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MAGDALENA, C.P; FUNGARO, D.A. Resíduos sólidos provenientes da queima do carvão de usina termelétrica. **Revista Educação Ambiental em Ação**, São Paulo, n. 41, 2012.

MÁQUINA para Blocos, Vibro prensa, Misturadores e Central de Abastecimento. **Mercado Físico Rural**, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br/detalhe/maquina-para-blocos-vibro-prensa-misturadores-e-central-de-abastecimento-125529.aspx>>. Acesso em: 30 maio 2017.

MELO VIEIRA, M. *et al.* Avaliação do Desempenho do Concreto com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza da Combustão de Carvão Mineral. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: 2012.

NEVILLE, A.M. **Properties of Concrete**, Fourth and Final Edition, Longman, Malaysia, 1995;

PAVER. **Empresa HiperBlock**, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://www.hiperblock.com/produto/2/paver/>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

PAVIMENTO Intertravado alia durabilidade e estética. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. 2012. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/banco-de-pautas/pavimento-intertravado-alia-durabilidade-e-estetica/>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

PIRES, G.W.M.O. **Incorporação de Resíduos Vítreos na Fabricação de Blocos de Concreto para Pavimentação Intertravada**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2015.

PISO Intertravado Tijolo. **Empresa FACIS**, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.facisbrasil.com.br/produtos/detalhes/piso+intertravado+tijolo>>. Acesso em: 25 maio 2017.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto**. Instrução de Projeto - IP 06, São Paulo, 2004.

RIBEIRO, T. **Blog First Class**, São Paulo, 09 maio 2010. Disponível em: <<http://firstclassbytaty.blogspot.com.br/2010/05/blumenal-sc-oktoberfest.html>>. Acesso em: 25 maio 2017.

ROCHA, R. Obra de pavimentação com piso intertravado. **Tem Sustentável**, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.temsustentavel.com.br/obra-de-pavimentacao-com-piso-intertravado/>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

RODOVIAS com intertravado já são realidade. **Revista Prisma**, São Paulo, n. 10, 2004. Disponível em: <<http://www.portalprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=18>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

ROSSI, F. Assentamento de Piso Intertravado, Passo a Passo. **Pedreirão**. [2011?]. Disponível em: <<http://pedreirao.com.br/assentamento-de-piso-intertravado-passo-a-passo/>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

SALES, R.J.M. **Avaliação de Blocos de Concreto para Pavimentação produzidos com Agregados Reciclados de RCD**. 2009. 55 f. Dissertação (Graduação em Saneamento Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SANTANA, C. R. Limites de Atterberg. **Wikipédia**, 26 nov. 2007. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Limites\\_de\\_Atterberg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Limites_de_Atterberg)>. Acesso em: 17 out. 2017.

SHACKEL, B. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavements**. First Edition and Reprinted 1991, Elsevier, New York and London, 1990.

SOUZA, A.M.P.F.F.C. **Pavimento Intertravado de Concreto com Adição de Resíduos de óxido de Alumínio – Sínter**. 2011. 56 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Bragança Paulista, 2011.

TANGO, C.E.S. Procedimentos de Dosagem de Concreto para Blocos Estruturais. *In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES*, 5., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 1994. pp 21-30.

ÚNICA máquina do misturador concreto de cimento hidráulico para construção concreta pré-fabricada. **Fábrica KUDAT**, China, [201-?]. Disponível em: <<http://portuguese.roadconstruction-machine.com/sale-7564186-single-cylinder-hydraulic-cement-concrete-mixer-machine-for-prefabricated-concrete-construction.html>>. Acesso em: 30 maio 2017.

USINA Termoelétrica. **TodaMatéria**, 2014. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/usina-termoeletrica/>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Relatório de Prospecção das Cinzas da Usina Termelétrica Energia Pecém**. 18 f. Fortaleza, 2015.

VASCONCELOS, S.D. **Avaliação da Heterogeneidade de Cinzas de Carvão Mineral Advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos**. 2016. 122 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.

ZACARIAS NASCIMENTO, W.; FORMAGINI, S. Desenvolvimento de Blocos para Pavimentação com Cinzas Residuais de Bagaço de Cana-de-Açúcar. *In: SEMINÁRIO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 3., 2008, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: 2008.

## APÊNDICE A – TABELAS ASSOCIADAS ÀS CURVAS DE GRANULOMETRIA

**Tabela 49** – Valores de porcentagens passante e retida acumulada em função do diâmetro das partículas (associada à Figura 59 na página 107).

Diâmetro (mm)	Passante (%)	Retido Acum. (%)	Diâmetro (mm)	Passante (%)	Retido Acum. (%)
50,8	100,00	0,00	0,297	39,14	60,86
38,1	98,76	1,24	0,149	26,62	73,38
32,0	96,58	3,42	0,075	14,28	85,72
25,4	93,89	6,11	0,0747	13,81	86,19
19,1	89,91	10,09	0,0543	9,64	90,36
12,27	83,14	16,86	0,0392	6,31	93,69
9,52	78,73	21,27	0,0271	5,48	94,52
6,30	73,05	26,95	0,0193	4,65	95,35
4,76	69,19	30,81	0,0141	4,65	95,35
2,40	59,56	40,44	0,0100	3,81	96,19
2,00	57,34	42,66	0,0071	2,98	97,02
1,19	54,20	45,80	0,0051	2,15	97,85
0,59	46,22	53,78	0,0036	2,15	97,85
0,42	42,75	57,25	0,0025	2,15	97,85
<b>CONTINUAÇÃO</b> →			0,0015	2,15	97,85

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 50** – Granulometria da cinza pesada passante na 19,0 mm e retida na 2,0 mm (associada à Figura 61 na página 109).

Diâmetro (mm)	Passante (%)	Retido Acum. (%)
19,10	100,00	0,00
12,27	79,22	20,78
9,52	65,67	34,33
6,30	48,23	51,77
4,76	36,38	63,62
2,40	6,81	93,19
2,00	0,00	100,00
1,20	0,00	100,00
0,60	0,00	100,00
0,42	0,00	100,00
0,30	0,00	100,00
0,15	0,00	100,00
DMC =		19,0 mm
MF =		5,91

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 51** – Granulometria da cinza pesada passante na 2,0 mm (associada à Figura 61 na página 109).

Diâmetro (mm)	Passante (%)	Retido Acum. (%)
19,10	100,00	0,00
12,27	100,00	0,00
9,52	100,00	0,00
6,30	100,00	0,00
4,76	100,00	0,00
2,40	100,00	0,00
2,00	100,00	0,00
1,20	94,53	5,47
0,60	80,60	19,40
0,42	74,56	25,44
0,30	68,26	31,74
0,15	46,42	53,58
DMC =		2,0 mm
MF =		1,10

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 52** – Granulometria da brita 19,0 mm (associada à Figura 62 na página 113).

	Amostra 1	Amostra 2	Resultado Final
Peneiras	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada
25mm	0,00	0,00	0,00
19mm	2,14	4,09	3,11
12,5mm	64,54	70,18	67,36
9,5mm	93,69	95,63	94,66
6,3mm	99,98	99,98	99,98
4,75mm	100,00	100,00	100,00
2,36mm	100,00	100,00	100,00
1,18mm	100,00	100,00	100,00
0,600mm	100,00	100,00	100,00
0,300mm	100,00	100,00	100,00
0,150mm	100,00	100,00	100,00
FUNDO	100,00	100,00	100,00
DMC	19,0 mm	19,0 mm	19,0 mm
MF	6,96	7,00	6,98

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 54** – Granulometria da areia natural (associada à Figura 63 na página 113).

	Amostra 1	Amostra 2	Resultado Final
Peneiras	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada
25mm	0,00	0,00	0,00
19mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm	0,30	1,00	0,65
9,5mm	1,00	2,10	1,55
6,3mm	2,40	3,31	2,85
4,75mm	3,70	4,51	4,10
2,36mm	15,40	16,03	15,72
1,18mm	30,20	30,96	30,58
0,600mm	43,20	44,19	43,69
0,300mm	56,70	57,72	57,21
0,150mm	71,50	72,04	71,77
FUNDO	100,00	100,00	100,00
DMC	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm
MF	2,22	2,28	2,25

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 53** – Granulometria da brita 12,5 mm (associada à Figura 62 na página 113).

	Amostra 1	Amostra 2	Resultado Final
Peneiras	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada
25mm	0,00	0,00	0,00
19mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm	3,89	3,05	3,47
9,5mm	22,95	19,12	21,04
6,3mm	65,82	59,19	62,50
4,75mm	83,31	77,03	80,17
2,36mm	98,40	95,99	97,19
1,18mm	99,84	99,68	99,76
0,600mm	99,84	99,68	99,76
0,300mm	99,84	99,68	99,76
0,150mm	99,84	99,68	99,76
FUNDO	100,00	100,00	100,00
DMC	12,5 mm	12,5 mm	12,5 mm
MF	6,04	5,91	5,97

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 55** – Granulometria da areia artificial (associada à Figura 63 na página 113).

	Amostra 1	Amostra 2	Resultado Final
Peneiras	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada	% Retida Acumulada
25mm	0,00	0,00	0,00
19mm	0,00	0,00	0,00
12,5mm	0,00	0,39	0,20
9,5mm	0,00	0,39	0,20
6,3mm	0,95	0,92	0,94
4,75mm	3,13	2,23	2,68
2,36mm	22,34	20,13	21,24
1,18mm	48,43	44,13	46,28
0,600mm	66,28	62,69	64,48
0,300mm	79,63	76,72	78,18
0,150mm	89,58	88,00	88,79
FUNDO	100,00	100,00	100,00
DMC	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm
MF	3,09	2,94	3,02

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 56** – Granulometria da mistura das areias (associada à Figura 63 na página 113).

Mistura das Areias	
Peneiras	% Retida Acumulada
25mm	0,00
19mm	0,00
12,5mm	0,42
9,5mm	0,87
6,3mm	1,89
4,75mm	3,39
2,36mm	18,48
1,18mm	38,43
0,600mm	54,09
0,300mm	67,69
0,150mm	80,28
FUNDO	100,00
DMC	4,75 mm
MF	2,63

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 57** – Zonas Granulométricas para agregados miúdos (associada à Figura 63 na página 113).

Peneira (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável Inferior	Zona Ótima Inferior	Zona Ótima Superior	Zona Utilizável Superior
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211/2009. Adaptado pelo autor.

**Tabela 58** – Zonas Granulométricas para agregados graúdos (associada à Figura 62 na página 113).

Peneira (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada									
	Zona Granulométrica d/D									
	4,75/12,5		9,5/25		19/31,5		25/50		37,5/75	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.
75	–	–	–	–	–	–	–	–	0	5
63	–	–	–	–	–	–	–	–	5	30
50	–	–	–	–	–	–	0	5	75	100
37,5	–	–	–	–	–	–	5	30	90	100
32	–	–	–	–	0	5	7	100	95	100
25	–	–	0	5	5	2	8	100	100	100
19	–	–	2	15	65	95	95	100	100	100
12,5	0	5	40	65	92	100	100	100	100	100
9,5	2	15	80	100	95	100	100	100	100	100
6,3	40	65	92	100	100	100	100	100	100	100
4,75	80	100	95	100	100	100	100	100	100	100
2,4	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: ABNT NBR 7211/2009. Adaptado pelo autor.

**Tabela 59** – Granulometria da mistura com os limites inferior e superior da faixa de controle (associada à Figura 64 na página 115).

Peneira (mm)	Granulometria Ponderada Acum.		Granulometria Combinada	
	Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)	Retida Indiv. (%)	Retida Acum. (%)
25	0,00	0,32	0,00	0,00
19	0,13	0,95	0,20	0,20
12,5	2,54	5,52	5,33	5,53
9,5	5,64	10,53	6,92	12,45
6,3	16,98	29,05	12,55	24,99
4,75	28,30	40,76	5,90	30,90
2,4	32,79	50,64	14,66	45,56
1,2	37,47	67,09	13,85	59,41
0,6	44,05	80,25	10,31	69,72
0,3	67,09	96,71	8,95	78,67
0,15	90,13	100,00	8,29	86,95
Fundo	–	–	13,05	100,00
Total	–	–	100,00	–
			DMC	19,0 mm
			MF	3,84

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 60** – Granulometria da mistura com cinzas Tipo I (associada à Figura 65 na página 116).

Mistura c/ cinzas Tipo I	
Peneiras	% Retida Acumulada
25mm	0,00
19mm	0,18
12,5mm	5,23
9,5mm	12,06
6,3mm	24,69
4,75mm	30,67
2,36mm	45,52
1,18mm	59,41
0,600mm	69,72
0,300mm	78,67
0,150mm	86,95
FUNDO	100,00
DMC	<b>19,0 mm</b>
MF	<b>3,83</b>

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 61** – Granulometria da brita 19,0 m com 10% de cinzas Tipo I (associada à Figura 66 na página 116).

Brita 19,0 mm c/ cinzas Tipo I	
Peneiras	% Retida Acumulada
25mm	0,00
19mm	2,80
12,5mm	62,70
9,5mm	88,63
6,3mm	95,16
4,75mm	96,36
2,36mm	99,32
1,18mm	100,00
0,600mm	100,00
0,300mm	100,00
0,150mm	100,00
FUNDO	100,00
DMC	<b>19,0 mm</b>
MF	<b>6,87</b>

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 62** – Granulometria da mistura com cinzas Tipo II (associada à Figura 67 na página 117).

<b>Mistura c/ cinzas Tipo II</b>	
<b>Peneiras</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
25mm	0,00
19mm	0,20
12,5mm	5,50
9,5mm	12,39
6,3mm	24,87
4,75mm	30,67
2,36mm	44,34
1,18mm	57,24
0,600mm	67,43
0,300mm	76,30
0,150mm	85,20
FUNDO	100,00
DMC	<b>19,0 mm</b>
MF	<b>3,74</b>

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 63** – Granulometria da areia com 10% de cinzas Tipo II (associada à Figura 68 na página 117).

<b>Areia c/ cinzas Tipo II</b>	
<b>Peneiras</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
25mm	0,00
19mm	0,00
12,5mm	0,38
9,5mm	0,79
6,3mm	1,71
4,75mm	3,05
2,36mm	16,63
1,18mm	35,14
0,600mm	50,62
0,300mm	64,10
0,150mm	77,61
FUNDO	100,00
DMC	<b>4,75 mm</b>
MF	<b>2,48</b>

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 64** – Dados do ensaio de Resistência à Compressão para os corpos-de-prova cilíndricos (associada à Figura 74 na página 122).

<b>Corpos-de-Prova Cilíndricos – Resistência Característica à Compressão</b>											
		Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia		Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 m	Traço Alternativo com Areia	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia
		Carga de Ruptura→ f (N)	Carga de Ruptura→ f (N)	Carga de Ruptura→ f (N)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Resistência Individual→ fc (MPa)	Resistência Individual→ fc (MPa)	Resistência Individual→ fc (MPa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Média (MPa)	Resistência Média (MPa)
<b>3 DIAS</b>	CP 1	111923,63	122549,67	98831,36	7853,98	14,25	15,60	12,58	<b>15,63</b>	<b>15,14</b>	<b>12,14</b>
	CP 2	118165,28	122854,14	90427,95	7853,98	15,05	15,64	11,51			
	CP 3	138077,70	111345,13	96760,95	7853,98	17,58	14,18	12,32			
<b>7 DIAS</b>	CP 1	146267,98	150804,59	119931,22	7853,98	18,62	19,20	15,27	<b>18,85</b>	<b>18,99</b>	<b>15,72</b>
	CP 2	143923,55	152570,53	127055,84	7853,98	18,32	19,43	16,18			
	CP 3	153971,09	144167,13	123523,98	7853,98	19,60	18,36	15,73			
<b>28 DIAS</b>	CP 1	176715,09	195210,67	167525,39	7853,98	22,50	24,85	21,33	<b>22,43</b>	<b>25,14</b>	<b>22,40</b>
	CP 2	169438,23	209446,01	183626,05	7853,98	21,57	26,67	23,38			
	CP 3	182439,16	187788,66	176616,37	7853,98	23,23	23,91	22,49			

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 65** – Dados do ensaio de Resistência à Compressão para os pavers (associada à Figura 76 na página 125).

<b>Blocos Pavers – Resistência Característica à Compressão</b>									
	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia			Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	
	Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Fator $\rho$	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	
<b>3 DIAS</b>	BL 1	88702,02	98992,71	67424,13	6361,73	0,95	13,25	14,78	10,07
	BL 2	78185,70	82610,01	101867,04	6361,73	0,95	11,68	12,34	15,21
	Resistência Média→ fp (MPa)		12,46	→Traço de Referência					
	Resistência Média→ fp (MPa)		13,56	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm					
	Resistência Média→ fp (MPa)		12,64	→Traço Alternativo com Areia					
	Coeficiente de Student→ s		1,376						
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		1,11	→Traço de Referência					
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		1,73	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm					
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		3,64	→Traço Alternativo com Areia					
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>10,93</b>	<b>→Traço de Referência</b>					
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>11,18</b>	<b>→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm</b>					
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>7,64</b>	<b>→Traço Alternativo com Areia</b>					

		Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia			Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	
		Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Fator $\rho$	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	
<b>7 DIAS</b>	BL 1	102700,89	95814,27	75723,39	6361,73	0,95	15,34	14,31	11,31	
	BL 2	94744,98	107331,21	84003,03	6361,73	0,95	14,15	16,03	12,54	
	Resistência Média→ fp (MPa)		14,74	→Traço de Referência						
	Resistência Média→ fp (MPa)		15,17	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm						
	Resistência Média→ fp (MPa)		11,93	→Traço Alternativo com Areia						
	Coeficiente de Student→ s		1,376							
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		0,84	→Traço de Referência						
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		1,22	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm						
	Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)		0,87	→Traço Alternativo com Areia						
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>13,59</b>	<b>→Traço de Referência</b>						
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>13,49</b>	<b>→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm</b>						
	<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>		<b>10,72</b>	<b>→Traço Alternativo com Areia</b>						

		Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia			Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	
		Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Carga de Ruptura (N)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Fator $\rho$	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	Resistência Individual (MPa)	
28 DIAS	BL 1	147012,66	133033,08	128216,70	6361,73	0,95	21,95	19,87	19,15	
	BL 2	145188,00	143981,37	119858,58	6361,73	0,95	21,68	21,50	17,90	
		Resistência Média→ fp (MPa)	21,82	→Traço de Referência						
		Resistência Média→ fp (MPa)	20,68	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm						
		Resistência Média→ fp (MPa)	18,52	→Traço Alternativo com Areia						
		Coefficiente de Student→ s	1,376							
		Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)	0,19	→Traço de Referência						
		Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)	1,16	→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm						
		Desvio - Padrão da Amostra→ t (MPa)	0,88	→Traço Alternativo com Areia						
		<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>	<b>21,55</b>	<b>→Traço de Referência</b>						
		<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>	<b>19,09</b>	<b>→Traço Alternativo com Brita 19,0 mm</b>						
		<b>Resistência Característica→ fpk, est (MPa)</b>	<b>17,31</b>	<b>→Traço Alternativo com Areia</b>						

Fonte: AUTOR (2017).

**Tabela 66** – Dados do ensaio de Absorção de Água para os corpos-de-prova cilíndricos (associada à Figura 77 na página 128).

<b>Corpos-de-Prova Cilíndricos – Absorção de Água</b>													
	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	Traço de Referência	Traço Alternativo com Brita 19,0 mm	Traço Alternativo com Areia	
	Massa Saturada (g)	Massa Saturada (g)	Massa Saturada (g)	Massa Seca (g)	Massa Seca (g)	Massa Seca (g)	<b>Absorção de Água Individual (%)</b>	<b>Absorção de Água Individual (%)</b>	<b>Absorção de Água Individual (%)</b>	<b>Absorção de Água Média (%)</b>	<b>Absorção de Água Média (%)</b>	<b>Absorção de Água Média (%)</b>	
<b>28 DIAS</b>	CP 1	3419,00	3411,00	3342,00	3286,00	3284,00	3218,00	<b>4,05</b>	<b>3,87</b>	<b>3,85</b>	<b>3,61</b>	<b>4,23</b>	<b>3,65</b>
	CP 2	3385,00	3329,00	3379,00	3274,00	3202,00	3263,00	<b>3,39</b>	<b>3,97</b>	<b>3,56</b>			
	CP 3	3431,00	3383,00	3357,00	3318,00	3226,00	3242,00	<b>3,41</b>	<b>4,87</b>	<b>3,55</b>			

Fonte: AUTOR (2017).

**ANEXO A – RESULTADOS COMPLETOS DA ANÁLISE  
ESTATÍSTICA POR MEIO DO SOFTWARE STATISTICA 7.0**

**Tabela 67 – Resultado da análise estatística ANOVA.**

<b>Variável Independente</b>	<b>Variável de Resposta</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b>Valor p</b>
Tipo de agregado	Resistência à compressão CP com 3 dias	21,401	2	10,700	7,960	0,020 Menor do que 0,05 <b>Significativo</b>
	Resistência à compressão CP com 7 dias	20,480	2	10,240	31,607	0,000651 Menor do que 0,05 <b>Significativo</b>
	Resistência à compressão CP com 28 dias	14,880	2	7,440	6,019	0,037 Menor do que 0,05 <b>Significativo</b>
	Resistência à compressão Paver com 3 dias	1,390	2	0,695	0,1194	0,891 Maior do que 0,05 <b>Não Significativo</b>
	Resistência à compressão Paver com 7 dias	12,415	2	6,208	6,315	0,084 Maior do que 0,05 <b>Não Significativo</b>
	Resistência à compressão Paver com 28 dias	11,206	2	5,603	7,809	0,065 Maior do que 0,05 <b>Não Significativo</b>
	Absorção de água CP com 28 dias	0,723	2	0,3613	2,285	0,183 Maior do que 0,05 <b>Não Significativo</b>

Fonte: STATISTICA 7.0.

**Tabela 68** – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 3 dias para o CP cilíndrico.

<b>Resultado (MPa)</b> <b>Traço</b>	<b>Ref. 15,63</b>	<b>Alt. c/ Areia 12,14</b>	<b>Alt. c/ Br 19 mm 15,14</b>
Ref.	–	0,0121	0,6272
Alt. c/ Areia	0,0121	–	0,0195
Alt. c/ Br 19 mm	0,6272	0,0195	–

Fonte: STATISTICA 7.0.

**Tabela 69** – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 7 dias para o CP cilíndrico.

<b>Resultado (MPa)</b> <b>Traço</b>	<b>Ref. 18,85</b>	<b>Alt. c/ Areia 15,72</b>	<b>Alt. c/ Br 19 mm 18,99</b>
Ref.	–	0,000739	0,7682
Alt. c/ Areia	0,000739	–	0,000594
Alt. c/ Br 19 mm	0,7682	0,000594	–

Fonte: STATISTICA 7.0.

**Tabela 70** – Resultado do teste de Duncan para a resistência à compressão aos 28 dias para o CP cilíndrico.

<b>Resultado (MPa)</b> <b>Traço</b>	<b>Ref. 22,43</b>	<b>Alt. c/ Areia 22,40</b>	<b>Alt. c/ Br 19 mm 25,14</b>
Ref.	–	0,9706	0,0246
Alt. c/ Areia	0,9706	–	0,0268
Alt. c/ Br 19 mm	0,0246	0,0268	–

Fonte: STATISTICA 7.0.

**ANEXO B – COMPOSIÇÃO DOS PREÇOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BASE NAS TABELAS DE CUSTO DA SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ (SEINFRA-CE) E EMPRESA OCS**

**Tabela 71 – Composição do custo/m<sup>3</sup> da camada de sub-base.**

<b>SUB BASE COM A MISTURA M3 → m<sup>3</sup></b>				
<b>EQUIPAMENTOS (CHORARIO)</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (R\$)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Caminhão Tanque 8.000 L (CHI)	hora	0,0114	16,6988	0,1897
Compac. de Pneus Pres. Var. Autopr. (CHI)	hora	0,0105	28,0058	0,2939
Compac. Liso Vibrat. Autopropelido (CHI)	hora	0,0089	25,5714	0,2273
Moto Niveladora (CHI)	hora	0,0101	38,6608	0,3914
Caminhão Tanque 8.000 L (CHP)	hora	0,0133	107,7968	1,4373
Compac. de Pneus Pres. Var. Autopr. (CHP)	hora	0,0019	146,1576	0,2707
Compac. Liso Vibrat. Autopropelido (CHP)	hora	0,0035	134,8041	0,4660
Moto Niveladora (CHP)	hora	0,0022	185,8430	0,4130
Recicladora à Frio (CHP)	hora	0,0123	647,4774	7,9935
Recicladora à Frio (CHI)	hora	0,0000	121,5409	0,0000
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>11,6828</b>
<b>MÃO-DE-OBRA</b>				
Servente	hora	0,1235	4,8800	0,6025
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>0,6025</b>
<b>SERVIÇOS</b>				
Desmatamento de Jazida	m <sup>2</sup>	0,5000	0,3048	0,1524
Escavação e Carga de Material de Jazida	m <sup>3</sup>	0,6790	3,5001	2,3766
Expurgo de Jazida	m <sup>3</sup>	0,1000	2,6798	0,2680
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>2,7970</b>
<b>TOTAL SIMPLES (R\$)</b>				<b>15,08</b>
<b>ENCARGOS SOCIAIS (R\$)</b>				<b>2,02</b>
<b>TOTAL GERAL (R\$)</b>				<b>17,10</b>

Fonte: SEINFRA-CE e OCS.

**Tabela 72** – Composição do custo/m<sup>3</sup> da camada de assentamento.

<b>CAMADA DE ASSENTAMENTO COM A MISTURA M1 → m<sup>3</sup></b>				
<b>EQUIPAMENTOS (CHORARIO)</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (R\$)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Caminhão Tanque 8.000 L (CHI)	hora	0,0067	16,6988	0,1113
Moto Niveladora (CHI)	hora	0,0017	38,6608	0,0670
Caminhão Tanque 8.000 L (CHP)	hora	0,0067	107,7968	0,7186
Moto Niveladora (CHP)	hora	0,0116	185,8430	2,1558
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>3,0527</b>
<b>MÃO-DE-OBRA</b>				
Servente	hora	0,0400	4,8800	0,1952
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>0,1952</b>
<b>SERVIÇOS</b>				
Usinagem de Misturas de Agregados	m <sup>3</sup>	1,1000	10,3164	11,3480
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>11,3480</b>
<b>TOTAL SIMPLES (R\$)</b>				<b>14,59</b>
<b>ENCARGOS SOCIAIS (R\$)</b>				<b>14,11</b>
<b>TOTAL GERAL (R\$)</b>				<b>28,70</b>

Fonte: SEINFRA-CE e OCS.

**Tabela 73** – Composição do custo/m<sup>2</sup> do revestimento (traço de referência) com rejuntamento.

<b>CAMADA DE REVESTIMENTO COM REJUNTAMENTO/TRAÇO REF. → m<sup>2</sup></b>				
<b>EQUIPAMENTOS (CHORARIO)</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>COEFICIENTE</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (R\$)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Compactador Liso Tandem Autopropelido (CHP)	hora	0,0100	63,0160	0,6302
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>0,6302</b>
<b>MÃO-DE-OBRA</b>				
Calceteiro	hora	0,1500	7,2000	1,0800
Servente	hora	0,4000	4,8800	1,9520
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>3,0320</b>
<b>MATERIAIS</b>				
Areia de Rejuntamento	m <sup>3</sup>	0,1500	46,0000	6,9000
Bloco Paver (10 cm × 20 cm)	unidade	32,0000	0,9384	30,0300
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>36,9300</b>
<b>TOTAL SIMPLES (R\$)</b>				<b>40,59</b>
<b>ENCARGOS SOCIAIS (R\$)</b>				<b>4,78</b>
<b>VALOR GERAL (R\$)</b>				<b>45,37</b>

Fonte: SEINFRA-CE e OCS.

**Tabela 74** – Composição do custo/m<sup>2</sup> do revestimento(traçó alt.c/ br.19mm) com rejuntamento.

<b>CAMADA DE REVESTIMENTO COM REJUNTAMENTO/TRAÇO ALT. BR. 19 mm → m<sup>2</sup></b>				
<b>EQUIPAMENTOS (CHORARIO)</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>COEFICIENTE</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (R\$)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Compactador Liso Tandem Autopropelido (CHP)	hora	0,0100	63,0160	0,6302
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>0,6302</b>
<b>MÃO-DE-OBRA</b>				
Calceteiro	hora	0,1500	7,2000	1,0800
Servente	hora	0,4000	4,8800	1,9520
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>3,0320</b>
<b>MATERIAIS</b>				
Areia de Rejuntamento	m <sup>3</sup>	0,1500	46,0000	6,9000
Bloco Paver (10 cm × 20 cm)	unidade	32,0000	0,9332	29,8618
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>36,7618</b>
<b>TOTAL SIMPLES (R\$)</b>				<b>40,42</b>
<b>ENCARGOS SOCIAIS (R\$)</b>				<b>4,78</b>
<b>VALOR GERAL (R\$)</b>				<b>45,20</b>

Fonte: SEINFRA-CE e OCS.

**Tabela 75** – Composição do custo/m<sup>2</sup> do revestimento (traço alt. c/ areia) com rejuntamento.

<b>CAMADA DE REVESTIMENTO COM REJUNTAMENTO/TRAÇO ALT. AREIA → m<sup>2</sup></b>				
<b>EQUIPAMENTOS (CHORARIO)</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>COEFICIENTE</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (R\$)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Compactador Liso Tandem Autopropelido (CHP)	hora	0,0100	63,0160	0,6302
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>0,6302</b>
<b>MÃO-DE-OBRA</b>				
Calceteiro	hora	0,1500	7,2000	1,0800
Servente	hora	0,4000	4,8800	1,9520
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>3,0320</b>
<b>MATERIAIS</b>				
Areia de Rejuntamento	m <sup>3</sup>	0,1500	46,0000	6,9000
Bloco Paver (10 cm × 20 cm)	unidade	32,0000	0,8894	28,4624
			<b>TOTAL (R\$):</b>	<b>35,3624</b>
<b>TOTAL SIMPLES (R\$)</b>				<b>39,02</b>
<b>ENCARGOS SOCIAIS (R\$)</b>				<b>4,78</b>
<b>VALOR GERAL (R\$)</b>				<b>43,80</b>

Fonte: SEINFRA-CE e OCS.