

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA  
URBANA**

**ADILSON NUNES RUIZ**

**CONCRETO COM FRESADO ASFÁLTICO  
APLICADO EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E  
DRENAGEM DE OBRAS VIÁRIAS**

**CAMPINAS  
2017**

**ADILSON NUNES RUIZ**

**CONCRETO COM FRESADO ASFÁLTICO  
APLICADO EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E  
DRENAGEM DE OBRAS VIÁRIAS**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho  
Coorientadora: Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

**CAMPINAS  
2017**

Ficha Catalográfica  
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e  
Informação - SBI - PUC-Campinas

t620.136  
R934c

Ruiz, Adilson Nunes

Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias / Adilson Nunes Ruiz.- Campinas: PUC-Campinas: 2017.  
191p.

Orientadora: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho.  
Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Inclui bibliografia.

1. Concreto. 2. Concreto asfáltico. 3. Drenagem. 4. Sustentabilidade. 5. Reciclagem - Indústria. I. Jacintho, Ana Elisabete Paganelli Guimarães. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

22.ed. CDD – t620.136

**ADILSON NUNES RUIZ**

**CONCRETO COM FRESADO ASFÁLTICO  
APLICADO EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E  
DRENAGEM DE OBRAS VIÁRIAS**

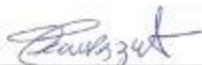
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a) Dr. (a) Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho.

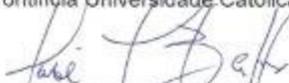
Dissertação defendida e aprovada em 07 de fevereiro de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho.  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Claudia Cotrim Pezzuto  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Tadeu Balbo  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

Dedico este trabalho de pesquisa de mestrado  
ao Sol que ilumina os meus dias,  
à Lua que clareia minhas noites,  
ao meu Cruzeiro do Sul,  
minha esposa, amiga e companheira Vanderléia.

## AGRADECIMENTOS

À Deus,

Por ter dado energia, entusiasmo, força, perseverança, determinação e saúde para que concluísse esta etapa da minha vida.

À Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho, Orientadora, amiga e encorajadora dos trabalhos realizados no curso de pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, por acreditar em mim, dar apoio, incentivo, atenção e entusiasmo.

À Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel, Coorientadora dos meus trabalhos de pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pelo apoio, incentivo e auxílio técnico.

Ao Sr. Phelipe Viana Ruiz,

Pela ajuda e presença constante, companheirismo e incentivo, com destaque nas elaborações das planilhas eletrônicas e nos preparativos dos ensaios laboratoriais.

Ao Sr. Antonio Ruiz Herrera e ao Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo (Divisão Regional 11),

Pelo apoio e auxílio nos ensaios de laboratório destinados às análises dos produtos asfálticos.

À Sra. Vanderléia Voltarelli Viana Ruiz e Srta. Isabella Viana Ruiz,

Pelo auxílio nas revisões do presente trabalho.

Ao Sr. João Maia de Oliveira, ao Sr. Francisco Rocha e a Concessionária Renovias S/A.,

Pelo incentivo e presteza na viabilização do fornecimento de material fresado que foi imprescindível à realização desta pesquisa.

Ao Sr. Igor Citrângulo Pereira, ao Sr. Joventino Manoel Gonçalves Filho, ao Sr. Wesley Rodrigues dos Santos e ao Sr. Antônio Carlos Leite Barbosa,

Pela atenção e auxílio na realização das moldagens e dos ensaios laboratoriais.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas,

Pelos ensinamentos, orientações e despertar pela pesquisa científica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP,

Pelo uso de equipamentos adquiridos no projeto de auxílio à pesquisa 2014/20486-8.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas,

Pela disponibilização das instalações e materiais para realização deste trabalho.

“Combati o bom combate,  
acabei a carreira,  
 guardei a fé.”  
2 Tm 4:7

## RESUMO

RUIZ, Adilson Nunes. *Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias*. 2017. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

Tendo em vista o grande volume gerado de resíduos pela indústria da construção aliado ao fato do crescente entendimento pela população da preservação ambiental, fez-se necessária a realização de estudos com o firme propósito de reutilizá-los. Este trabalho foca no resíduo gerado na área da construção de pavimentação viária, principalmente naqueles advindos das obras de manutenção, restauração e melhoria do leito viário pavimentado revestido com concreto asfáltico. Como a utilização deste material é realizada nem sempre de forma técnica e adequada, mesmo tendo diversos estudos direcionados à boa técnica de utilização do fresado asfáltico, este trabalho tem a pretensão de apresentar mais uma forma técnica para a aplicação deste importante resíduo, o de utilizar na construção de barreiras rígidas de concreto e em canaletas, meios fio e sarjetas. Serviços estes normalmente executados dentro das obras viárias, ou seja, visa manter o material gerado dentro dos limites da fonte geradora. Para isso, foram realizados estudos focados em atender as especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) e do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) em parte das obras de segurança viária e drenagem, tendo em vista que estes órgãos públicos tem o domínio das principais fontes geradoras deste resíduo e são executores dos serviços ao qual se destina. Este estudo comparou as características físicas do concreto convencional e do concreto com fresado asfáltico incorporado, avaliando assim a sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. O estudo foi realizado em concreto com resistência característica à compressão de 25MPa, destinado a elementos de segurança viária, e com 20MPa, para os elementos de drenagem superficial. Foi constatado que o incremento de fresado asfáltico na mistura do concreto influencia diretamente nas resistências mecânicas, reduzindo sua capacidade resistente. Ao analisar o teor de substituição de fresado asfáltico na mistura, foi constatado que percentuais superiores a 15% afetam substancialmente as propriedades mecânicas do concreto. O concreto com fresado asfáltico apresenta menor ascensão e absorção de água por capilaridade, bem como menor absorção no ensaio de imersão, qualidades importantes para misturas que serão destinadas à fabricação de estruturas que ficarão expostas às intempéries ou ao contato com a água. O uso deste resíduo no concreto gera redução no custo de fabricação, além de proporcionar redução da emissão de gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>). No Brasil, pode-se estimar que o uso do fresado asfáltico nos concretos estudados, pode gerar a redução anual aproximada de 270mil tCO<sub>2</sub>, além de possibilitar economia aproximada de US\$ 97 milhões/ano através da comercialização do CO<sub>2</sub> (renda “verde”) e da redução de custos com a aquisição de matérias primas naturais extraídas de jazidas (areia e pedra britada), bem como financiar com este valor a construção de aproximadamente 23mil residências populares de 40m<sup>2</sup>.

**Palavras Chave:** Concreto. Resíduo. Fresado Asfáltico. Drenagem Superficial. Dispositivo de Proteção Viária. Reciclagem. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

RUIZ, Adilson Nunes. *Concrete with recycled asphalt pavement applied in protection devices and drainage of road works*. 2017. 191 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

In view of the large volume of waste generated by the construction industry coupled with the growing understanding of environmental preservation by the population, it was necessary to carry out studies with the firm intention of reusing these wastes. This work focuses on the residues generated in the area of road pavement construction, especially those resulting from the maintenance, restoration and improvement of roads paved with asphalt concrete. As the use of this material is not always carried out in a technical and adequate way, even though several studies are directed to the good technique of using recycled asphalt pavement, this work intends to present another technical form for the application of this important residue, to use in the construction of rigid concrete barriers and in gutters, half wire and gutters. These services normally run within the road works, that is, it aims to keep the material generated within the limits of the generating source. In order to achieve this, studies focused on meeting the technical specifications of the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT) and the Department of Roads of the State of São Paulo (DER-SP), minimizing the output of milling from the generating source, considering that these public agencies are the main sources of this waste and performers of the services for which it is intended. This study compared the physical characteristics of conventional concrete and concrete with embedded asphalt milling, thus evaluating its technical, economic feasibility and environmental. The study was carried out in concrete with a characteristic compressive strength of 25MPa, intended for road safety elements, and at 20MPa for surface drainage elements. It was observed that the increase of recycled asphalt pavement in the concrete mixture directly influences the mechanical resistance, reducing its resistant capacity. When analyzing the substitution content of recycled asphalt pavement in the mix, it was found that percentages higher than 15% substantially affect the concrete's strength properties. The concrete with recycled asphalt pavement presents less rise and absorption of water by capillarity, as well as less absorption in the test of immersion, important qualities for mixtures that will be destined to the manufacture of structures that will be exposed to the elements or the contact with the water. The use of this residue in the concrete generates reduction in the cost of manufacture, besides providing reduction of the emission of greenhouse gases (CO<sub>2</sub>). In Brazil, it can be estimated that the use of asphalt milling in the concretes studied, can generate the approximate annual reduction of 270 thousand tCO<sub>2</sub>, besides saving approximately US\$ 97 million/year through the sale of CO<sub>2</sub> ("green" income) And the reduction of costs with the acquisition of natural raw materials extracted from deposits (sand and crushed stone), as well as to finance with this amount the construction of approximately 23 thousand popular residences of 40m<sup>2</sup>.

Keywords: Concrete. Residue. Asphalt Milling. Surface Drainage. Road Protection Device. Recycling. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Depósito de material fresado localizado na SP 344 km 221 Pista Leste .....	26
Figura 2 - Fresado asfáltico no sistema de drenagem superficial localizado na proximidade do km 193, pista sul, da SP 330 .....	27
Figura 3 – Carreamento de fresado asfáltico para sistema de drenagem superficial Rua Ferdinando Marchi, Leme-SP .....	27
Figura 4 – Rodovia Rio-Petrópolis .....	36
Figura 5 – Escavadeira hidráulica no processo de demolição da camada asfáltica.....	37
Figura 6 – Motoniveladora no processo de demolição da camada asfáltica .....	37
Figura 7 – Demolição com trator sobre esteira com <i>ripper</i> .....	37
Figura 8 – 1970, os primeiros equipamentos de reciclagem a quente .....	38
Figura 9 – Fresadora a frio em operação.....	39
Figura 10 – Comparativo do processo de fresagem e reciclagem in situ .....	42
Figura 11 – Situação local logo após intervenção com fresadora a frio .....	44
Figura 12 – Minicarregadeira com vassoura mecânica .....	45
Figura 13 – Sistema de Peneiramento.....	45
Figura 14 – Triturador Rubble Master .....	46
Figura 15 - Localização das praças de pedágio de acesso à Campinas, Pedágio Itupeva (2016).....	49
Figura 16- Barreira de segurança média - SGM11a-b.....	53
Figura 17 - Perfil de barreira tipo New Jersey conforme DNIT 109/2009-PRO .....	54
Figura 18 - Projeto padrão do DER-SP para barreira rígida em concreto baixa, conforme PP-DE-L03/014-A .....	55
Figura 19 - Propagação de trincas no concreto convencional e com RAP.....	58
Figura 20 - Imagem eletrônica da fratura no concreto com RAP .....	60
Figura 21 - Baias de estocagem de agregados naturais da PUC Campinas.....	65
Figura 22 - Prensa EMIC DL30000 para ensaio de barras de aço .....	66
Figura 23 - Corpos de prova recém moldados.....	71

Figura 24- Retificadora de corpos de prova cilíndricos em concreto .....	72
Figura 25 - Corpo de prova em concreto retificado.....	72
Figura 26 - Equipamento de ensaio à compressão .....	73
Figura 27 – Módulo eletrônico para informatização de máquinas de ensaio.....	73
Figura 28 - Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos .....	73
Figura 29 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade .....	74
Figura 30 - Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.....	75
Figura 31 - Equipamento de ensaio de impacto (EMIC).....	76
Figura 32 – Equipamento de realização de ensaio a flexão com pistão hidráulico Torvel	76
Figura 33 - Poroscópio CP-6000.....	77
Figura 34 - Esquema de preparação para os ensaios de permeabilidade ao ar e à água	79
Figura 35 - Barreira rígida simples baixa tipo 1, DER-SP.....	81
Figura 36 - Meio fio e sarjeta MFC3 - DNIT .....	83
Figura 37 - Meio fio MFC05 – DNIT .....	83
Figura 38 - Valeta de drenagem superficial SCC04 – DNIT .....	84
Figura 39 – Ensaio de determinação de teor de betume no fresado asfáltico.....	90
Figura 40 - Ensaio de abatimento com o tronco de cone .....	101
Figura 41 - Peça metálica cilíndrica utilizada no ensaio de impacto.....	106
Figura 42 - Barreira rígida após ensaio de impacto.....	107
Figura 43- Ensaio ao impacto da barreira rígida.....	107
Figura 44 - Execução do ensaio de impacto.....	107
Figura 45 - Ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos convencional e com fresado asfáltico destinados a barreiras rígidas.....	108
Figura 46 - Ascensão da água por capilaridade em corpo de prova de concreto convencional para barreiras rígidas.....	109
Figura 47 - Meio fio e sarjeta moldada em concreto convencional (esquerda) e com fresado asfáltico (direita).....	112

Figura 48 – Lajes de fundo das valetas moldadas com concreto convencional (à direita) e com fresado asfáltico (à esquerda).....	113
Figura 49 - Guia em concreto no ensaio à flexão .....	120
Figura 50 - Ascensão de água por capilaridade no corpo de prova em concreto com fresado asfáltico para canaletas e valetas .....	125
Figura 51 - Elemento prismático em concreto com fresado asfáltico após ensaio .....	129
Figura 52 - Seção do corpo de prova prismático em concreto com fresado asfáltico após ruptura.....	129
Figura 53 - Comparativo de corpos de prova prismáticos com concreto convencional e com fresado asfáltico .....	134
Figura 54 - Rodovia SP 099, km 18, com barreiras rígidas para separação das pistas de tráfego.....	163
Figura 55 – Separação de pistas na Rodovia SP 147, km 85 com barreiras rígidas.....	164
Figura 56 - Separação de pistas na Rodovia SP 330, km 139 com barreiras rígidas ....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensão da malha rodoviária .....	28
Tabela 2 – Geração de RAP e Reciclagem em alguns países da Europa .....	40
Tabela 3 – Estimativa de geração de fresado em Campinas .....	47
Tabela 4 – Estimativa de geração de fresado asfáltico no Estado de São Paulo.....	49
Tabela 5 – Estimativa de geração de fresado asfáltico no Brasil .....	50
Tabela 6 – Condição da Superfície da malha viária do Brasil .....	51
Tabela 7 – Levantamento das condições do pavimento (Brasil) segundo CNT .....	51
Tabela 8 – Valores das resistências mínimas dos concretos (MPa) .....	67
Tabela 9 - Dimensões da barreira rígida simples baixa tipo 1 .....	82
Tabela 10 - Características do aço .....	87
Tabela 11 – Ensaio do Cimento.....	88
Tabela 11 – Composição dos traços destinados a confecção de barreira rígida (kg/m <sup>3</sup> ) .	91
Tabela 12 – Composições dos traços para elementos de drenagem ( kg/m <sup>3</sup> ) .....	91
Tabela 13 – Resultados de laboratório (barreira rígida) .....	92
Tabela 15 – Redução de agregados naturais por m <sup>3</sup> de concreto.....	96
Tabela 16 – Características Mecânicas do concreto para elementos de drenagem .....	97
Tabela 17 - Comparativo de consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto para elementos de drenagem.....	99
Tabela 18 - Resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios dos concretos com corpos de prova padronizados.....	132
Tabela 19 - Comparativo de consistência pelo abatimento observado por Erdem e Blankson (2014).....	135
Tabela 20 - Evolução dos resultados à compressão de corpos de prova cilíndricos observados com a evolução da idade e taxa de substituição.....	138
Tabela 21 - Resultados de compressão de corpos de prova cilíndricos com idade de 28 dias .....	144
Tabela 22 - Resultados de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos .....	147

Tabela 23 - Resultados de módulo de elasticidade dos concretos destinados dos elementos de drenagem.....	149
Tabela 24 - Módulo de Elasticidade.....	149
Tabela 25 - Resistência à flexão dos elementos de drenagem superficial.....	152
Tabela 26 - Preços praticados pela CAIXA/SINAPI (jan/17).....	153
Tabela 27 - Preços de materiais (jan/17).....	154
Tabela 28 - Emissão de CO <sub>2</sub> por produto e serviço.....	155
Tabela 29 - Diferença de custo entre o concreto de referência e com fresado asfáltico	158
Tabela 30 - Diferença de emissão de CO <sub>2</sub> entre o concreto de referência e com fresado asfáltico.....	159
Tabela 31 - Diferença de custo entre o concreto convencional e com fresado asfáltico por m <sup>3</sup> .....	160
Tabela 32 - Redução de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> de concreto gerado com fresado asfáltico.....	160
Tabela 33 - Resumo dos resultados apurados quanto aos aspectos econômicos, financeiros e ambientais .....	161
Tabela 34 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da SP 099 .....	165
Tabela 35 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da Rodovia SP 330 .....	166
Tabela 36 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da Rodovia SP 147 .....	167
Tabela 37 - Resumo dos impactos do concreto com fresado asfáltico nas obras analisadas .....	169
Tabela 38 - Resumo dos impactos do concreto com fresado asfáltico considerando o uso do volume potencial gerado no Brasil.....	170

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de resíduos em Campinas.....	24
Gráfico 2 – Distribuição do sistema modal de transporte no Brasil .....	25
Gráfico 3 – Tipo de revestimento do pavimento das ruas de Campinas .....	47
Gráfico 4 – Extensão de malha viária nacional (km).....	50
Gráfico 5 – Distribuição granulométrica da areia.....	88
Gráfico 6 – Distribuição granulométrica da brita .....	89
Gráfico 7 – Distribuição granulométrica do fresado asfáltico.....	90
Gráfico 8 – Resultados das resistências médias à compressão de corpos de prova cilíndricos – barreira rígida.....	93
Gráfico 9 - Distribuição granulométrica do concreto referência CR4.....	93
Gráfico 10 - Distribuição granulométrica dos concretos de referência e com fresado asfáltico.....	94
Gráfico 11 - Resultados comparativos da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos para o concreto destinado à barreira rígida (referência e com fresado asfáltico) .....	95
Gráfico 12 - Resultados comparativos das resistências do concreto (28dias) para barreira rígida (referência e com fresado asfáltico).....	96
Gráfico 13 - Comparativo de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (elementos de drenagem).....	98
Gráfico 14 – Comparativo das resistências mecânicas do concreto para elementos de drenagem.....	98
Gráfico 15- Resultados dos abatimentos verificados na confecção das peças ensaiadas .....	102
Gráfico 16 - Comparação da média da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos entre concreto convencional (CR0) e com fresado asfáltico (CF0-15) .....	103
Gráfico 17- Comparação da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos entre concreto convencional (CR0) e com fresado asfáltico (CF0-15) .....	103
Gráfico 18 - Comparativo de resultados de resistência média à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos do concreto destinado a fabricação de barreiras rígidas .....	105
Gráfico 19 - Comparativo de resultados médios do módulo de elasticidade do concreto destinado a fabricação de barreiras rígidas .....	105

Gráfico 20 - Comparativo de resistência à tração média na flexão de corpos de prova prismáticos em concreto convencional e com fresado asfáltico .....	106
Gráfico 21 - Comparativo da média dos resultados do ensaio ao impacto adaptado nas barreiras rígidas moldadas.....	108
Gráfico 22 - Comparativo de absorção média de água por capilaridade do concreto convencional e com fresado asfáltico para barreiras rígidas .....	109
Gráfico 23 - Comparativo da ascensão capilar média no corpo de prova de concreto convencional com fresado asfáltico para barreira rígida.....	110
Gráfico 24 - Comparativo de resultados médios de absorção de água para concretos destinados a barreiras rígidas.....	110
Gráfico 25 - Permeabilidade ao ar através do <i>Air Exclusion Rating</i> para concreto destinado a barreira rígida.....	111
Gráfico 26 - Comparativo do WAR para determinação da permeabilidade do concreto convencional e com fresado asfáltico para barreira rígida.....	112
Gráfico 27 - Comparativo da evolução da resistência média à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional (CCR0) com o concreto com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.....	113
Gráfico 28 - Comparativo da evolução da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional (CCR0) com o concreto com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.....	114
Gráfico 29 - Comparativo de resistência média à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos entre o concreto com agregado natural (CCR0) e com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.....	115
Gráfico 30 - Comparativo do módulo de elasticidade do concreto com agregado natural (CCR0) com o concreto fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.....	115
Gráfico 31 - Comparativo de resistência média à ruptura a flexão em corpos de prova prismáticos de concretos destinados a fabricação de meios fio e sarjetas .....	116
Gráfico 32 - Comparativos de resultados do ensaio de impacto nos meios fio e sarjetas em concreto convencional e com fresado asfáltico .....	117
Gráfico 33 - Comparativo da absorção de água por capilaridade em concreto convencional e com fresado asfáltico para meios fio e sarjetas .....	117
Gráfico 34 - Comparativo de ascensão capilar média dentre os concretos convencional e com fresado asfáltico para meios fio e sarjetas.....	118
Gráfico 35 - Comparativo dos resultados de absorção de água por imersão para os concretos destinados a meios fio e sarjetas .....	118
Gráfico 36 - Comparativo do AER para determinação da permeabilidade ao ar dos concretos destinados à confecção de meios fio e sarjetas.....	119

Gráfico 37 - Comparativo dos valores de WAR para determinação da permeabilidade a água dos concretos destinados à confecção de meios fio e sarjetas .....	120
Gráfico 38 - Comparativo da evolução da resistência média à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional e com fresado asfáltico (valetas e canaletas) .....	121
Gráfico 39 - Comparativo da evolução da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional e com fresado asfáltico (valetas e canaletas) .....	122
Gráfico 40 - Comparativo de resultados médios da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos para concretos de valetas e canaletas .....	123
Gráfico 41 - Comparativo do módulo de elasticidade do concreto convencional e com fresado asfáltico para valetas e canaletas .....	123
Gráfico 42 - Comparativo de resistências médias a ruptura por flexão em corpos de prova prismáticos com concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas .....	124
Gráfico 43 - Comparativo dos resultados médios da resistência ao impacto entre o concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para canaletas e valetas ..	124
Gráfico 44 - Comparativo de absorção média de água por capilaridade entre os concretos com concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas.....	125
Gráfico 45 - Comparativo da ascensão de água média nos corpos de prova de concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas ..	126
Gráfico 46 - Comparativo de absorção média de água por imersão para a moldagem de canaleta e valeta .....	126
Gráfico 47 - Comparativo de resultados, AER, para concretos destinados a canaletas e valetas.....	127
Gráfico 48 - Comparativo dos valores de WAR para os concretos convencional (CCR00) e com resíduo de fresagem de pavimento betuminoso (CCF00-15) .....	128
Gráfico 49 - Evolução da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos para barreira rígida com substituição de 15% (CF5-15) e 22% (CF6-22) de fresado asfáltico. ....	137
Gráfico 50 - Comparativo de resultados de resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos dos concretos de referência.....	139
Gráfico 51 - Comparativo de resultados de resistência à média à compressão em corpos de prova cilíndricos dos concretos com fresado asfáltico.....	140
Gráfico 52 - Relação da resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos - $f_{cm7}$ , $f_{cm14}$ e $f_{cm91}$ COM $f_{cm28}$ .....	141

Gráfico 53 - Relação de resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos - $f_{c7}$ , $f_{c14}$ com $f_{c28}$ .....	141
Gráfico 54 - Relação de resultados médios à compressão de axial aos 28 dias com a porcentagem de substituição de fresado asfáltico .....	144
Gráfico 55 - Relação entre resistência média à compressão diametral com resistência à tração na flexão .....	146
Gráfico 56 – Relação entre Módulo de elasticidade e porcentagem de substituição de fresado asfáltico .....	150

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio previstos para o Cimento .....	64
Quadro 2 – Ensaio da ABNT dos Agregados.....	65
Quadro 3 – Nomenclatura das composições dos concretos.....	70
Quadro 4 – Ensaio do Concreto Endurecido.....	70
Quadro 5 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio .....	71
Quadro 6 - Classificação do concreto quanto a permeabilidade .....	80
Quadro 7 – Classificação do concreto pela permeabilidade ao ar.....	80
Quadro 8 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 7 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura.....	142
Quadro 9 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 14 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura.....	142
Quadro 10 - Relação de correlação de Pearson.....	143
Quadro 11 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 28 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura.....	145
Quadro 12 - Comparativo da resistência à tração na flexão média em corpos de prova prismáticos em função da substituição de agregados .....	147

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB COLINAS	= Rodovia das Colinas S/A
ABNT	= Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	= Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	= <i>American Concrete Institute</i>
AER	= <i>Air Exclusion Rating</i>
AUTOBAN	= Concessionária do Sistema Anhanguera-Bandeirantes S/A
BACEN	= Banco Central do Brasil
CAA	= Classe de Agressividade Ambiental
CAIXA	= Caixa Econômica Federal
CAP	= Cimento Asfáltico de Petróleo
CCFn <sup>o</sup> -%	= Concreto do elemento de drenagem superficial com fresado asfáltico
CCR	= Concreto Compactado com Rolo
CCRn <sup>o</sup>	= Concreto do elemento de drenagem superficial
CEATEC	= Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia
CFEM	= Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CFn <sup>o</sup> -%	= Concreto do elemento de segurança viária com fresado asfáltico
CNT	= Confederação Nacional de Transporte
CONAMA	= Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP-17	= 17 <sup>a</sup> Conferência das Partes das Nações Unidas sobre o Clima
CPV-ARI	= Cimento Portland de alta resistência inicial
CRn <sup>o</sup>	= Concreto do elemento de segurança viária de referência
DER-SP	= Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	= Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DNPM	= Departamento Nacional de Proteção Mineral
ECOPISTAS	= Concessionária das Rodovias Ayrton Senna e Carvalho Pinto S/A
EUPAVE	= <i>European Concrete Paving Association</i>
FHWA	= <i>Federal Highway Administration</i>
HMA	= <i>Hot mix asphalt</i>
IBGE	= Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	= Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ICS	= Índice de Condição de Superfície
NAPA	= <i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	= Norma Brasileira
NM	= Norma Mercosul
RAP	= <i>Recycled Asphalt Pavement</i>
RCD	= Resíduos da Construção e Demolição
RENOVIAS	= Renovias Concessionária S/A
ROTA DAS BANDEIRAS	= Concessionária Rota das Bandeiras S/A
RSU	= Resíduo Sólido Urbano
SGP	= Sistema de Gerência de Pavimentos
TAH	= Taxa Anual por Hectare

TCU	= Tribunal de Contas da União
UFIR	= Unidade Fiscal de Referência
UTB	= Unidade Territorial Básica
VDM	= Volume diário médio
VIAPAR	= Rodovias Integradas do Paraná S/A
WAR	= <i>Water Absorption Rate</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a/c$	= Relação água e cimento em massa
€	= Euro
$E_{ci}$	= Módulo estático de elasticidade do concreto
$f'$	= Média dos valores da resistência das amostras
$f'_i$	= Valor da resistência de cada amostragem
$f_{c7}$	= Resistência à compressão do concreto aos 7 dias
$f_{c14}$	= Resistência à compressão do concreto aos 14 dias
$f_{c28}$	= Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
$f_{c91}$	= Resistência à compressão do concreto aos 91 dias
$f_{ck}$	= Resistência característica à compressão do concreto
$f_{cm}$	= Resistência média do concreto à compressão do concreto
$f_{ct,f}$	= Resistência do concreto à tração na flexão
$f_{ct,sp}$	= Resistência do concreto à tração indireta
$f_{ctm}$	= Resistência média à tração do concreto
$m$	= Relação agregado e cimento
$n$	= Número de exemplares da amostra
$R^2$	= Coeficiente de determinação
$S_d$	= Desvio padrão adotado para cálculo das dosagens do concreto
$S_n$	= Desvio padrão calculado dos resultados das amostras executadas durante um período pré-estabelecido
$tCO_2$	= Tonelada de gás carbônico
$tCO_{2e}$	= Tonelada de gás carbônico equivalente
US\$	= Dólar dos Estados Unidos da América

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2. OBJETIVOS DO TRABALHO</b> .....	<b>31</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>33</b>
3.1. Destinação dos resíduos da construção .....	33
3.2. Histórico das rodovias .....	34
3.3. Processos de remoção de pavimento asfáltico .....	36
3.3.1. Processo de demolição do pavimento .....	36
3.3.2. Processo de fresagem a frio .....	37
3.3.3. Destinação do Fresado Asfáltico .....	39
3.3.4. Aplicação do fresado asfáltico .....	41
3.3.5. Adequação da distribuição granulométrica do fresado asfáltico .....	44
3.3.6. Estimativas de geração de fresado asfáltico .....	46
3.3.7. Direito sobre a propriedade do material fresado .....	52
3.3.8. Elementos de drenagem superficial e segurança viária .....	53
3.3.9. Aplicação de materiais reciclados no concreto .....	56
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>62</b>
4.1. Definição da resistência à compressão e características do concreto .....	62
4.1.1. Escolha e procedência dos materiais .....	63
4.1.2. Ensaio de caracterização dos materiais .....	63
4.1.3. Dosagens .....	66
4.1.4. Ensaio de características mecânicas do concreto .....	70
4.2. Moldagem dos elementos de segurança viária e de drenagem superficial .....	80
4.2.1. Ensaio realizados nos elementos moldados em escala .....	84
4.3. Critério utilizado para determinação dos resultados médios .....	85
<b>5. RESULTADOS PRELIMINARES</b> .....	<b>87</b>
5.1. Materiais .....	87
5.1.1. Aço .....	87
5.1.2. Cimento .....	87
5.1.3. Areia .....	88
5.1.4. Brita .....	88
5.1.5. Fresado Asfáltico .....	89
5.2. Estudo de traços de concreto .....	90
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>101</b>
6.1. Concreto fresco .....	101
6.2. Concreto endurecido .....	102
6.2.1. Elementos de segurança viária – barreiras rígidas .....	102

6.2.2. Elementos de drenagem superficial em escala real.....	112
6.2.3. Observações.....	128
<b>7. ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>131</b>
<b>8. ESTIMATIVAS DE RESULTADOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS .....</b>	<b>153</b>
8.1. Impactos da incorporação do fresado asfáltico no concreto .....	157
8.1.1. Elementos de segurança viária.....	158
8.1.2. Elementos de drenagem superficial.....	159
8.1.3. Elementos moldados em escala .....	161
8.2. Simulações de emissão, compensação ambiental, redução custos e créditos de carbono .....	163
<b>9. CUIDADOS – PONTOS DE ATENÇÃO .....</b>	<b>171</b>
<b>10. CONCLUSÕES.....</b>	<b>173</b>
10.1. Sugestão de trabalhos futuros .....	176
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>177</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No processo de recuperação ou restauração de vias pavimentadas com revestimentos que levam o cimento asfáltico na sua composição, camada asfáltica de revestimento, é habitual a sua remoção parcial ou total desta camada e conforme a metodologia utilizada no serviço de remoção, que reveste o pavimento, é gerado o fresado asfáltico.

Sua destinação deve ser controlada e sua deposição realizada em local adequado, o que nem sempre ocorre, pois, seu uso como material reciclado, eventualmente é desacompanhado da boa técnica de aplicação e destinação, o que ocasiona problemas ambientais, como o assoreamento de cursos d'água ou deposição nos sistemas de drenagem superficial que comprometem seu desempenho.

A indústria da construção civil é reconhecidamente uma das maiores geradoras de resíduos em nosso país e no mundo. Estes materiais residuais oriundos das obras realizadas são denominados de resíduos de construção e demolição (RCD).

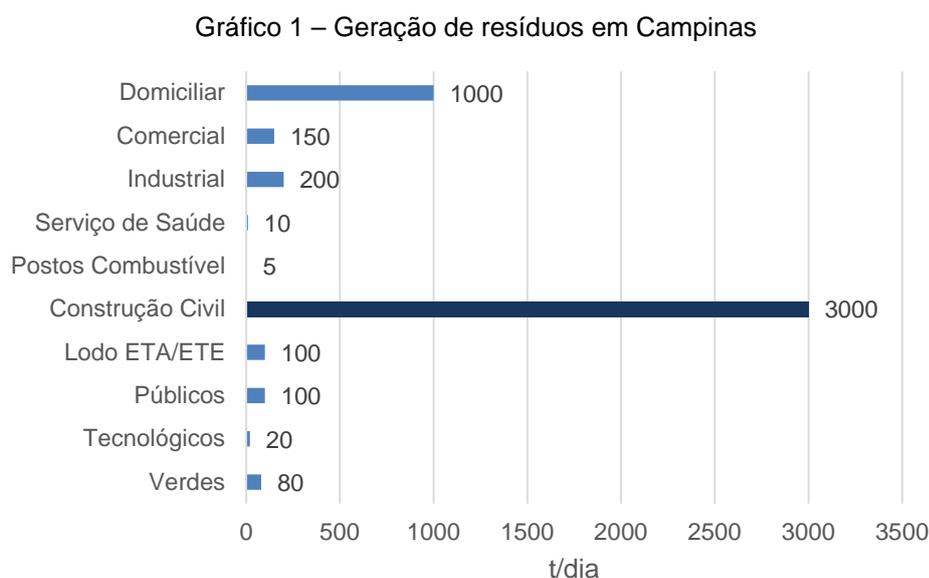
Segundo levantamento realizado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, ABRELPE (2015), foram coletadas pelo sistema público brasileiro, a média diária de 44.625.000 toneladas de resíduos de construção e demolição no ano de 2014, o que equivale a 122.262 toneladas por dia.

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2014), a população brasileira no ano de 2014 totalizava 202.799.518 habitantes, o que implica que cada cidadão gera em média a quantia diária de 0,603kg de resíduos da construção e demolição, baseado na geração deste resíduo de 122,262t/dia.

Conforme ABRELPE (2015), o total de resíduo sólido urbano (RSU) gerado em 2014 foi de 78.583.405 toneladas, o que significa que a parcela correspondente ao RCD é de 56,8% do total gerado, o que torna extremamente

importante a adequada destinação e reutilização deste resíduo através de processos de reciclagem.

No município de Campinas, 64% de todo o volume de resíduos sólidos gerados é produzido pela construção civil e representa 3.000 toneladas por dia e supera em três vezes aquele gerado pelos domicílios que é de 1.000 toneladas por dia, conforme Fernandes Júnior *et al.* (2012), apresentado no Gráfico 1.



Fonte: FERNANDES JÚNIOR *et al.*, 2012

Conforme Scremin *et al.* (2014), estima-se que existe uma grande quantidade de resíduo da construção que é gerada e descartada de forma irregular, tanto pelos geradores quanto pelos coletores, aumentando substancialmente o percentual de resíduo de construção e demolição que compõe o resíduo sólido urbano.

Dentre as diversas áreas que constituem o ramo da construção civil está a engenharia rodoviária. Este segmento de obras destinado à construção e manutenção de vias é o principal responsável pela geração de fresado asfáltico e também não foge à regra na geração de resíduos.

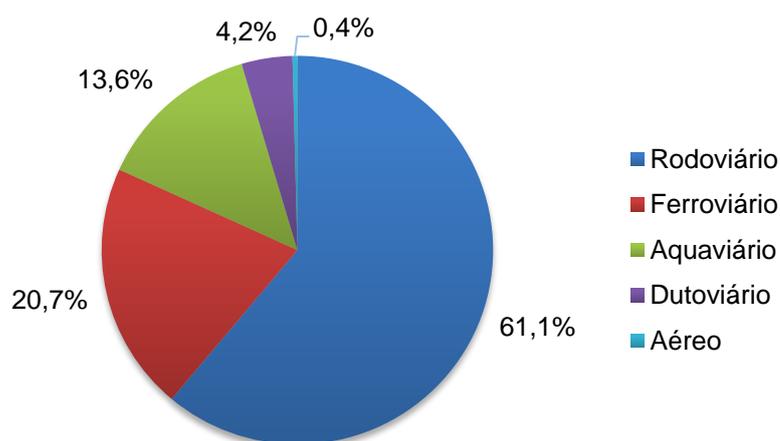
Segundo o Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais do DER (2012), uma rodovia, como qualquer obra da engenharia, pode ser decomposta em

algumas fases e cada uma delas tem uma finalidade específica para constituição do corpo estradal.

A divisão adotada para as fases são: as obras complementares (constituem serviços importantes para a segurança do usuário e funcionalidade da via), obras de arte especial (consistem em estruturas construídas com a finalidade de vencer obstáculos onde a execução de aterros não é possível, tanto no aspecto físico quanto econômico), terraplenagem (consiste em conformar o terreno de forma a atender as características definidas em projeto), pavimentação (consiste na estrutura que tem como finalidade de transferir os esforços solicitantes gerados pelo tráfego para a camada final da terraplenagem) e drenagem (consiste em proteger todo o corpo estradal dos efeitos da água, tanto dos cursos existentes quanto das águas pluviais).

No território brasileiro são utilizados diversos sistemas modais de transporte sendo que o sistema rodoviário é o preponderante, segundo Andrade (2016). Ele responde por 61,1% do deslocamento de pessoas e bens (Gráfico 2), além de ser o integrador de todo o sistema de transporte nacional.

Gráfico 2 – Distribuição do sistema modal de transporte no Brasil



Fonte: Adaptado de ANDRADE, 2016

Andrade (2016) cita que em um total de 103.259km de rodovias pavimentadas que foram analisadas, 51,7% estão com o pavimento classificado como ótimo e bom, 35,8% como regular e 12,5% como ruim e péssimo. Se considerar que há necessidade de reparação imediata para os seguimentos de

classificação ruim e péssimo, há 12.930km de vias a serem trabalhadas para melhorar seu atual estado, desta forma, resíduos serão gerados, entre eles o fresado asfáltico.

O fresado asfáltico quando gerado deve ser destinado para depósitos licenciados e, preferencialmente, reutilizados na execução de outros serviços, conforme determina a Resolução CONAMA 448/2012 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasil (2012a).

A destinação é tão importante que o Tribunal de Contas da União, TCU, Brasil (2012b), menciona em seu relatório técnico que “há necessidade de indicar nos projetos a destinação ambientalmente adequada do material fresado não reutilizado”. Isso se deve à utilização deste material sem planejamento adequado por diversas prefeituras municipais. Neste processo é mencionado por uma das partes envolvidas que este produto “consiste em resíduo perigoso e que necessita de tratamento especial” e não pode ser depositado em qualquer local.

A deposição (Figura 1), utilização ou aplicação inadequada pode acarretar a contaminação de sistemas de drenagem (Figura 2) obstruindo o fluxo de água projetado, além da contaminação de áreas (Figura 3) próximas aos cursos d'água, por exemplo.

Figura 1 - Depósito de material fresado localizado na SP 344 km 221 Pista Leste



Fonte: Autoria própria.

Nota: Cabe salientar que o local já foi recuperado com a remoção total do material depositado e recomposição vegetal, inclusive com a implantação de dispositivos para coibir o carreamento de materiais para as áreas onde há passagem natural das águas de chuva.

Figura 2 - Fresado asfáltico no sistema de drenagem superficial localizado na proximidade do km 193, pista sul, da SP 330



Fonte: Autoria própria.

Figura 3 – Carreamento de fresado asfáltico para sistema de drenagem superficial Rua Ferdinando Marchi, Leme-SP



Fonte: Autoria própria.

Segundo a *National Asphalt Pavement Association*, NAPA (2015a), nos Estados Unidos da América, foi gerado no ano de 2014 o montante aproximado de 75,8 milhões de toneladas *Recycled Asphalt Pavement (RAP)*. Apenas 1% deste resíduo da construção foi destinado a aterros sanitários, em um país que conta com a maior malha viária mundial, cerca de 6.506.204 Km de rodovias (Tabela 1), segundo Dearo (2013).

Tabela 1 - Extensão da malha rodoviária

País	Extensão (Km)
Estados Unidos da América	6.506.204
Índia	4.689.842
China	4.106.387
Brasil	1.720.756
Rússia	1.283.387
Japão	1.210.251
Canadá	1.042.300
França	1.028.446
Austrália	823.217
Espanha	683.175
Alemanha	645.000
Suécia	572.900
Indonésia	496.607
Itália	487.700
Polônia	412.035
Reino Unido	394.428
México	377.660
África do Sul	364.131
Turquia	352.046
Paquistão	262.256

Fonte: Adaptado de DEARO, 2013 e ANDADRE (2016).

Nos Estados Unidos, conforme NAPA (2015b), o fresado asfáltico é utilizado na execução de pavimentos recuperados de asfalto, na execução de asfaltos reciclados a quente. O uso em pavimentos é absolutamente preponderante. Há a utilização na fabricação de telhas, mas com pequeníssima participação.

A quantidade reciclada do resíduo de asfalto tem a mesma quantidade da realizada por resíduos de concreto. O aço é reciclado na proporção de 40% a menos que o total dos produtos asfálticos, já o papel corresponde a redução de 62% em peso (HORVATH, 2004).

Por outro lado, a aplicação de impostos pode impedir a comercialização dos produtos reciclados. No estado do Rio de Janeiro, conforme Lisboa (2015), o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS) cobrado dos produtos

reciclados da construção civil é taxado em 19% e por outro lado as empresas que extraem agregados graúdos, pedreiras, pagam apenas 6% neste tributo.

A Constituição da República Federativa do Brasil (BRASIL, 1988) define que para as atividades de extração mineral para atividades comerciais serão cobrados impostos referentes à compensação financeira decorrente da atividade da exploração mineral.

Dentre estes impostos cobrados está prevista a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) que é regulamentada pela Lei nº 7.990 de 28/12/1989 (BRASIL, 1989). Esta lei define o valor deste imposto em 3% que é aplicado sobre o faturamento líquido para as atividades de extração de areia e brita.

O montante arrecadado é dividido entre as unidades e entidades da nossa nação. Destina-se 23% para os Estados e o Distrito Federal e 65% para os municípios geradores. Reserva-se ainda parte do tributo para o desenvolvimento científico e tecnológico do setor mineral no valor de 2% e 10% para a manutenção do Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, (BRASIL, 1999). Essa tributação é intitulada de *royalty* mineral, pois está ligada diretamente à extração do material da jazida produtora (DNPM, 2015).

Outra tributação é a Taxa Anual por Hectare (TAH) que é a taxa cobrada anualmente por hectare durante a fase de pesquisa mineral. Esse valor anual é cobrado na taxa de 1,5 Unidade Fiscal de Referência (UFIR) por hectare da reserva de jazida que é definido na portaria Ministério das Minas e Energia nº 503, de 28 de novembro de 1999 (BRASIL, 1999).

No ano de 2015, somente a arrecadação do CFEM, registrou valores totais de R\$ 692,6 milhões no primeiro semestre e R\$ 826,4 milhões no segundo semestre, assim o DNPM amealhou o montante total de R\$ 1.519,0 milhões, conforme o Informe Mineral do segundo semestre de 2015, DNPM (2015).

Dentre as arrecadações previstas para o DNPM, o recolhimento dos impostos referentes à compensação financeira pela exploração de recursos

minerais e a taxa anual por hectare representaram aproximadamente 98% de toda a arrecadação desta instituição.

Esse imposto representa a arrecadação no valor de R\$ 349,37 milhões para os Estados e Distrito Federal e é um grande aporte financeiro para os cofres públicos municipais dos geradores deste imposto, os quais amealham o montante aproximado de R\$ 987,35 milhões anuais.

Considerando que aproximadamente 3,0% deste montante é gerado pela extração de areia e pedra, pode-se estimar que a arrecadação gerada resulta no montante de R\$ 455,7 milhões anuais, os quais estão diretamente ligados aos materiais que tem a pretensão de serem substituídos nesse estudo, o que afetará diretamente essa importante arrecadação financeira dos cofres públicos.

Está em tramitação no Senado Federal a proposta de alteração da alíquota de compensação financeira, a qual foi acatada no parecer da Comissão de Serviços de Infraestrutura do Senado. Em seu parecer foi aceita a proposta da alteração da alíquota para o valor de 2%, para os produtos destinados a uso como agregados da construção civil e que será aplicado sobre o faturamento bruto total das receitas de vendas, excluídos os tributos incidentes sobre a comercialização do produto mineral, como a areia e brita (BRASIL, 2015).

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho pesquisou o potencial de uso do fresado asfáltico como um dos componentes do concreto, substituindo uma parte do agregado graúdo e do miúdo. O foco principal é aplicá-lo em obras complementares da construção viária, como por exemplo, elementos de segurança (defensa rígida em concreto) e elementos de drenagem superficial (canaletas, valetas, meios fio e sarjetas), ampliando assim a gama de soluções técnicas de reciclagem deste resíduo da construção.

Neste estudo foram atendidas as solicitações preconizadas nos projetos tipo, normas e especificações técnicas dos principais contratantes de obras públicas do Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) e Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP).

A barreira de concreto armado, conhecida como defesa rígida em concreto, tem sua utilização e perfil bem definidos. Segundo a ET-DE-C00/007-A do DER-SP (2006a, p. 5), “as barreiras rígidas ou flexíveis têm por finalidade reconduzir veículos desgovernados à pista, da forma mais suave e natural possível, permitindo desaceleração leve no redirecionamento dos veículos”.

Elas devem atender à especificação ET-DE-C00/007-A do DER-SP (2006a) que trata da execução dos dispositivos de proteção e no caso do DNIT, deve atender à NORMA DNIT 109/2009 – PRO, DNIT (2009a), que trata das “Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário – Projeto de barreiras de concreto – Procedimento”. Ambas definem que o concreto a ser utilizado deve apresentar resistência característica mínima de 25MPa.

Segundo o Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais do DER-SP (2012, p.128) as sarjetas, canaletas são dispositivos de drenagem superficial utilizados na proteção da plataforma da estrada dos efeitos da água e de valetas, são os dispositivos utilizados fora da plataforma com a finalidade de proteger o corpo da estrada. As guias com finalidade de drenagem, também se enquadram

como dispositivos de proteção da plataforma, conforme NORMA DNIT 020/2006–ES, DNIT (2006b).

O tipo de revestimento utilizado em cada um deles está diretamente ligado ao greide da pista, pois cada tipo de material utilizado apresenta diferentes resistências aos efeitos provocados pela velocidade de escoamento das águas. O revestimento pode ser de grama em placas, cascalho compactado, revestimento primário ou concreto.

O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) define que o concreto deve apresentar resistência mínima à compressão de 15MPa e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) especifica que esta resistência deve ser de 20MPa. Deste modo o trabalho focou em obter uma resistência de 20MPa por ser a maior delas exigida para o elemento estudado.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1. Destinação dos resíduos da construção**

Os resíduos gerados na construção, na maioria das vezes, ainda são descartados de modo inapropriado e muito pouco utilizados com finalidade de reciclagem. Com o aumento da atividade da construção no mundo, faz-se necessário regular a destinação correta dos resíduos gerados por este setor da economia.

Segundo Levy (2001), a partir de 1928 foram produzidos e estudados mais intensamente os primeiros concretos com resíduos minerais reciclados. Em 1946, ocorre um grande uso do material reciclado no processo de reconstrução das cidades afetadas pela segunda guerra mundial.

Devido ao alto consumo de materiais nesta época da história, tomou-se a decisão de britar a grande quantidade de escombros gerados pelos combates, conforme Wedler e Hummel (1946), apud Levy (2001). A partir disto, na Europa torna-se comum o uso de materiais reciclados na construção de edificações, quando é pertinente.

No Brasil a destinação do material gerado pela construção foi regulamentada pela Resolução CONAMA 448/2012, a qual define claramente a destinação dos resíduos, bem como as responsabilidades dos seus geradores. Nela estão inclusos todos os tipos de resíduos que podem ser gerados nas obras de construção decorrentes de seus processos executivos.

Segundo Brasileiro (2013) existem diversas formas de aproveitar o material gerado pela indústria da construção, como na produção de blocos pré-moldados e tijolos, na pavimentação como camadas de bases, na argamassa de revestimento e assentamento, meio-fio e calçadas.

Há algum tempo, o concreto vem incorporando resíduos gerados por diversas fontes, como escórias de alto forno, por exemplo. Existem diversos estudos na busca de ampliar a utilização dos resíduos gerados pela construção

como componentes do concreto, como a substituição de parte dos agregados naturais por agregados reciclados oriundos da própria indústria da construção.

Com relação aos materiais, sabe-se que os produtos reciclados apresentam características diferenciadas do material natural. Como exemplo, Leite (2001) afirma que os agregados produzidos pelo processo de reciclagem apresentam maior desgaste por abrasão quando comparados aos de origem natural, mas não inviabiliza seu uso.

Os agregados, oriundos do processo de reciclagem da construção, podem ser utilizados como parte integrante na confecção de elementos estruturais, desde que ocorra a compatibilização das propriedades deste material, conforme conclui Tenório *et al.* (2012). Segundo Rodrigues e Fucale (2014) há o potencial de substituição de 50% de agregado miúdo natural por agregado reciclado na produção de concretos.

Com relação ao fresado asfáltico, existem estudos em desenvolvimento no intuito de sua aplicação no concreto, ou como componente de camadas cimentadas de pavimento, como concreto compactado com rolo (CCR), estudado por Sachet (2012), que substitui nas misturas os agregados naturais pelo resíduo gerado do revestimento asfáltico que foi submetido o processo de fresagem. Devido à importância da utilização do material reciclado também há estudos direcionados à análise da viabilidade econômica, como o elaborado por Paiva e Ribeiro (2005) na análise dos tijolos ecológicos.

### **3.2. Histórico das rodovias**

As necessidades do homem em ampliar suas terras e poder acessar com segurança todos os cantos de seu interesse, com maior facilidade e menor tempo, fizeram com que construísse estradas que procurassem garantir sua trafegabilidade.

Os persas implantaram a Estrada Real Persa no século V a.C. com extensão aproximada de 2.300km e tinha como finalidade melhorar seu sistema de

comunicação. Os mensageiros levavam aproximadamente 7 dias para percorrer a estrada (WOODHEAD,1991a).

Outra importante rodovia foi a estrada de Semíramis na Mesopotâmia que foi construída no século VI a.C. Os chineses construíram no século III a.C. aproximadamente 6000km de estradas para a ligação das suas diversas capitânicas no recente processo de unificação da China (WOODHEAD,1991b).

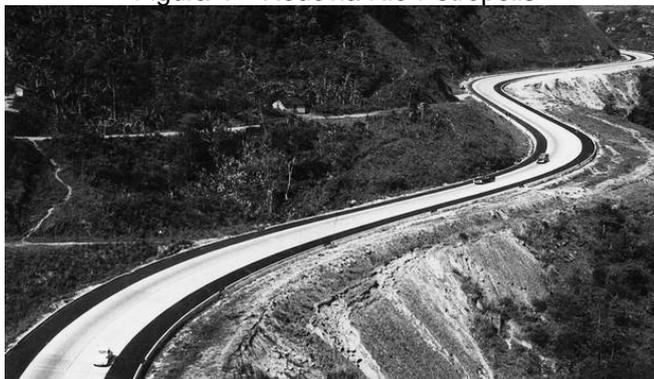
Inicialmente o leito estradal era revestido com materiais pétreos, normalmente irregulares, isso garantia a trafegabilidade. Mesmo com essa técnica o tempo destinado para percorrer o trecho desejado continuava demorado e ainda apresentava grande desconforto na viagem. Prova disso são as construções das vias do Império Romano mencionadas por Balbo (2007). Construídas a partir do século III a.C. tiveram grande importância na expansão e consolidação do Império. Com o passar do tempo, o pavimento foi sendo revestido com diversos materiais, entre eles o cimento asfáltico.

Com o decorrer do tempo e após inúmeros estudos, desenvolveram-se várias técnicas que melhoraram o revestimento das vias, inclusive o concreto asfáltico. Brasileiro (2013) cita que o revestimento asfáltico é construído através da combinação de agregados (como a areia, a brita, o pó de brita), e do *filler* com o cimento asfáltico de petróleo (CAP), o qual é obtido após a retirada das frações leves do petróleo, conforme Petrobrás Distribuidora (2015).

Segundo o Grass (2002), em 1858 é realizada em Paris a primeira estrada asfaltada moderna, em 1869 ocorre em Londres o primeiro pavimento asfáltico e em meados de 1870, em Newark, New Jersey, surgem as primeiras estradas em solo Norte-americano asfaltadas.

No Brasil, com o conhecido lema “Governar é abrir estradas”, “frase do então presidente Washington Luís, materializou-se em 25 de agosto de 1928, com a inauguração da Rio-Petrópolis (Figura 4), a primeira rodovia asfaltada do país”. (O GLOBO, 1928, p.1)

Figura 4 – Rodovia Rio-Petrópolis



Fonte: O GLOBO, 1969

### 3.3. Processos de remoção de pavimento asfáltico

Com o passar do tempo o pavimento se deteriora necessitando assim de intervenções para reestabelecer suas condições de uso. Isso ocorre normalmente, com o fim da vida útil do pavimento motivada por diversos fatores, desde intempéries a ações mecânicas, que acarretam a execução de obras de restauração.

Os processos mais comuns de remoção e reaproveitamento do material do pavimento são através da demolição e posterior britagem do material demolido ou com o uso de fresadora a frio. No primeiro utiliza-se de equipamentos que destroem o pavimento existente com o uso de escarificadores e que depois são transportados para instalações de britagem, fixas ou móveis, para seu processamento, o qual consiste em reduzir as placas geradas em material granular de diâmetro máximo controlado. Já no caso da fresagem, o processo executivo faz com que o material gerado já tenha características mais adequadas, minimizando ao máximo o uso do da britagem do resíduo gerado.

#### 3.3.1. Processo de demolição do pavimento

Neste caso podem ser utilizados alguns equipamentos diferenciados como escavadeira hidráulica (Figura 5), retroescavadeira, motoniveladora com escarificador (Figura 6) e trator de esteiras com *ripper* (Figura 7). Neste caso, estes equipamentos removem o pavimento que são carregados nos veículos de transporte com o uso de pás carregadeiras.

Figura 5 – Escavadeira hidráulica no processo de demolição da camada asfáltica



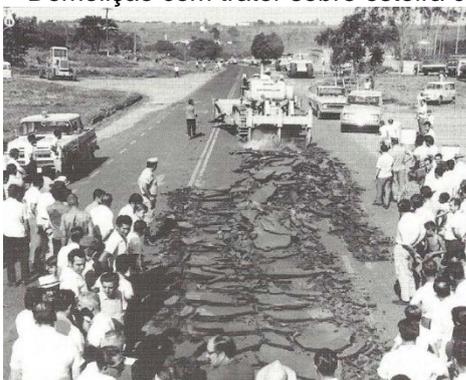
Fonte: SILVA, 2012

Figura 6 – Motoniveladora no processo de demolição da camada asfáltica



Fonte: [s.a]

Figura 7 – Demolição com trator sobre esteira com *ripper*



Fonte: DAMHA, 1996

### 3.3.2. Processo de fresagem a frio

Devido à necessidade do mercado em aprimorar o desempenho no processo de remoção das camadas asfálticas, a partir de meados dos anos 50 desenvolve-se então a fresadora de asfalto a frio, mencionado pela fabricante WIRTGEN GMBH (2013), em seu manual de operação. Nesta época tratava-se um equipamento composto por escarificadores rotativos acoplados a tratores. Nos

anos 60 houve a intenção de utilizar outro tipo de equipamento para a demolição do pavimento, mas o processo executivo era moroso e pouco eficiente. Assim foram concentrados os esforços para aprimorar os equipamentos de fresagem a frio e de reciclagem a quente (Figura 8).

Figura 8 – 1970, os primeiros equipamentos de reciclagem a quente



Fonte: WIRTGEN GMBH, p. 7, 2013.

No mercado da construção brasileira o equipamento de fresagem era na sua totalidade importado, até bem pouco tempo atrás, e tinha um custo bem elevado para aquisição e locação. Com o tempo, ocorreu uma adequação dos custos de operação e isso fez com que a fresagem a frio se popularizasse no meio rodoviário. Essa melhora foi consequência do aumento de empresas especializadas e da maior oferta de equipamentos para o mercado de recuperação de pavimento asfáltico.

O processo executivo de fresagem a frio deve ser executado com equipamento específico, a fresadora (Figura 9). Para o DER-SP (2006b), a especificação técnica ET-DE-P00/038-A, define:

A fresagem a frio consiste no corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico por meio de processo mecânico a frio. É realizada através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante. (DER, 2006b, p.3)

Figura 9 – Fresadora a frio em operação



Fonte: CIBER, 2015

O processo de serviços de fresagem é definido pela norma DNIT 159/2011–ES (DNIT, 2011, p. 2) como a “operação em que é realizado o corte ou desbaste de uma ou mais camada(s) do pavimento asfáltico, por processo mecânico a frio.”

Segundo a *Federal Highway Administration*, a FHWA (2015), a fresagem a frio consiste na remoção de pavimento asfáltico com o uso de um equipamento constituído de tambor rotativo revestido com um conjunto de dentes de carboneto de tungstênio que age por impacto. Neste processo de execução do serviço de fresagem asfáltica a frio é gerado um produto residual chamado de fresado asfáltico.

Em grandes obras, tanto no âmbito rural como urbano, este resíduo gerado passa a ser bastante inconveniente, devido ao grande volume produzido e a baixa aplicação dentro dos canteiros, principalmente em obras de melhorias e restauração do pavimento.

### 3.3.3. Destinação do Fresado Asfáltico

Nos Estados Unidos da América, segundo a política de reciclagem da FHWA, é necessário ampliar em âmbito global a utilização em rodovias de materiais reciclados. Este órgão americano aponta que há diversos benefícios econômicos e ambientais para a utilização de produtos reciclados. Reduz o custo direto e reduz os impactos ambientais provocados pela deposição dos materiais de descarte, além de reduzir a quantidade de novos materiais a serem comprados. No Brasil, o

descarte de material é regido pela Resolução CONAMA 307/2002 (BRASIL, 2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), pertencente ao Ministério do Meio Ambiente.

Segundo a Resolução 448/2012 do CONAMA, o resíduo da reforma e reparo de pavimentação, que inclui o fresado asfáltico, é classificado como resíduo da construção civil Classe A. Em seu Art. 4º, § 1º, determina que “os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de ‘bota fora’, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei”. No Art. 10, da mesma resolução, é definido que o fresado asfáltico dever ser reutilizado ou reciclado como agregado, ou ainda deve ser “encaminhado a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros”.

Holtz e Eighmy (2000) apresentam dados referentes a geração e reciclagem do RAP em alguns países da Europa, conforme Tabela 2. O que chama a atenção é que na Alemanha, apenas 55% recicla o volume gerado.

Tabela 2 – Geração de RAP e Reciclagem em alguns países da Europa

Local	Geração RAP (t/ano)	% Reciclagem
Europa	41.000.000	80%
Suécia	880.000	95%
Alemanha	13.200.000	55%
Dinamarca	530.000	100%
Holanda	120.000	100%
Estados Unidos da América	75.900.000	99%

Fonte: Adaptado pelo autor de HOLTZ E EIGHMY, 2000 e NAPA, 2015a.

Horvath (2014) aponta que as reciclagens dos materiais asfálticos em 2004 representavam 92% do total gerado. A reciclagem dos materiais de concreto é realizada na taxa de 80% do peso total gerado, o aço na proporção de 68%, o alumínio em 50%, o plástico em 40% e o papel em 60%.

Conforme mencionado por Hovarth (2004) a quantidade total gerada de resíduos de produtos asfálticos nos Estados Unidos da América, 67% são reincorporados ao sistema viário através da sua inclusão na confecção de bases e

os 33% restantes são destinados à fabricação de novas camadas de misturas asfálticas utilizadas nas camadas finais do pavimento.

Segundo NAPA (2011), apenas 10% do fresado gerado foram utilizados como agregado no ano de 2010 e 9% no ano anterior. Apenas o percentual de 0,1% foi direcionado para os aterros que representa um total inferior a 0,1 milhões de toneladas.

Segundo Bida, Danraka e Ma'ali (2016) a maior parcela de uso de fresado asfáltico é destinado à construção ou recuperação de pavimentos, essa afirmação é reforçada por Huang, Shu e Li (2005) que aponta a aplicação desse resíduo material na construção de bases granulares das estruturas dos pavimentos rodoviários.

No Japão o uso deste material fresado é muito utilizado em pavimentos reciclados de asfalto segundo West e Copeland (2015). Há incorporação de aproximadamente 47% deste material nas misturas asfálticas, no entanto, nos Estados Unidos a incorporação gira em torno de 20%. Informam ainda que no Japão 41,9 milhões de toneladas de misturas à quente são recicladas anualmente neste país. No Japão são produzidos aproximadamente 55 milhões de toneladas de misturas anualmente, enquanto nos Estados Unidos fabricam 350 milhões em suas centrais de usinagem.

#### **3.3.4. Aplicação do fresado asfáltico**

Este resíduo é comumente utilizado como revestimento primário em estradas secundárias não pavimentadas ou em vias urbanas, conforme menciona NETO [s.d.], ou ainda como agregado nas camadas de base da estrutura do pavimento. Esta camada localiza-se logo abaixo das camadas de revestimento asfáltico. Ela é, normalmente, constituída pela combinação, ou não, de materiais como o solo, a pedra britada, a escória britada, o cascalho britado e a areia, podendo ainda ser cimentada com o emprego do cimento asfáltico ou Portland.

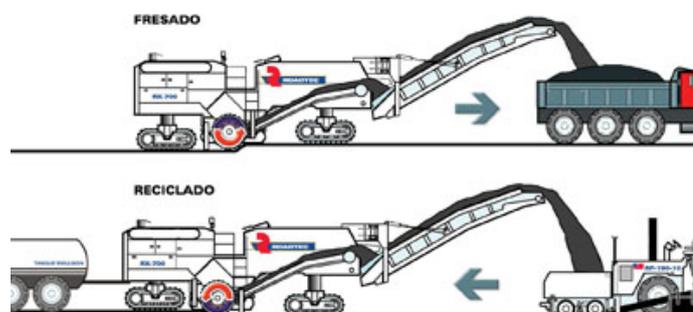
O fresado asfáltico também é utilizado como revestimento em dispositivos de acesso à rodovia pavimentada, em acostamentos de estradas de

menor tráfego, ou ainda, como “limpa roda” que é um dispositivo utilizado para que a lama que é trazida pelos pneus dos veículos não suje o leito estradal pavimentado.

Segundo o Relatório de Levantamento realizado pelo Tribunal de Contas da União, Brasil (2012b), foram realizadas obras de “limpa roda” na extensão de 150m em cada via não pavimentada que acessa a BR 285, no trecho pertencente ao estado do Rio Grande do Sul.

Há também aplicação do fresado asfáltico como parte da composição de novas camadas do leito estradal no processo de recuperação. Esta metodologia é chamada de reciclagem *in situ* a frio e consiste em utilizar o material fresado no mesmo local, incorporando-o juntamente com outros agregados e cimento, isto para a execução de uma nova camada de base reciclada. A diferença entre elas é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Comparativo do processo de fresagem e reciclagem *in situ*



Fonte: CONSTRUCCION PAN-AMERICANA, 2010

Na rodovia SP 070, Rodovia Ayrton Senna, administrada pela Concessionária das Rodovias Ayrton Senna e Carvalho Pinto S/A, Ecopistas, utilizou na execução de seus serviços de recuperação e manutenção do pavimento a técnica da reciclagem a frio em um trecho de 35km de extensão, localizado entre os km 11 e km 46, conforme Caterpillar Paving (2015).

Uma variante é o processo realizado com a adição de espuma de asfalto. Ele segue o mesmo processo, apenas inserindo a espuma de asfalto no meio da

mistura. A espuma é gerada através da aspersão de asfalto quente em contato com a água, conforme Castro (2003).

De acordo com Fonseca *et al.* (2014) há o processo a quente que conta com dois modelos, o *in situ* e o que é usinado em outro local. O executado no local (*in situ*) consiste em aquecer o asfalto existente, corrigi-lo ou adicionar agente rejuvenescedor, bem como adequar a granulometria e aplicá-lo no mesmo lugar. Já o outro processo consiste em levar o material fresado retirado da faixa de rolamento e utilizá-lo, incorporando-o como parte da nova mistura asfáltica.

Segundo Sachet (2012), a partir de 1980 o estado de Illinois, nos Estados Unidos da América, há utilização do processo de reciclagem a quente na geração de novas misturas asfálticas em usina, o *hot mixed asphalt* (HMA). No Brasil algumas obras foram executadas utilizando este processo.

Existem novas utilizações que estão em recente uso como os estudos realizados Sachet (2012) na aplicação de uso na confecção de concreto compactado com rolo (CCR) na substituição de agregado graúdo pelo resíduo asfáltico.

Outros estudos foram realizados na busca da utilização do fresado asfáltico na composição da camada destinada a base e sub-base do pavimento. Dias, Pinto e Costa (2015) estudaram a incorporação de fresado asfáltico em vários teores de incorporação, chegando à mistura que consiste em 90% de fresado asfáltico com 10% de solo. Foi verificado que a resistência necessária não foi atingida para a base, mas a utilização para uso na camada de sub-base é plenamente atendida.

O fresado asfáltico também pode ser utilizado como melhoria nas camadas finais de terraplenagem, incorporando-o ao solo do aterro. Também, conforme Pinto (2010, p. 72), há aplicação como camada de reforço do subleito, pois, “as análises mecánísticas mostraram que o material fresado quando utilizado como material de reforço de subleito é capaz de apresentar desempenho satisfatório”.

Há também a aplicação deste resíduo como agregado componente das camadas de pavimento, como a base, conforme Moreira, Pereira e Correia (2006). Neste tipo de aplicação é primordial adicionar ao fresado asfáltico, o pó de pedra e o cimento Portland.

### 3.3.5. Adequação da distribuição granulométrica do fresado asfáltico

Para posterior utilização do fresado asfáltico, de modo geral, deve-se adequar sua distribuição granulométrica para que atenda as especificações técnicas a que se destina. Segundo Bonfim (2007), o material fresado asfáltico tem a sua granulometria correlacionada diretamente com a velocidade de operação praticada durante o trabalho, do tipo do equipamento e das características do pavimento a ser removido.

O processo de coleta do material demolido pela fresadora a frio não é perfeito e o material não é totalmente removido, restando impurezas que são prejudiciais ao serviço de recomposição asfáltica, conforme Figura 11. Para realizar esta coleta complementar faz-se uso de minicarregadeira com vassoura rotativa (Figura 12).

Figura 11 – Situação local logo após intervenção com fresadora a frio



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Minicarregadeira com vassoura mecânica



Fonte: UNIFRESA, 2015

Para que isso se torne possível há necessidade de realizar separadamente ou conjuntamente os processos de peneiramento ou britagem, reduzindo assim o diâmetro máximo do fresado, bem como adequando sua distribuição granulométrica.

#### **3.3.5.1. Peneiramento**

Este processo é realizado devido às características granulométricas do material residual gerado e é realizado com o uso de um sistema de peneiramento mecânico (Figura 13). Esse processo é necessário para que sejam eliminados os grãos que não atendam a especificação desejada da composição granulométrica do novo agregado gerado, no caso o originado do fresado asfáltico removido dos pavimentos que revestem nossos sistemas viários.

Figura 13 – Sistema de Peneiramento



Fonte: IRONMART, 2015

### 3.3.5.2. Britagem

Quando se utiliza a fresadora, há menor necessidade do resíduo gerado ser submetido a um sistema de britagem ou trituração (Figura 14). Já no caso do processo de demolição, há necessidade que os materiais retirados sejam britados ou triturados para que os tamanhos dos blocos sejam reduzidos para dimensões de pedras comerciais, e assim, possam ter maior aplicabilidade ao produto.

Figura 14 – Triturador Rubble Master



Fonte: AECWEB, 2013

### 3.3.6. Estimativas de geração de fresado asfáltico

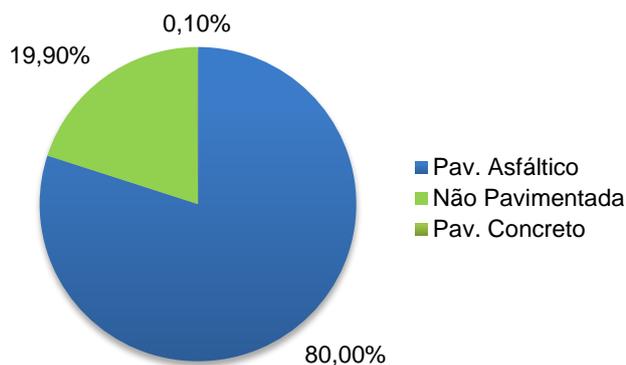
A malha viária brasileira é composta principalmente de pavimentos revestidos com concreto asfáltico. Isso faz com que seja gerada à cada nova intervenção uma grande quantidade de resíduo sólido nos processos de recuperação, como o fresado asfáltico.

Conforme mencionado na instrução de projeto do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, DER-SP (2006c), no IP-DE-P00/001-A, é considerado nos projetos de dimensionamento para um pavimento flexível o período de vida útil de 10 anos. É esperado que a cada década, sejam realizadas obras de recuperação do pavimento existente, adequando-o às suas novas condições. De outra forma, a cada ano, 10% de toda a malha viária tem a necessidade de ser readequada através de processos de recuperação ou melhorias das suas condições.

Segundo o Plano Diretor do Município de Campinas, Campinas (2006), que está sendo reestruturado em 2016, a cidade conta com uma extensão viária

próxima de 5.000km. Deste montante 4.000km são revestidos com camadas asfálticas, 995Km não são pavimentados e apenas 5km são de pavimento de concreto de cimento Portland e distribuídos percentualmente conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Tipo de revestimento do pavimento das ruas de Campinas



Fonte: Adaptado de CAMPINAS, 2006

De posse destes dados, desconsiderando que já havia em Campinas a demanda de 320km de vias públicas que necessitavam ser pavimentadas, há um potencial de geração de fresado asfáltico de 144.000m<sup>3</sup>, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de geração de fresado em Campinas

Dados estimados	Extensão (km)	Largura (m)	Espessura (cm)	% Área Fresada (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
	4.000	8	3	15%	144.000

Fonte: CAMPINAS, 2006.

Na região estão estabelecidas quatro concessionárias de rodovias, a Concessionária do Sistema Anhanguera-Bandeirantes S/A (Autoban), a Renovias Concessionária S/A (Renovias), a Concessionária Rota das Bandeiras S/A (Rota das Bandeiras) e Rodovia das Colinas S/A (AB Colinas).

A Autoban é responsável por segmentos das Rodovias SP 348, SP 330, SP 300 e SPI 102/330. A Renovias por segmentos da Rodovia SP 340, SP 342, SP 344, SP 350 e SP 215. A AB Colinas por segmentos das Rodovias SP 075, SP 127, SP 280, SP 300 e SP 102/300. A Rota das Bandeiras por segmentos das Rodovias

SP 065, SP 083, SP 332, SP 360, SP 063, SPA-122/065, SPA-067/360 e SPA-114/332.

Estas concessionárias contam com rodovias com grande volume de tráfego e que tem passagem pela cidade de Campinas. Todas com obrigações de realizar obras na região, mantendo o padrão de qualidade e prazos exigidos em seus contratos de concessão rodoviária.

A região de Campinas é extremamente bem servida de acessos rodoviários e conta com algumas das mais importantes rodovias do país, como a rodovia SP 348 e SP 330, Rodovia dos Bandeirantes e Anhanguera, respectivamente. Estas vias, nas proximidades de Campinas, apresentam um grande volume médio diário de veículos em trânsito, possivelmente em decorrência da importância da cidade que é a 11ª geradora de riqueza do país, aliado ao fato da região ter sua economia superior a 18 estados da nação brasileira (BACCHETTI, 2015).

A Secretaria de Logística e Transportes do Departamento de Estradas de Rodagem (DER-SP, 2016), disponibiliza a estatística de tráfego onde consta o volume diário médio de tráfego (VDM) das rodovias paulistas. Verifica-se, como exemplo, que na Rodovia SP 330 o volume médio diário é de 46.484 veículos (praça de pedágio de Valinhos) e na SP 348, o fluxo diário registrado é de 75.386 veículos (praça de pedágio Bandeirantes Itupeva), todos transitando pela Região Metropolitana de Campinas, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Localização das praças de pedágio de acesso à Campinas, Pedágio Itupeva (2016)



Fonte: PEDÁGIO Itupeva, 2016

No estado de São Paulo a malha viária, segundo DER-SP (2015), é composta de 34.134,81 km de extensão pavimentada e 162.333,96 km de extensão não pavimentada. Considerando toda a extensão pavimentada com revestimento asfáltico há um potencial de geração de fresado asfáltico de 2.150.493m<sup>3</sup>, conforme apresentado na Tabela 4.

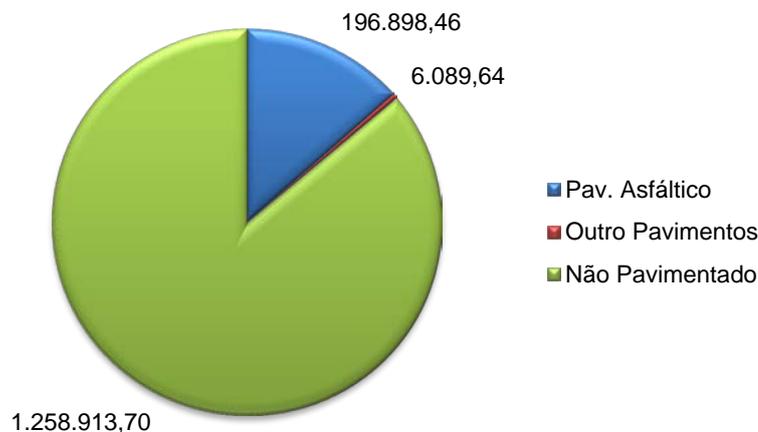
Tabela 4 – Estimativa de geração de fresado asfáltico no Estado de São Paulo

Dados estimados	Extensão (km)	Largura (m)	Espessura (cm)	% Área Fresada (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
	34.134,81	7	6	15%	2.150.493

Fonte: Autoria própria.

Segundo o Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais do Sistema de Gerencia de Pavimentos (SGP) do DNIT, Brasil (2013), a malha viária brasileira é composta predominantemente por vias não pavimentadas conforme demonstrado no Gráfico 4. Das vias que contam com pavimento, 97% têm seu revestimento produzidos com produtos asfálticos e apenas 3% com outros tipos de revestimento.

Gráfico 4 – Extensão de malha viária nacional (km)



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2013

Considerando estas informações, há um potencial de geração de fresado asfáltico de 12.404.606m<sup>3</sup> (Tabela 5), incluso os volumes estaduais.

Tabela 5 – Estimativa de geração de fresado asfáltico no Brasil

Dados estimados	Extensão (km)	Largura (m)	Espessura (cm)	% Área Fresada (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
	196.898,5	7	6	15%	12.404.606

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2013.

Considerando o tempo de vida de 10 anos, há o potencial de geração anual de 1.240.461m<sup>3</sup>, ou ainda, levando em conta a massa específica média de 24kN/m<sup>3</sup>, há o potencial de 2.977.106t anuais. Nesta estimativa não estão inclusas as potenciais quantidades geradas nos municípios nas obras viárias e decorrentes de outras atividades, como a execução de obras de redes de drenagem pluvial, água potável, esgoto e gás.

O próprio DNIT aponta em seu relatório (BRASIL, 2013) que nas rodovias vistoriadas em parte da malha viária brasileira, em 2013, 16,9% está com índice de condição de superfície (ICS) ruim, conforme apresentado na Tabela 6, o que indica a necessidade imediata de algum tipo de intervenção.

Tabela 6 – Condição da Superfície da malha viária do Brasil

Superfície	Porcentagem (%)	Extensão (km)
Bom	58,8	32.370,1
Regular	24,3	13.355,6
Ruim	16,9	9.299,3
Total	100,0	55.025,0

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2013

Por outro lado, a CNT (Confederação Nacional de Transporte) apresenta uma avaliação um pouco diferente, conforme Andrade (2016). Enquanto o DNIT aponta que 16,9% tem uma condição de superfície ruim, a CNT aponta que apenas 12,5% tem a condição ruim ou péssimo (Tabela 7). O levantamento realizado pela CNT representa 49,6% da malha viária pavimentada brasileira.

Tabela 7 – Levantamento das condições do pavimento (Brasil) segundo CNT

Pavimento	Porcentagem (%)	Extensão (km)
Ótimo	44,5	45.876
Bom	7,2	7.485
Regular	35,8	36.968
Ruim	9,9	10.227
Péssimo	2,6	2.703
Total	100,0	103.259

Fonte: Adaptado de Andrade, 2016

Uma informação importante para a manutenção da qualidade do pavimento existente é o controle de peso através de equipamentos de pesagem. Nesses locais são autuados e retidos os veículos que estão trafegando com cargas superiores às determinadas pela legislação vigente. Deste modo, preservando a utilização mais adequada da rodovia.

Por outro lado, o Relatório de Gestão Temático (DNIT, 2015), informa que no ano de 2012 e 2013 estavam em operação, na malha viária sob gestão do DNIT, 73 unidades de controle de pesagem em operação e no ano de 2014, nenhuma estava em atividade.

### 3.3.7. Direito sobre a propriedade do material fresado

Miranda (2005) afirma que o Estado pode exercer intervenção na propriedade privada desde tenha em foco a garantia e preservação dos interesses públicos descritos no artigo 5º da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.

Neste referido artigo, no inciso XXII, é garantido o direito à propriedade, mas o Estado pode apropriar-se da terra e exercer o domínio quando se trata de um interesse maior que é o público (BRASIL, 1988). No inciso XXIV, autoriza o Estado a realizar a desapropriação em função da necessidade ou utilidade pública ou ainda interesse social.

O processo de desapropriação é o recurso utilizado pelos governos Federal, Estadual, do Distrito Federal e dos Municípios para aquisição de áreas de interesse público para a implantação ou ampliação de obras, tomando posse de tudo o que pertence a estas glebas.

Como a maioria das áreas pavimentadas é de interesse público e pertencentes ao Estado, ele acaba por deter o domínio sobre a quase totalidade das áreas pavimentadas de nosso País que são as ruas, avenidas, alamedas, rodovias, acessos, pátios, pistas, dispositivos entre outros. Como proprietário, ele é detentor dos direitos e deveres de tudo o que está construído e é gerado em suas propriedades, ou seja, o fresado asfáltico estudado neste trabalho é pertencente ao Estado.

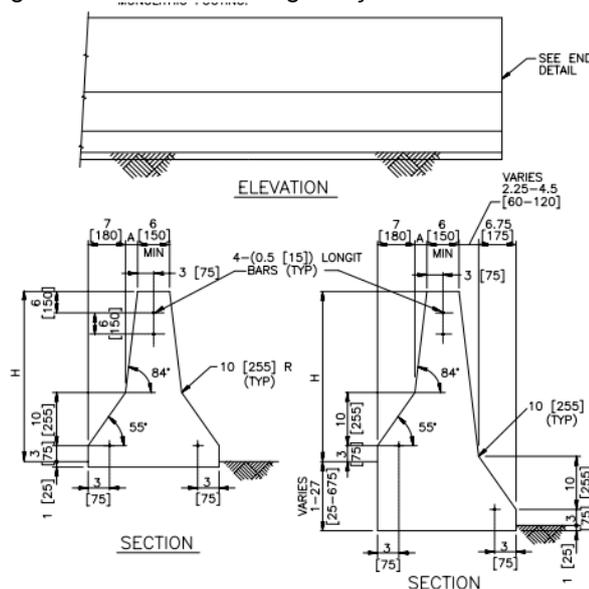
A concessionária de rodovias VIAPAR (2015), informa em seu portal eletrônico que o material gerado dos serviços de manutenção e restauração da sua malha viária “é depositado temporariamente na Faixa de Domínio da rodovia e é de propriedade da União ou do Estado do Paraná, dependendo da rodovia de onde ele foi obtido”. Alerta ainda que retirar este material sem autorização está cometendo um crime.

### 3.3.8. Elementos de drenagem superficial e segurança viária

As normas e especificações técnicas do DNIT e DER-SP apresentam as características necessárias para a produção e implantação dos elementos de segurança e de drenagem superficial. As exigências quanto ao concreto estão calcadas na resistência característica,  $f_{ck}$ .

A barreira tipo *New Jersey*, uma das mais utilizadas nos Estados Unidos, prevê sua execução com concreto que apresente resistência mínima à compressão superior a 4500psi, o que corresponde a 30MPa. Essa característica é detalhada juntamente com a planta de forma da barreira de segurança *safety-shape median barrier*, detalhado na SGM11a-b da FHWA (2005), conforme Figura 16.

Figura 16- Barreira de segurança média - SGM11a-b



Fonte: FHWA (2005)

Nota:

Sem escala.

Medidas em polegadas e milímetros.

O *Department of Transport and Main Roads* de Queensland (2009), estado da Austrália, define em suas especificações técnicas destinadas à produção de barreiras rígidas que o concreto utilizado na sua confecção apresente resistência característica à compressão superior a 25MPa.

Conforme a EUPAVE, *European Concrete Paving Association* (2012), as barreiras rígidas em concreto *in situ* europeias têm recomendação para fabricar estas peças de segurança viária com concreto de classe C28/35 ou C30/37, além de prescrever que deve ter consumo mínimo de 340kg cimento por metro cúbico de concreto produzido, relação água e cimento inferior a 0,50, além de abatimento próximo de 3cm. A aplicação deste concreto é com o uso de equipamentos extrusores auto propelidos.

Existem várias seções que podem ser utilizadas para a confecção destes elementos de segurança viária, como por exemplo o perfil de barreira tipo *New Jersey* descrito na norma DNIT 109/2009–PRO (2009), apresentado na seção para barreiras simples e dupla na Figura 17.

Figura 17 - Perfil de barreira tipo New Jersey conforme DNIT 109/2009-PRO

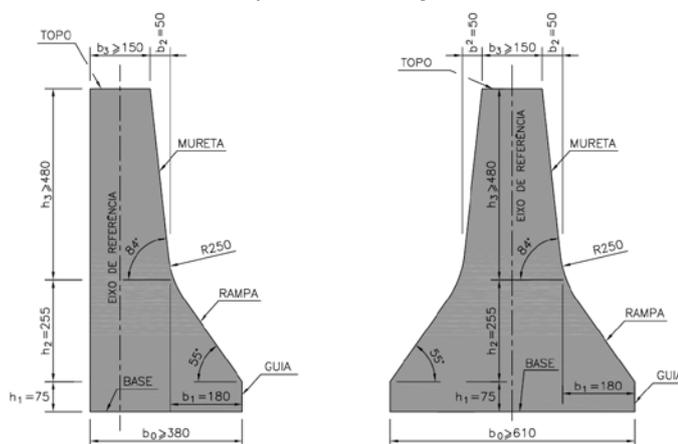


Figura 1-a  
Barreira Simples

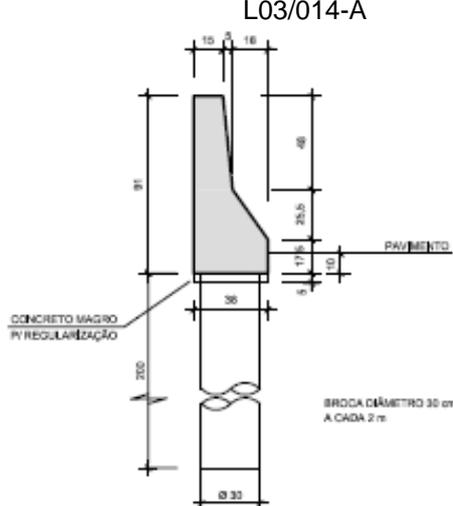
Figura 1-b  
Barreira Dupla

Fonte: DNIT (2009)

Nota:  
Sem escala  
Medidas em mm

O DER-SP apresenta uma série de projetos padronizados para a execução de barreiras rígidas, todas disponibilizadas em seu portal. Na Figura 18 é apresentada a planta de forma de uma barreira rígida simples baixa, referente ao projeto padrão PP-DE-L03/014-A (DER-SP, [s.d.]).

Figura 18 - Projeto padrão do DER-SP para barreira rígida em concreto baixa, conforme PP-DE-L03/014-A



Fonte: DER-SP, [s.d.]c

Nota:

Sem escala.

Medidas em mm.

Conforme definido pelo DNIT e pelo DER-SP, os concretos que terão a finalidade de fabricação das barreiras rígidas devem apresentar resistência característica do concreto a compressão de 25MPa, resistência semelhante ao preconizado na Austrália, menor que a especificada em 30MPa nos Estados Unidos e na Europa pela EUPAVE em 28MPa.

Quanto aos elementos de drenagem superficial estudados, o projeto da divisão de engenharia da cidade de Lake Oswego (2012), no estado de Oregon, nos Estados Unidos, define que a confecção de meios fio e sarjetas devem ser realizadas com concreto que tenha resistência à compressão superior a 4.000psi (28MPa). Os regulamentos de Bracken County (2016), do estado de Kentucky, nos Estados Unidos da América, definem que o concreto deve ter resistência mínima aos 28 dias superior a 4000 libras por polegada quadradas (28MPa) e 570 libras por polegada quadrada (3,9MPa) de resistência ruptura por flexão.

A província de Manitoba (2013) no Canadá, define para a execução desses elementos de drenagem que o concreto apresente resistência característica superior a 32MPa, abatimento entre 3 e 8cm, relação água e cimento de 0,45 e consumo mínimo de 340kg de cimento por metro cúbico de concreto produzido.

Há diferenças entre as especificações, pois o DNIT apresenta a necessidade do concreto deve apresentar resistência mínima à compressão de 15MPa e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) especifica que esta resistência deve ser de 20MPa. Nos Estados Unidos da América é visto que a resistência mínima característica do concreto é 28MPa e resistência a ruptura na flexão de 3,9MPa. No Canadá a resistência característica do concreto é 32MPa e impõe consumo mínimo de cimento aliado a relação água cimento.

### **3.3.9. Aplicação de materiais reciclados no concreto**

Inserir agregados reciclados no concreto não é nenhuma novidade. Normalmente é decorrente da necessidade de baratear o custo da fabricação deste importante insumo da construção. Outra motivação é a necessidade de preservar as nossas jazidas de materiais naturais tendo em vista que suas reservas são limitadas. Há também a busca pela melhora do desempenho do concreto e com isso poder aproveitá-lo em novas aplicações, pela direta redução das seções das peças calculadas nos projetos, pela preservação das suas propriedades quando submetido a meios agressivos ou ainda pela garantia da qualidade.

Várias aplicações de materiais que podem ser reciclados foram e estão em estudo nos mais diferentes tipos de concreto, nem sempre oriundos da construção. Há muito outros produtos são incorporados ao concreto, no cimento ou como agregados.

Preservar o nosso meio é de extrema importância e nunca foi tão alardeada sua necessidade. O clima no mundo está mudando e é notado por todos, reuniões envolvendo grande número de países, dentre eles os mais importantes do planeta, são cada vez mais frequentes e necessários, para definir regras e metas globais. Usar novas técnicas não é somente importante, é vital.

Análises desenvolvidas por Blankendaal, Schuur e Voordijk (2014), apontam que o impacto ambiental gerado por algumas técnicas de reciclagem do material oriundo de revestimento asfáltico pode gerar significativas reduções de

geração de gases do efeito estufa neste processo da construção. Apontam que essa redução pode atingir a quantia de 1/3 do total emitido, quantia extremamente significativa.

Utilizar o fresado asfáltico como insumo do concreto não é novidade. Há algum tempo alguns pesquisadores vem estudando o comportamento dos concretos em cimento Portland com a adição deste material oriundo da restauração ou manutenção das vias rurais ou urbanas.

Delwar, Fahmy e Taha (1997) estudaram a incorporação de RAP no concreto de cimento Portland em substituição aos agregados naturais. Foram realizadas substituições de 25%, 50%, 75% e 100% do agregado graúdo e 100% do miúdo. Neste trabalho foi observada a redução da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos com a elevação do teor de substituição, ou seja, quanto maior a substituição de agregado natural por fresado asfáltico, menor a resistência. Isso foi concretizado com a afirmação dos autores que a maior resistência foi encontrada no concreto que somente fez uso de agregados naturais em sua composição. Por outro lado, observaram que o concreto com RAP apresenta melhoria na ductibilidade.

Estes pesquisadores apontam a possibilidade de utilização deste novo concreto que contém o agregado de RAP na fabricação de elementos utilizados nas obras de engenharia. Indicam que este concreto pode ser aplicado na produção de barreiras, calçadas, calhas e tubos.

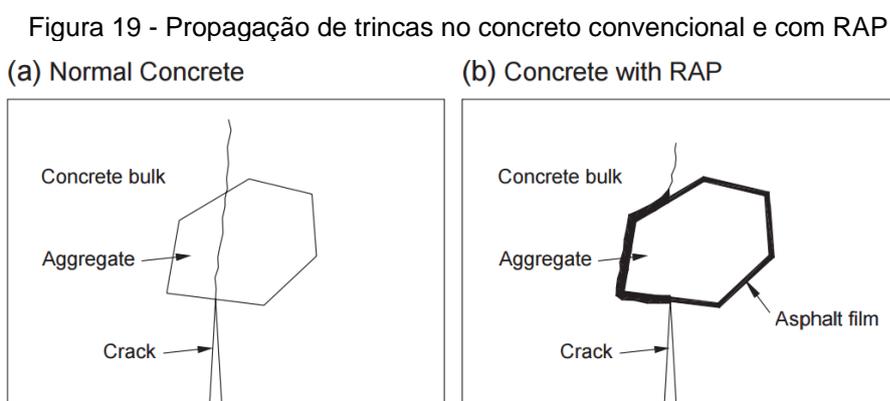
Hassan, Brooks e Erdman (2000) realizaram estudo onde substituíam totalmente os agregados por fresado asfáltico, tanto na porção graúda quanto na miúda, onde foi observada a redução de 80% da resistência à compressão e de 45% da resistência a flexão. Quando estes pesquisadores analisaram a substituição individual de todo agregado graúdo e depois o miúdo por fresado asfáltico, foi notado que os resultados obtidos não foram tão discrepantes, tanto na resistência à compressão que apresentaram redução de aproximadamente 65% e na resistência à flexão a redução aproximada de 35%. Deste modo é confirmado que a substituição de todos os agregados, bem com a parcela total de cada um

deles (gráudo ou miúdo) impactam fortemente na redução das resistências do concreto gerado com este resíduo.

Huang, Shu e Li (2005) desenvolveram estudos onde trabalham com diversas substituições de agregado natural por fresado asfáltico. Observa-se que com a substituição total dos agregados gráudos há redução na resistência à compressão de 41%, quando comparado com o concreto constituído por 100% de agregado natural.

Ao realizarem a substituição total de agregado miúdo, a redução apurada é 50% do valor de referência executado com agregados naturais. No evento analisado que consiste na substituição total dos agregados por fresado asfáltico, a redução verificada é 72%. Concluem que com o incremento do fresado asfáltico acarreta redução de resistências mecânicas como a compressão axial.

Os pesquisadores apontam que as resistências a ruptura à flexão apresentam reduções menores que as axiais. Essa perda de resistência varia de 5%, para a substituição de agregado gráudo, para 21% na substituição do miúdo. Para o caso da substituição total dos agregados, a resistência chega a ser minorada em 49%. Apontam que esta redução está relacionada a ruptura do concreto que ocorre na superfície gerada entre o filme de asfalto e a pasta de cimento conforme Figura 19.



Fonte: HUANG, SHU e LI, 2005

Observa-se resultados no concreto estudado por Mathias, Sedran e De Larrard (2004), a influência direta da temperatura dos corpos de prova ensaiados

quanto aos resultados dos ensaios mecânicos. As temperaturas utilizadas no estudo foram de 2°C, 20°C e 40°C. Os resultados mostram que independentemente do teor de substituição de agregado natural por fresado asfáltico, há redução das resistências mecânicas dos corpos de prova já endurecidos. Nota-se ainda que nas substituições mais elevadas a sensibilidade à variação da temperatura é maior o que gera grande mudança na resistência do concreto.

Percebe-se que para substituições de material reciclado com teores inferiores a 20%, a variação à resistência à compressão avaliada permanece com valores muito próximos ao concreto sem substituição de agregados naturais (informação verbal)<sup>1</sup>.

Erdem e Blankson (2014) desenvolveram estudo que envolve concreto com agregados naturais com outras composições que foram elaborados com a substituição total dos agregados por material reciclado de concreto e fresado asfáltico.

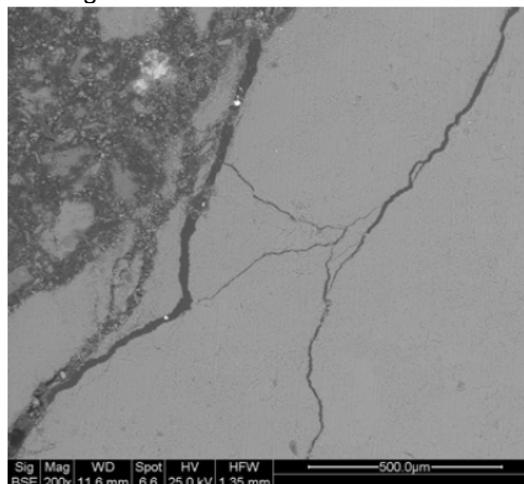
Observaram que a resistência à compressão axial aos 28 dias do concreto com total substituição dos agregados naturais por fresado asfáltico, apresentou redução aproximada de 55% e para a resistência à flexão na compressão a redução observada foi de 37%, quando comparado ao concreto confeccionado com pedra calcária de Derbyshire. Quando utilizado agregado natural de Trend Valley a redução apurada foi de 35% para a resistência à compressão axial aos 28 dias e a resistência à flexão na compressão foi de 36%.

Segundo os autores essa redução deve-se ao fato do enfraquecimento da nova película gerada pela nova argamassa devido à existência da antiga envoltória de asfalto dos grãos do fresado asfáltico, conforme apresentado no seu artigo (Figura 20).

---

<sup>1</sup> Informação de Thierry Sedran na palestra “Reciclagem de Pavimentos: O Estado da Arte na França”, em São Paulo, promovido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Escola Politécnica da USP, Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais (LMEF – USP) e pelo Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transportes (IFSTTAR) em 11 março de 2016.

Figura 20 - Imagem eletrônica da fratura no concreto com RAP



Fonte: Erdem e Blankson (2014)

Erdem e Blankson (2014) afirmam que o concreto elaborado com fresado asfáltico não é recomendado para uso em concreto estrutural, tendo em vista a grande redução de importantes resistências mecânicas gerados na plena substituição do agregado natural por reciclado.

Ibrahim *et al.* (2014), realizou ensaios mecânicos em laboratório com a incorporação de fresado asfáltico no concreto de cimento Portland. Foi observado a redução da resistência à tração que está diretamente relacionada ao teor de substituição do agregado natural. O estudo afirma que não aconselha a substituição de agregado graúdo em quantidade superior a 25% por agregado gerado no processo de fresagem de pavimento asfáltico devido às perdas das qualidades do novo concreto.

Solanki e Dash (2015) apresentam resultados derivados do incremento de fresado asfáltico no concreto que variam a substituição de agregados graúdos e miúdos individualmente. Os percentuais de permuta de agregado natural por fresado asfáltico são 10%, 20% e 40%. Os pesquisadores concluem que a resistência à compressão simples e a resistência indireta à flexão foram reduzidos em função da substituição do teor de fresado asfáltico e da granulometria do agregado (miúdo e graúdo). É observado que a substituição de agregados graúdo implicam em maior redução de resistências mecânicas quando comparados às substituições do agregado miúdo. Apontam ainda que a queda de resistência está associada a película de asfalto entre o agregado e as partículas de cimento.

Indicam ainda que o RAP apresenta baixa absorção de água quando comparado ao agregado natural.

Na elaboração de concreto auto adensável, Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015) apresentam estudos que foram observados aumento no ensaio de *slump flow*, conforme ocorria a substituição do agregado graúdo por fresado asfáltico. O estudo considerou a substituição de 10%, 20% e 40% do agregado graúdo, mantendo a mesma relação entre a água e o cimento, o cimento e o agregado miúdo. Observa-se que o incremento de 10% de fresado asfáltico apresenta resultados à compressão axial e de resistência à tração superior ao confeccionado com agregados naturais. Para as demais substituições os resultados apresentam redução, mas não tem relação direta com o teor de troca de agregado reciclado por natural.

Em ensaios laboratoriais desenvolvidos por Bida, Danraka e Ma'ali (2016), é possível verificar que a absorção de água do concreto gerado com a fresado asfáltico. As substituições realizadas foram em diversos teores e de modo geral o concreto com fresado apresentam resultados, em média, superiores aos dos naturais. Apenas em um caso de substituição de 40% do agregado fino foi verificada elevação da absorção de água no valor de 9% quando correlacionado com o concreto de referência (1,65%). Em contrapartida com a substituição de 20%, apresentou redução aproximada de 75%. Concluem ainda que a substituição de 40% do agregado fino por fresado asfáltico apresenta resultados que o torna viável, pois mesmo com redução da massa específica e resistência à compressão. Essa informação deve-se ao fato desta substituição acarretar pequena variação na resistência à compressão entre substituições de 20% e 40%, além da redução aproximada de 10% em relação ao concreto sem substituição. A substituição de 40% de agregado fino por fresado asfáltico equivale a substituição de 16% do total de agregados que compõe a mistura referencial.

## 4. METODOLOGIA

Esta pesquisa experimental visou entender o comportamento mecânico do concreto que tem na sua composição o fresado asfáltico, substituindo parte dos agregados naturais. Aplicou-se este concreto com fresado em elementos de segurança viária (barreiras rígidas) e em elementos de drenagem das rodovias (canaletas). Para tanto esta pesquisa foi dividida em duas fases.

Na primeira fase foram elaborados os traços de concreto com fresado e suas propriedades mecânicas foram comparadas com as propriedades de um concreto referência constituído com materiais convencionais. Como parâmetro das exigências técnicas dos concretos foram utilizadas as publicações do DNIT e do DER-SP que têm normas específicas para confecção das peças em estudo. Para a barreira rígida, o DNIT apresenta as normas DNIT 109/2009-PRO (2009) e DNIT 110/2009-ES (2009), já o DER-SP utiliza a especificação técnica ET-DE-C00/007-A (2006a). Para as canaletas, guias, sarjetas e valetas, o DNIT faz uso da norma DNIT 020/2006-ES (2006) e DNIT 018/2006-ES (2006) e o DER-SP com a especificação técnica ET-DE-H00/018-A (2006d).

Na segunda fase foram construídos elementos de drenagem e segurança viária com os traços dos concretos desenvolvidos na fase 1 com a intenção de verificar o desempenho mecânico do concreto, o acabamento e trabalhabilidade dos concretos propostos com substituição de agregados por fresado asfáltico comparados aos construídos em concreto convencional. Para isso as peças foram moldadas conforme PP-DE-H07/003 (DER-SP, [s.d.]a), PP-DE-H00/018-A (DER-SP, [s.d.]b) e PP-DE-L03/014-A (DER-SP, [s.d.]c).

### 4.1. Definição da resistência à compressão e características do concreto

O concreto utilizado para confecção de barreiras rígidas de concreto, deve ter uma resistência característica à compressão mínima de 25MPa, conforme especifica as normas DNIT 109/2009-PRO (2009), DNIT 110/2009-ES (2009) e DER-SP ET-DE-C00/007-A (2006a).

Para execução de guias, sarjetas e valetas, o concreto deve ter resistência característica à compressão de 15MPa, segundo especificações das normas DNIT 020/2006-ES (2006), DNIT 018/2006-ES (2006). Nas especificações preconizadas pelo DER-SP ET-DE-H00/018-A (2006) é previsto a execução destes elementos de drenagem com a resistência característica à compressão de 20MPa.

Foram estudadas duas composições de concretos, um com resistência característica à compressão de 25MPa e abatimento de 9cm para as barreiras rígidas e outro concreto com resistência característica de 20MPa (abrange as especificações do DER e do DNIT) com abatimento de 1cm, conforme IMB, fabricante de extrusoras de perfis de concreto, IMB (2015).

#### **4.1.1. Escolha e procedência dos materiais**

Os materiais utilizados neste estudo foram fornecidos pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas e estão disponíveis no laboratório de materiais, como o cimento, a brita e o aço nas bitolas de 4,2mm adaptado do projeto padrão, o qual serviu de referência, PP-DE-L03/014-A, DER-SP ([s.d.]c). O fresado asfáltico foi coletado nas rodovias da Macrorregião Metropolitana de Campinas e transportado até as instalações da PUC Campinas.

#### **4.1.2. Ensaio de caracterização dos materiais**

Os materiais que compõe os concretos estudados, bem como a armadura utilizada na confecção da barreira rígida, foram caracterizados conforme estabelecido pelas normas da ABNT.

##### **4.1.2.1. Cimento**

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, Cauê CPV-ARI Estrutura. Este insumo é produzido pela InterCement Brasil. Este cimento utilizado deve atender a norma NBR 5733, ABNT (1991) e os ensaios executados estão descritos no Quadro 1. Os resultados podem ser vistos no capítulo 5 no item 5.1.2.

Quadro 1 - Ensaio previstos para o Cimento

Ensaio	Norma
Resistência à Compressão	NBR 7215:1996
Massa Específica	NBR NM 23:2001
Índice de Finura	NBR 11579:2012

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2.2. Agregados

A brita utilizada é proveniente da Pedreira Basalto localizada na cidade de Pedreira e a areia do Porto Marchionno da cidade de Jacareí. O fresado asfáltico foi coletado na obra de restauração viária da malha da Concessionária Renovias SA, na macrorregião de Campinas, mais precisamente no km 260 da SP 350, Rodovia Deputado Eduardo Vicente Nasser. O fresado asfáltico foi gerado no processo de remoção da camada asfáltica existente com o método de fresagem do pavimento a frio para a execução de serviços de recapeamento da mencionada rodovia, atividade realizada durante o mês de julho de 2015. As atividades de fresagem ocorreram no período matutino com tempo ensolarado e havia 18 dias da última precipitação no local dos trabalhos.

O processo de fresagem do pavimento contou com a utilização de uma fresadora a frio da marca Wirtgen, modelo W 1900, com cilindro contendo 162 ferramentas de corte, que removeu a camada asfáltica existente na espessura média de 5cm, trabalhando com velocidade média de operação de 4m/min.

Após o processo de aquisição de materiais, a areia e pedra britada foram condicionados nas baias de estocagem de agregados do laboratório de materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (Figura 21), bem como os sacos contendo fresado asfáltico foram depositados em área coberta e com identificação para evitar problemas durante os processos de moldagem.

Figura 21 - Baias de estocagem de agregados naturais da PUC Campinas



Fonte: Autoria própria.

Para a caracterização dos agregados foram realizados os ensaios descritos na Quadro 2.

Quadro 2 – Ensaios da ABNT dos Agregados

Ensaios/Agregados	Areia	Brita	Fresado asfáltico
Massa Específica	NBR NM 23:2001	NBR NM 53:2009	NBR NM 53:2009
Massa Unitária	NBR NM 45:2006	NBR NM 45:2006	NBR NM 45:2006
Granulometria	NBR NM 248:2003	NBR NM 248:2003	NBR NM 248:2003
Absorção de água		NBR NM 53:2009	NBR NM 53:2009
Abrasão Los Angeles		NBR NM 51:2001	NBR NM 51:2001
Teor de Asfalto			NBR 16208:2013

Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2.3. Aditivo

Para auxiliar na trabalhabilidade do concreto fez-se uso de aditivo com base de policarboxilato produzido pela Grace Construction Products. O produto escolhido foi o ADVA™ CAST 525 que é um superplastificante que permite trabalhar com concretos de baixa trabalhabilidade em condições normais.

#### 4.1.2.4. Aço

O aço utilizado foi na bitola de 4,2mm, adaptado do projeto padrão PP-DE-L03/014-A, DER-SP ([s.d.]c). É proveniente da metalúrgica GUERDAU. Para esse material foi realizado o ensaio de verificação da tensão de escoamento e módulo de elasticidade através da norma ABNT NBR ISO 6892-1, ABNT (2013).

Para verificação da tensão de ruptura foi utilizada a prensa EMIC modelo DL30000 com célula de carga de 30tf, com garras inferior e superior (Figura 22). As informações coletadas no processo de ensaio foram transferidas para o programa TESC versão 3.04.

Figura 22 - Prensa EMIC DL30000 para ensaio de barras de aço



Fonte: A autoria própria.

Para facilitar o manuseio e a realização dos ensaios destrutivos nas barreiras rígidas, foi adotada a estratégia de trabalhar com um modelo reduzido. Neste processo foram reduzidas todas as medidas externas na razão de 50% do real. Na proporção volumétrica, a redução foi de 75%.

A área de aço, inicialmente prevista, foi reduzida de tal forma que garantisse manter a relação da seção inicial entre a área de aço e a área do concreto, permitindo assim realizar os estudos sem alterar as características utilizadas no processo de dimensionamento estrutural.

Para a adequação da seção de aço foram utilizadas duas ações: a primeira foi utilizar aço com menor diâmetro (adotado o aço 4,2mm); a segunda foi alterar o espaçamento das barras de aço, mas com distância que permitisse a passagem do concreto sem a ocorrência da segregação ou necessidade de abertura de janelas na armadura durante o processo de concretagem.

#### 4.1.3. Dosagens

Para realização do estudo foram necessárias diversas dosagens de concreto. Para tanto foi estabelecido o concreto de referência e utilizado o processo de dosagem realizado através do método do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN,

1992), confeccionado com agregados comumente usados. A substituição pelo fresado foi feita nos dois tipos de agregados, o graúdo e miúdo.

Por se tratar de uma composição que deve ter rigoroso controle tecnológico, o cimento e os agregados devem ser medidos em massa, a água de amassamento deve ser medida em massa ou volume, desde que com dispositivo dosador, além de ser corrigida a quantidade de água em função da umidade dos agregados, considerou-se a condição de preparo do concreto “A”, conforme preconiza a NBR 12655, ABNT (2015).

Com esta condição definida, determinou-se a resistência de dosagem do concreto através do cálculo previsto na NBR 12655, ABNT (2015), que descreve que a resistência média do concreto à compressão prevista para a idade desejada ( $f_{cm}$ ) é calculada em função da resistência característica ( $f_{ck}$ ) desse concreto e do desvio padrão da dosagem ( $S_d$ ), igual a 4,0 (condição “A”), conforme fórmula (1) e apresentado na Tabela 8.

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (1)$$

Tabela 8 – Valores das resistências mínimas dos concretos (MPa)

Concreto	$f_{ck}$	$f_{cm}$
Barreira rígida	25,0	31,6
Elementos de drenagem	20,0	26,6

Fonte: Autoria própria.

Quanto à durabilidade, no caso das barreiras rígidas, foi seguida a recomendação descrita na NBR 12655, ABNT (2015), e quanto à definição da relação água/cimento em massa (A/C) foi adotado o valor máximo 0,60 para concretos C25 quando em concreto armado. Será controlada a consistência através do abatimento do tronco de cone através do ensaio preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O concreto com fresado asfáltico foi desenvolvido após a definição do concreto de referência para cada resistência e características solicitadas nas especificações do DER-SP e do DNIT. O principal objetivo do novo traço é de manter as características mais próximas do referencial. Além da resistência

mínima, foi verificada a menor mudança na distribuição granulométrica da nova mistura com a de referência.

Para determinação do novo traço contendo fresado asfáltico em sua composição, foi adotada a seguinte sequência:

- a) Após determinar o traço do concreto em função da resistência mínima adotada aos 28 dias, verificou-se a composição deste traço com a determinação dos percentuais em peso de cada um dos componentes em relação ao peso total seco;
- b) Foi realizada a substituição da areia e brita por fresado asfáltico, destacando-se estes percentuais na composição;
- c) Em uma planilha todas as curvas granulométricas foram analisadas;
- d) Com o percentual da composição e granulometria de cada componente determinou-se a granulometria de em cada peneira através da somatória da multiplicação do percentual da composição pela porcentagem retida de cada um dos materiais. Esse passo do processo gerou a distribuição granulométrica do concreto de referência;
- e) Para determinar uma “faixa de trabalho”, recalculou-se novas faixas limítrofes utilizando as especificações para uso das areias e das britas no concreto. Considerou-se para o limite inferior os valores mínimos preconizados e para o limite superior os valores máximos descritos na norma. Desta forma delimitou-se a faixa de variação para a granulometria do concreto referenciado;
- f) De posse da distribuição do concreto de referência, realizou-se a substituição dos agregados naturais (areia e brita) por fresado asfáltico, gerando assim novas distribuições granulométricas devido a inserção de um novo produto no concreto.

- g) Realizou-se o processo para determinação da nova distribuição granulométrica descrito no item “d”;
- h) Comparou-se então as distribuições granulométricas, concreto de referência com o concreto com fresado asfáltico na busca de procurar a menor distorção possível entre elas;
- i) A curva granulométrica obtida que apresentou menor distanciamento entre a curva de referência e a com fresado asfáltico foi analisada. Para isso foi adotado inicialmente a quantidade de peneiras fora dos limites definidos.
- j) Esse processo gerou um rol de curvas granulométricas para a confecção do concreto com fresado asfáltico que poderiam substituir a curva de referência. Assim escolheu-se o de maior substituição;

No caso particular do concreto destinado a confecção de dispositivos de drenagem é recomendado que o teor de argamassa seja elevado. Conforme menciona a IMB Industria Metalúrgica Ltda. (2015), fabricante de equipamentos para aplicação de concreto, que o percentual de argamassa da composição do concreto tenha teor próximo ao valor de 72%.

Foram elaborados os traços de concreto destinados a determinação do concreto de referência e com fresado asfáltico, tanto para a destinação da confecção de elementos de segurança viária, bem como para a confecção de elementos de drenagem superficial.

Objetivando a identificação dos corpos de prova confeccionados foi adotada a nomenclatura descrita no Quadro 3, acompanhado do número do traço desenvolvido. Para os concretos que contém fresado asfáltico na sua composição, foi destacado o percentual de utilização de fresado asfáltico. A numeração “0” (zero) foi utilizada na confecção das composições finais de verificação dos resultados, tanto para as barreiras rígidas quanto para a drenagem.

Quadro 3 – Nomenclatura das composições dos concretos

Concreto	Elemento de segurança	Elemento de drenagem
Referência	CRn <sup>o</sup>	CCRn <sup>o</sup>
Com fresado asfáltico	CFn <sup>o</sup> -%	CCFn <sup>o</sup> -%

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4. Ensaios de características mecânicas do concreto

Estes ensaios seguiram as normas da ABNT para cada característica a ser analisada descrita no Quadro 4.

Quadro 4 – Ensaios do Concreto Endurecido

Ensaios	Concreto Endurecido
Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos	NBR 5739:2007
Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	NBR NM 7222:2011
Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos	NBR 12142:2010
Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão	NBR 8522:2008
Determinação da absorção de água por capilaridade	NBR 9779:2012
Ensaio de Impacto	Será realizado conforme preconizado por MARTINS, 2005

Fonte: Autoria própria.

A quantidade de corpos de prova moldados utilizados na verificação dos resultados de cada ensaio realizado é apresentado no Quadro 5. No processo de confecção foram utilizados moldes cilíndricos nas dimensões de 10cmx20cm e prismáticos com dimensões de 10cmx10cmx40cm, ambos metálicos.

Quadro 5 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio

Ensaio	Idade (dias)	Quantidade de corpos de prova	
		Definição do traço	Moldagem dos elementos
Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos	7	4	6
	14	4	6
	28	4	6
	91	4	6
Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	28	4	6
Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos	28	4	6
Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão	28	4	6
Determinação da absorção de água por capilaridade	28	-	6
Ensaio de Impacto	28	-	6

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram moldados (Figura 23) e submetidos aos ensaios destinados à obtenção das características do concreto no estado endurecido no laboratório de materiais de construção e estruturas da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Os corpos de prova foram desmoldados até 24h após a moldagem e direcionados para a câmara úmida, com a finalidade de dar continuidade do processo de cura do concreto até completar a idade para a realização dos ensaios.

Figura 23 - Corpos de prova recém moldados



Fonte: Autoria própria.

Após o período desejado de cura dentro da câmara úmida, os corpos de prova foram removidos para a realização dos ensaios destinados a determinação da resistência à compressão de corpos de provas cilíndricos. Para tanto, foram preparados com o uso de equipamento de retificação (Figura 24), o qual tem a finalidade de garantir a planicidade das áreas dos tops, conforme observado na Figura 25.

Figura 24- Retificadora de corpos de prova cilíndricos em concreto



Fonte: A autoria própria.

Figura 25 - Corpo de prova em concreto retificado



Fonte: A autoria própria.

Em seguida os corpos de prova cilíndricos retificados foram submetidos ao ensaio em uma prensa MFL System com capacidade de 200tf (Figura 26), com aquisitor de dados EMIC com módulo eletrônico para informatização de máquinas de ensaio (Figura 27). As cargas obtidas foram coletadas e transferidas para o programa TESC versão 3.04. Este processo foi realizado no concreto com idade de 7, 14, 28 e 91 dias.

Figura 26 - Equipamento de ensaio à compressão



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Módulo eletrônico para informatização de máquinas de ensaio



Fonte: Autoria própria.

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (Figura 28). Foi utilizada a mesma prensa destinada aos ensaios de determinação de resistência à compressão dos corpos de provas cilíndricos. Este ensaio foi realizado com a idade de 28 dias.

Figura 28 - Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios destinados a determinação do módulo de elasticidade estático à compressão (Figura 29) houve a necessidade do preparo das amostras

para a sua realização. A preparação realizada nos corpos de prova foram as mesmas destinadas ao ensaio de resistência à compressão.

Este processo de ensaio foi realizado com 28 dias de idade e foi utilizado uma prensa da empresa EMIC modelo DL30000 com célula de carga de 30tf e com dois extensômetros para medida de deformação diametral. Os valores foram coletados e transferidos para o programa TESC versão 3.04.

Figura 29 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria.

O processo de ensaio consiste em aplicar a tensão equivalente a 30% da tensão de ruptura adquirida nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e manter nesta condição por 60s. Depois desta tensão aplicada no tempo previsto, deve-se aliviá-la até que seja considerada nula.

A seguir é aplicada uma tensão axial de 0,5 MPa no corpo de prova por 60s e depois elevado a tensão até a tensão de 30% da tensão de ruptura pelo mesmo tempo. Novamente reduz-se o carregamento a zero. Esta fase é realizada mais uma vez.

Na nova aplicação de uma tensão axial de 0,5 MPa no corpo de prova por 60s é registrada por 30s a deformação axial. Em seguida é elevada a tensão até que atinja de 30% da tensão de ruptura pelo mesmo tempo e registrado novamente a deformação diametral por 30s.

A determinação do valor do módulo é obtida pela divisão da diferença de 30% da tensão de ruptura adquirida nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos deduzido 0,5MPa com a diferença das deformações axiais médias obtidas para os dois carregamentos impostos. Esse resultado dividido por 1000, é obtido o módulo estático de elasticidade à compressão. O programa trabalha os dados coletados e fornece diretamente o valor do módulo estático de elasticidade à compressão obtido do corpo de prova cilíndrico submetido ao ensaio.

Para a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (Figura 30) foi utilizada a mesma prensa destinada ao ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão.

Figura 30 - Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos



Fonte: Autoria própria.

No ensaio de impacto foi utilizado o equipamento de queda livre da EMIC que permite que uma peça metálica atinja diretamente o corpo de prova a ser analisado. Foram empregadas no ensaio peças metálicas esféricas com massa de 500g para as placas padronizadas (35cmx35cmx5cm) e cilíndricas com massa de 10kg para os elementos de segurança (em escala reduzida) e drenagem (em escala real). Este ensaio foi realizado com o equipamento apresentado na Figura 31 com a idade de 28 dias.

Figura 31 - Equipamento de ensaio de impacto (EMIC)



Fonte: Autoria própria.

A moldagem realizada de elementos de segurança e de drenagem em escala tem a finalidade de comparar o desempenho entre os concretos aplicados nas diferentes seções que serão utilizadas nas obras de engenharia, tanto com o convencional quanto com fresado asfáltico.

No caso do ensaio da resistência da peça à flexão, foi realizado ensaio com o uso de pórtico metálico com pistão hidráulico Torvel, para aplicação da carga, com célula de carga de 60tf modelo ULCE 60k (Figura 32) com a finalidade de verificar o comportamento dos elementos estudados em escala.

Este equipamento de ensaio é provido de aquisitor de dados LYNX e o programa para tratamento das informações é ATMP 2.2 da LYNX. Estes elementos ficaram apoiados pelas extremidades sobre dois cavaletes metálicos com cutelos na região de contato.

Figura 32 – Equipamento de realização de ensaio a flexão com pistão hidráulico Torvel



Fonte: Autoria própria.

Foi realizado ensaio de permeabilidade tanto no concreto usado como referência quanto no concreto com fresado, para fins de comparação de seus resultados. O equipamento usado foi o poroscópio eletrônico CP-6000 fabricado pela *James Instruments Inc.* (Figura 33). Com o uso deste instrumento de ensaio não destrutivo, executou-se a verificação da permeabilidade a água e ao ar.

Figura 33 - Poroscópio CP-6000



Fonte: Autoria própria.

Para realizar este ensaio é necessário perfurar o concreto na profundidade de 40mm com diâmetro de 10mm e distante no mínimo 40mm dos bordos e de outros furos. Este furo deve ser completamente limpo para evitar que resíduos gerados na fase de furação venham comprometer os resultados dos ensaios.

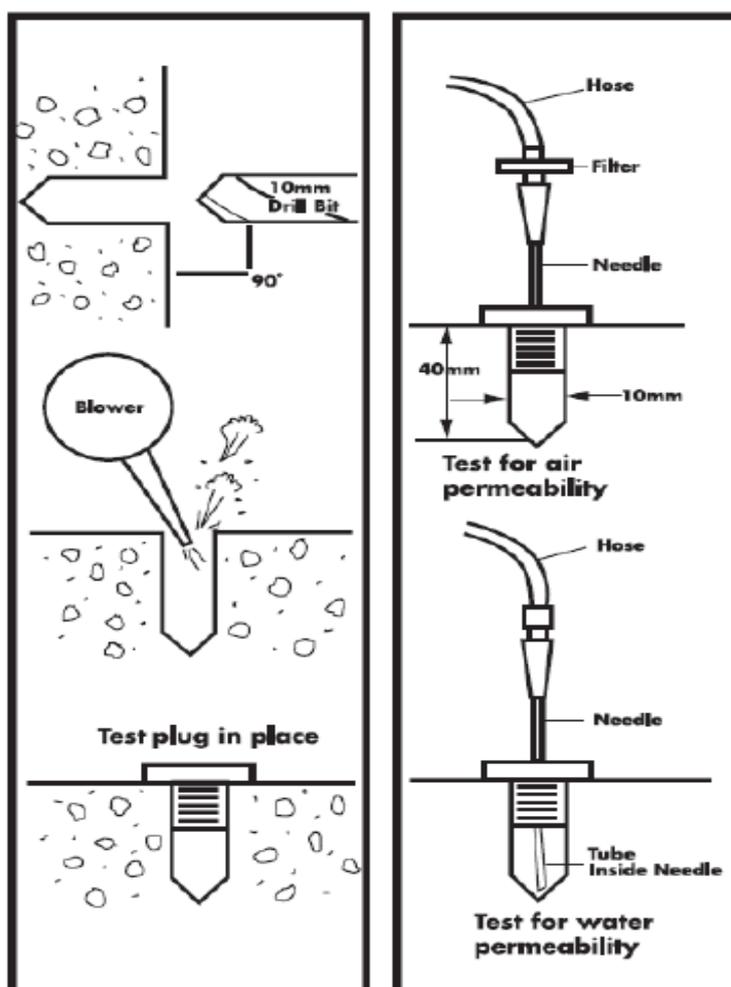
Em cada furo é introduzido um plugue de silicone com altura de 20mm e diâmetro de 10mm, ungido com vaselina para facilitar sua instalação. No centro deste plugue é colocado um parafuso especial de plástico que tem a finalidade de facilitar o encaixe de uma agulha para realizar o ensaio de permeabilidade ao ar e cabo para ensaio de permeabilidade à água, além de aumentar o travamento do plugue às paredes do furo em processo de ensaio.

No ensaio ao ar, é introduzido uma agulha acoplada a um elemento filtrante que ficam conectados ao poroscópio através de um tubo de ar (Figura 34). Após o devido encaixe destas peças é ligado o equipamento. Deve-se limpar a memória de registros de informações através da tecla “reset”. Em seguida abre-se a chave de controle de entrada de ar e pressuriza-se o sistema através do bombeamento de ar através de uma bomba manual acoplada ao equipamento.

Quando dois dispositivos luminosos acenderem, indica que o furo está pressurizado e pronto para a realização do ensaio. Fecha-se a chave de controle de ar e aguarda até que um dos dispositivos luminosos do painel apague, iniciando assim, a contagem do tempo necessário à determinação da permeabilidade ao ar que é registrado no painel do equipamento. Quando o outro dispositivo luminoso apagar, o registro de tempo para automaticamente e este tempo é o utilizado para determinação da permeabilidade ao ar através do cálculo do *air exclusion rating* (AER). (JAMES INSTRUMENTS INC., 2012)

Para a realização do ensaio de permeabilidade à água é necessário que o furo já tenha sido submetido ao ensaio de permeabilidade ao ar. Após o ensaio ao ar, deve-se despressurizar o sistema, o filtro de ar e o tubo de ar que liga o filtro ao equipamento. Em seguida deve-se acoplar o tubo para ensaio à água na agulha e no equipamento acopla-se uma seringa com água (Figura 34). Do mesmo modo que o ensaio anterior, zera-se o contador de tempo com a tecla *reset*. Com a seringa é inserido água no sistema até que os elementos luminosos sejam acesos (dois). A partir deste momento é aguardado que uma das lâmpadas seja apagada e o contador seja disparado, iniciando assim o processo de contagem de tempo para determinar a permeabilidade à água através do cálculo da *water absorption rate* (WAR). (JAMES INSTRUMENTS INC., 2012)

Figura 34 - Esquema de preparação para os ensaios de permeabilidade ao ar e à água



Fonte: JAMES INSTRUMENTS INC., 2012

Segundo descrito no manual do equipamento (JAMES INSTRUMENTS INC., 2012), o valor de exclusão do ar (AER) é fornecido pela fórmula 2 e depende do volume do aparato que é de 77,1ml e do tempo (t) medido em segundos. Para a determinação da absorção da água (WAR) é utilizada a fórmula 3 que depende diretamente do tempo (s). Estas unidades são medidas em segundos por mililitro (s/ml).

$$AER = \frac{t}{\left(\frac{55V}{50} - V\right) * \frac{52,5}{100}} \quad (2)$$

$$WAR = 100 . t \quad (3)$$

De posse destes índices determina-se a classificação do concreto quanto a permeabilidade à água e ao ar com o Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação do concreto quanto a permeabilidade

Categoria do concreto	Qualidade de proteção	Permeabilidade (s/ml)	
		Ar	Água
		AER	WAR.10 <sup>-3</sup>
0	Pobre	< 8	< 3
1	Não muito boa	8 a 25	3 a 10
2	Regular	25 a 75	10 a 30
3	Boa	75 a 250	30 a 100
4	Excelente	> 250	> 100

Fonte: Adaptado pelo autor de JAMES INSTRUMENTS INC., 2012.

Cather *et al.* (1984) *apud* Soto (2014), propõe uma outra classificação para o concreto analisado quanto a sua permeabilidade ao ar que correlaciona o tempo apurado no ensaio à um tipo de material diferente, como argamassas à concretos com polímeros. Esta classificação é apresentada no Quadro 7.

Quadro 7 – Classificação do concreto pela permeabilidade ao ar

Categoria de qualidade	Tempo (s)	Interpretação	Tipo de material
0	< 30	Pobre	Argamassa porosa
1	30 - 100	Moderado	Concreto com resistência à compressão de 20MPa
2	100 - 300	Satisfatório	Concreto com resistência à compressão de 50MPa
3	300 – 1000	Bom	Concreto adensado e bem curado
4	> 1000	Excelente	Concreto com polímeros

Fonte: Adaptado pelo autor de Cather *et al.* (1984) *apud* Soto (2014)

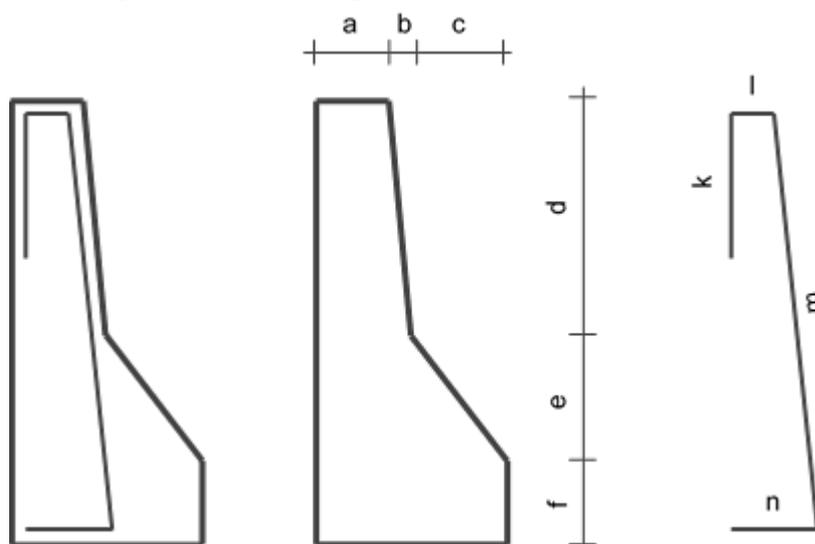
#### 4.2. Moldagem dos elementos de segurança viária e de drenagem superficial

Nesta segunda fase, é verificado o desempenho do concreto do aplicado nos elementos estudados, foram manufaturadas peças com a finalidade de reproduzir elementos de segurança viária, barreira rígida, na escala reduzida de 75%. Na elaboração das peças destinadas a fabricação de elementos de drenagem superficial foi utilizada a escala real. Para facilidade da realização dos ensaios destrutivos, no caso específico das peças destinadas a valetas e canaletas, foi

utilizado parte da estrutura mantendo as dimensões reais, como a espessura e largura.

Na moldagem dos elementos de drenagem foi utilizado como referência o projeto PP-DE-L03/014-A destinado a fabricação de barreira rígida simples baixa DER-SP (s.d.)c, conforme verificado na Figura 35. No processo de redução produzido nas novas dimensões reduzidas a 50% das medidas reais as quais resultam na redução final de 75%, conforme Tabela 9. O concreto gerado com agregados naturais é denominado CR0 e o concreto com fresado asfáltico em substituição dos agregados naturais é denominado CF0-15.

Figura 35 - Barreira rígida simples baixa tipo 1, DER-SP



Fonte: Adaptado de DER-SP, s.d. c

Nota:

Sem escala.

As dimensões são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões da barreira rígida simples baixa tipo 1

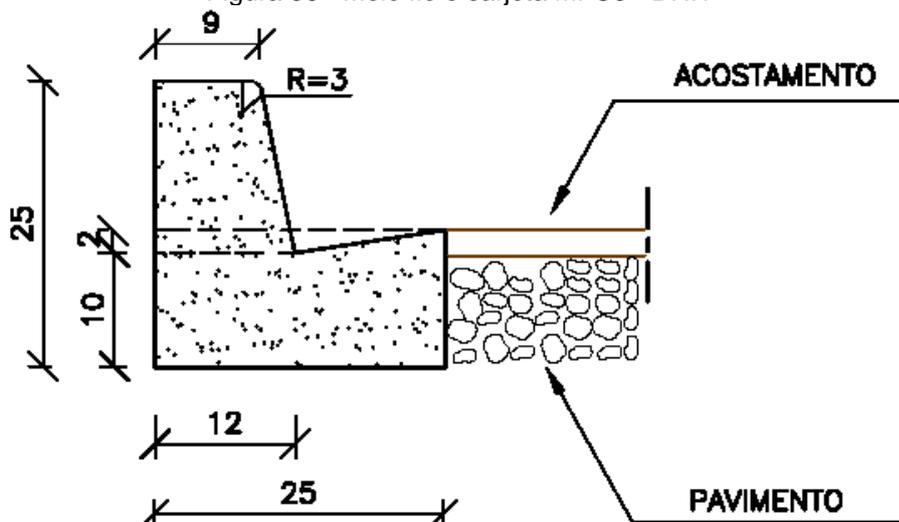
Item	Dimensões da forma da barreira em escala	
	Real (mm)	Reduzida 75% (mm)
Forma		
a	150	75
b	50	25
c	180	90
d	480	240
e	255	127,5
f	175	87,5
Armadura		
k	300	150
l	90	45
m	850	425
n	180	90

Fonte: Adaptado pelo autor de DER-SP s.d. c

Para a elaboração das peças destinadas a representar os elementos de drenagem estudados nesta pesquisa, foi utilizado o álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2006d).

Para a execução das meios fio e sarjetas foi utilizado o modelo MFC03, apresentado na Figura 36. Para a guia foi feito uso do modelo MFC05, descrita na Figura 37. O concreto destinado a fabricação destes elementos de drenagem contendo somente agregados naturais é denominado CCR0 e quando contém fresado asfáltico em sua composição, CCF0-15.

Figura 36 - Meio fio e sarjeta MFC3 - DNIT



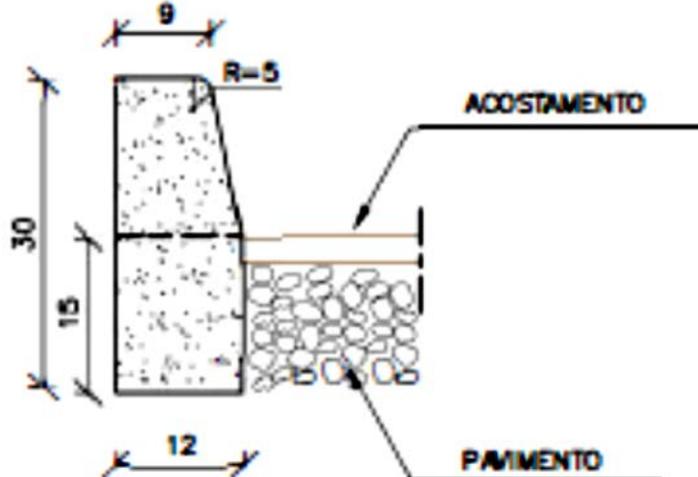
Fonte: DNIT, 2006d

Nota:

Medidas em centímetros.

Sem escala.

Figura 37 - Meio fio MFC05 – DNIT



Fonte: DNIT, 2006d.

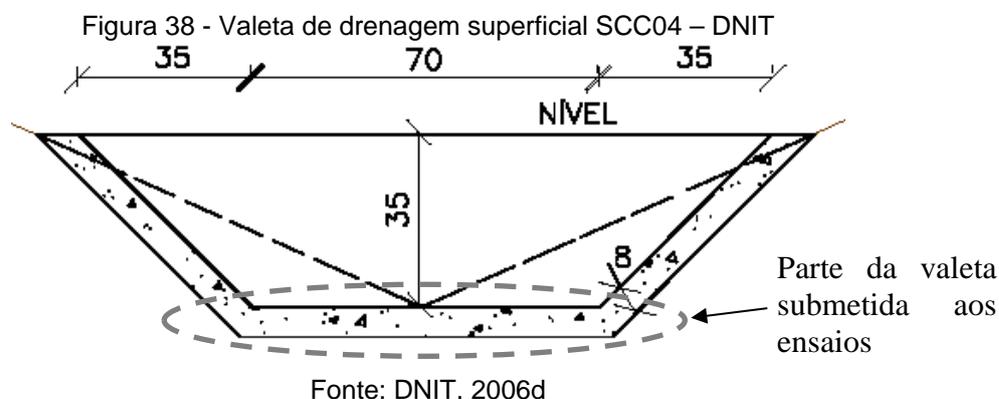
Nota:

Medidas em centímetros.

Sem escala.

No caso específico da valeta e canaleta foi utilizado apenas parte dela, como a laje de fundo, por motivo de risco elevado de ruptura do elemento durante o manuseio para os preparativos dos ensaios destrutivos. Então, foi utilizado a laje de fundo da valeta SCC04, conforme o álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT (2006d), apresentado em destaque na Figura 38. Neste caso o

concreto processado com agregados naturais é denominado de CCR00 e o contendo fresado asfáltico, CCF00-15.



Nota:  
Medidas em centímetros.  
Sem escala.

Foram moldadas duas unidades de cada elemento estudado, tanto com concreto convencional (referência) quanto com concreto com fresado asfáltico na sua composição. A concretagem das peças estudadas foi dividida em três etapas devido ao volume de concreto necessário ao estudo. Deste modo foi realizado a concretagem das barreiras rígidas, em seguida, as meios fio e sarjetas e por fim, a laje de fundo das valetas de drenagem. Em todos os casos foram realizadas concretagem utilizando concretos convencionais e com a incorporação de fresado asfáltico com traços já estudados e definidos neste trabalho.

#### 4.2.1. Ensaios realizados nos elementos moldados em escala.

Em cada elemento confeccionado, tanto de segurança viária quanto par drenagem superficial, foi realizado o ensaio de impacto para determinar a energia necessária para a ruptura da peça analisada na idade de 28 dias. Esse ensaio, adaptado de Martins (2006), aplicar sucessivos golpes desferidos em um mesmo ponto por um peso em queda livre.

O primeiro passo consiste em posicionar o elemento estudado sob o equipamento de ensaio de impacto, além de garantir que a peça esteja sobre superfície resistente e recoberta com areia para garantir o perfeito assentamento. Elevase o peso metálico até a altura desejada e faz com que ele caia em queda

livre até atingir o elemento em concreto. Deve-se desferir golpes sucessivos a partir de 20cm de altura elevando em 10cm a cada tentativa. Após cada golpe desferido, deve-se procurar na peça analisada a ocorrência de qualquer tipo de fissura na sua superfície, caso ocorra, o ensaio está terminado.

Outro ensaio realizado é o de resistência à tração na flexão nos corpos de prova, somente realizados nos elementos de drenagem superficial. No caso da barreira rígida, por ser armada, não foi realizado por não contar com elementos especiais destinados a verificação do surgimento das primeiras fissuras no concreto.

Este ensaio consiste em posicionar uma peça moldada, no comprimento de um metro, apoiada nas suas extremidades e aplicar uma carga distribuída em sua extensão até seu rompimento, determinando assim a força de ruptura.

Salienta-se que para cada concretagem das peças analisadas foi confeccionado um conjunto de corpos de prova cilíndricos e prismáticos para a comparação dos resultados obtidos das duas composições de concreto (convencional e com fresado asfáltico). Os ensaios realizados foram os relativos a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, à tração na flexão em corpo de prova prismático, módulo de elasticidade, absorção de água, absorção por capilaridade, impacto e permeabilidade ao ar e à água, conforme Quadro 5.

#### 4.3. Critério utilizado para determinação dos resultados médios

Para a análise dos resultados obtidos dos corpos de prova do concreto estudado, foi adotado o uso do menor valor do coeficiente de variação ( $cv$ ) dos exemplares das amostras ensaiadas. O coeficiente de variação é calculado a partir da razão entre o desvio padrão ( $S_n$ ) e a média ( $f'$ ) dos resultados analisados ( $f'_i$ ).

$$f' = \frac{\sum_{i=1}^n f'_i}{n} \quad (4)$$

$$S_n = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f'_i - f')^2}}{n-1} \quad (5)$$

$$cv = \frac{Sn}{f'} \quad (6)$$

Para realizar esta análise foi realizado a seguinte sequência de cálculo:

- a) As moldagens dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram realizadas com as seguintes quantidades:
  - i. 4 unidades na fase 1, referente ao processo de definição do traço;
  - ii. 6 unidades na fase 2, referente ao processo de fabricação dos elementos de drenagem e de segurança viária;
- b) Os resultados foram classificados em ordem crescente de valores obtidos nos ensaios;
- c) De posse dos valores ordenados, desconsiderou-se o menor valor dos resultados e calculou-se o coeficiente de variação 1 ( $cv_1$ );
- d) Novamente com todos os resultados ordenados, conforme item "b", desconsiderou-se o maior valor dos resultados e calculou-se o coeficiente de variação 2 ( $cv_2$ );
- e) Foram comparados os resultados calculados dos coeficientes de variação e passou a utilizar os valores que geram o menor coeficiente de variação entre  $cv_1$  e  $cv_2$ , ou seja, foi descartado o maior ou menor valor obtidos nos ensaios realizados;
- f) Após o descarte foi calculado o valor médio dos ensaios ( $f'$ ) e utilizado nas análises desta pesquisa.

Esse processo impõe ao estudo sempre uma exclusão de um corpo de prova para análise realizada e esse procedimento leva a melhor uniformidade dos resultados. A escolha do resultado a ser excluído fica em função do menor coeficiente de variação calculado.

## 5. RESULTADOS PRELIMINARES

Apresenta-se neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios preliminares para obtenção dos traços de concreto para confecção dos elementos de obras rodoviárias: barreira rígida e canaleta. Esses estudos serviram de base para a confecção dos traços definitivos que foram utilizados nos ensaios principais.

### 5.1. Materiais

São apresentados os resultados obtidos dos materiais que compõe os concretos, tanto o de referência, quanto o que contém fresado asfáltico na substituição dos agregados naturais.

#### 5.1.1. Aço

Para a produção das peças em escala reduzida da barreira rígida (elemento de segurança viária) foi utilizado aço CA 60 que apresentou as características apontadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características do aço

Ensaio	Unidade	Resultados
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	7,723
Alongamento	%	3,8
Massa linear	Kg/m	0,107
Desbitolamento	%	-1,8
Tensão de escoamento	MPa	694,9
Tensão de ruptura	MPa	762,1

Fonte: Autoria própria.

#### 5.1.2. Cimento

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, Cauê CPV-ARI utilizado apresenta os resultados apontados na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaio do Cimento

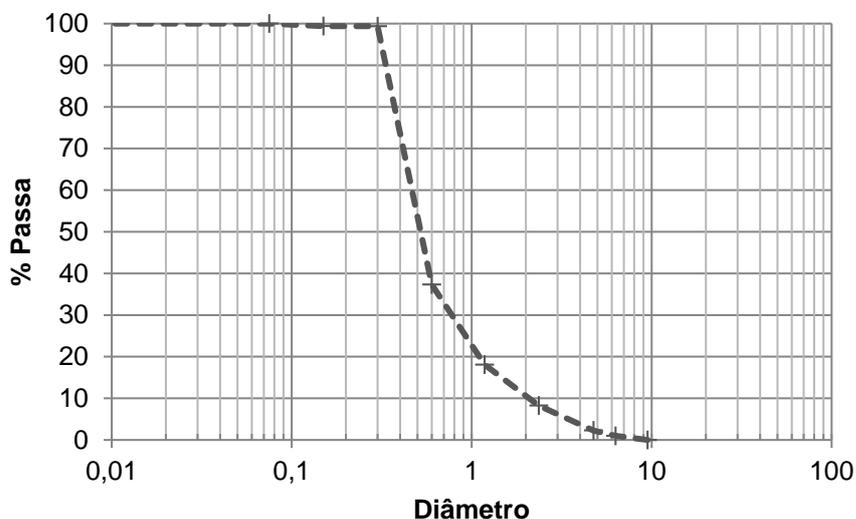
Ensaio	Unidade	Resultados
Resistência à Compressão	MPa	1 dia – 21,4
		3 dias – 35,8
		7 dias – 42,7
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,105
Finura - Resíduo na peneira 75µm	%	0,3

Fonte: Autoria própria.

### 5.1.3. Areia

A areia utilizada nos estudos apresentou massa específica de 2,761g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,267g/cm<sup>3</sup> e a granulometria encontrada após três processos de ensaios é apresentada no Gráfico 5 é verificado que o módulo de finura é de 2,48. Observa-se então que este material está enquadrado dentro da zona utilizável, conforme descreve a NBR 7211, ABNT (2009b).

Gráfico 5 – Distribuição granulométrica da areia

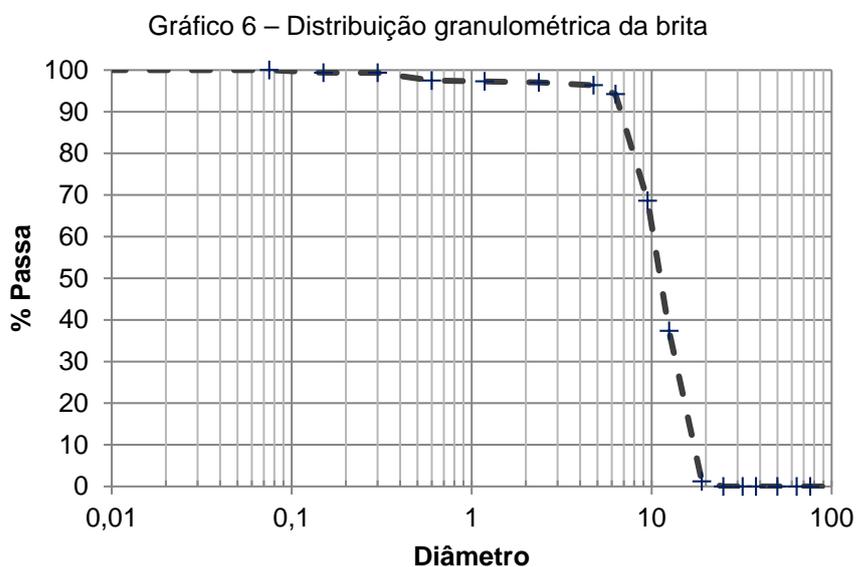


Fonte: Autoria própria

### 5.1.4. Brita

A brita utilizada é originária da rocha diábase e foi submetida aos ensaios mencionados no Quadro 2 e foi obtido a massa específica de 2,46g/cm<sup>3</sup>, a massa unitária de 1,571g/cm<sup>3</sup>, absorção de água de 0,75% e abrasão *Los Angeles* de 17%.

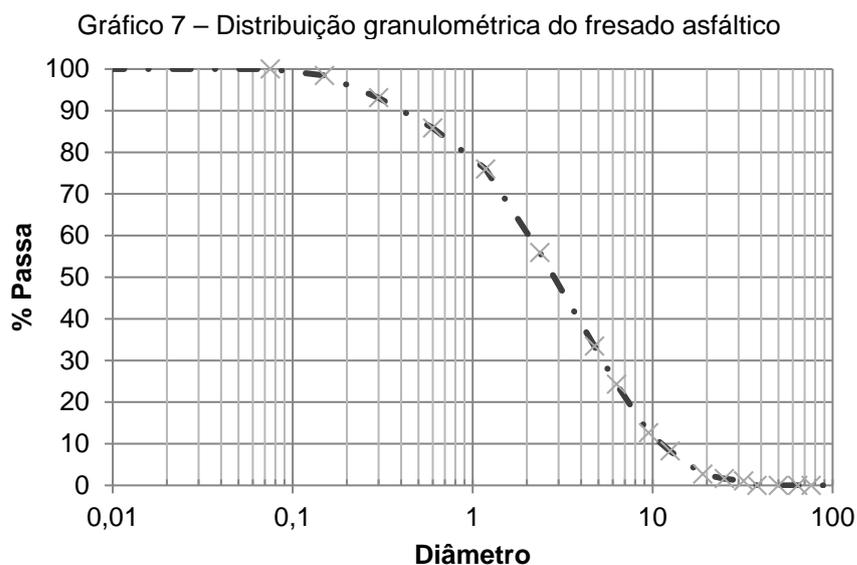
A granulometria é apresentada no Gráfico 6, além do mais é determinado o diâmetro máximo de 19mm.



Fonte: Autoria própria

#### 5.1.5. Fresado Asfáltico

O fresado asfáltico utilizado nos experimentos, apresenta massa específica de  $2,455\text{g/cm}^3$ , a massa unitária de  $1,558\text{g/cm}^3$ , absorção de água de 0,48% e abrasão *Los Angeles* de 42%. A distribuição granulométrica verificada neste resíduo da construção foi realizada em 3 amostras e realizado o processo por duas vezes. O resultado é apresentado no Gráfico 7 e este agregado tem diâmetro máximo é de 19mm.



Fonte: Autoria própria.

Foi obtido o teor médio de asfalto do fresado (Figura 39), que ficou em 4,95% e foi determinado conforme a NBR 16208 (ABNT, 2013b). Este ensaio para verificação do teor de asfalto foi realizado no laboratório de solos e asfalto da Divisão Regional 11 (DER - DR11) do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, instalada na cidade de Araçatuba-SP.

Figura 39 – Ensaio de determinação de teor de betume no fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

## 5.2. Estudo de traços de concreto

Foram desenvolvidas misturas para definição do concreto de referência e com fresado asfáltico destinados à fabricação de elementos de segurança viária (Tabela 12) e de elementos de drenagem superficial (Tabela 13).

## a) Elemento de segurança viária (Barreira Rígida)

Tabela 12 – Composição dos traços destinados a confecção de barreira rígida (kg/m<sup>3</sup>)

Traço	m	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo	a/c
Referência								
CR1	5,0	373,0	745,5	1.118,5	0,0	179,0	1,9	0,48
CR2	3,5	497,1	621,4	1.118,5	0,0	213,5	2,5	0,43
CR3	6,5	298,3	820,2	1.118,5	0,0	171,4	1,5	0,57
CR4	7,0	280,0	838,6	1.118,6	0,0	160,9	2,1	0,57
Com Fresado								
CF1-22	6,5	298,3	574,2	872,4	492,1	171,4	2,2	0,57
CF2-22	6,5	298,3	554,2	872,4	512,1	171,4	2,2	0,57
CF3-15	6,5	298,3	652,5	950,7	335,6	171,4	1,5	0,57
CF4-15	6,5	298,3	652,5	950,7	335,6	171,4	1,5	0,57
CF5-15	7,0	280,0	670,7	950,7	335,6	160,9	2,1	0,57
CF6-22	7,0	280,0	592,4	872,4	492,1	160,9	2,8	0,57

Fonte: Autoria própria.

## b) Elementos de drenagem superficial

Tabela 13 – Composições dos traços para elementos de drenagem (kg/m<sup>3</sup>)

Traço	m	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo	A/C
Referência								
CC1	7,5	286,0	1.456,0	700,0	0,0	255,4	-	0,89
CC2	9,0	244,0	1.498,0	700,0	0,0	225,1	-	0,92
CC3	6,0	308,0	1.148,0	700,0	0,0	264,9	1,5	0,86
CC6	6,0	308,0	1.148,0	700,0	0,0	255,4	1,54	0,83
CC7	6,2	298,0	1.151,2	706,8	0,0	149,0	2,98	0,50
CC8	6,8	275,0	1.174,2	706,8	0,0	137,5	2,75	0,50
Com Fresado								
CCF1-15	7,5	286,0	1.416,1	398,0	341,9	255,4	-	0,89
CCF2-15	7,5	286,0	1.384,3	356,5	415,1	164,3	1,4	0,57
CCF3-15	6,0	308,0	1.108,1	398,0	341,9	264,9	1,5	0,86
CCF6-15	6,0	308,0	1.108,1	398,0	341,9	255,4	1,54	0,83
CCF7-15	6,2	298,0	1.038,0	496,6	323,4	149,0	2,98	0,50
CCF8-15	6,8	275,0	1.061,0	496,6	323,4	137,5	2,75	0,50

Fonte: Autoria própria.

Para cada um dos traços desenvolvidos foram confeccionados 4 corpos de prova cilíndricos para a realização dos ensaios destrutivos pré-definidos. Após a cura, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial nos corpos de prova aos 7, 14, 28 e 91 dias de idade do concreto, e aos 28 dias de idade para os demais ensaios. Também foram moldados 4 corpos de prova com configuração prismática para a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Estes resultados são apresentados na Tabela 14 para a barreira rígida com os valores médios obtidos.

a) Elementos de segurança viária (barreira rígida)

Tabela 14 – Resultados de laboratório (barreira rígida)

Traço	$f_{cm}$				Abatimento		$f_{ctm,sp}$	$E_{ci28}$	$f_{cm28}^*$	$f_{ctm,f}$
	$f_{cm7}$	$f_{cm14}$	$f_{cm28}$	$f_{cm91}$	s/Adit..	c/Adit.				
	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm				
CR1	34,5	38,2	48,1	54,8	15	90	3,8	59,8	47,2	5,5
CR2	43,7	45,5	54,6	57,2	0	90	4,5	60,1	49,6	6,0
CR3	32,0	34,0	44,4	44,7	35	80	3,8	46,0	41,0	5,1
CR4	35,4	43,7	44,1	45,8	20	85	3,1	36,9	41,4	6,0
CF1-22	22,7	22,4	22,6	24,7	10	90	3,2	25,4	24,5	3,8
CF2-22	21,1	23,9	25,6	26,8	30	85	3,3	26,3	26,7	3,6
CF3-15	36,8	40,9	42,9	47,1	20	85	4,5	38,8	43,5	7,4
CF4-15	15,6	30,7	30,2	33,0	10	85	3,2	26,9	34,2	5,3
CF5-15	29,8	32,9	36,6	37,7	10	90	3,5	30,0	35,8	5,9
CF6-22	19,1	21,0	21,2	22,6	10	85	2,9	24,1	21,3	4,3

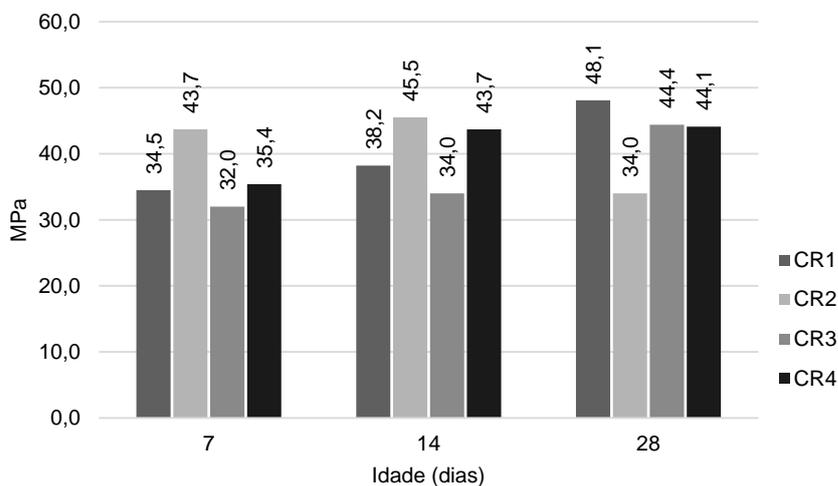
Fonte: Autoria própria.

\* resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos após ensaio de módulo estático de elasticidade

As especificações técnicas do DER-SP e do DNIT, referente à barreira rígida, exigem resistência superior a 25MPa e conseqüentemente superiores a 31,6MPa no processo de dosagem na idade de 28 dias. Conforme pode ser visto no Gráfico 8, todos os traços de referência foram superiores à resistência mínima definido para a dosagem. Portanto, será adotado o traço CR4, pois tem o menor consumo de cimento. Essa tomada de decisão se deve ao fato do cimento ser do produto de maior custo, maior consumo de energia para sua fabricação e maior

emissão de gases poluentes dentre os produtos empregados na mistura do concreto.

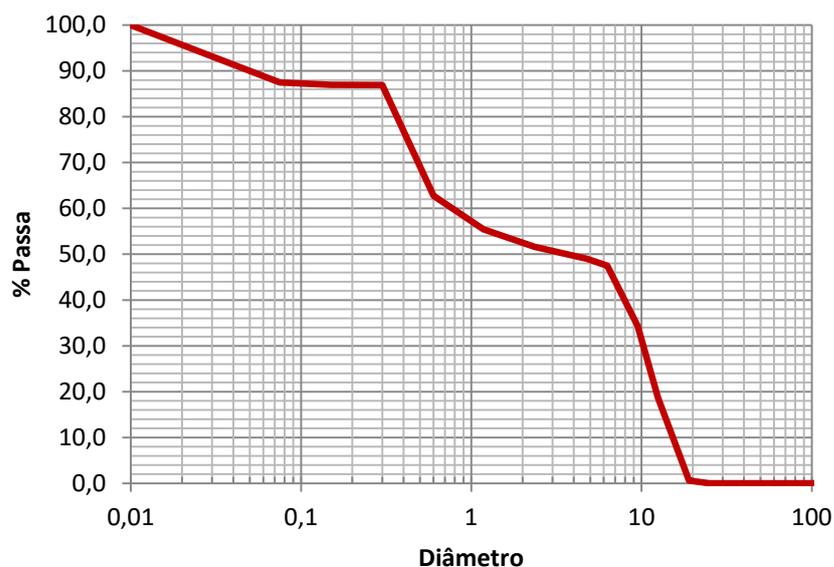
Gráfico 8 – Resultados das resistências médias à compressão de corpos de prova cilíndricos – barreira rígida



Fonte: Autoria própria.

A composição granulométrica do concreto de referência CR4 é apresentada no Gráfico 9, pois esta característica é muito importante no processo de definição do concreto, que tem em sua constituição, o fresado asfáltico.

Gráfico 9 - Distribuição granulométrica do concreto referência CR4



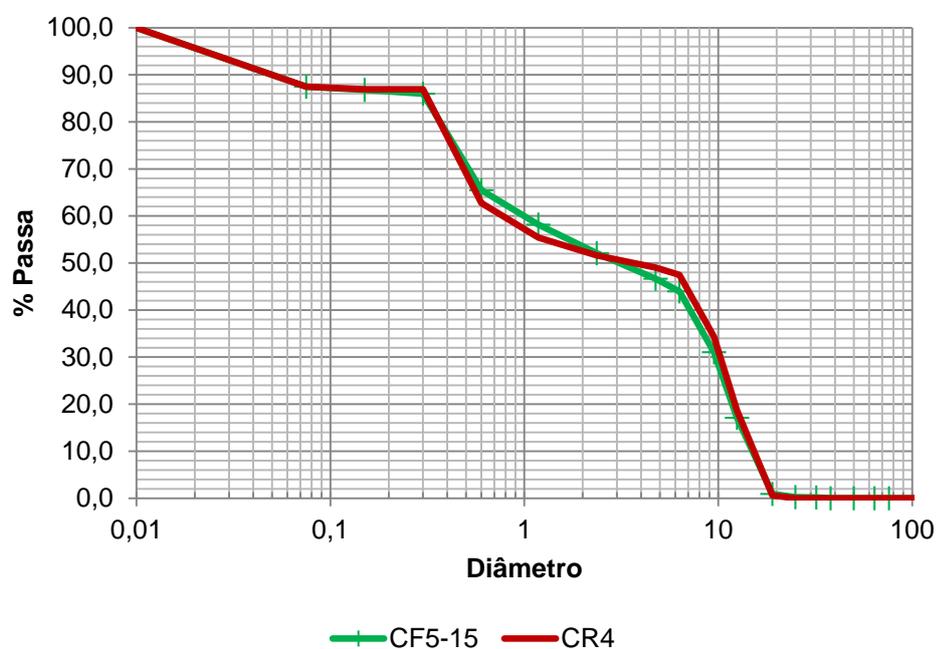
Fonte: Autoria própria.

Para a definição da porcentagem de substituição dos agregados naturais pelo fresado asfáltico foi adotado o processo descrito no processo de dosagem do item 4.4. Foram analisadas diversas substituições e procurada a que tivesse menor desvio da curva granulométrica do concreto de referência. Analisou-se além do desvio apresentado entre as curvas, a quantidade de fresado asfáltico incorporado e conseqüentemente, a redução de CO<sub>2</sub> que a nova mistura proporcionaria.

No âmbito geral das substituições possíveis, foram descartadas as que apresentavam valores inferiores a 10% e procurado as de maior taxa de troca entre os agregados. Foi detectado que as misturas que apresentavam substituição de 15% e 22% propiciavam menores diferenças nas granulometrias e que poderiam atender às exigências estabelecidas.

No Gráfico 10 é verificado que a distribuição granulométrica dos concretos de referência CR4 e com fresado asfáltico CF5-15 têm curvas muito próximas.

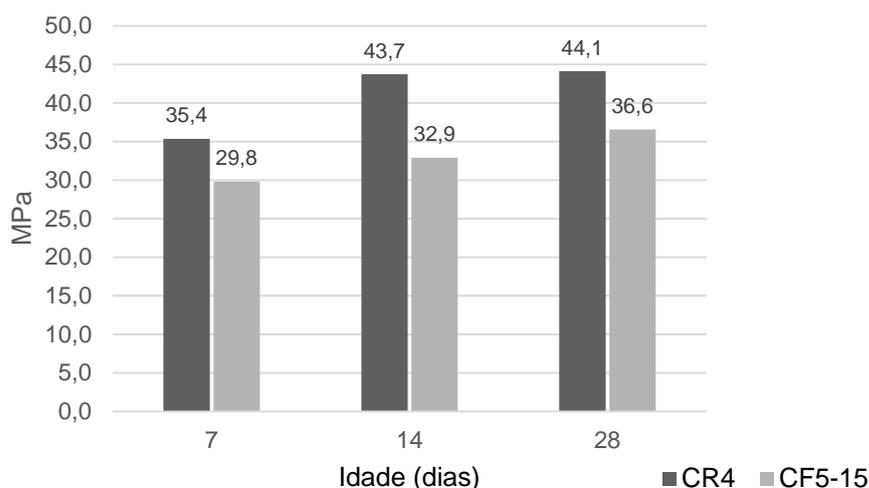
Gráfico 10 - Distribuição granulométrica dos concretos de referência e com fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Quando comparado os resultados obtidos com o concreto de referência CR4 e o com fresado asfáltico em sua composição, CF5-15, observa-se que os resultados apurados atendem aos requisitos de resistência à compressão mínima especificada pelo DER-SP e DNIT, conforme Gráfico 11, mesmo com redução de resistência de 17,1% aos 28 dias.

Gráfico 11 - Resultados comparativos da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos para o concreto destinado à barreira rígida (referência e com fresado asfáltico)

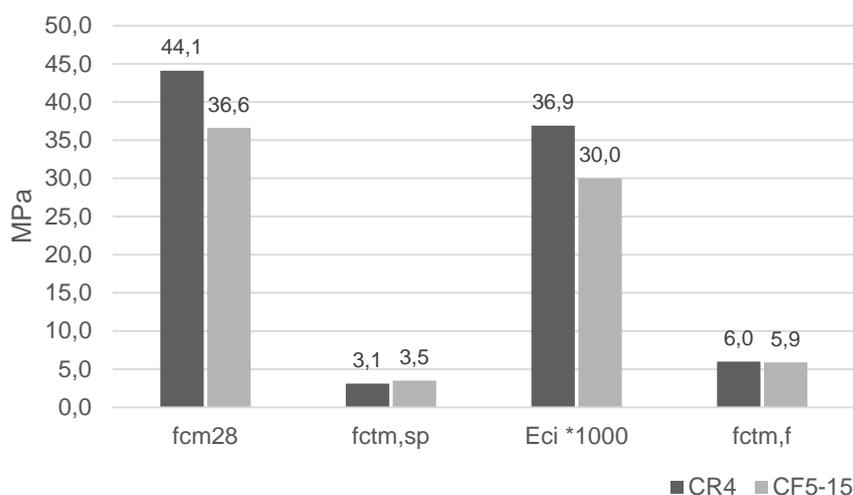


Fonte: Autoria própria.

No concreto de referência foi encontrada a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de 3,1MPa, o módulo de elasticidade à compressão de 36,9GPa e resistência à tração na flexão em corpo de prova prismático é de 6,0MPa. No concreto com substituição de 15% dos agregados naturais por fresado asfáltico foram determinados que a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de 3,5MPa, o módulo de elasticidade à compressão de 30,0GPa e resistência à tração na flexão em corpo de prova prismático é de 5,9MPa.

Pode-se observar que há variação dos resultados apurados no concreto referência CR4 e o concreto com resíduo, CF5-15, pois a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos elevou-se em 12,9%, o módulo de elasticidade reduziu em 18,7% e a resistência à tensão na flexão em corpos de prova prismáticos reduziu em 1,7%, conforme pode ser verificado no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Resultados comparativos das resistências do concreto (28dias) para barreira rígida (referência e com fresado asfáltico)



Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar que há redução significativa no consumo de matérias primas naturais que compõe o concreto, como a areia e a pedra britada, quando é incorporado o fresado asfáltico, conforme demonstrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Redução de agregados naturais por m<sup>3</sup> de concreto

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CR4	280,0	838,6	1.118,6	0,0	160,9	2,1
CF5-15	280,0	670,7	950,7	335,6	160,9	2,1
Diferença	0,0	-167,9	-167,9	+335,6	0,0	0,0
Diferença (%)	0,0	-20,0%	-15,0%	-	0,0	0,0

Fonte: Autoria própria.

- b) Elementos de drenagem superficial (meio-fio, sarjeta, canaleta e valeta)

As especificações técnicas do DER-SP e do DNIT definem para a confecção de elementos de drenagem como as canaletas, valetas, meios fio e sarjetas, resistências características à compressão diferenciadas. Conforme já explanado foi adotado o maior valor definido pelas entidades, 20MPa. Essa decisão implica em resistências médias à compressão, aos 28 dias de idade, com valores superiores a 26,6MPa, para o processo de dosagem. O estudo completo é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Características Mecânicas do concreto para elementos de drenagem

Traço	$f_{cm}$				Abatimento		$f_{ct,sp}$	$E_{ci28}$	$f_{c28^*}$	$f_{ct,f}$
	$f_{c7}$	$f_{c14}$	$f_{c28}$	$f_{c91}$	s/Adit.	c/Adit				
	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm				
CC1	15,1	17,9	18,2	19,0	10	-	2,4	22,8	18,9	3,3
CC2	10,8	12,0	12,3	12,4	10	-	1,8	20,8	13,3	3,0
CC3	35,2	37,6	39,6	42,6	0	10	4,1	35,3	46,7	2,6
CC6	31,8	32,3	37,2	38,6	0	15	3,9	37,3	40,9	6,7
CC7	29,0	36,5	42,5	42,9	0	15	3,8	34,0	39,5	7,2
CC8	26,9	25,7	33,5	34,4	0	10	4,0	27,9	32,0	4,4
CCF1-15	9,9	10,2	12,3	13,3	0	10	1,4	14,4	11,6	2,3
CCF2-15	6,0	8,7	10,1	10,6	0	10	1,5	15,4	9,6	2,0
CCF3-15	30,9	32,3	31,0	32,8	0	9	3,5	30,2	32,8	6,6
CCF6-15	29,1	31,8	35,3	36,3	0	15	3,6	25,5	33,6	6,4
CCF7-15	22,8	32,1	32,1	33,3	0	15	3,2	28,1	30,4	5,9
CCF8-15	21,6	21,7	27,2	28,9	0	10	3,9	27,3	27,0	4,7

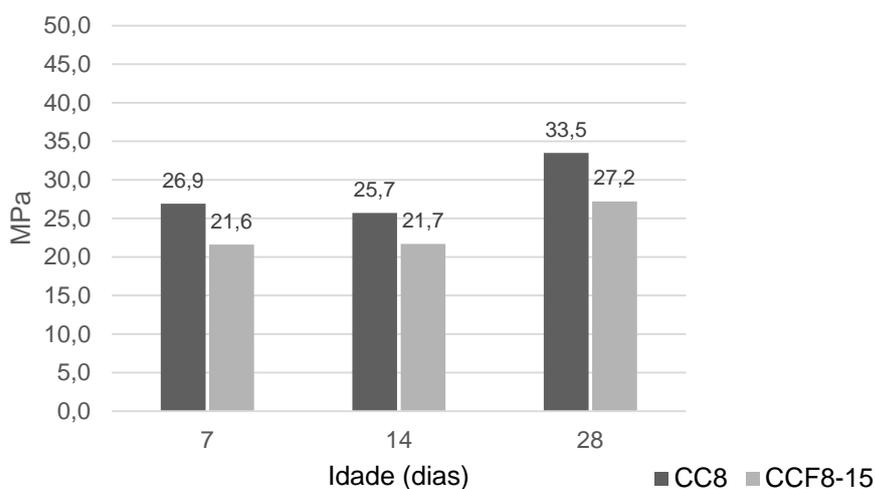
Fonte: Autoria própria.

\* resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos após ensaio de módulo estático de elasticidade

Para a elaboração das composições não foram analisadas substituições superiores a 15%. Isso se deve ao fato, de como observado no estudo das barreiras rígidas, que maiores substituições apresentaram redução significativa nos resultados dos ensaios de resistência que norteiam a elaboração da mistura do concreto.

As especificações técnicas do DER-SP e do DNIT, referente à confecção de elementos de drenagem solicitam que tenham resistência característica à compressão de 20MPa para o DER-SP e 15MPa para o DNIT, as composições CC8 e CCF8-15%, atendem satisfatoriamente as premissas destes órgãos, pois apresentam resistência à compressão média, na idade de 28 dias, nos valores de 33,5MPa e 27,2MPa, respectivamente conforme, Gráfico 13.

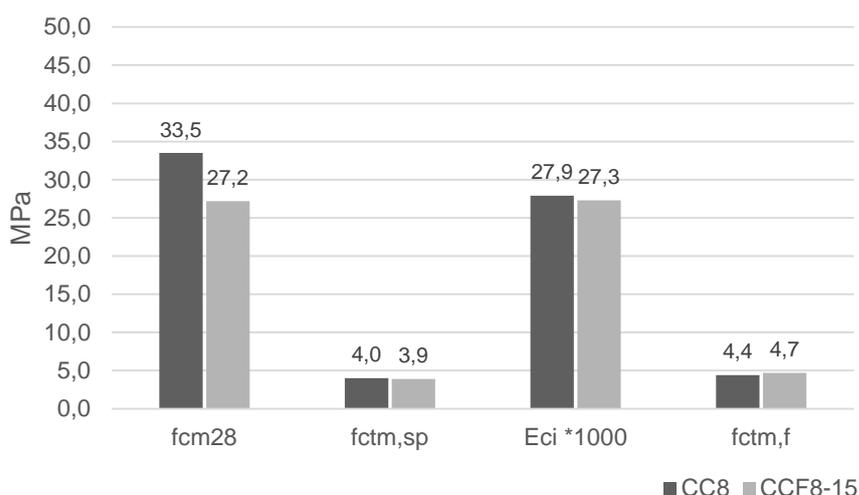
Gráfico 13 - Comparativo de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (elementos de drenagem)



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que há alteração nos resultados dos ensaios realizados envolvendo o traço com agregados naturais e o que apresenta fresado asfáltico na sua composição. Observa-se que a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos que passa de 4,0MPa para 3,9MPa, o módulo de elasticidade passa de 27,9GPa para 27,3GPa e a resistência à flexão em corpos de prova prismáticos passa de 4,4MPa para 4,7MPa, conforme Gráfico 14.

Gráfico 14 – Comparativo das resistências mecânicas do concreto para elementos de drenagem



Fonte: Autoria própria

Nota-se que a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos aos 28 dias apresenta redução de 18,8% entre o concreto com agregados naturais

em relação ao concreto com fresado asfáltico. A resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos apresenta redução de 2,5% entre os concretos, com relação ao módulo de elasticidade também apresenta redução de 2,2%. A resistência à flexão em corpos de prova prismáticos apresenta aumento na resistência de 6,8% no concreto com fresado asfáltico em comparação ao de referência.

A variação da resistência é esperada pela simples incorporação de um novo elemento na mistura, principalmente no caso do fresado asfáltico que apresenta menor resistência que o agregado natural (pedra britada) e, como oriundo de camadas betuminosas, maior deformabilidade. Essa capacidade de deformação é decorrente da composição dos grãos de fresado asfáltico que são constituídos pela mistura de agregado graúdo e miúdo naturais, *filler* e cimento asfáltico de petróleo, e não somente de agregado graúdo revestido com material betuminoso.

A substituição dos agregados por fresado asfáltico apresentam a redução do consumo de areia por metro cúbico de concreto produzido de 9,64% e de 29,74% da brita. Essa comparação é realizada entre as misturas do concreto com agregados naturais e com fresado asfáltico, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Comparativo de consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto para elementos de drenagem

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CC8	275	1174,2	706,8	0	137,5	2,75
CCF8-15	275	1061,01	496,59	323,4	137,5	2,75
Diferença	0,0	-113,19	-210,21	323,4	0,0	0,0
Diferença (%)	-	-9,64%	-29,74%	-	0,0	0,0

Fonte: Autoria própria.

Após a definição das dosagens dos concretos com agregados naturais (referência) e as que contém fresado asfáltico na substituição de agregados graúdos e miúdos (concreto com fresado), foram refeitas as dosagens e verificado se os resultados atendem ao especificado pelo DNIT e DER-SP. Após a confirmação das resistências definidas nas normas, foram moldados modelos em

escala reduzida dos elementos de segurança viária (barreira rígida), e em escala natural dos elementos de drenagem superficial (meio-fio, sarjeta e meio-fio e canaleta).

## 6. RESULTADOS

Para cada moldagem realizada na fase de fabricação dos elementos de segurança viária e de drenagem superficial, foram realizados os ensaios preconizados e apresentados neste capítulo.

### 6.1. Concreto fresco

Foram realizados em todas as moldagens o ensaio de abatimento com o tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), apresentado na Figura 40, tanto na definição dos traços quanto no processo de fabricação dos elementos estudados. Todos os procedimentos foram realizados pelo mesmo operador, o qual possui grande habilidade e prática neste ensaio. Esse cuidado se deve a tentativa de diminuir a possibilidade de ocorrer erro grosseiro no ensaio.

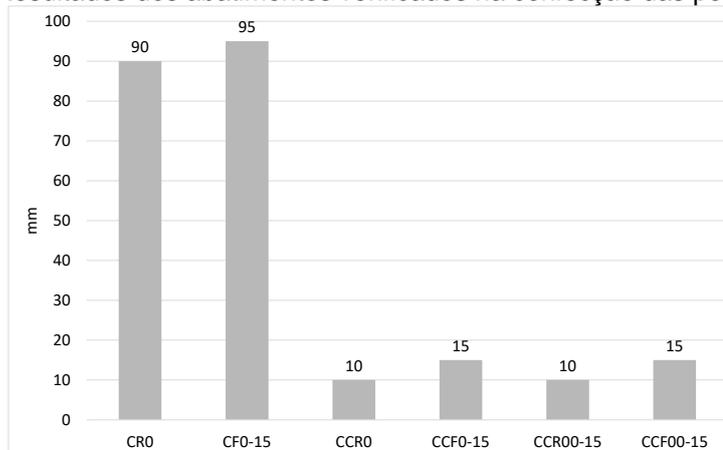
Figura 40 - Ensaio de abatimento com o tronco de cone



Fonte: Autoria própria.

Durante o processo de execução da moldagem dos corpos de prova e elementos da composição rodoviária estudados, foi verificado que quando incorporado o fresado asfáltico no concreto, há melhoria na trabalhabilidade. Isso é verificado pelo aumento no abatimento apresentado no Gráfico 15.

Gráfico 15- Resultados dos abatimentos verificados na confecção das peças ensaiadas



Fonte: Autoria própria.

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova dos elementos estudados neste trabalho de mestrado (barreira rígida, canaletas, meios fio e sarjetas), foi verificada a maior facilidade de aplicação, adensamento e acabamento do concreto.

## 6.2. Concreto endurecido

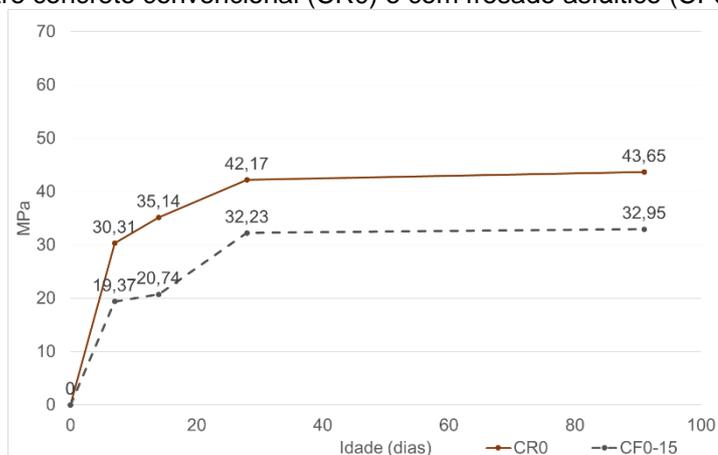
Os concretos após confeccionados foram desenformados e transferidos para a câmara úmida para o processo final de cura. As peças destinadas aos elementos de segurança viária e drenagem superficial foram transferidas com o auxílio de um carro plataforma para evitar qualquer problema que danificasse essas unidades recém-fabricadas e desenformadas.

### 6.2.1. Elementos de segurança viária – barreiras rígidas

Foram realizados ensaios no processo de fabricação das barreiras rígidas ensaios destinados a comparação de desempenho entre os concretos com agregados convencionais e com fresado asfáltico em substituição dos agregados naturais.

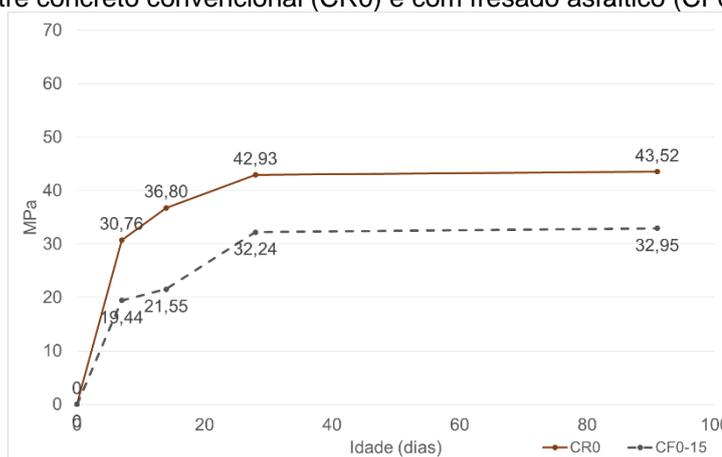
Os ensaios de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos são apresentados levando em consideração os resultados médios das amostras no Gráfico 16. No Gráfico 17 é demonstrado os resultados analisados levando em conta o cálculo da mediana.

Gráfico 16 - Comparação da média da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos entre concreto convencional (CR0) e com fresado asfáltico (CF0-15)



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 17- Comparação da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos entre concreto convencional (CR0) e com fresado asfáltico (CF0-15)



Fonte: Autoria própria.

Comparando-se os resultados obtidos através do cálculo da média (método de cálculo que reflete todos os resultados apurados), com a mediana (cálculo que apresenta menor sensibilidade a resultados extremos) não apresentam grande disparidade entre eles.

Observa-se que aos 28 dias o valor obtido com o cálculo da média para o concreto convencional é de 42,17MPa e com o uso do cálculo da mediana o valor é de 42,93MPa, diferença de 1,77% entre eles. Ao comparar os mesmos resultados com o concreto com fresado asfáltico, observa-se que o valor da média é de 32,23MPa e da mediana de 32,24MPa, diferença de 0,03%.

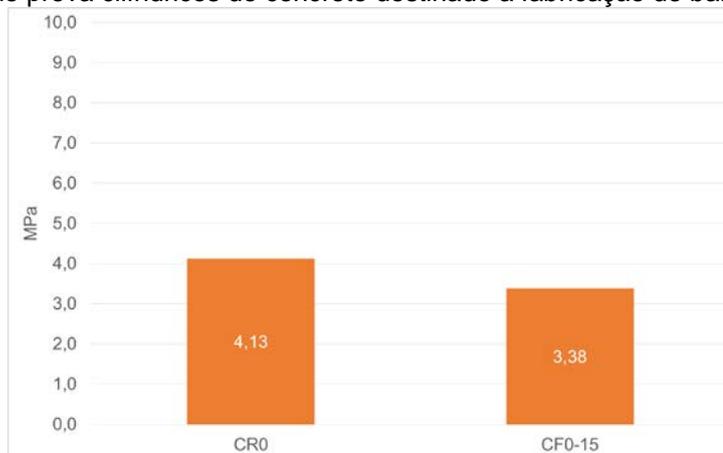
É verificado que o valor médio aos 28 dias é de 42,17MPa para o concreto com agregados naturais e de 32,23MPa para o concreto com uso de 15% de fresado asfáltico. Verifica-se redução de 21,2% da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos com a incorporação do fresado asfáltico. Se levar em conta os resultados calculados pela mediana, a resistência avaliada passa de 42,93MPa para o concreto convencional para 32,24MPa para o concreto com fresado asfáltico, redução de 24,9%.

Observou-se que as resistências à compressão de corpos de prova cilíndricos apresentadas nos concretos, convencional e com fresado asfáltico, apresentaram acréscimo nos valores quando ensaiados aos 91 dias quando comparado aos resultados obtidos aos 28 dias de idade. O concreto com agregados naturais apresentou crescimento nos valores médios de 3,8%, passando de 42,17MPa para 43,76MPa. No concreto com fresado asfáltico a resistência média evolui de 32,23MPa para 32,95MPa, crescimento de 2,2%.

O concreto apresenta menor crescimento da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos no concreto com fresado asfáltico na idade de 14 dias, gerando maior diferença percentual de redução quando comparado com o concreto com agregados naturais. Esta variação não prevista levou a uma série de verificações, como a validade da calibração do equipamento de ensaio, a variação dos agregados, problemas no processo de retificação dos corpos de prova cilíndricos. Foi levantada uma hipótese para a ocorrência deste fato, a alta temperatura no dia e horário do ensaio. A variação de temperatura afeta o desempenho do concreto, principalmente ao que contém fresado asfáltico.

Na realização dos ensaios de verificação da resistência à tração por compressão diametral foi verificada a redução dos valores médios obtidos quando da inclusão de fresado asfáltico no concreto. A resistência média verificada aos 28 dias para o concreto convencional é de 4,13MPa e para o concreto com fresado asfáltico é de 3,38MPa, conforme verificado no Gráfico 18. Observa-se redução de 18,1% na resistência avaliada quando da incorporação de fresado asfáltico no concreto.

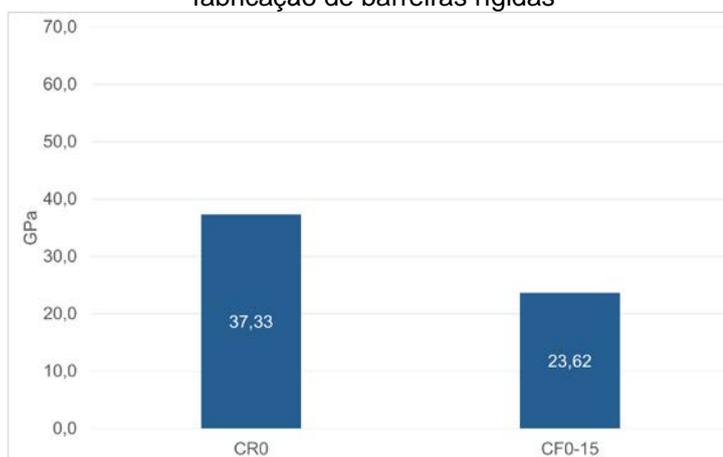
Gráfico 18 - Comparativo de resultados de resistência média à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos do concreto destinado a fabricação de barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Ao realizar ensaio de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade, foi observado a redução do valor quando há introdução de fresado asfáltico na sua composição. O valor médio obtido no concreto elaborado com agregados naturais é de 37,33GPa e quando ocorre a incorporação de fresado asfáltico o resultado passa para 23,62GPa, conforme verificado no Gráfico 19. Deste modo verifica-se a redução de 33,7%.

Gráfico 19 - Comparativo de resultados médios do módulo de elasticidade do concreto destinado a fabricação de barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos nas verificações de resistência à tração na flexão realizado aos 28 dias, apresentou resultado médio de 5,88MPa quando ensaiados os corpos de prova do concreto com agregados naturais. Ao ensaiar os corpos de prova com concreto com fresado asfáltico verifica-se o valor médio de 4,48MPa,

conforme exposto no Gráfico 20. Verifica-se a redução da resistência analisada de 23,8%.

Gráfico 20 - Comparativo de resistência à tração média na flexão de corpos de prova prismáticos em concreto convencional e com fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

O ensaio ao impacto foi realizado com o uso de equipamento que permite elevar um peso até a altura desejada e liberar sua queda até atingir o corpo de prova posicionado sob a máquina de ensaio. Para esse processo foi utilizado um peso de 10,35kg em aço, conforme Figura 41.

Figura 41 - Peça metálica cilíndrica utilizada no ensaio de impacto



Fonte: Autoria própria.

O ensaio finaliza quando ocorrer o surgimento de fissura na superfície do concreto. Estas fissuras foram ressaltadas no modelo submetido ao impacto conforme apresentado na Figura 42 para melhor visualização.

Figura 42 - Barreira rígida após ensaio de impacto



Fonte: A autoria própria.

Nas Figura 43 e Figura 44 são apresentados registros fotográficos do ensaio de impacto realizado nos elementos de segurança viária moldados em modelo reduzido.

Figura 43- Ensaio ao impacto da barreira rígida



Fonte: A autoria própria.

Figura 44 - Execução do ensaio de impacto

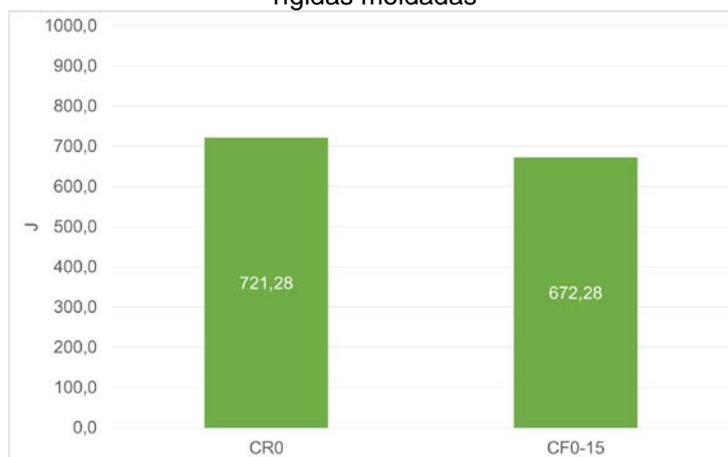


Fonte: A autoria própria.

Conforme o Gráfico 21 foi verificado que a energia média ao impacto observada na barreira moldada com o concreto de referência foi de 721,28J, momento em que surge a primeira fissura na peça ensaiada. Quando analisada a

barreira rígida do concreto com fresado asfáltico, nota-se que a energia ao impacto é reduzida para 672,28J. Observou-se, portanto, que houve uma redução na resistência ao impacto do concreto, de 6,8%, quando foi incorporado o fresado no concreto.

Gráfico 21 - Comparativo da média dos resultados do ensaio ao impacto adaptado nas barreiras rígidas moldadas



Fonte: Autoria própria.

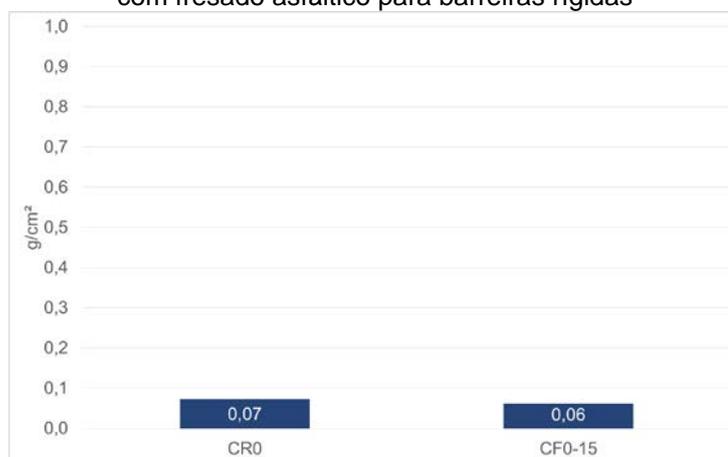
Ao realizar o ensaio de absorção de água por capilaridade (Figura 45), observa-se que após a finalização do ensaio com 72h, o concreto com fresado asfáltico absorveu menor teor de água que o concreto convencional. O concreto com agregados naturais apresenta índice de absorção de 0,07g/cm<sup>2</sup> enquanto o concreto com fresado asfáltico tem valor de 0,06g/cm<sup>2</sup>, conforme Gráfico 22. Redução de 14,2% com a inclusão de fresado asfáltico na composição do concreto.

Figura 45 - Ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos convencional e com fresado asfáltico destinados a barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

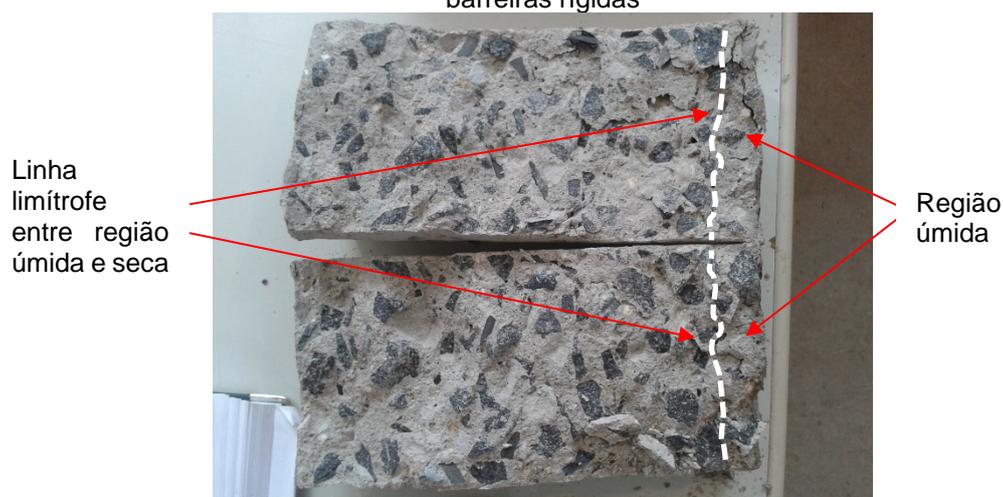
Gráfico 22 - Comparativo de absorção média de água por capilaridade do concreto convencional e com fresado asfáltico para barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a ascensão capilar da água no corpo de prova de concreto com agregados naturais (Figura 46) é de 1,79cm, enquanto no concreto com fresado asfáltico é de 1,44cm, conforme Gráfico 23. A diferença é de 16,6% de redução da ascensão da água. A penetração máxima é de 1,97cm no concreto convencional e de 1,64cm no concreto com fresado asfáltico. Esta redução de penetração verificada é de 15,2% do concreto convencional para o concreto com fresado asfáltico.

Figura 46 - Ascensão da água por capilaridade em corpo de prova de concreto convencional para barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Uma das propriedades do cimento asfáltico é ser um material hidrófugo. Como o concreto asfáltico leva cimento asfáltico na sua composição acaba por gerar uma mistura hidrófuga. No concreto com fresado asfáltico ocorre a dispersão

de seus grãos pelo corpo do concreto, fato este que proporciona ao novo produto uma menor permeabilidade à água.

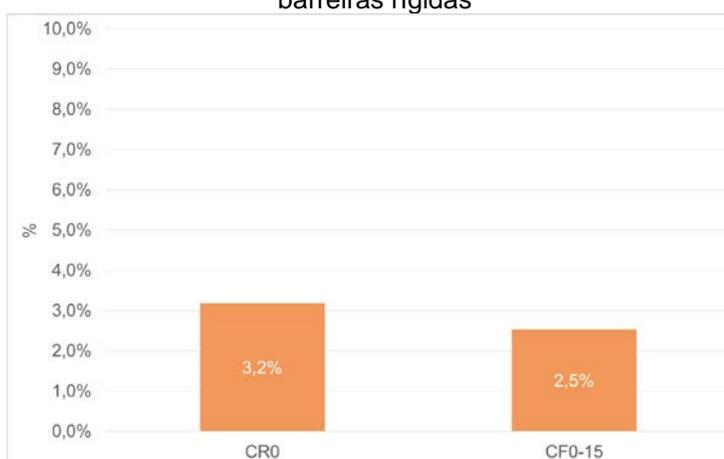
Gráfico 23 - Comparativo da ascensão capilar média no corpo de prova de concreto convencional com fresado asfáltico para barreira rígida



Fonte: Autoria própria.

Os resultados de absorção de água, obtidos pelo processo de imersão dos corpos de prova em água, apresentaram uma taxa média de 3,2% para o concreto referência e 2,5% para o concreto com fresado, conforme apresentado no Gráfico 24. Correlacionado os concretos é observada a redução de 21,8% após a inserção do resíduo na composição.

Gráfico 24 - Comparativo de resultados médios de absorção de água para concretos destinados a barreiras rígidas



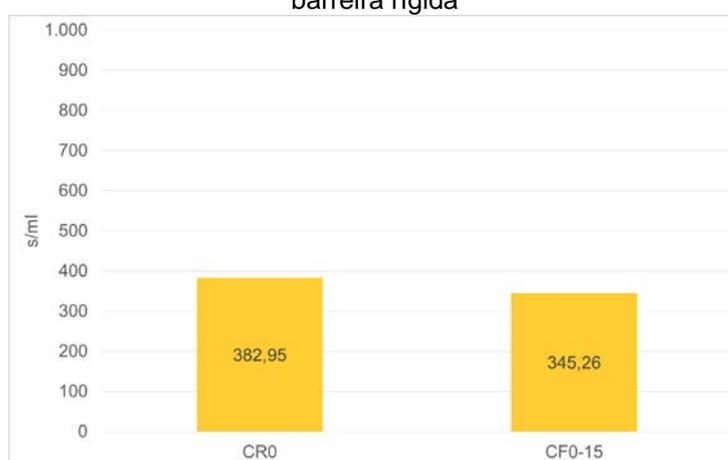
Fonte: Autoria própria.

Foram realizados ensaios para a determinação da permeabilidade com o uso do equipamento Poroscópio 6000, destinado a verificação da permeabilidade ao ar e à água. Nos ensaios destinados à permeabilidade ao ar é determinado o

valor médio do cálculo do *Air Exclusion Rating* (AER) de 382,95s/ml para o concreto convencional e 345,26s/ml para o concreto com fresado asfáltico, conforme demonstrado no Gráfico 25. Essa redução é de 9,8% na relação dos concretos com e sem resíduos.

Cabe ressaltar que segundo a avaliação da permeabilidade constante do manual do Poroscópio 6000 (Quadro 6), os concretos se enquadram na categoria 4 (AER>250s/ml), classificando-os como excelentes quanto à qualidade de proteção ao ar.

Gráfico 25 - Permeabilidade ao ar através do *Air Exclusion Rating* para concreto destinado a barreira rígida

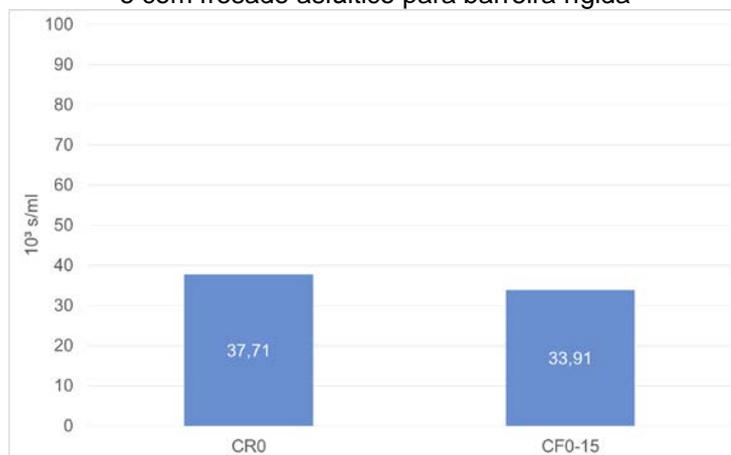


Fonte: Autoria própria.

Considerando os estudos de Cather *et al.* (1984) *apud* Soto (2014), descrito Quadro 7, os valores apurados de 392,95s/ml (com agregados naturais) e 345,26s/ml (com fresado asfáltico) indicam que os concretos são classificados como bons quanto à permeabilidade e considera que o material está bem adensado e bem curado.

Também foi realizado no mesmo aparelho, o ensaio de permeabilidade à água e o resultado foi obtido através do cálculo do Water Absorption Rate (WAR). Esse valor apurado foi de  $37,54 \cdot 10^3$  s/ml para o concreto convencional e de  $33,91 \cdot 10^3$  s/ml para o concreto com fresado asfáltico, conforme Gráfico 26. A redução observada foi de 9,1%. Os concretos podem ser classificados na categoria 3 (Quadro 6), tendo qualidade de proteção à água como boa ( $30 < \text{WAR} \cdot 10^3 < 100$ ).

Gráfico 26 - Comparativo do WAR para determinação da permeabilidade do concreto convencional e com fresado asfáltico para barreira rígida



Fonte: Autoria própria.

### 6.2.2. Elementos de drenagem superficial em escala real

De maneira similar ao que foi realizado na produção das barreiras rígidas, foram realizados ensaios no destinados à comparação de desempenho entre os concretos com agregados convencionais e com fresado asfáltico em substituição dos agregados naturais. Foram realizadas duas moldagens distintas, a primeira para a confecção de meios fio e sarjetas (Figura 47) e a segunda para as canaletas e valetas (Figura 48).

Figura 47 - Meio fio e sarjeta moldada em concreto convencional (esquerda) e com fresado asfáltico (direita)



Fonte: Autoria própria

Figura 48 – Lajes de fundo das valetas moldadas com concreto convencional (à direita) e com fresado asfáltico (à esquerda)

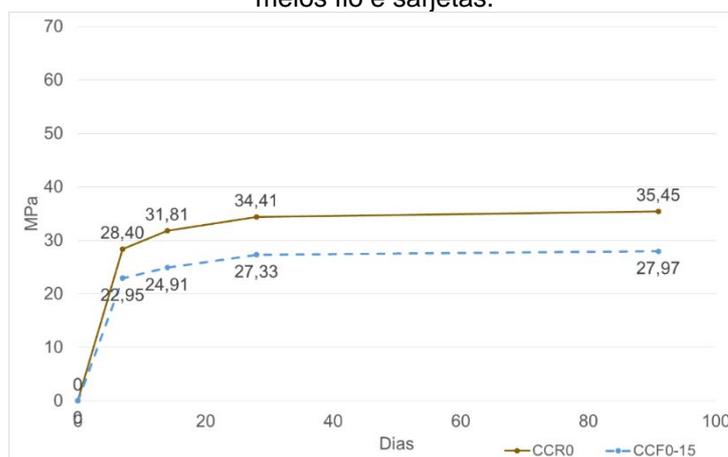


Fonte: Aatoria própria.

### 6.2.2.1. Meios fio e sarjetas

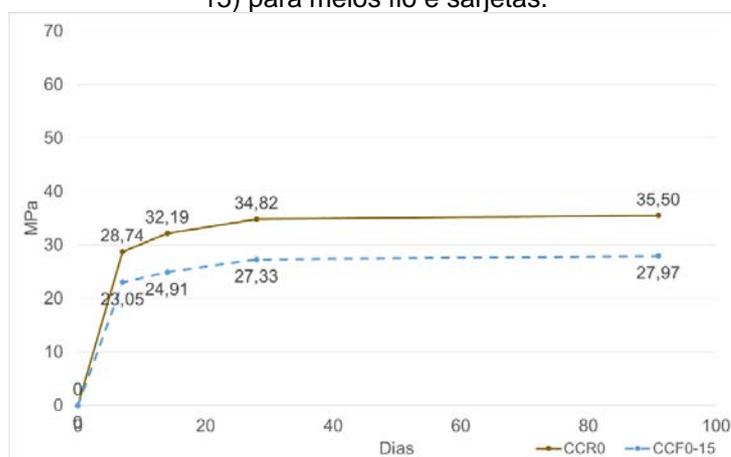
Para a realização dos elementos de drenagem superficial, especificamente, meios fio e sarjetas, foram moldados e ensaiados corpos de prova cilíndricos à compressão que obtiveram resultados médios apresentados no Gráfico 27 e no Gráfico 28 são apresentados os resultados obtidos com o cálculo da mediana.

Gráfico 27 - Comparativo da evolução da resistência média à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional (CCR0) com o concreto com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.



Fonte: Aatoria própria.

Gráfico 28 - Comparativo da evolução da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional (CCR0) com o concreto com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.



Fonte: Autoria própria.

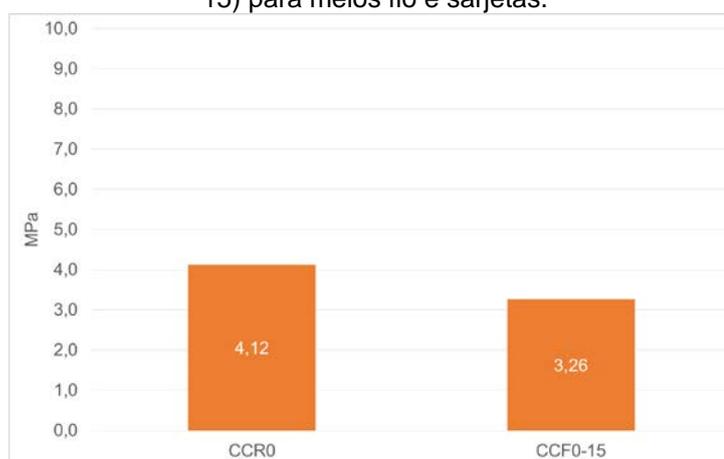
Novamente os resultados obtidos apresentaram média e mediana muito próximos, o que indica que há poucos resultados discrepantes. A resultado médio obtido com a idade de 28 dias, para o concreto de referência, é 34,41MPa e de 34,82MPa considerando a mediana. A diferença entre os métodos de cálculo é de 1,2%. Quando é analisado o concreto com fresado asfáltico verifica-se que a média da resistência à compressão na idade de 28 dias é de 27,33MPa, igual ao valor da mediana.

Pode-se notar que as curvas apresentam comportamento muito semelhantes. A resistência média aos 7 dias de idade é de 28,74MPa e é reduzida para 23,05MPa com a substituição de parte dos agregados por fresado asfáltico, gerando a redução de 19,8%. Ao comparar os resultados obtidos em média aos 14 dias, é 32,19MPa para o concreto convencional e 24,91MPa para o concreto com fresado asfáltico, apresentando redução de 22,6% com a inclusão do fresado asfáltico no concreto.

Observa-se redução da resistência média do concreto aos 28 dias que passa de 34,41MPa da composição elaborada com agregados naturais para 27,33MPa para o concreto com fresado asfáltico. Esta redução é da ordem de 20,5%. O crescimento da resistência do concreto até a idade de 91 também é verificada. No concreto de referência, há crescimento de 1,9% e no concreto com fresado asfáltico, o crescimento é de 1,5%, taxas muito semelhantes.

A resistência média à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos do concreto, destinado a fabricação de elementos de drenagem, no caso, meios fio e sarjetas, é observado a redução da resistência. Ela passa de 4,12MPa, no concreto de referência, para 3,26MPa, no concreto com fresado asfáltico, conforme verificado no Gráfico 29. Esta redução verificada é de 20,9%.

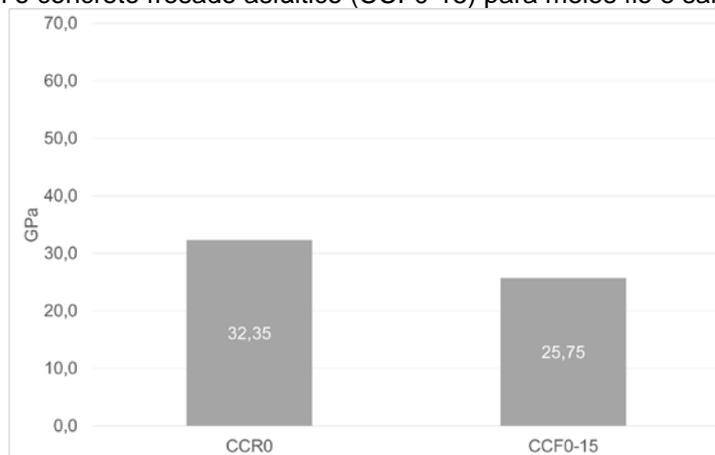
Gráfico 29 - Comparativo de resistência média à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos entre o concreto com agregado natural (CCR0) e com fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que o resultado do módulo elástico do concreto com idade de 28 dias, contendo somente agregados naturais, é de 32,35GPa e o obtido com a inclusão de fresado asfáltico na composição é de 25,75GPa, conforme Gráfico 30. Essa redução é de 20,4%.

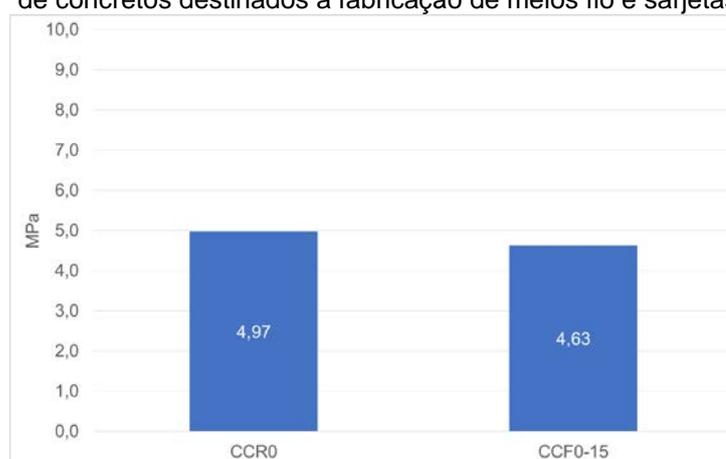
Gráfico 30 - Comparativo do módulo de elasticidade do concreto com agregado natural (CCR0) com o concreto fresado asfáltico (CCF0-15) para meios fio e sarjetas.



Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios realizados da ruptura a flexão em corpos de prova prismáticos, verifica-se que o concreto com agregados naturais apresenta resistência média de 4,97MPa e no concreto com fresado asfáltico o valor de 4,63MPa (Gráfico 31). Essa redução é da ordem de 6,8% com a inserção de fresado asfáltico na composição do concreto.

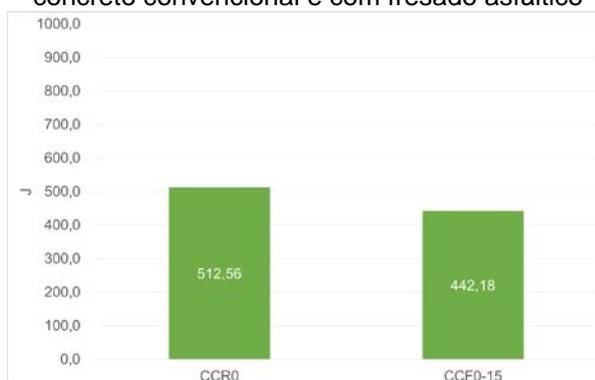
Gráfico 31 - Comparativo de resistência média à ruptura a flexão em corpos de prova prismáticos de concretos destinados a fabricação de meios fio e sarjetas



Fonte: Autoria própria.

Os modelos executados em escala real foram submetidos ao ensaio de impacto do mesmo modo que as barreiras rígidas. Foi observado que a energia média necessária para a abertura de fissuras nos elementos construídos foi de 512,56J, para as construídas com concreto de referência, e de 442,18J, para as fabricadas com concreto com fresado asfáltico, comparativo apresentado no Gráfico 32. Essa redução é de 13,7% quando é utilizado fresado asfáltico no concreto.

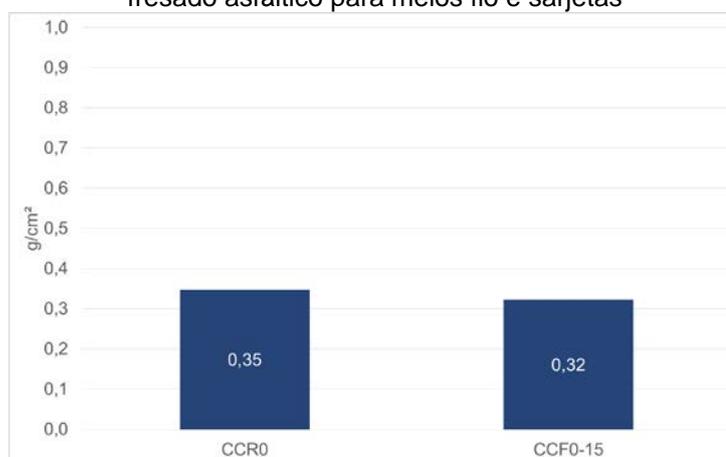
Gráfico 32 - Comparativos de resultados do ensaio de impacto nos meios fio e sarjetas em concreto convencional e com fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Constata-se no ensaio de absorção de água por capilaridade que o concreto convencional apresenta resultado de  $0,35\text{g/cm}^2$ , enquanto que o concreto com fresado asfáltico é  $0,32\text{g/cm}^2$ , conforme Gráfico 33. Observa-se que há redução da absorção de água de 8,6%.

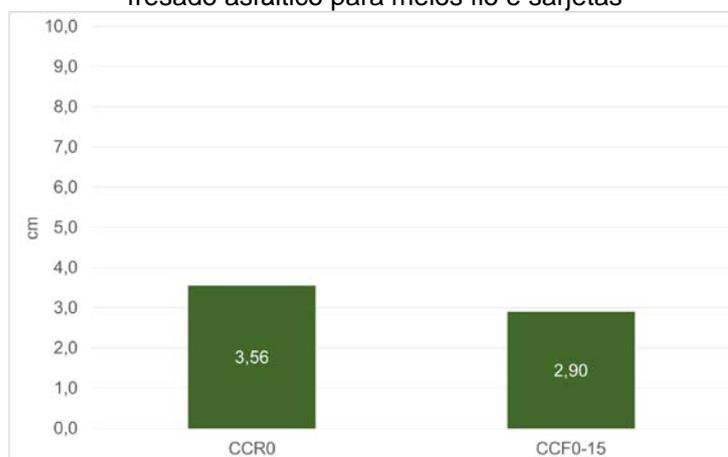
Gráfico 33 - Comparativo da absorção de água por capilaridade em concreto convencional e com fresado asfáltico para meios fio e sarjetas



Fonte: Autoria própria.

A altura de ascensão média da água no corpo de prova é 3,56cm no concreto convencional e 2,90cm no concreto confeccionado com fresado asfáltico em sua composição, conforme Gráfico 34. Há redução de 18,5% na comparação entre os concretos convencional e com fresado asfáltico. A ascensão máxima verificada no concreto convencional é 3,87cm para o concreto convencional e de 3,02cm para o concreto com fresado asfáltico. A diferença verificada é de 21,9% entre os concretos.

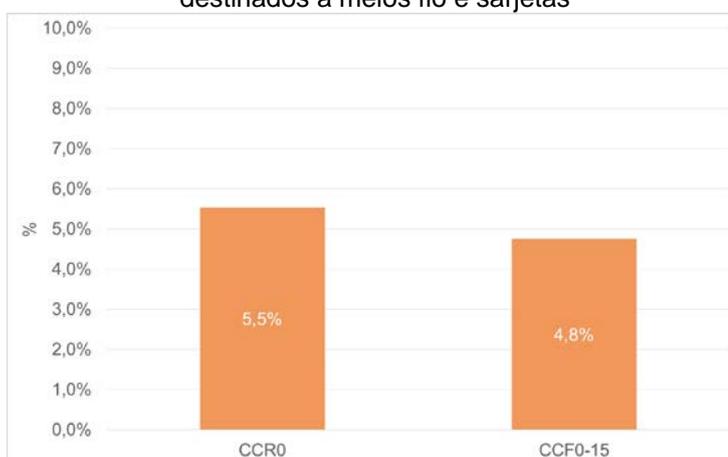
Gráfico 34 - Comparativo de ascensão capilar média dentro os concretos convencional e com fresado asfáltico para meios fio e sarjetas



Fonte: Autoria própria.

A absorção da água por imersão verificada no processo de moldagem das peças destinadas a meios fio e sarjetas é de 5,5% para o concreto com agregados naturais e 4,8% após a inserção de fresado asfáltico na composição, conforme Gráfico 35. A substituição de materiais naturais pelo resíduo estudado, acarreta redução de 12,7% na comparação dos concretos.

Gráfico 35 - Comparativo dos resultados de absorção de água por imersão para os concretos destinados a meios fio e sarjetas

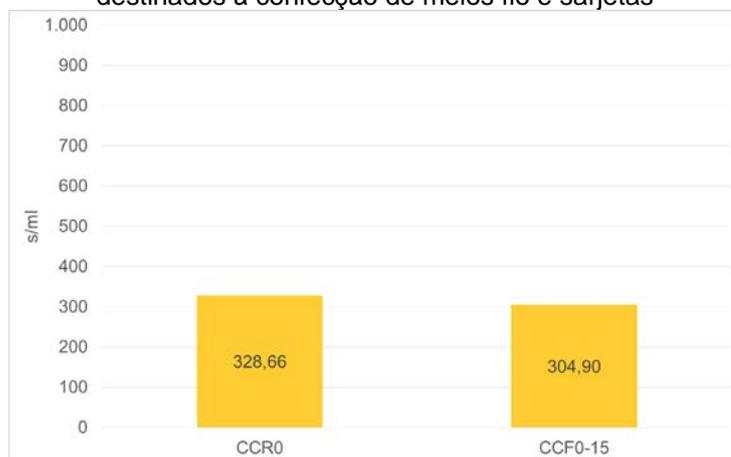


Fonte: Autoria própria.

A permeabilidade ao ar verificada nos ensaios foi de 328,66s/ml para o concreto com agregados naturais e de 304,90s/ml para o concreto com fresado asfáltico, conforme Gráfico 36. A redução verificada foi de 7,2% na comparação do concreto com fresado asfáltico com o que contém apenas agregados naturais na composição. Neste caso o concreto está classificado, segundo o manual do

Poroscópio utilizado, como categoria 4, o qual é excelente quanto a permeabilidade do ar (Quadro 6).

Gráfico 36 - Comparativo do AER para determinação da permeabilidade ao ar dos concretos destinados à confecção de meios fio e sarjetas

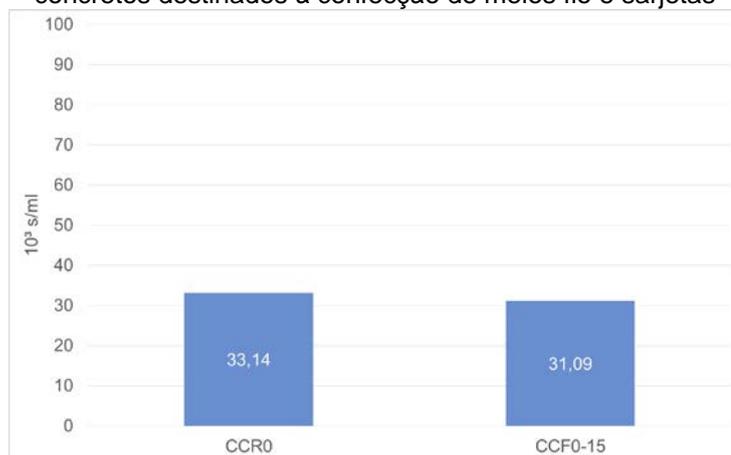


Fonte: Autoria própria.

Considerando os estudos de Cather *et al.* (1984) *apud* Soto (2014), Quadro 7, os valores apurados de 328,66s/ml (com agregados naturais) e 304,90s/ml (com fresado asfáltico) indicam que os concretos são bons quanto à permeabilidade e que estão bem adensados e bem curados.

Foi verificado que para o concreto convencional o valor da permeabilidade à água (WAR) de  $33,14 \cdot 10^3$ s/ml e para o concreto com fresado asfáltico de  $31,09 \cdot 10^3$ s/ml, apresentado no Gráfico 37. A redução apurada é no valor percentual de 6,2%. Estes concretos estão classificados na categoria 3 (Quadro 6), sendo classificados de boa qualidade a permeabilidade ao ar ( $30 < \text{WAR} \cdot 10^3 < 100$ ).

Gráfico 37 - Comparativo dos valores de WAR para determinação da permeabilidade a água dos concretos destinados à confecção de meios fio e sarjetas



Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas moldagens de elementos de drenagem como guias (Figura 49), meio fio e sarjetas. Ambas foram submetidas a ensaio a flexão com carga aplicada sobre os elementos em pontos pré-definidos. Foram executadas peças em escala real com concreto convencional e o concreto com fresado asfáltico.

Figura 49 - Guia em concreto no ensaio à flexão



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente foram ensaiadas as guias e pôde ser observado que a carga necessária a ruptura da peça foi de 57,04kN, para o concreto convencional, e de 44,48kN para o concreto com fresado asfáltico. Essa redução observada após o incremento do resíduo estudado é 22,0%.

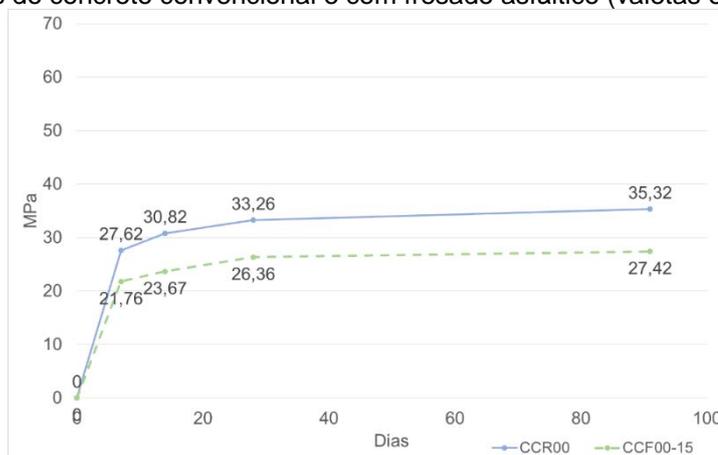
Ao comparar os resultados realizados no ensaio semelhante ao anterior, agora em meios fio e sarjetas, observa-se que a força necessária para realizar a ruptura da peça é 71,20kN para o concreto convencional e 59,88kN para o concreto

com fresado asfáltico. A redução de carga verificada é de 15,9%. Valor menor que o anteriormente visto para as guias.

### 6.2.2.2. Valetas e canaletas

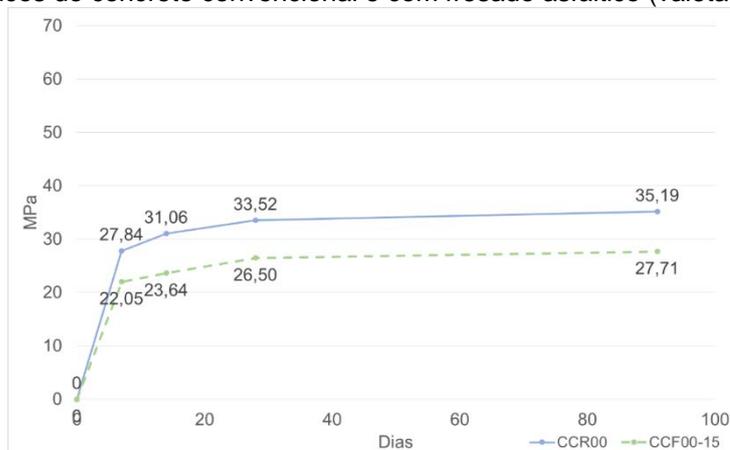
No processo de fabricação da laje de fundo da valeta, que representa as valetas e canaletas, foram moldados corpos de prova para a realização dos mesmos ensaios analisados para as meios fio e sarjetas. O valor médio obtido para as resistência média à compressão de corpos de prova cilíndricos aos 28 dias para o concreto convencional (CCR00) é de 33,26MPa (Gráfico 38) e calculando a mediana o resultado é de 33,18MPa (Gráfico 39), o que apresenta diferença de 0,2% entre os resultados. Quando compara-se os valores obtidos para o concreto com fresado asfáltico (CCF00-15), o valor apurado para a média do mesmo ensaio é de 26,36MPa (Gráfico 38) e considerando a mediana o resultado é de 26,50MPa (Gráfico 39). A diferença entre os resultados é de 0,5%. Deste modo verifica-se que a diferença entre os métodos de cálculo são pequenos.

Gráfico 38 - Comparativo da evolução da resistência média à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional e com fresado asfáltico (valetas e canaletas)



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 39 - Comparativo da evolução da mediana da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto convencional e com fresado asfáltico (valetas e canaletas)



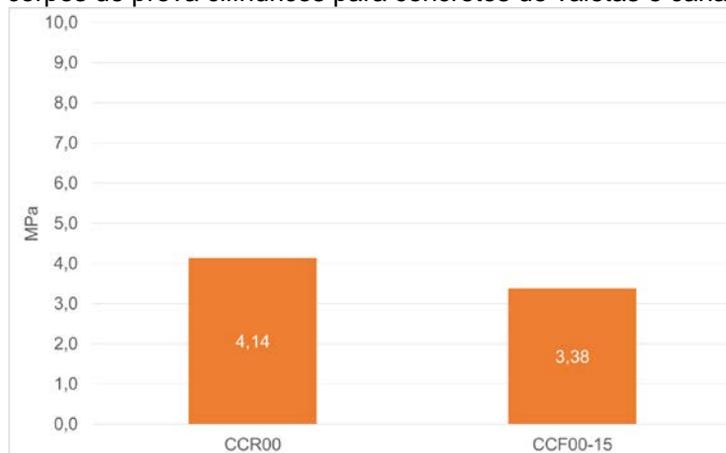
Fonte: Autoria própria.

Apura-se no ensaio de resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos que na idade de 7 dias, o concreto convencional atinge valor médio de 27,62MPa, enquanto que, com fresado asfáltico gera resultados médios de 21,76MPa, apresentando redução de 21,2%. Ao verificar o comportamento aos 14 dias, nota-se que o valor referente ao concreto convencional é de 30,85MPa e com fresado asfáltico é de 23,64MPa, que resulta na redução de 23,3%. Aos 28 dias é verificado que a resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos com concreto convencional é de 33,26MPa e passa para 26,36MPa com a inclusão do fresado asfáltico na composição, que representa redução de 20,7%.

É observado que os concretos continuam aumentando com a idade sua resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos, tanto para o concreto com agregados naturais quanto para o concreto com fresado asfáltico na sua composição. Há crescimento no concreto convencional de 6,2% e no concreto com fresado asfáltico de 4,0% observado nos resultados médios obtidos nos ensaios realizados com idade de 91 dias.

Nos ensaios realizados na determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, foi obtido o resultado médio apurado para o concreto convencional de 4,14MPa e para o concreto com fresado asfáltico de 3,38MPa, conforme Gráfico 40, gerando a redução de 18,4%.

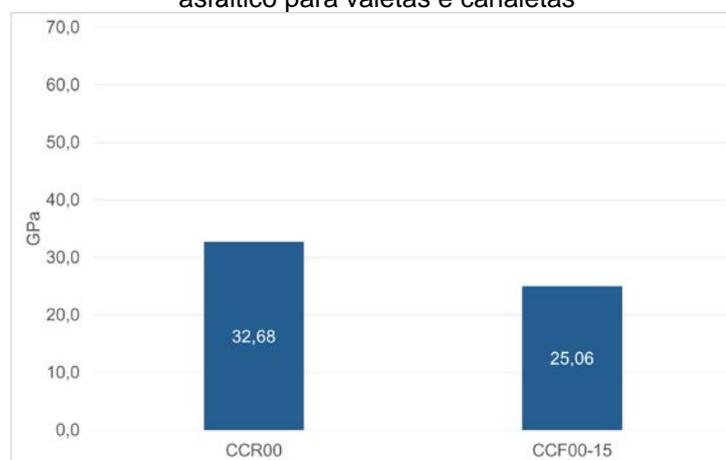
Gráfico 40 - Comparativo de resultados médios da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos para concretos de valetas e canaletas



Fonte: Autoria própria.

O módulo elástico observado no concreto convencional apresenta valores médios de 32,68GPa e com o concreto com fresado asfáltico, o valor é de 25,06GPa, conforme Gráfico 41. Representa a redução de 23,3%.

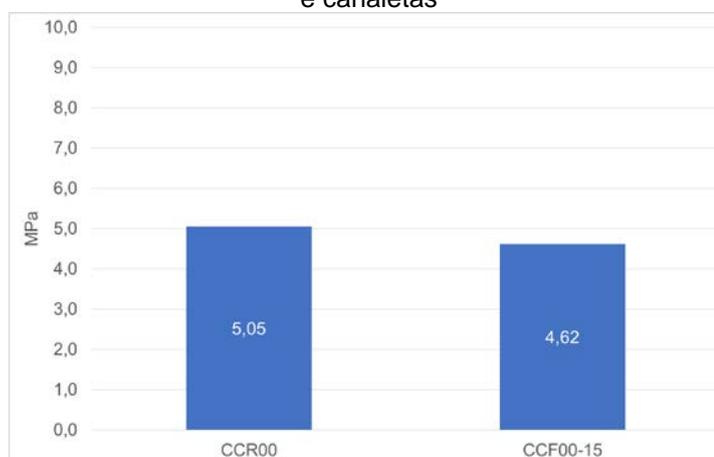
Gráfico 41 - Comparativo do módulo de elasticidade do concreto convencional e com fresado asfáltico para valetas e canaletas



Fonte: Autoria própria.

Os resultados médios obtidos à ruptura por flexão em corpos de prova prismáticos foram de 5,05MPa, com o concreto convencional, e 4,62MPa com o concreto com fresado asfáltico, conforme Gráfico 42. A redução verificada é de 8,5%, quando comparado as resistências dos concretos.

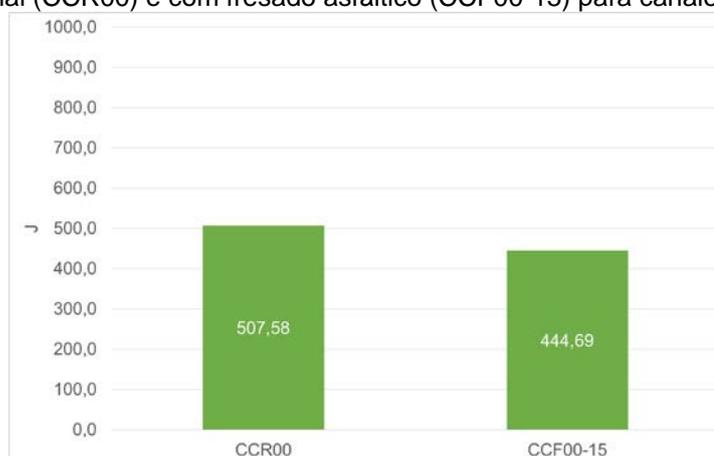
Gráfico 42 - Comparativo de resistências médias a ruptura por flexão em corpos de prova prismáticos com concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas



Fonte: Autoria própria.

Ao submeter os elementos ao ensaio de impacto, foi observado que o concreto convencional apresenta fissuras a partir da energia de 507,58J e, quando realizado o mesmo ensaio com concreto com fresado asfáltico, o valor passa a 444,69J, apresentados no Gráfico 43. Há redução de 12,4%.

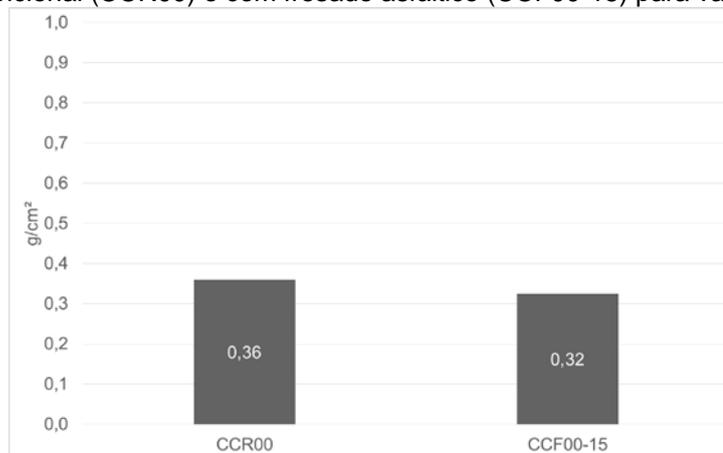
Gráfico 43 - Comparativo dos resultados médios da resistência ao impacto entre o concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para canaletas e valetas



Fonte: Autoria própria.

A absorção de água por capilaridade neste concreto foi de 0,36g/cm<sup>2</sup> no concreto convencional e 0,32g/cm<sup>2</sup> no concreto com fresado asfáltico, conforme Gráfico 44. Os valores apresentados demonstram redução de 11,1%.

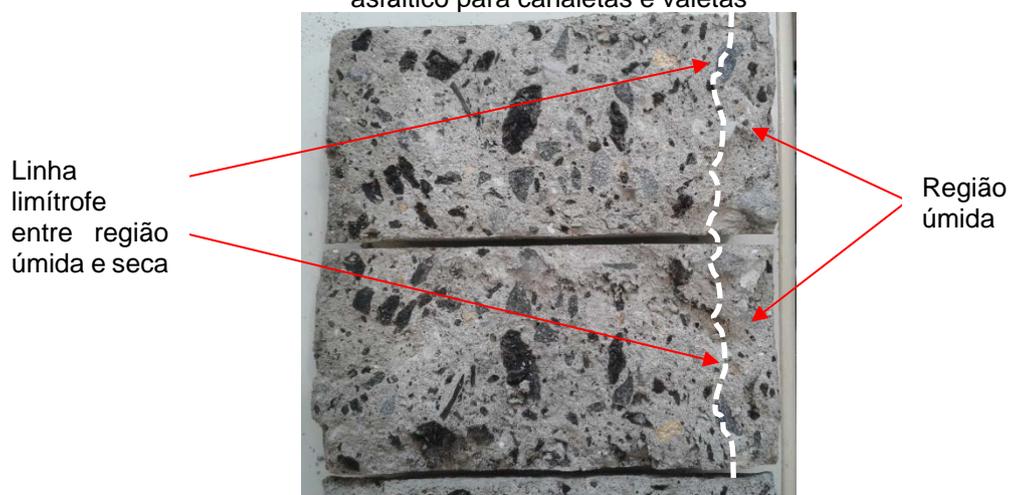
Gráfico 44 - Comparativo de absorção média de água por capilaridade entre os concretos com concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas.



Fonte: Autoria própria.

A distribuição de água dentro do corpo de prova teve ascensão média de 3,36cm para o concreto convencional e no concreto com fresado asfáltico na mistura, o valor observado é de 3,00cm, destacado na Figura 50.

Figura 50 - Ascensão de água por capilaridade no corpo de prova em concreto com fresado asfáltico para canaletas e valetas



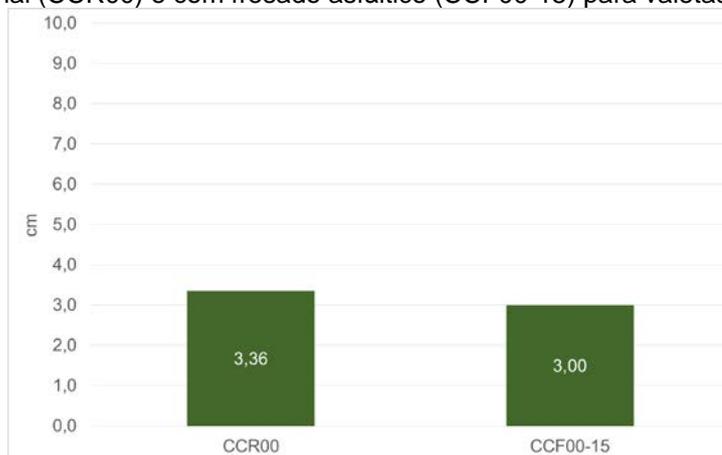
Fonte: Autoria própria.

Cabe salientar que a diferença de tonalidade entre a área umedecida pela ascensão da água é de difícil visualização, conforme pode ser observado na Figura 50 apresentada.

Os resultados deste ensaio são apresentados no Gráfico 45. A diferença apresenta redução de 10,7% ao comparar o concreto convencional com o fresado asfáltico. Notou-se a maior ascensão de água nos corpos de prova em concreto convencional de 3,53cm e no concreto com fresado asfáltico de 3,09cm. Há

redução de 12,5% entre o concreto convencional com o concreto com fresado asfáltico na composição.

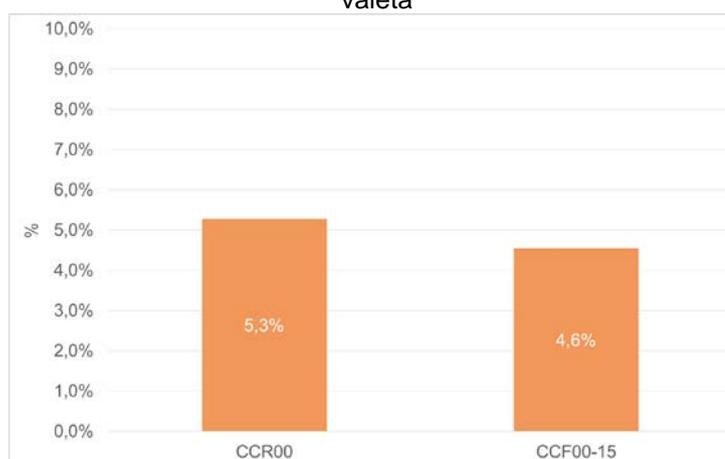
Gráfico 45 - Comparativo da ascensão de água média nos corpos de prova de concreto convencional (CCR00) e com fresado asfáltico (CCF00-15) para valetas e canaletas



Fonte: Autoria própria.

A absorção por imersão notada nesta moldagem para concretos de canaleta e valeta, apresentou redução no total de água que incorpora ao corpo de prova quando há inserção de fresado asfáltico no concreto. O valor apurado no concreto convencional é de 5,3% e para o concreto com resíduo é 4,6%, conforme Gráfico 46. Essa variação significa a redução de 13,2%.

Gráfico 46 - Comparativo de absorção média de água por imersão para a moldagem de canaleta e valeta

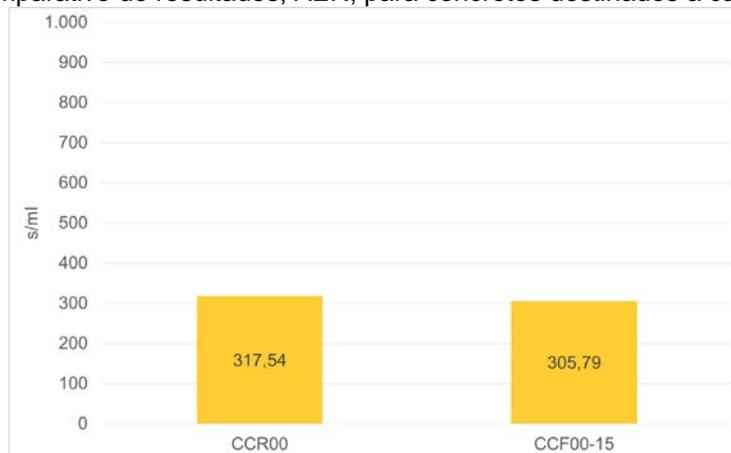


Fonte: Autoria própria.

O valor apurado para o AER é de 317,54s/ml para o concreto convencional e de 305,79s/ml para o concreto com fresado asfáltico na sua composição, conforme apresentado no Gráfico 47. A redução apurada é de 3,7%.

Esse concreto está classificado na categoria 4, o que apresenta boa qualidade de proteção ( $AER > 250$ ), conforme Quadro 6.

Gráfico 47 - Comparativo de resultados, AER, para concretos destinados a canaletas e valetas



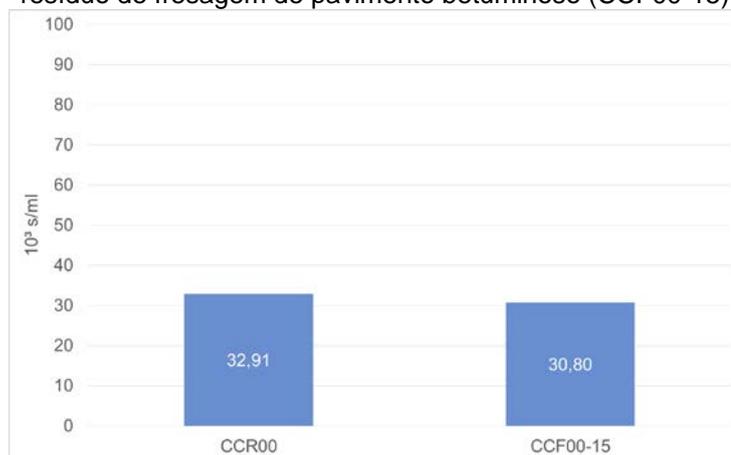
Fonte: Autoria própria.

Considerando, a classificação apresentada no Cather et al. (1984) *apud* Soto (2014), propõe uma outra classificação para o concreto analisado quanto a sua permeabilidade ao ar que correlaciona o tempo apurado no ensaio à um tipo de material diferente, como argamassas à concretos com polímeros. Esta classificação é apresentada no Quadro 7.

Quadro 7, os valores apurados de 317,14s/ml (com agregados naturais) e 305,79s/ml (com fresado asfáltico), classificam os concretos como bons quanto à permeabilidade e que estão bem adensados e bem curados.

Os valores apurados no ensaio de verificação da permeabilidade a água através da determinação do WAR, teve o resultado de  $32,91 \cdot 10^3$ s/ml para o concreto convencional e  $30,80 \cdot 10^3$ s/ml para o concreto com resíduo, conforme observado no Gráfico 48 e está classificado segundo o Quadro 6, com boa proteção a água. Há redução é de 6,4% quando do incremento do fresado asfáltico na mistura.

Gráfico 48 - Comparativo dos valores de WAR para os concretos convencional (CCR00) e com resíduo de fresagem de pavimento betuminoso (CCF00-15)



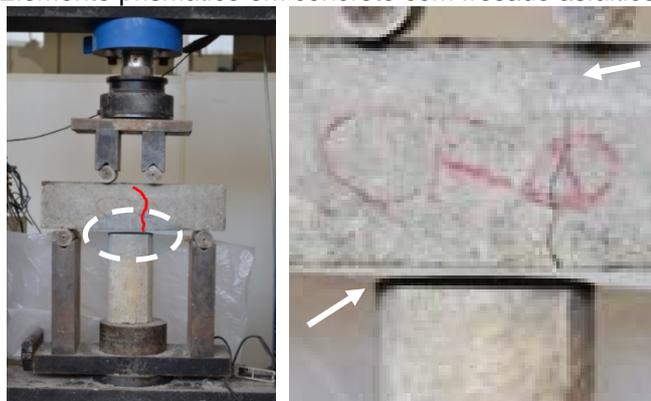
Fonte: Autoria própria.

Esses elementos foram analisados no ensaio destrutivo a flexão, onde foi verificado que para as peças moldadas em concreto convencional apresentou valor médio de 29,84kN e, para o concreto com fresado asfáltico, o valor de 22,73kN. Apresentando deste modo a redução com o uso de material reciclado em 23,8%.

### 6.2.3. Observações

Durante os processos de ruptura dos corpos de prova prismáticos, de dimensões 10cm x 10cm x 40cm, destinados ao ensaio de ruptura a flexão com agregados naturais, foi observado que após a ocorrência da ruptura e finalização do ensaio, a seção que ocorre o fendilhamento, separava-se totalmente em duas partes distintas, caindo após o ensaio. Este fato não foi observado, na maioria das peças que continham fresado asfáltico, permanecendo as duas partes ainda interligadas após o ensaio finalizado. Esta constatação é verificada conforme apresentado na Figura 51. A ligação entre as partes era frágil, pois com qualquer movimentação realizada, a peça acabava de romper em duas peças independentes.

Figura 51 - Elemento prismático em concreto com fresado asfáltico após ensaio

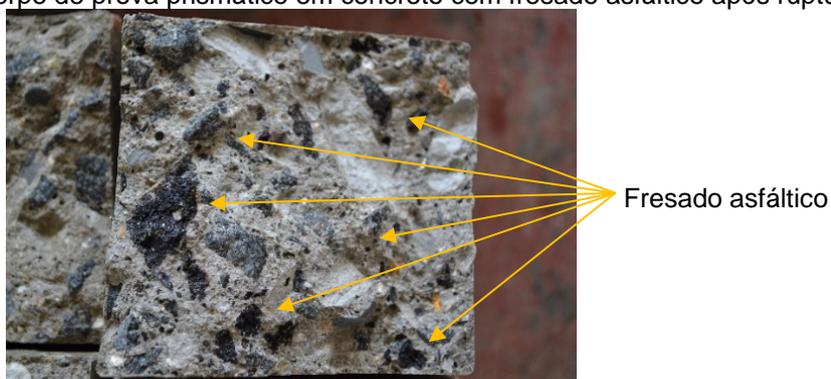


Fonte: A autoria própria.

Nota-se que a ligação que ocorre entre as duas metades das peças dos corpos de prova prismáticos, os agregados graúdos de fresado asfáltico que compõe o concreto apresentam deformação antes da sua total ruptura, fato que não é verificado no concreto com agregado natural.

Observa-se a ocorrência de pontos pretos nos corpos de prova, estes referem-se a agregados de granulometria graúda contido no fresado asfáltico, conforme detalhe da seção apresentada na Figura 52. Nota-se que os grãos de fresado asfáltico verificados na mesma figura estão seccionados devido a sua constituição mais frágil que do agregado natural ou da argamassa que compõe o concreto, não ocorrendo a ruptura na seção do concreto submetido à esforços conforme afirmado por Huang, Shu e Li (2005). Estes pesquisadores apontam que a ruptura ocorre na superfície gerada pela pasta de cimento e o filme de fresado asfáltico e não no grão de fresado asfáltico.

Figura 52 - Seção do corpo de prova prismático em concreto com fresado asfáltico após ruptura



Fonte: A autoria própria.

É verificado que a massa específica média do concreto no estado endurecido, obtido para os concretos destinado às barreiras rígidas com concreto convencional, é de  $24,05\text{kN/m}^3$  e com concreto com fresado asfáltico é de  $23,61\text{kN/m}^3$ .

Os concretos destinados aos elementos de drenagem apresentaram resultados, no concreto convencional destinado às meios fio e sarjetas, de  $23,38\text{kN/m}^3$  e com fresado asfáltico é  $22,83\text{kN/m}^3$ . Na moldagem destinada a elaboração do concreto para a valeta e canaleta, a massa específica do concreto convencional de  $23,26\text{kN/m}^3$  e com fresado asfáltico de  $22,93\text{kN/m}^3$ . Como os concretos destinados a elementos de drenagem foram elaborados com o mesmo traço, os resultados apresentaram valores muito próximos.

## 7. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Após realização dos ensaios, foram confrontados os resultados obtidos relativos aos concretos gerados com agregados naturais e com fresado asfáltico, em substituição de uma parcela dos agregados graúdos e miúdos que constituem a mistura.

Pode-se observar que há alteração nos resultados coletados na comparação destas misturas cimentícias pesquisadas, tanto para a fabricação de elementos de segurança viária (barreiras rígidas em concreto) quanto para os elementos de drenagem superficial (guias, sarjetas, valetas e canaletas).

Como esta pesquisa de mestrado teve enfoques diferenciados quanto ao desempenho do concreto gerado com concreto asfáltico, fez-se necessário subdividir este capítulo para melhor examinar os resultados obtidos, sendo estes mecânicos, que foram apurados através de ensaios laboratoriais, bem como, os referentes aos impactos econômicos e ambientais.

Para facilidade do processo de comparação e desempenho nos diversos ensaios mecânicos realizados, destrutivos ou não, é apresentado o resumo geral dos resultados levantados nos concretos com destinações e moldagens diferenciadas. Os resultados são apresentados detalhadamente no Capítulo 6 e sintetizados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios dos concretos com corpos de prova padronizados

Ensaio	Unidade	Barreira Rígida			Meio fio e sarjeta			Canaleta e valeta			
		CR0	CF0-15	CF0-15/CR0 - 1	CCR0	CCF0-15	CCF0-15/CCR0 - 1	CCR00	CCF00-15	CCF00-15/CCR00 - 1	
Consistência pelo abatimento do tronco de cone no concreto fresco	mm	90	95	5,6%	10	15	50,0%	10	15	50,0%	
Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos											
Idade de 7 dias	f <sub>cm7</sub>	MPa	30,31	19,37	-36,1%	28,40	22,95	-19,2%	27,62	21,76	-21,2%
Idade de 14 dias	f <sub>cm14</sub>	MPa	35,14	20,74	-41,0%	31,81	24,91	-21,7%	30,82	23,67	-23,2%
Idade de 28 dias	f <sub>cm28</sub>	MPa	42,17	32,23	-23,6%	34,41	27,33	-20,6%	33,26	26,36	-20,7%
Idade de 91 dias	f <sub>cm91</sub>	MPa	43,65	32,95	-24,5%	35,45	27,97	-21,1%	35,32	27,42	-22,4%
Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	f <sub>ctm,sp</sub>	MPa	4,13	3,38	-18,2%	4,12	3,26	-20,9%	3,30	2,85	-13,6%
Resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos	f <sub>ctm,f</sub>	MPa	5,88	4,34	-26,2%	4,97	4,63	-6,8%	5,05	4,62	-8,5%
Módulo estático de elasticidade	E <sub>ci</sub>	GPa	35,15	23,62	-32,8%	32,35	25,75	-20,4%	32,68	25,06	-23,3%
Energia ao Impacto	J		721,28	672,28	-6,8%	512,56	442,18	-13,7%	507,58	444,69	-12,4%
Absorção de água por capilaridade	g/cm <sup>2</sup>		0,07	0,06	-14,3%	0,35	0,32	-8,6%	0,32	0,32	0,0%
Ascensão capilar da água	cm		1,89	1,58	-16,4%	3,56	2,90	-18,5%	3,36	3,00	-10,7%
Ascensão capilar máxima da água (penetração d'água)	cm		1,97	1,64	-16,8%	3,87	3,02	-22,0%	3,53	3,09	-12,5%
Absorção de água por imersão	%		3,2	2,5	-21,9%	5,5	4,8	-12,7%	5,3	4,6	-13,2%
AER	s/ml		382,95	345,26	-9,8%	328,66	304,9	-7,2%	317,54	305,79	-3,7%
WAR	10 <sup>3</sup> .s/ml		37,71	33,91	-10,1%	33,14	31,09	-6,2%	32,91	30,8	-6,4%

Fonte: Autoria própria

Verificou-se que a trabalhabilidade foi melhorada com a inserção do fresado asfáltico na mistura dos concretos, tanto o que se destina a fabricação de elementos de segurança, quanto aos elementos de drenagem superficial. Isso é verificado no ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone no concreto fresco. O valor do abatimento sempre foi superior no concreto com resíduos na composição, conforme apresentado na Tabela 18.

Constatou-se que a absorção de água é reduzida no fresado, devido ao fato de que seus grãos são envolvidos com cimento asfáltico de petróleo, inibindo o acesso das moléculas de água para dentro do agregado, pois este material betuminoso é hidrófugo (repele e não dissolve com a água). Esta característica se deve ao fato do produto residual estudado ser oriundo da remoção das camadas betuminosas que revestem, quase que na totalidade, os sistemas viários pavimentados brasileiros.

Outro fato importante é que o concreto apresenta menor massa específica com o incremento do fresado asfáltico à mistura, o que pode indicar a existência de capilares de maior diâmetro, o que leva a menor ascensão da água por capilaridade. Esse fato pode ser notado com a redução dos valores de permeabilidade ao ar (AER) e à água (WAR), pois este ensaio é realizado com a profundidade de 4cm, região bem superficial do concreto onde a maior ascensão capilar da água foi observada nos concretos desta pesquisa (3,87cm, maior valor constatado).

O aumento da trabalhabilidade, não foi observado na pesquisa feita por Erdem e Blankson (2014), pois suas investigações contemplando concreto contendo RAP na mistura apresentou abatimento inferior à mistura de referência, reduzindo o abatimento de 150mm para 90mm após o incremento do resíduo.

Erdem e Blankson (2014) comentam que durante o processo de fabricação do concreto, partículas de betume que envolvem os agregados são liberadas, permitindo assim o aumento da capacidade absorção da água pelos grãos do fresado asfáltico. Aparentemente esse aumento da absorção de água

pelos grãos não foi percebida nesta pesquisa de mestrado, pois no processo das moldagens dos elementos, o concreto com resíduo apresentou maior facilidade na sua aplicação nas peças quando comparado ao convencional, o que é justificado pelo crescimento do abatimento no tronco de cone e que leva a concluir que há mais água livre na mistura.

Outro fato que corrobora com essa afirmação é o resultado do ensaio de absorção de água pelos agregados graúdos estudados no Capítulo 5, onde foram ensaiados os materiais que fazem parte desta pesquisa de mestrado. Constatou-se que a pedra britada utilizada na mistura apresentou resultado de absorção de água de 0,75%, enquanto o fresado asfáltico 0,48%, portanto uma redução de 36,0%.

Por outro lado, após as moldagens e iniciado o processo de cura, a tonalidade do concreto com fresado asfáltico na composição, apresentava nuance mais escuro que a observada nas peças moldadas com concreto convencional. Quando esses elementos já estão curados e secos à temperatura ambiente, essa diferença de tonalidade ficava difícil de ser observada. Na Figura 53 é verificado a seção dos corpos de prova prismáticos após ensaio destrutivo e observa-se na porção superior estão os corpos de prova, já ensaiados, feitos com concreto convencional (mais claros) e os inferiores em concreto com fresado asfáltico (mais escuros).

Figura 53 - Comparativo de corpos de prova prismáticos com concreto convencional e com fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

A disponibilidade de água observada na mistura de concreto com fresado asfáltico não acarretou exsudação, mas facilitou a sua aplicação e

adensamento nos corpos de prova, tanto nos cilíndricos quanto nos prismáticos, bem como na moldagem dos elementos estudados. Isso é mais evidente e sensível nos concretos destinados a fabricação de elementos de drenagem superficial, pois tem abatimento muito baixo e pequenas melhoras trazem grandes facilidades no desempenho executivo, tanto para aplicação mecânica como manual, sem que comprometa as características preconizadas.

Cabe ressaltar que, no mesmo estudo realizado por Erdem e Blankson (2014), foi observado grande redução no valor do abatimento realizado no *slump test* quando da utilização de agregado gerado de resíduo de concreto (*waste precast*). O valor apresentado no estudo com é de 50mm, o que representa 1/3 do verificado no concreto de referência com agregado graúdo natural (150mm), apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Comparativo de consistência pelo abatimento observado por Erdem e Blankson (2014)

Agregado	Slump test (mm)
Limestone	150
Waste precast	50
RAP	90

Fonte: Adaptado de Erdem e Blankson (2014)

Algumas dessas pesquisas estudadas e apresentadas neste trabalho, mostraram a influência do fresado asfáltico nas propriedades mecânicas do concreto. Elas foram realizadas com a variação percentual de substituição de agregado natural pelo resíduo estudado, ou ainda, a sua composição granulométrica, selecionando em agregado graúdo e miúdo.

Os estudos realizados por Delwar, Fahmy e Taha (1997), Hassan, Brooks e Erdman (2000), Huang, Shu e Li (2005), Erdem e Blankson (2014), Ibrahim *et al.* (2014), Solanki e Dash (2015) e por Bida, Danraka e Ma'ali (2016) apontam que a inclusão do fresado asfáltico na composição do concreto acarreta a redução das resistências mecânicas quando comparado ao concreto com agregados naturais.

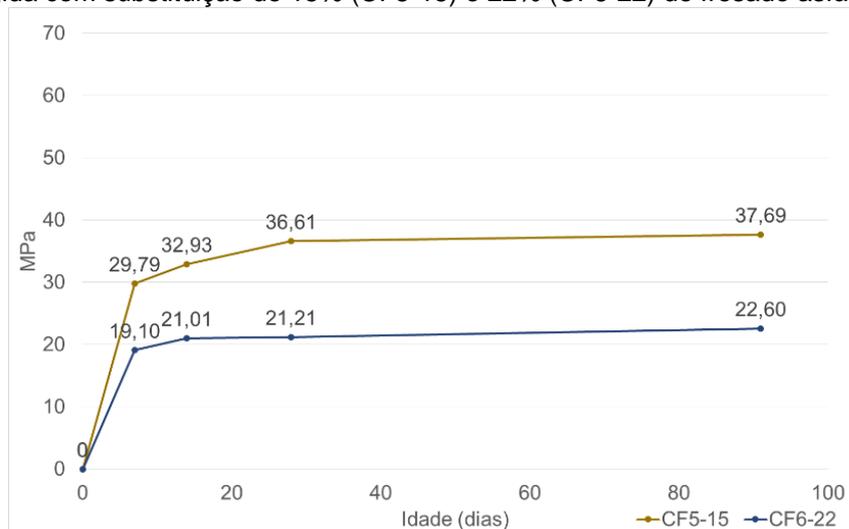
Nesta pesquisa de mestrado, a redução das resistências em função do incremento de fresado asfáltico na mistura, já foi observado durante a fase de

definição do traço destinado aos elementos de segurança viária. Neste estágio foi estudada a viabilidade da incorporação de fresado asfáltico na mistura em valores de 15% e 22%, tendo como base o total de agregados naturais que compõe o concreto com agregados naturais. A redução de resistência mecânica foi verificada e, ainda, que é crescente com o percentual de fresado incorporado à mistura.

Para os órgãos utilizados no estudo, o DNIT e DER-SP, a definição para a fabricação do concreto destinado à fabricação de elementos de segurança viária e de drenagem superficial, está ligado diretamente à sua resistência característica à compressão. Para o concreto destinado à barreira rígida especifica-se  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , desta forma, deve apresentar  $f_{cmd}=31,6\text{MPa}$ . Este valor não foi atingido com a substituição de agregados naturais por fresado asfáltico no teor de 22%, pois obteve a resistência média de 21,21MPa (Gráfico 49), valor 32,9% abaixo do especificado.

Os resultados apurados no ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, na idade de 28 dias, na fase de definição do traço para o concreto apresentam com substituição de 15% de agregados naturais por fresado asfáltico a resistência média de 36,6MPa e de 21,2MPa para substituição de 22%, conforme Gráfico 49. A redução de resistência, verificada com o acréscimo de incorporação de fresado asfáltico é 7% (15% para 22%), é de 42,1%. Significa que a cada 1% de substituição acarreta a redução aproximada de 6% na resistência à compressão, entre 15% e 22% de substituição dos agregados.

Gráfico 49 - Evolução da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos para barreira rígida com substituição de 15% (CF5-15) e 22% (CF6-22) de fresado asfáltico.



Fonte: Autoria própria.

Nota:

CF5-15 – concreto para elementos de segurança viária com substituição de 15% de fresado asfáltico

CF6-22 – concreto para elementos de segurança viária com substituição de 22% de fresado asfáltico

Ibrahin *et al.* (2014) desaconselham a substituição superior a 25% devido à grande perda da redução das qualidades do concreto, mas neste estudo de mestrado é verificada grande redução das resistências com teor de substituição inferior ao recomendado no estudo desses pesquisadores.

Na decisão do traço para os elementos de drenagem, a substituição estudada seguiu o mesmo teor adotado para os elementos de segurança viária. O que foi alterado foi o teor de cimento utilizado, na busca de reduzir seu consumo atendendo às necessidades previstas, além da adequação da quantidade de argamassa da mistura.

Na fabricação do concreto destinado à barreira rígida em concreto foi verificada a desaceleração do crescimento da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos do concreto entre as idades de 7 e 14 dias. Esse fenômeno não foi observado quando elaborado o concreto para a fabricação dos elementos de drenagem superficial.

Na pesquisa elaborada por Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015), o comportamento da resistência à compressão mostra que a evolução dos resultados

apresenta crescimento diferenciado em função da taxa de substituição dos agregados naturais por RAP. Nos concretos com 10% e 20% de substituição têm a maior resistência apurada na idade de 14 dias, sendo superiores a verificada na idade 28 dias. No concreto com 40% de substituição é notada que a resistência cai com a idade do concreto (Tabela 20). Isso contraria a evolução natural da resistência do concreto com o tempo.

Tabela 20 - Evolução dos resultados à compressão de corpos de prova cilíndricos observados com a evolução da idade e taxa de substituição

Idade do concreto (dias)	$f_{cm}$ (MPa)			
	Fresado asfáltico na mistura			
	0%	10%	20%	40%
7	15	19	40	38
14	30	48	42	35
28	36	44	32	34

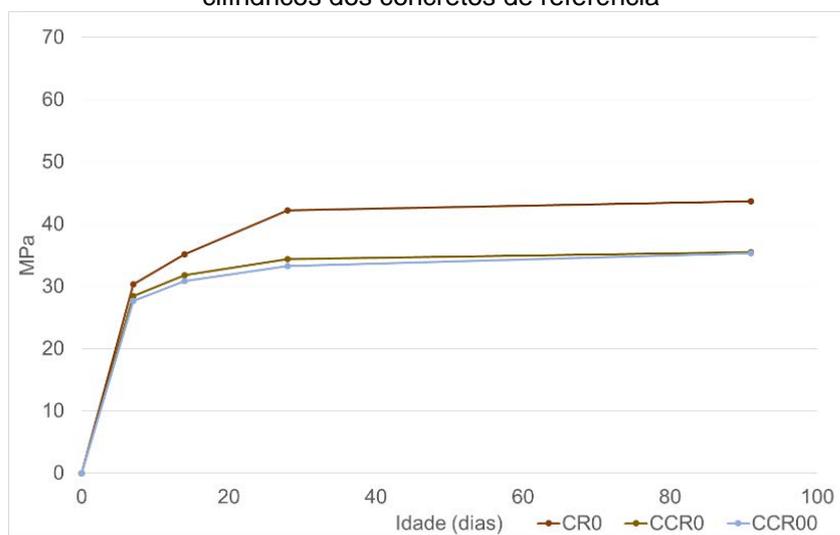
Fonte: Adaptado de Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015)

Nota: Informações obtidas dos gráficos apresentados no artigo.

Esse fato não foi observado no concreto estudado nesta pesquisa, mas é notado o comportamento não convencional da relação idade e resistência. Pode-se ratificar que o comportamento do concreto com fresado asfáltico é muito sensível à sua taxa de substituição, mas os resultados são divergentes dos apurados, tanto no processo de definição do traço, como na fabricação dos elementos estudados.

Os resultados referentes à resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos observados na moldagem dos elementos estudados apresentam comportamentos semelhantes nas diversas moldagens, mostrando crescimento em todas as idades analisadas (7, 14, 28 e 91 dias), conforme evidenciado no Gráfico 50.

Gráfico 50 - Comparativo de resultados de resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos dos concretos de referência



Fonte: Autoria própria

Nota:

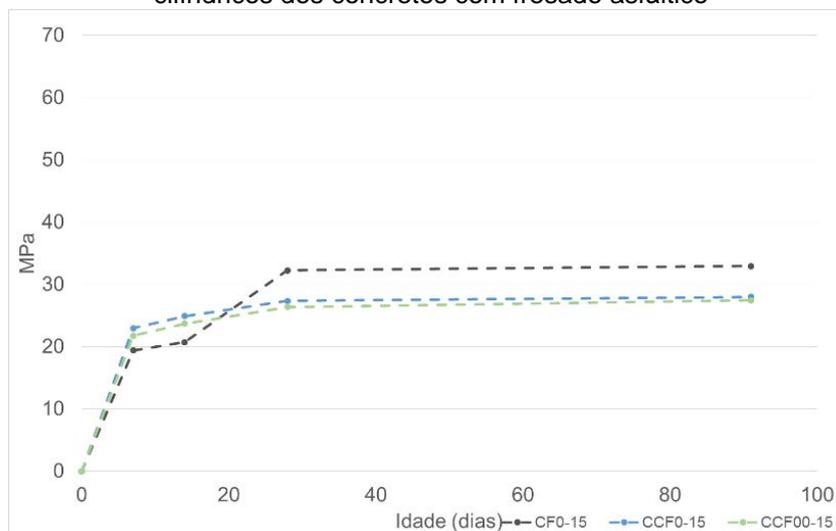
CR0 – Concreto convencional aplicado no elemento de segurança viária

CCR0 – Concreto convencional aplicado no elemento de drenagem superficial (meio-fio e sarjeta)

CCR00 – Concreto convencional aplicado no elemento de drenagem superficial (canaleta e valeta)

No Gráfico 51 pode ser observado que as resistências apresentaram crescimento e comportamento semelhantes no concreto com substituição de agregado natural por fresado asfáltico para a barreira rígida, cuja resistência característica é 25MPa. Apenas foi verificado o menor crescimento da resistência entre as idades de 7 e 14dias, mas recuperando nas idades seguintes.

Gráfico 51 - Comparativo de resultados de resistência à média à compressão em corpos de prova cilíndricos dos concretos com fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Nota:

CF0 – Concreto aplicado no elemento de segurança viária com fresado asfáltico

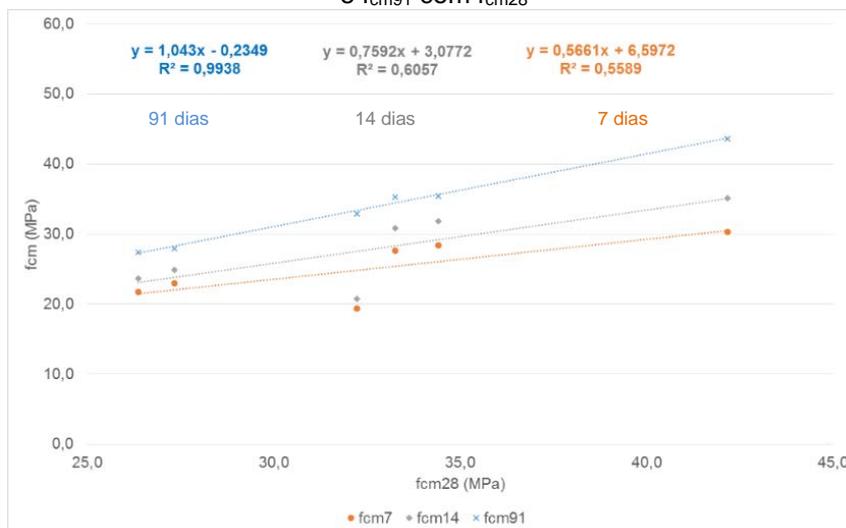
CCF0-15 – Concreto aplicado no elemento de drenagem superficial com fresado asfáltico (meio-fio e sarjeta)

CCF00-15 – Concreto aplicado no elemento de drenagem superficial com fresado asfáltico (canaleta e valeta)

Para entender o comportamento do concreto estudado foi analisado a relação entre as idades de 7, 14 e 91 dias comparadas com as observadas na idade de 28 dias. Para isso foram relacionadas todas as resistências médias à compressão de corpos de prova cilíndricos e interpolados com uma curva de regressão linear. Foi analisado o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) desta curva de interpolação, pois este indica a proporção de variação dos valores que é definida pela equação de regressão.

Observa-se que nos resultados da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos na idade de 7 dias comparado com a idade de 28 dias tem equação de regressão com valor  $R^2$  de 0,5589. Para a comparação entre a idade de 14 dias com 28 dias, o valor de  $R^2$  é 0,6057 e para a comparação na idade 91 dias com 28 dias, o valor de  $R^2$  é 0,9938. Pode-se notar que a linearidade é crescente com a evolução do tempo, conforme Gráfico 52.

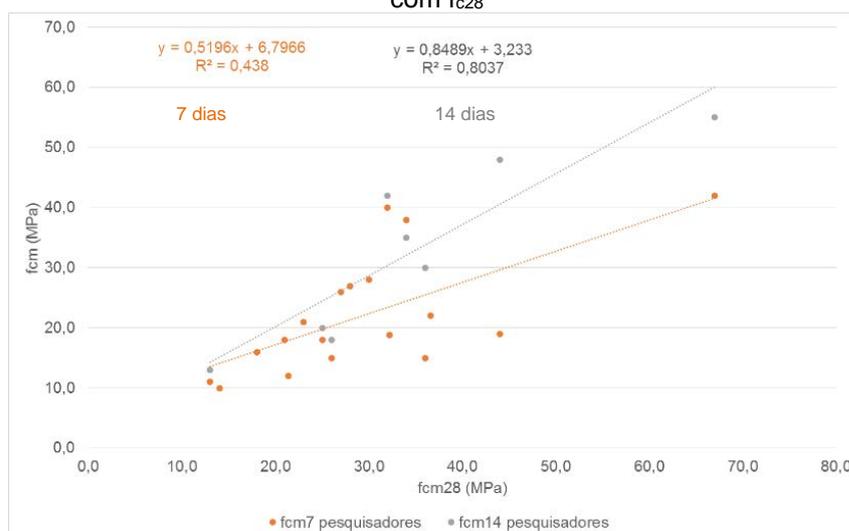
Gráfico 52 - Relação da resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos -  $f_{cm7}$ ,  $f_{cm14}$  e  $f_{cm91}$  com  $f_{cm28}$



Fonte: Autoria própria.

Mesmo os trabalhos realizados referentes aos estudos de outros pesquisadores (mencionados no estado da arte), foram analisados resultados médios com idade de 7 dias e 14 dias (nem todos estudaram esta idade), conforme apresentados nos Quadro 8 e Quadro 9. O valor  $R^2$  da equação de regressão linear observada é 0,4380 para 7 dias e aumenta para 0,8037 com a idade de 14 dias conforme apresentado no Gráfico 53.

Gráfico 53 - Relação de resistência média à compressão em corpos de prova cilíndricos -  $f_{c7}$ ,  $f_{c14}$  com  $f_{c28}$



Fonte: Autoria própria.

Quadro 8 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 7 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura

Fonte	Obs.	% substituição x $f_{cm7}$						
		%	0	15				
Dados desta pesquisa	Elemento de segurança viária	$f_{cm7}$ (MPa)	30,31	19,37				
		%	0	15				
	Elemento de drenagem superficial	$f_{cm7}$ (MPa)	28,01	22,36				
		%	0	15				
Erdem, Blankson (2014)	Substituição do agregado graúdo	$f_{cm7}$ (MPa)	18,8	10,0				
		%	0	50				
Hassan, Brooks e Erdman (2000)	Substituição total dos agregados	$f_{cm7}$ (MPa)	42,0	11,0				
		%	0	100				
	Substituição dos agregados graúdo	$f_{cm7}$ (MPa)	18,0					
		%	60					
Bida, Daranka e Ma'ali (2016)	Substituição dos agregados fino	$f_{cm7}$ (MPa)	28,0	27,0	26,0	21,0	18,0	16,0
		%	0	8	16	24	32	40
Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015)	Substituição dos agregados finos	$f_{cm7}$ (MPa)	15,0	19,0	40,0	38,0		
		%	0	3	10	20		

Fonte: Adaptado pelo autor de Erdem, Blankson (2014), Hassan, Brooks e Erdman (2000), Bida, Daranka e Ma'ali (2016), Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015).

Quadro 9 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 14 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura

Fonte	Obs.	% substituição x $f_{cm14}$				
		%	0	15		
Dados desta pesquisa	Elemento de segurança viária	$f_{cm14}$ (MPa)	35,14	20,74		
		%	0	15		
	Elemento de drenagem superficial	$f_{cm14}$ (MPa)	31,32	24,29		
		%	0	15		
Hassan, Brooks e Erdman (2000)	Substituição total dos agregados	$f_{cm14}$ (MPa)	55,0	13,0		
		%	0	100		
	Substituição dos agregados finos	$f_{cm14}$ (MPa)	20,0			
		%	60			
Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015)	Substituição dos agregados finos	$f_{cm14}$ (MPa)	30,0	48,0	42,0	35,0
		%	0	3	10	20

Fonte: Adaptado pelo autor de Hassan, Brooks e Erdman (2000), Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015).

Confirma-se que a linearidade dos resultados cresce com a evolução do tempo tanto para esta pesquisa como nas realizadas por diversos pesquisadores. Esse fato mostra que este estudo está em consonância com as demais pesquisas realizadas por outros pesquisadores de diferentes lugares do mundo. Nas pesquisas utilizadas como referência para comparação do desempenho do

concreto com fresado asfáltico não apresentavam resultados com idades superiores a 28 dias. Alguns pesquisadores adotaram estudos com a idade de 3 dias, que não foi analisada nesta pesquisa de mestrado, mas não foram consideradas idades mais avançadas como 91 dias, importante para verificar o comportamento do concreto com a evolução da sua vida.

Para avaliar a relação entre os resultados obtidos nos corpos de prova do concreto para realização de ensaio de compressão axial, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) que associa a linearidade entre duas variáveis em análise, segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009).

Conforme definem Dancey e Reidy (2005) *apud* Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), a relação entre os dados analisados que podem ser avaliados em função do valor absoluto do coeficiente de correlação de Pearson. Esta relação é apresentada no Quadro 10.

Quadro 10 - Relação de correlação de Pearson

Coeficiente de correlação de Pearson $ r $	Relação
0,10 a 0,30	Fraca
0,40 a 0,60	Moderada
0,70 a 1,00	Forte

Fonte: Adaptado de Dancey e Reidy (2005) *apud* Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009).

Aplicando esse conceito aos resultados dos corpos de prova dos concretos de referência e com fresado asfáltico na mistura para os elementos de segurança viária nos resultados de compressão de corpos de prova cilíndricos com a idade de 28 dias, é determinado que as amostras resultam em uma relação moderada, pois coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) obtido é -0,7.

Utilizando a mesma relação para os corpos de prova destinados aos elementos de drenagem superficial, com agregados naturais e com fresado asfáltico, é mantida a mesma relação entre os resultados obtidos, relação moderada, apenas com o valor de  $r=0,7$ . Todos os valores obtidos nesta idade estão apresentados na Tabela 21.

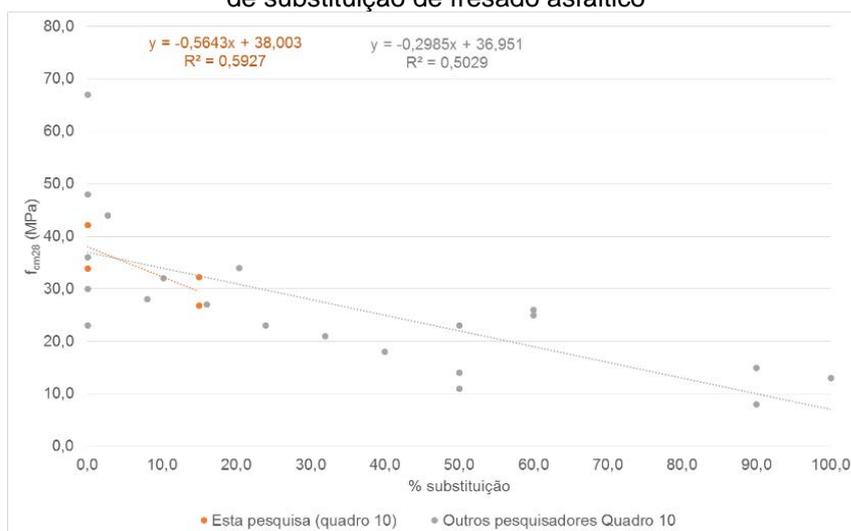
Tabela 21 - Resultados de compressão de corpos de prova cilíndricos com idade de 28 dias

Concreto	Elemento	$f_{c28}$					
Referência	Segurança viária	43,72	43,88	39,67	38,77	42,93	40,66
Fresado 15%	Segurança viária	31,09	32,97	34,93	34,21	34,82	35,11
	Drenagem superficial (CCF0)	31,09	32,97	34,93	34,21	34,82	35,11
Referência	Drenagem superficial	33,18	33,09	30,86	32,89	33,52	33,62
Fresado 15%	Drenagem superficial (CCF0-15)	25,60	26,09	30,57	28,57	29,07	27,33
	Drenagem superficial (CCF00-15)	27,33	26,99	25,58	28,42	25,38	26,50

Fonte: Autoria própria.

Comparando-se a resistência à compressão axial com os diferentes valores de substituição de fresado asfáltico na mistura, observa-se melhor comportamento dos resultados deste estudo de mestrado em comparação aos apresentados pelos outros pesquisadores estudados. Vê-se que a curva de regressão linear apresenta valor de  $R^2$  de 0,5927 nos valores obtidos nesta pesquisa e 0,5029 na curva que considera os valores das outras pesquisas realizadas e analisadas (Gráfico 54).

Gráfico 54 - Relação de resultados médios à compressão de axial aos 28 dias com a porcentagem de substituição de fresado asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Nota: Foram utilizados resultados obtidos de alguns trabalhos de pesquisa apresentados no Quadro 11.

Esta comparação pode até possibilitar a previsão de desempenho do concreto em função do percentual de substituição dos agregados naturais por fresado asfáltico na mistura, no caso com baixa precisão, mas ainda serve como indicador do comportamento médio dos concretos para estudos iniciais de comportamento mecânico.

Quadro 11 - Resumo de resultados médios à compressão axial, com idade de 28 dias, comparado com a substituição de agregados naturais na mistura

Fonte	Obs.	% substituição x $f_{cm28}$						
		%	0	15				
Dados desta pesquisa de mestrado	Elemento de segurança viária	%	0	15				
		$f_{cm28}$ (MPa)	42,17	32,23				
	Elemento de drenagem superficial	%	0	15				
		$f_{cm28}$ (MPa)	33,84	26,85				
Erdem, Blankson (2014)	Substituição do agregado graúdo	%	0	50				
		$f_{cm28}$ (MPa)	32,2	14,0				
Hassan, Brooks e Erdman (2000)	Substituição total dos agregados	%	0	100				
		$f_{cm28}$ (MPa)	67,0	13,0				
	Substituição dos agregados finos	%	60					
		$f_{cm28}$ (MPa)	25,0					
Bida, Daranka e Ma'ali (2016)	Substituição dos agregados fino	%	0	8	16	24	32	40
		$f_{cm28}$ (MPa)	30,0	28,0	27,0	23,0	21,0	18,0
Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015)	Substituição dos agregados finos	%	0	3	10	20		
		$f_{cm28}$ (MPa)	36,0	44,0	32,0	34,0		
Mathias, Sedran e De Larrard (2004)	Consumo de cimento com 330kg/m <sup>3</sup>	%	0	50	90			
		$f_{cm28}$ (MPa)	18,0	23,0	15,0			
	Consumo de cimento com 220kg/m <sup>3</sup>	%	0	50	90			
		$f_{cm28}$ (MPa)	23,0	11,0	8,0			

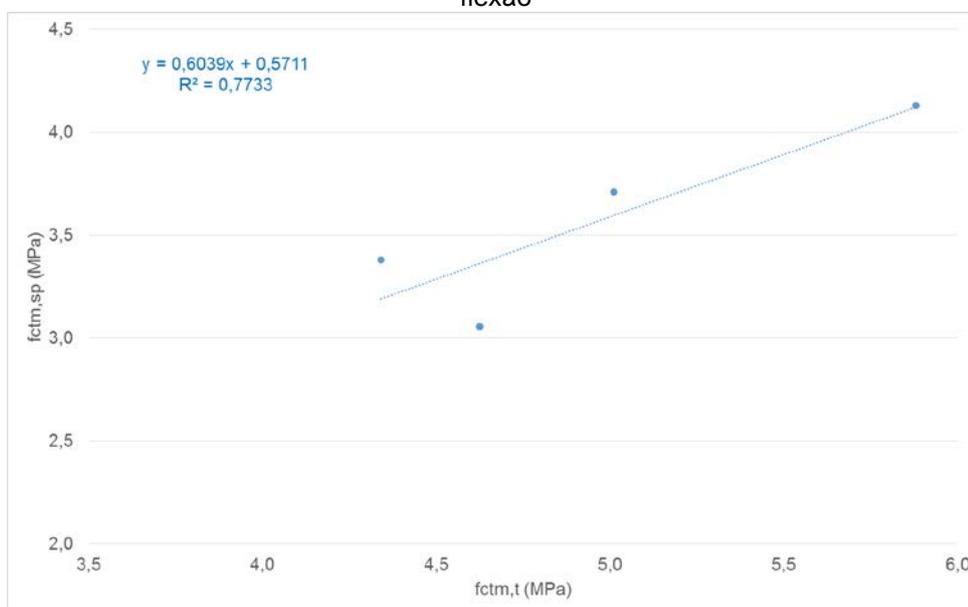
Fonte: Adaptado pelo autor de Erdem, Blankson (2014), Hassan, Brooks e Erdman (2000), Bida, Daranka e Ma'ali (2016), Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015), Mathias, Sedran e De Larrard (2004).

A relação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos e o módulo de elasticidade estático apresentam redução em seus resultados, contrariando o observado no processo de definição do traço destinado aos elementos de segurança, onde este ensaio apresentou resultados superiores com a incorporação do fresado quando comparado ao concreto convencional. No processo de fabricação dos elementos, foram gerados maior quantidade de corpos de prova, 6 unidades para cada ensaio. Na fase de definição

da mistura eram 4. Outro ponto que pode ter ocorrido para o aumento da resistência é a possibilidade de ter ocorrido alguma variação granulométrica do fresado incorporando agregados que melhoram o desempenho deste concreto.

Relacionando os dois resultados com uma curva de regressão linear considerando os resultados médios de resistência à compressão diametral em corpos de prova cilíndricos com resistência média a flexão na compressão em corpos de prova prismáticos que foi obtida a curva mencionada no gráfico e que tem coeficiente de regressão de 0,7733, conforme Gráfico 55.

Gráfico 55 - Relação entre resistência média à compressão diametral com resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria

O resultado apresentado no ensaio de resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos comparando o concreto convencional com o concreto com fresado asfáltico ocorreu redução, conforme esperado quando se compara os resultados com aqueles obtidos por Hassan, Brooks e Erdman (2000), apresentados no Quadro 12, o que aponta que o desempenho do concreto com fresado asfáltico desta pesquisa tem comportamento semelhante ao realizado pelos outros pesquisadores.

Quadro 12 - Comparativo da resistência à tração na flexão média em corpos de prova prismáticos em função da substituição de agregados

Fonte	Obs.	Comparativo $f_{ctm,f}$ , na idade de 28 dias, com a substituição de fresado asfáltico		
		%		
Dados desta pesquisa de mestrado	Elemento de segurança viária	%	0	15
		$f_{ctm,f}$ (MPa)	5,88	4,34
	Elemento de drenagem superficial	%	0	15
		$f_{ctm,f}$ (MPa)	5,01	4,63
Hassan, Brooks e Erdman (2000)	Substituição total dos agregados	%	0	100
		$f_{ctm,f}$ (MPa)	4,59	2,45
	Substituição dos agregados finos	%	60	
		$f_{ctm,f}$ (MPa)	2,94	

Fonte: Adaptado pelo autor de Hassan, Brooks e Erdman (2000).

Reitera-se que foi observado, nos processos experimentais desta pesquisa de mestrado, que a maioria dos corpos de prova submetidos a este procedimento de ensaio, não foram totalmente seccionados, conforme ocorreu com os corpos de prova produzidos com concreto convencional.

Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015) obtiveram resultados a resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos superiores ao concreto convencional quando foi imposta a substituição de 10% de fresado asfáltico na mistura substituindo o material fino, isso representa 3% da substituição na mistura, observado na Tabela 22. No processo de fabricação dos elementos para drenagem superficial e segurança viária não ocorreu este fato, sendo todos os resultados apurados neste trabalho de pesquisa apresentaram redução do valor analisado.

Tabela 22 - Resultados de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos

% Substituição	0	3	10	20
$f_{ctm28}$ (MPa)	2,5	2,7	2,3	2,4

Fonte: Adaptado de Abdel-Mohti, Shen e Khodair (2015)

O módulo estático de elasticidade apurado nos concretos apresentou resultados menores quando é incorporado fresado asfáltico à mistura. Esse fato é verificado nas duas moldagens realizadas, tanto para a destinada a fabricação da meio fio e sarjeta quanto para a canaleta e valeta de drenagem. Na primeira moldagem, foi verificado a redução do módulo estático em 20,4% e na segunda no valor de 23,3%.

Pacheco *et al.* (2014) apresentam considerações quanto aos critérios de avaliação do módulo de elasticidade do concreto. No trabalho em questão é apontado que a obtenção deste valor é muito diferenciada e está sujeita aos procedimentos de aferição e que variações são observadas nos resultados interlaboratoriais brasileiros.

Para evitar erros nas avaliações de módulo, o ACI 318-14 (ACI, 2014 p. 315) permite que o valor apurado esteja compreendido entre 80% a 120% do valor de referencial. Considerando o cálculo de estimativa de módulo de elasticidade definido no item 8.2.8 da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para o concreto de  $f_{ck}=20\text{MPa}$ , tem valor de módulo de 30,05GPa e para o  $f_{ck}=25\text{MPa}$  valor de 33,60MPa.

$$E_{ci} = \alpha E. 5600. f_{ck} \quad (7)$$

Essa expressão é definida na norma NBR 6118 (ABNT, 2014) e pode ser utilizada para valores de  $f_{ck}$  compreendidos entre 20MPa e 50MPa. Ela define que o valor do módulo está relacionado com o tipo de rocha que é utilizada como agregado, no caso, foi considerado o valor de “ $\alpha E$ ” igual a 1,2 devido a rocha utilizada, a diábase.

Deste modo os valores do módulo de elasticidade para os elementos de segurança viária, fabricados em concreto de  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , podem, considerando as premissas da ACI 318-14, ter o valor apurado em laboratório entre 26,88GPa e 40,32 GPa. O valor médio apurado neste estudo para o concreto desenvolvido com agregados naturais (CR) é 35,15GPa, dentro dos limites definidos. Para o concreto com fresado asfáltico (CF-15) o valor é 23,62GPa, abaixo do valor mínimo.

No caso do módulo dos elementos destinados a drenagem superficial que têm  $f_{ck}=20\text{MPa}$ , os valores limites são 24,04GPa e 36,06GPa. Nas duas moldagens realizadas foram obtidos valores dentro dos limites estabelecidos, tanto para o concreto convencional (CCR0 e CCR00) quanto para o concreto com fresado asfáltico (CCF0-15 e CCF00-15) e os resultados são apresentados na Tabela 23.

Mesmo não atendendo aos limites de avaliação dos valores do módulo estático de elasticidade previstos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), a utilização deste material na confecção destes elementos de segurança viária e de drenagem superficial não é invalidada, apenas requer verificação pelo projetista responsável, tornando-as passíveis de utilização.

Tabela 23 - Resultados de módulo de elasticidade dos concretos destinados dos elementos de drenagem

Composição	CCR0	CCF0-15	CCR00	CCF00-15
Ec (GPa)	32,35	25,75	32,68	25,06

Fonte: Autoria própria.

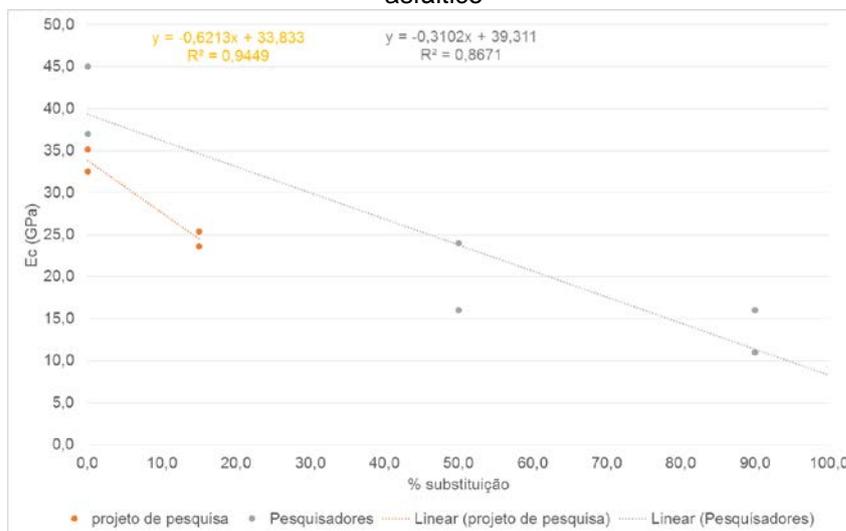
Considerando a correlação entre o valor apurado para o módulo de elasticidade do concreto observa-se nos resultados desta pesquisa que o seu comportamento apresenta maior linearidade que os resultados da pesquisa de Mathias, Sedran e De Larrard (2004), apresentados na Tabela 24. Essa linearidade pode ser verificada pelo valor de  $R^2$  que nesta pesquisa apresenta valor de 0,9449 e nas demais pesquisas o valor de 0,8671, conforme verificado no Gráfico 56.

Tabela 24 - Módulo de Elasticidade

% Substituição	0	50	90
Consumo de cimento de 330kg/m <sup>3</sup>	45	24	16
Consumo de cimento de 220kg/m <sup>3</sup>	37	16	11

Fonte: Adaptado de Mathias, Sedran e De Larrard (2004).

Gráfico 56 – Relação entre Módulo de elasticidade e porcentagem de substituição de fresado asfáltico



Fonte: Adaptado pelo autor.

A resistência ao impacto com peso arremessado no mesmo ponto reiteradas vezes, apresentou redução na sua resistência, conforme visto na Tabela 18. Possivelmente, este comportamento está relacionado com a minoração da resistência à compressão do concreto dos corpos de prova cilíndrico apuradas. A redução observada no ensaio de impacto apresenta redução de 6,8% quando é comparado o concreto com fresado asfáltico com o convencional.

Quanto a redução do resultado de resistência ao impacto foi verificada no concreto, destinado a fabricação de meios fio e sarjetas, que este apresentou resultado bastante próximo aos designados a canaletas e valetas. A diferença notada com o concreto feito para a fabricação de barreiras rígidas certamente tem seu resultado com valores mais expressivos devido a sua resistência à compressão maior e também ao fato de ter armadura inserida na peça analisada, conforme determina o projeto de referência para a confecção das barreiras.

A absorção de água por capilaridade e a ascensão capilar de água minoradas com a incorporação de fresado asfáltico à mistura traz ótimos resultados quanto à proteção da armadura que está inserida na barreira rígida, tendo em vista que a máxima ascensão de água no corpo de prova de concreto com fresado é de 1,64cm e no concreto convencional de 1,97cm. Nos elementos de drenagem os valores observados foram superiores aos da barreira, mas ainda o concreto com

fresado asfáltico apresentou resultados inferiores ao convencional, mas agora muito próximos.

Esse aumento na ascensão da água no corpo do concreto é muito relevante nestes elementos, principalmente a barreira rígida que contém aço em seu interior. Principalmente pelo motivo destes elementos ficam totalmente expostos às ações da natureza, ou seja, totalmente vulneráveis a ação das águas das chuvas que ocorrem em abundância nos verões.

Nos elementos de drenagem, mesmo não sendo armados, esta é uma característica importante para evitar a passagem de água pelo concreto, pois a ascensão máxima no concreto de referência é 3,87cm e com fresado 3,09cm. Mesmo assim, muito inferiores aos 8cm de espessura previsto no projeto padrão das canaletas e valetas.

É verificado na absorção de água por imersão que os resultados obtidos com o concreto com fresado asfálticos são muito melhores, pois conforme observado na ascensão capilar e na absorção por capilaridade apresentam relevante redução.

O que é interessante observar é que as relações que ocorrem nos resultados obtidos nos corpos de prova, variam entre fraca e moderada, apenas ocorrendo relação forte nos ensaios de ascensão capilar da água onde os valores obtidos no cálculo da correlação superam o valor absoluto de 0,81.

Comparando os resultados obtidos do ensaio em que foram submetidos os elementos de drenagem à flexão, foi possível notar que há redução na resistência à tração na flexão com a adição de fresado asfáltico na mistura. Na guia e no fundo da canaleta moldados, a queda de resistência tem a mesma ordem de grandeza.

No caso do meio fio e sarjeta, a redução da resistência à flexão é menor, possivelmente decorrente das características da seção transversal deste elemento de drenagem. A seção transversal da canaleta é um retângulo, já as seções

transversais da guia, meio fio e sarjeta são composições de trapézios e retângulos. Estes resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resistência à flexão dos elementos de drenagem superficial

Elemento	Concreto	Força ruptura (kN)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Varição percentual da resistência à tração na flexão
Guia	Convencional	57,04	8,54	-22,0%
	Fresado asfáltico	44,48	6,66	
Meio fio e sarjeta	Convencional	71,20	9,05	-15,9%
	Fresado asfáltico	59,88	7,61	
Canaleta e valeta	Convencional	29,84	13,99	-23,8%
	Fresado asfáltico	22,73	10,65	

Fonte: Autoria própria.

## 8. ESTIMATIVAS DE RESULTADOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Após os critérios técnicos atendidos, a avaliação do custo é um dos itens mais importantes para qualquer tomada de decisão, tanto o gestor público quanto privado. É necessário para que o tomador de decisão possa escolher o caminho ou opção desejada, sendo ele contratante, projetista, fiscalizador ou executor.

É claro que verificar o aspecto econômico é importante, mas não é o único aspecto relevante, pois há outros que complementam o rol de indicadores que permitam realizar uma melhor análise, como o financeiro, impactos ambientais, qualidade, disponibilidade, trabalhabilidade etc.

Para compor os preços dos materiais que sofreram alteração de quantidades quando incorporado fresado asfáltico no concreto, foi utilizado o custo divulgado pela Caixa Econômica Federal (CAIXA), o qual é baseado no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, SINAPI. Conforme o critério de definição de preços desta entidade, os agregados têm seu custo referenciado à sua fonte geradora e que devem ser transportados até o local de destino. Estes preços são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Preços praticados pela CAIXA/SINAPI (jan/17)

Produto	Código CAIXA/SINAPI	R\$/m <sup>3</sup>	R\$/t
Areia média na jazida	370	62,75	-
Pedra britada na pedreira	4721	48,28	-
Transporte em via pavimentada	72843	-	0,63

Fonte: Adaptado pelo autor de CAIXA (2017).

Foi considerado nesta consulta de preços na base de dados da CAIXA, a cidade de São Paulo, por ser o local mais próximo de Campinas. Essa importante cidade do interior do estado não é apresentada na base de dados disponibilizada pela CAIXA.

No custo do fresado asfáltico foi considerado o transporte deste material na distância média de 30km. Esse percurso considera a distância percorrida entre o local da execução dos serviços de fresagem ou do depósito provisório (local

próximo a extração onde o fresado asfáltico é temporariamente depositado) e o destino final. Para o agregado graúdo a distância percorrida média é de 50km e do agregado miúdo de 100km.

Com estas considerações, pode-se determinar o valor do custo de cada material que sofreu alterações na composição do concreto expresso em quilogramas, conforme Tabela 27.

Tabela 27 - Preços de materiais (jan/17)

Produto	R\$/kg
Areia média	0,108
Pedra britada	0,064
Fresado asfáltico	0,019

Fonte: Autoria própria.

No processo de conversão dos valores para quilogramas foram utilizadas as massas específicas definidas no programa de venda por peso, o qual foi instituído pelo Sindicato da Indústria de Mineração de Pedra Britada do Estado de São Paulo, Sindipedras. A massa específica apresentada neste programa para utilização junto ao mercado consumidor é de 14kN/m<sup>3</sup> para pedra 1 e de 15kN/m<sup>3</sup> para areia (SINDIPEDRAS, 2012). No caso do fresado asfáltico, o valor apurado nesta pesquisa no item 5.1.5.

Cuidar do meio ambiente não é moda, tendência política ou social, mas sim a necessidade urgente de agir com o simples propósito de manter a existência de alguns países, províncias, estados e cidades que ficam próximos da orla marinha e tendem a ter sérios problemas com a atual elevação do nível dos oceanos, bem como a alteração na velocidade da locomoção das massas de ar. Em outras regiões, há tragédias provocadas pelas mudanças dos ciclos das chuvas, da elevação da temperatura e da umidade do ar.

Os impactos negativos gerados ao meio ambiente acarretam consequências imediatas e futuras que incidem diretamente na sobrevivência de diversas espécies que constituem nossa flora e fauna do nosso planeta.

Procurar processos que reduzam a emissão de gases geradores do efeito estufa para a atmosfera é vital para conter o contínuo processo de elevação da temperatura global. Nos últimos séculos foram constatados substanciais aumentos na concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera terrestre o está gerando aumento na temperatura global, este fato impacta diretamente na vida de todo o planeta e em especial as calotas polares (MCBEAN *et al.*, 2001).

Outro valor importante associado a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera são os processos executados nas atividades necessárias para a extração ou fabricação dos materiais que constituem o concreto. Somente o Reino Unido gera anualmente quantia superior a 29 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, conforme Hammond e Jones, 2008.

Para avaliar a quantidade de CO<sub>2</sub> contida nos concretos, convencional e com fresado asfáltico, foram utilizados os índices apresentados por Costa (2012). Os fatores utilizados nos cálculos da emissão de CO<sub>2</sub> são apresentados na Tabela 28 e variam de acordo com o produto ou serviço executado.

Tabela 28 - Emissão de CO<sub>2</sub> por produto e serviço

Produto/Serviço	tCO <sub>2</sub> /t de produto
Agregado graúdo	0,0858
Agregado miúdo	0,0861
Transporte materiais em caminhões (30km ida e 30km volta)	0,0037

Fonte: Adaptado de COSTA, 2012

Os índices relacionados ao consumo de cimento e aos processos de fabricação do concreto não estão mencionados, devido ao fato que não houve variação na quantidade de cimento e no processo fabril, utilizados na confecção do concreto convencional e com a incorporação de fresado asfáltico.

É importante salientar que a avaliação da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida está diretamente associada ao processo e a metodologia utilizada na determinação dos índices de gás incorporados ao material ou serviços analisados (HAMMOND; JONES, 2008).

Na conferência realizada em Kyoto, no Japão, foi elaborado um documento que ficou conhecido como protocolo de Kyoto, onde foi estabelecido que os países desenvolvidos reduziriam as emissões dos gases do efeito estufa em 5,2% no período de 2008 a 2012. Na 17ª Conferência das Partes das Nações Unidas sobre o Clima (COP-17), realizada em Durban na África do Sul, as metas foram ampliadas para 18% até o ano de 2020. Essas reduções estão baseadas nas emissões ano de 1990, conforme UNITED NATIONS (2014).

Na conferência de Kyoto é instituído o mercado de créditos de carbono e para tanto estabelece algumas regras como a que prevê para os eventuais vendedores de créditos devem ser certificados para ter o direito de participar do comércio de créditos de carbono com os países com metas no protocolo.

A redução de geração CO<sub>2</sub> passa por trabalhar com diversos enfoques e não somente o técnico. Medidas político-econômicas com enfoque ambiental podem reduzir tais quantitativos. Algumas medidas foram adotadas na Europa, dentre elas a negociação de créditos de carbono que fazem uso de operadores financeiros como bancos e fundos que investem em ativos de carbono e ainda plataformas de negociação, conforme Fernández *et al.* (2015).

Como o olhar voltado a geração de renda, empresários veem oportunidade de converter a economia de geração CO<sub>2</sub> de seus processos em valores financeiros, através da negociação de créditos de carbono. Essa comercialização gera receita complementar, conhecida como renda “verde”, conforme menciona Antonio, 2012.

Com foco ambiental, esse incremento de recursos tem a finalidade de agregar valor ao negócio e como consequência, melhorar o desempenho econômico e financeiro. Essa comercialização tem objetivos monetários e é realizada seguindo um critério de relação muito simples, um crédito de carbono tem correspondência direta com uma tonelada de gás carbônico equivalente (tCO<sub>2e</sub>), conforme Nascimento (2012).

Segundo divulgação da empresa Investing.com o valor médio para o crédito carbono futuro – dez 16 (CFI2Z6) é de 6,50€/tCO<sub>2e</sub>, tendo como referência o valor de fechamento do dia 03 de novembro de 2016. (CRÉDITO, 2016)

Como o valor de fechamento do euro para a mesma data é 3,6012R\$/€, o valor do crédito de carbono no mercado futuro resulta no valor de 23,41R\$/tCO<sub>2e</sub>, ou 6,92US\$/tCO<sub>2e</sub> (BACEN, 2017).

Conforme Portal Brasil (2012) é verificado no Brasil há o total de 268 projetos destinados à comercialização no mercado de créditos de carbono. Essa totalidade de projetos correspondem a quantia de 5% do volume negociado do mercado mundial.

Considerando apenas os países que trabalham neste recente mercado de negócios financeiros, o Brasil, apesar de negociar um percentual pequeno no cenário internacional, ocupa a terceira posição da classificação mundial (PORTAL BRASIL, 2012).

Conforme Alves, Oliveira e Lopes (2013) são gerados pela indústria a quantidade anual aproximada de 35,5 bilhões de toneladas CO<sub>2</sub>. A emissão desse gás tem a capacidade de gerar no mercado de carbono o montante aproximado de US\$ 710,0 bilhões. Há possibilidade de comercializar parte deste montante avaliado no mercado financeiro no valor estimado de US\$ 117,8 bilhões. Esse valor representa aproximadamente 17% do total gerado anualmente no mundo.

### **8.1. Impactos da incorporação do fresado asfáltico no concreto**

Os impactos foram analisados para as duas composições de concretos desenvolvidos nesta pesquisa. A primeira composição da mistura é destinada a produção dos elementos de dos elementos de segurança viária e a segunda destinada a fabricação de elementos de drenagem superficial.

### 8.1.1. Elementos de segurança viária

O estudo realizado apresenta redução de custo devido à economia de consumo de agregados naturais e pela redução do transporte de material fresado para destinos fora da obra, considerando o aspecto econômico, no valor de R\$ 35,24/m<sup>3</sup>, conforme demonstrado na Tabela 29, quando comparado o concreto com referência é o concreto com fresado asfáltico. Considerando o valor médio do câmbio do dólar comercial para o mês de janeiro de 2017, referência destes preços, de 3,2034R\$/US\$ (BACEN, 2017), calcula-se que a economia é US\$11,00/m<sup>3</sup>.

Tabela 29 - Diferença de custo entre o concreto de referência e com fresado asfáltico

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CR4	280,0	838,6	1.118,6	0,0	160,9	2,1
CF5-15	280,0	670,7	950,7	335,6	160,9	2,1
Diferença	0,0	-167,9	-167,9	+335,6	0,0	0,0
Custo Unitário (R\$/kg)	-	0,108	0,064	0,019	-	-
Diferença (R\$)	-	-18,12	-10,74	-6,38	-	-
Diferença total (R\$)				35,24		
Diferença total (US\$)				11,00		

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valor do dólar em janeiro 2017 - 3,2034 R\$/US\$ (BACEN, 2017)

Da mesma maneira, quando comparamos os concretos de referência e o com fresado asfáltico em sua composição, é verificado a redução de emissão de CO<sub>2</sub> decorrente da substituição de agregados naturais por fresado asfáltico, além da redução do seu transporte para destinos fora do local de geração. Essa redução é no montante de 0,0301tCO<sub>2</sub>, conforme detalhado na Tabela 30, para cada metro cúbico de concreto gerado.

Tabela 30 - Diferença de emissão de CO<sub>2</sub> entre o concreto de referência e com fresado asfáltico

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CR4	280,0	838,6	1.118,6	0,0	160,9	2,1
CF5-15	280,0	670,7	950,7	335,6	160,9	2,1
Diferença	0,0	-167,9	-167,9	+335,6	0,0	0,0
Emissão tCO <sub>2</sub>	-	0,0861	0,0858	0,0037	-	-
Diferença tCO <sub>2</sub>	-	-0,0145	-0,0144	-0,0012	-	-

Fonte: Autoria própria.

Conforme Strachera Júnior (2008), cada residência popular construída no padrão da Companhia de Habitação do Paraná, com área em projeção de 40m<sup>2</sup> em alvenaria com dois quartos, emite cerca de 8,959 tCO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo esta unidade habitacional a mais construída no Estado do Paraná (cerca de 70%). A economia gerada de CO<sub>2</sub> ao executar um volume de 298m<sup>3</sup> de concreto com fresado asfáltico em sua composição destinado a confecção de barreira rígida em concreto, equivale à construção de uma unidade habitacional.

Considerando a comercialização de crédito de carbono futuro no valor de 23,41R\$/tCO<sub>2e</sub> aplicado sobre a redução de emissão de 0,0301tCO<sub>2</sub> para cada metro cúbico de concreto gerado com substituição de agregado natural por fresado asfáltico, implica no potencial de negociação de 0,70R\$/m<sup>3</sup> de concreto. Considerando o valor médio do câmbio do dólar comercial para o mês de dezembro de 2016, referência deste preço, de 3,3830R\$/US\$ (BACEN, 2017), calcula-se que a economia de 0,21US\$/m<sup>3</sup>.

### 8.1.2. Elementos de drenagem superficial

A composição apresentada com fresado asfáltico acarreta redução de custo devido a economia do consumo de agregados naturais e pela redução do transporte de material fresado para destinos fora da obra, considerando o aspecto econômico, no valor de 31,81R\$/m<sup>3</sup>, demonstrado na Tabela 31. Considerando o valor médio do câmbio do dólar comercial para o mês de janeiro de 2017, referência destes preços, de 3,2034R\$/US\$ (BACEN, 2017), calcula-se que a economia é 9,93US\$/m<sup>3</sup>.

Tabela 31 - Diferença de custo entre o concreto convencional e com fresado asfáltico por m<sup>3</sup>

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CC8	275	1174,2	706,80	0	137,5	2,75
CCF8-15	275	1061,01	496,59	323,4	137,5	2,75
Diferença	0,0	-113,19	-210,21	323,4	0,0	0,0
Custo Unitário (R\$/kg)	-	0,108	0,064	0,019	-	-
Diferença (R\$)	-	-12,22	-13,45	-6,14	-	-
Diferença total (R\$)			31,81			
Diferença total (US\$)			9,93			

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valor do dólar em janeiro 2017 - 3,2034 R\$/US\$ (BACEN, 2017)

Ao comparar o concreto de referência com o que contém fresado asfáltico em sua composição, é verificado a redução de emissão de CO<sub>2</sub> decorrente da substituição de agregados naturais por fresado asfáltico, além da redução do seu transporte para destinos fora do local de geração. Essa redução é no montante de 0,0290tCO<sub>2</sub>, conforme detalhado na Tabela 32, para cada metro cúbico de concreto gerado.

Tabela 32 - Redução de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de concreto gerado com fresado asfáltico

Traço (kg)	Cimento	Areia	Brita	Fresado	Água	Aditivo
CC8	275	1174,2	706,8	0	137,5	2,75
CCF8-15	275	1061,01	496,59	323,4	137,5	2,75
Diferença	0,0	-113,19	-210,21	323,4	0,0	0,0
Emissão tCO <sub>2</sub>	-	0,0861	0,0858	0,0037	-	-
Diferença tCO <sub>2</sub>	-	-0,0097	-0,0180	-0,0012	-	-

Fonte: Autoria própria.

Considerando a comercialização de crédito de carbono futuro no valor de 23,41R\$/tCO<sub>2e</sub>, aplicado sobre a redução de emissão de 0,0290tCO<sub>2</sub> para cada metro cúbico de concreto gerado com substituição de agregado natural por fresado asfáltico, implica no potencial de negociação de 0,69R\$/m<sup>3</sup> de concreto. Considerando o valor médio do câmbio do dólar comercial para o mês de dezembro de 2016, referência deste preço, de 3,3830R\$/US\$ (BACEN, 2017), calcula-se que a economia de 0,20US\$/m<sup>3</sup>.

Neste caso realizando a mesma consideração aplicada no concreto para barreira rígida utilizando os índices definidos por Strachera Júnior (2008), a

economia gerada de CO<sub>2</sub> ao executar um volume de 309m<sup>3</sup> de concreto com fresado asfáltico em sua composição, destinado a confecção de elementos de drenagem em concreto, equivale à construção de uma unidade habitacional de padrão popular em alvenaria com dois quartos com área em projeção de 40m<sup>2</sup>.

### 8.1.3. Elementos moldados em escala

Na geração de concreto com fresado asfáltico desenvolvidas neste estudo, há possibilidade de redução nos custos de produção do concreto, de redução da emissão de gases que geram o efeito estufa, negociação de créditos de carbono no mercado futuro e ainda, compensação ambiental referente a emissão de CO<sub>2</sub> para obras destinadas às camadas de baixa renda. Esses resultados apurados podem ser observados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resumo dos resultados apurados quanto aos aspectos econômicos, financeiros e ambientais

Item	Unidade	Concreto para elementos de segurança viária CF-15	Concreto para elementos de drenagem CCF-15
Redução de custo (jan 17)	R\$/m <sup>3</sup>	35,24	31,81
	US\$/m <sup>3</sup>	11,00	9,93
Comercialização de Crédito Carbono Futuro (dez 16)	R\$/m <sup>3</sup>	0,70	0,69
	US\$/m <sup>3</sup>	0,21	0,20
Redução emissão CO <sub>2</sub>	t/m <sup>3</sup>	0,0301	0,0290
Volume equivalente de concreto correspondente a emissão de CO <sub>2</sub> em residência padrão popular com 2 quartos com área 40m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	298	309

Fonte: Autoria própria.

Nota:

Valor do dólar em dezembro 2016 - 3,3830R\$/US\$ (BACEN, 2017)

Valor do dólar em janeiro 2017 - 3,2034 R\$/US\$ (BACEN, 2017)

É observado que nos resultados obtidos na Tabela 33, tanto para o concreto destinado a fabricação de elementos de segurança e drenagem superficial, apresentam resultados econômicos e ambientais não dispare, obviamente ligados a quantidade de substituição de agregados naturais por

materiais reciclados determinada na sua composição, no caso 15% de fresado asfáltico.

Quando o concreto convencional tem parte de seus agregados naturais substituídos pelo fresado asfáltico, sem sofrer nenhum tipo de tratamento complementar, é verificada redução no valor total de aquisição destes materiais. Essa diminuição nos custos de fabricação verificados totalizam a importância de 35,24R\$/m<sup>3</sup> (11,00 US\$/m<sup>3</sup>) para o concreto destinado aos elementos de segurança viária e de 31,81R\$/m<sup>3</sup> (9,93 US\$/m<sup>3</sup>) para os elementos de drenagem.

A substituição de agregados naturais por fresado asfáltico na fabricação de elementos de segurança viária proporciona a redução na emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera na quantidade de 0,0301t/m<sup>3</sup>, deste modo, para cada 1.000m<sup>3</sup> fabricados há redução da emissão de 30,1t de gases do efeito estufa.

Quando é analisado o concreto para elementos de drenagem superficial, a redução da emissão é de 0,0290t/m<sup>3</sup> quando ocorre a substituição de agregados naturais por fresado asfáltico. Fazendo uso do mesmo critério de cálculo das barreiras rígidas, conclui-se que para cada 1.000m<sup>3</sup> gerados desta mistura acarreta na diminuição na emissão de 29,0t de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Ao considerar a possibilidade de realizar a comercialização de créditos de carbono referente à redução da emissão de gases do efeito estufa, através da negociação na bolsa de valores no mercado futuro, é plausível agregar valor financeiro de 0,70R\$/m<sup>3</sup> (0,21 US\$/m<sup>3</sup>), quando da substituição do concreto convencional pelo que contém fresado asfáltico na sua composição no concreto destinado aos elementos de segurança viária e de 0,69R\$/m<sup>3</sup> (0,20 US\$/m<sup>3</sup>) para o concreto dos elementos de drenagem superficial.

Com o foco na quantidade emitida de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, no processo fabril, de concreto para barreiras rígidas é constatado que cada 298m<sup>3</sup> de concreto gerado com fresado asfáltico é reduzida a emissão equivalente de uma casa de padrão popular com dois quartos com área de 40m<sup>2</sup>. Do mesmo modo pode-se pensar na compensação da emissão destes gases com o foco de favorecer a

construção de moradias unifamiliares de menor renda. No caso dos elementos de drenagem superficial, a equivalência é de 309m<sup>3</sup> de concreto processado com fresado asfáltico para cada residência popular construída.

## **8.2. Simulações de emissão, compensação ambiental, redução custos e créditos de carbono**

O país constrói diversas obras viárias com recursos próprios ou através dos contratos de concessão. Foram escolhidas algumas destas obras aleatoriamente, pois destinam-se apenas a avaliar os impactos gerados se nestas obras fossem utilizados o concreto com fresado asfáltico, resíduo este removido do revestimento do pavimento existente local das obras.

Foram avaliadas algumas obras por este autor como a Rodovia dos Tamoios, SP 099, entre os km 11 e km 60 (Figura 54), Rodovia Anhanguera (SP 330) entre os km 174 e km 134 (Figura 56) e rodovia João Tosello, SP 147 (Figura 55), entre os km 64 e km 85.

Figura 54 - Rodovia SP 099, km 18, com barreiras rígidas para separação das pistas de tráfego



Fonte: BIANCHI, 2015

Figura 55 – Separação de pistas na Rodovia SP 147, km 85 com barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Figura 56 - Separação de pistas na Rodovia SP 330, km 139 com barreiras rígidas



Fonte: Autoria própria.

Cabe ressaltar que as quantidades de serviços executados foram avaliadas por este autor em função da falta de informações divulgadas e do livre acesso às planilhas de medição de serviços, tanto para os órgãos públicos quanto das concessionárias.

No caso da rodovia SP 099 foram avaliadas as quantidades executadas nas obras de drenagem superficial, como as canaletas, valetas, meios fios, guias e sarjetas, além das barreiras rígidas implantadas (elementos de segurança viária) no trecho compreendido, aproximadamente, entre os Km 11 ao km 60 (Tabela 34).

Tabela 34 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da SP 099

Item	Unidade	Total
Volume de concreto avaliado		
Drenagem superficial (1)	m <sup>3</sup>	16.000,00
Elemento de segurança (1)	m <sup>3</sup>	27.000,00
Redução da emissão CO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	1.276,70
Redução de custo (jan/17)	R\$	1.460.440,00
	US\$	455.903,10
Comercialização créditos de CO <sub>2</sub> (dez/16)	R\$	29.940,00
	US\$	8.850,13
Economia (redução de custo e comercialização de créditos de CO <sub>2</sub> )	R\$	1.490.380,00
	US\$	464.753,23
Extensão do trecho de rodovia analisado	km	49
Economia por km de trecho de rodovia	R\$/km	30.415,92
	US\$/km	9.484,76
Compensação ambiental (2)	Casas populares (40m <sup>2</sup> )	143

Fonte: Autoria própria

(1) Estimativa realizada pelo autor.

(2) Em função da emissão CO<sub>2</sub>.

Foi considerado nesta avaliação além da extensão do segmento rodoviário, a existência de dispositivos de acesso e retorno operacionais. Para simplificar o cálculo estimativo, arbitrou-se a extensão total de 60km (dispositivos e tronco) composto por duas barreiras rígidas com seção transversal que consome 0,45m<sup>3</sup>/m de concreto na sua fabricação. Deste modo, o volume total é de 27.000,00m<sup>3</sup> destinados aos elementos de segurança viária. Com relação ao sistema de drenagem superficial foi realizado a avaliação considerando a quantidade de 4,0 vezes a extensão do lote devido ao tipo de seção transversal da via, pois ela apresenta grandes cortes e aterros constituídos por diversas bermas (Figura 54). Considerou-se largura média da canaleta em 1,02m e espessura de 8cm. Esta avaliação totaliza o volume de 16.000,00m<sup>3</sup> de concreto para elementos de drenagem superficial.

Para a análise das quantidades estimadas pelo autor, para as rodovias SP 330 (Tabela 35) e SP 147 (Tabela 36) referem-se às obras realizadas recentemente com a implantação de barreiras rígidas para separação das pistas de

tráfego de sentidos opostos e ainda conta com sistema de drenagem superficial disposta entre elas.

Para avaliar as quantidades de concreto utilizadas nas obras do canteiro central da SP 330, foi considerado em toda a extensão (40km) a implantação de duas barreiras rígidas para proteção do canteiro central com um sistema de drenagem superficial entre elas, conforme Figura 55.

Para estimar o volume dos elementos de segurança foi considerada a existência de duas unidades de barreiras rígidas baixa com volume de concreto de 0,22m<sup>3</sup>/m em toda a extensão, o que totaliza a quantidade de 17.600,00m<sup>3</sup> de concreto. No elemento de drenagem foi considerada a existência de uma valeta e revestimento em concreto com seção média de 2,5m com espessura de 8cm. Este volume avaliado tem 8.000,00m<sup>3</sup> de concreto. Na Tabela 35 são considerados estas quantidades estimadas nos cálculos de avaliação dos impactos nesta obra.

Tabela 35 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da Rodovia SP 330

Item	Unidade	Total
Volume de concreto avaliado		
Drenagem superficial (1)	m <sup>3</sup>	8.000,00
Elemento de segurança (1)	m <sup>3</sup>	17.600,00
Redução da emissão CO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	761,76
Redução de custo (jan/17)	R\$	874.704,00
	US\$	273.054,88
Comercialização créditos de CO <sub>2</sub> (dez/16)	R\$	17.840,00
	US\$	5.167,01
Economia (redução de custo e comercialização de créditos de CO <sub>2</sub> )	R\$	892.544,00
	US\$	278.221,89
Extensão do trecho de rodovia analisado	km	40
Economia por km de trecho de rodovia	R\$/km	22.313,60
	US\$/km	6.955,55
Compensação ambiental (2)	Casas populares (40m <sup>2</sup> )	85

Fonte: Autoria própria.

(1) Estimativa realizada pelo autor.

(2) Em função da emissão CO<sub>2</sub>.

Para avaliar a quantidade de concreto utilizado na fabricação dos elementos de segurança e drenagem nas obras da SP 147, foi analisado o canteiro central na extensão (21km) composto por duas unidades de barreira simples baixa, separadas por um sistema de drenagem superficial, conforme observado na Figura 55.

Considerando que o consumo de concreto destinado a fabricação de cada barreira rígida baixa é  $0,22\text{m}^3/\text{m}$ , totaliza-se para toda a extensão o volume avaliado de  $9.240,00\text{m}^3$  para este elemento de segurança viária. No caso do elemento de drenagem superficial foi considerado a existência em toda a extensão de uma valeta de seção trapezoidal de dimensões aproximadas de 18cm de altura, 25cm de fundo e espessura de 8cm. Esse volume totaliza a quantidade estimada de  $1.344,00\text{m}^3$ . Na Tabela 36 são considerados estas quantidades estimadas nos cálculos de avaliação dos impactos nesta obra.

Tabela 36 - Resumo dos impactos do uso do concreto com fresado asfáltico em parte das obras da Rodovia SP 147

Item	Unidade	Total
Volume de concreto avaliado		
Drenagem superficial (1)	$\text{m}^3$	1.344,00
Elemento de segurança (1)	$\text{m}^3$	9.240,00
Redução da emissão $\text{CO}_2$	$\text{tCO}_2$	317,10
Redução de custo (jan/17)	R\$	368.370,24
	US\$	114.993,52
Comercialização créditos de $\text{CO}_2$ (dez/16)	R\$	7.395,36
	US\$	2.186,04
Economia (redução de custo e comercialização de créditos de $\text{CO}_2$ )	R\$	375.765,60
	US\$	117.179,56
Extensão do trecho de rodovia analisado	km	21
Economia por km de trecho de rodovia	R\$/km	17.893,60
	US\$/km	5.579,98
Compensação ambiental (2)	Casas populares ( $40\text{m}^2$ )	36

Fonte: Autoria própria.

(1) Estimativa realizada pelo autor.

(2) Em função da emissão  $\text{CO}_2$ .

Nestes casos pode-se avaliar que a quantidade não emitida de CO<sub>2</sub> é de 2.355,56t para a atmosfera que pode gerar o valor de R\$ 55.175,36 (US\$ 16.203,18) com a negociação de créditos de carbono. Aliado a redução de custo de materiais no valor de R\$ 2.703.514,24 (US\$ 843.951,50), poderia ser construído a quantia de 62 residências unifamiliares de padrão popular com área de 40m<sup>2</sup>, tomando como base o custo médio da construção do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, SINAPI para o estado de São Paulo (IBGE, 2017), no valor de 1.127,11R\$/m<sup>2</sup> (351,85 US\$/m<sup>2</sup>).

Na cidade de Campinas, cada unidade residencial familiar é composta em média por 3,08 pessoas (CAMPINAS, 2010) que leva em conta todos os tipos de habitação, faixa de renda e regiões deste município. Para melhor estimativa de população impactada, foi considerada a Unidade Territorial Básica 51, UTB 51, pois é constituída por diversos conjuntos habitacionais, foco da equivalência de construção abordada nesta avaliação.

A UTB 51 considerada neste estudo é constituída pelo Conjunto Habitacional Monsenhor Luís Fernando de Abreu, Conjunto Habitacional Dr. Antônio Mendonça de Barros, Conjunto Habitacional Rui Novaes, Conjunto Habitacional Santo Dias, Conjunto Habitacional Chico Mendes, Conjunto Habitacional Lech Walesa, Parque Vista Alegre, Jardim Guararapes, Jardim Acadêmico e Vila Todescan, os quais possuem população média por habitação de 3,36 pessoas. (CAMPINAS, 2010)

A substituição de material natural por fresado asfáltico no concreto destinado aos elementos analisados, poderia impactar diretamente na mudança de vida de 209 pessoas (Tabela 37) com a destinação da economia gerada para a construção de moradias.

Tabela 37 - Resumo dos impactos do concreto com fresado asfáltico nas obras analisadas

Item	Unidade	Total
Volume de concreto avaliado		
Drenagem superficial (1)	m <sup>3</sup>	25.344,00
Elemento de segurança (1)	m <sup>3</sup>	53.840,00
Redução da emissão CO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	2.355,56
Redução de custo (jan/17)	R\$	2.703.514,24
	US\$	843.951,50
Comercialização créditos de CO <sub>2</sub> (dez/17)	R\$	55.175,36
	US\$	16.309,60
Economia (redução de custo e comercialização de créditos de CO <sub>2</sub> )	R\$	2.758.689,60
	US\$	860.261,10
Extensão do trecho de rodovia analisado	Km	110
Economia por km de trecho de rodovia	R\$/km	25.079,00
	US\$/km	729,64
Compensação ambiental (2)	Casas populares (40m <sup>2</sup> )	264
Construção de casas populares de 40m <sup>2</sup> (3)	Unidade	62
População impactadas (3)	habitantes	209

Fonte: Autoria própria

(1) Estimativa realizada pelo autor.

(2) Em função da emissão CO<sub>2</sub>.

(3) Impacto gerado pela redução de custos e comercialização de créditos de carbono.

Tomando como base o total estimado de geração de fresado asfáltico no Brasil que é de 2.977.106t/ano pode-se calcular os impactos gerados com a utilização deste produto no concreto. Para determinar o volume de concreto divide-se o total gerado de fresado asfáltico pelo seu consumo médio em um metro cúbico de concreto, no caso, 329,5kg/m<sup>3</sup> (elementos de segurança e drenagem). Deste modo estima-se que pode ser gerado a quantia de 9.035.221m<sup>3</sup>/ano de concreto (Tabela 38).

Utilizando os dados já obtidos, pode-se estimar, conforme Tabela 38, que há possibilidade por ano de: reduzir custos no montante de R\$ 302.905.784,08 (US\$ 94.557.590,09); reduzir a emissão de gases do efeito estufa em 266.990,78tCO<sub>2</sub>; ter a possibilidade de comercializar estes gases não gerados no valor de R\$ 6.279.478,60 (US\$ 1.856.186,40); beneficiar, com o total de recursos gerados, uma população estimada de 23.043 habitantes.

Tabela 38 - Resumo dos impactos do concreto com fresado asfáltico considerando o uso do volume potencial gerado no Brasil

Item	Unidade	Total
Volume de concreto avaliado (1)	m <sup>3</sup>	9.035.221
Redução da emissão CO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	226.990,78
Redução de custo (jan/17)	R\$	302.905.784,08
	US\$	94.557.590,09
Comercialização créditos de CO <sub>2</sub> (dez/16)	R\$	6.279.478,60
	US\$	1.856.186,40
Economia (redução de custo e comercialização de créditos de CO <sub>2</sub> )	R\$	309.185.262,67
	US\$	96.413.776,49
Extensão do trecho de rodovia analisado	Km	196.898,50
Economia por km de trecho de rodovia	R\$/km	1.570,28
	US\$/km	489,66
Compensação ambiental (2)	Casas populares (40m <sup>2</sup> )	29.770
Construção de casas populares de 40m <sup>2</sup> (3)	Unidade	6.858
População impactadas (3)	habitantes	23.043

Fonte: Autoria própria

Nota: Utilizados índices médios dos elementos de segurança e drenagem superficial

(1) Estimativa realizada pelo autor.

(2) Em função da emissão CO<sub>2</sub>.

(3) Impacto gerado pela redução de custos e comercialização de créditos de carbono.

A quantidade de pessoas potencialmente atendidas nesta simulação corresponde à população do município de Santo Antônio da Posse que possui 22.597 habitantes, conforme IBGE, 2016. Esta cidade é integrante da região metropolitana de Campinas.

## 9. CUIDADOS – PONTOS DE ATENÇÃO

Para que se possa melhorar a qualidade e facilitar do manuseio e aplicação do fresado asfáltico na confecção de concreto, deve-se tomar alguns cuidados tanto na fase de remoção da camada asfáltica e estocagem deste resíduo da construção rodoviária.

Durante o processo de remoção da camada asfáltica existente, onde é gerado o fresado asfáltico, deve-se treinar e acompanhar as atividades de remoção da camada de revestimento betuminosa que gerará o fresado asfáltico de modo a minimizar a variação granulométrica.

Deve-se atentar no processo de geração do fresado asfáltico para materiais que não atendem aos interesses desse trabalho como as camadas de revestimentos asfálticos que apresentam teor de asfalto excessivo, pois podem alterar substancialmente a resistência do concreto em cimento Portland com fresado asfáltico gerado.

Outro ponto relevante é a manutenção da velocidade de operação no processo de fresagem, pois segundo Bonfim (2007) a granulometria do fresado asfáltico pode sofrer variações em função da velocidade de operação e da espessura do pavimento que está em processo de remoção.

A manutenção efetiva do equipamento de remoção (fresadora a frio), principalmente dos *bits* que fazem parte do cilindro de fresagem, melhoram a qualidade da distribuição granulométrica do fresado asfáltico gerado. A falha ou falta nestes elementos de impacto acarretam no aumento do diâmetro de parte dos grãos gerados de resíduo.

Se ocorrer a necessidade de estocagem do material, deve-se evitar grandes alturas nos depósitos, além de minimizar a circulação de veículos e máquinas sobre os estoques. Isso para que em função da temperatura gerada no ambiente, pela simples exposição ao sol, ocorra compactação desse material pelo seu peso próprio ou gerado pela ação direta dos automotores, alterando assim sua distribuição granulometria.

Deve-se também durante a execução dos concretos gerados, realizar controle tecnológico efetivo e frequente para verificar a manutenção das características definidas ao fresado asfáltico. Esse procedimento é fundamental para a garantia da qualidade final do produto gerado com fresado asfáltico, pois a alteração das características deste resíduo afetará diretamente os resultados finais do concreto gerado com este resíduo da construção.

## 10. CONCLUSÕES

Após realização de diversos experimentos, análise de seus resultados e comparação com outras pesquisas divulgadas no meio científico pode-se concluir que a inclusão de fresado asfáltico no concreto em cimento Portland acarreta diminuição das resistências mecânicas estudadas nesta pesquisa.

Após realizar os estudos de traço e a fabricação dos elementos de segurança viária e de drenagem superficial confeccionados, foi confirmada que a resistência mínima à compressão solicitada nas normas e especificações de referência foram atendidas, tanto para o DNIT quanto para o DER\_SP, órgãos públicos utilizados de referência. Estes solicitam resistências características diferenciadas para os concretos destinados aos elementos de segurança viária ( $f_{ck}=25\text{MPa}$ ) e de drenagem superficial ( $f_{ck}=20\text{MPa}$ ).

A redução da capacidade de resistir aos esforços é diminuída em função da característica do novo agregado que foi introduzido à mistura, o fresado asfáltico. Ele é constituído pela união de agregados finos com grãos pela cimentação do asfalto de petróleo e desta forma, fica mais frágil que o natural. Esse fato é observado pelo ensaio de resistência à abrasão, pois para o agregado natural é 17%, para o fresado asfáltico passa a 42%.

É observado nas seções rompidas dos corpos de prova, cilíndricos ou prismáticos que a porção graúda do fresado asfáltico é rompida durante o ensaio, contrariando a afirmativa de Huang, Shu e Li (2005) que afirmam que a ruptura ocorre na superfície gerada entre o filme de asfalto e a pasta de cimento.

É confirmado que com o aumento da quantidade de fresado asfáltico na mistura do concreto, as resistências mecânicas são reduzidas conforme pode-se observar na Tabela 14. Devido à redução dos resultados médios destas características, principalmente a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndrico aos 28 dias de idade, não foi possível substituir mais de 15% do peso dos agregados (graúdo e miúdo) sem obter resistências inferiores ao especificado pelos órgãos de referência (DNIT e DER-SP) para o traço estudado.

Conclui-se também que o concreto com fresado asfáltico continua aumentando sua resistência com a idade, fato constatado com as resistências obtidas com o concreto com 91 dias, mas com taxa de crescimento inferior ao verificado no concreto com agregados naturais. No concreto para os elementos de segurança viária apresentam evolução da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos da idade de 28 dias para 91 dias, de 3,8% para o concreto convencional e 2,2% para o concreto com fresado asfáltico. No caso dos elementos de drenagem superficial, há evolução no concreto convencional de 6,2% e de 4,0% para o concreto com fresado asfáltico na composição.

A absorção de água e ascensão capilar são muito beneficiadas com inclusão de fresado asfáltico, pois com sua incorporação no corpo moldado em concreto ocorre a diminuição da percolação da água, protegendo desta forma a armadura, no caso da barreira rígida. Este fato refere-se às características do fresado asfáltico que é originário de camadas betuminosas de revestimento dos pavimentos e que contém cimento asfáltico na sua composição. Este material cimentício tem propriedades hidrófuga que diminuem a permeabilidade da água. Essa característica pode ser verificada no ensaio de absorção de água realizada nos materiais, onde é verificado que o agregado natural (pedra britada) apresenta resultado de 0,75% enquanto o fresado asfáltico apresenta 0,48%, redução de 36%. Deste modo a inclusão de fresado ganhou de qualidade nesta importante característica do concreto.

Com a menor absorção de água e, portanto, com maior quantidade livre no concreto, foi observado que a trabalhabilidade é melhorada o que permite melhor acabamento e aplicação do concreto, verificado na execução das peças que contém resíduo na sua composição, contrariando Erdem e Blankson (2014) que afirmam que ocorre redução do abatimento com a inserção de fresado na mistura.

A substituição de parte dos agregados naturais por fresado asfáltico levou a economia de custos tornando o concreto com reciclado mais barato que o convencional, além de manter o resíduo gerado pela construção viária dentro do canteiro gerador. Cada 1.000m<sup>3</sup> de concreto para barreiras rígidas gera economia

de custo de R\$ 34.080,00 (US\$ 11.000,00) e para elementos de drenagem, R\$ 33.260,00 (US\$ 9.930,00).

Outro ponto relevante é a redução da emissão de gases do efeito estufa, calculado em toneladas de CO<sub>2</sub>, que deixam de ser emitidos para a atmosfera, pois cada 1.000m<sup>3</sup> de concreto para elementos de segurança apresenta redução de 34 tCO<sub>2</sub> e para o concreto gerado para elementos de drenagem superficial, traz redução de 29tCO<sub>2</sub>.

Essa redução pode compensar a emissão gerada na execução de casas para atendimento à população mais carente, ou ainda, ser comercializada no mercado de venda de créditos de carbono que pode gerar a cada 1.000m<sup>3</sup> o valor aproximado de R\$ 700,00 (US\$ 205,00).

A redução de custo gerada e a venda de crédito de carbono podem ser direcionadas para a construção de moradias populares. Na simulação realizada com o potencial uso do fresado asfáltico gerado anualmente no Brasil pode direcionar o dinheiro economizado com a redução de custo dos materiais e da comercialização de crédito de carbono, que totalizam o valor de R\$ 309.185.262,67 (US\$ 96.517.844,37), para a construção de aproximadamente 6.858 residências populares de 40m<sup>2</sup>, considerando o valor apresentado pela SINAPI, atendendo a uma população de 23.043 pessoas que considera a população da UTB 51 da cidade de Campinas.

A geração de 1.317m<sup>3</sup> de concreto com fresado asfáltico na composição, considerando o valor médio para a construção de elementos de segurança viária, e dos elementos de drenagem superficial, equivalem economicamente à construção de uma residência popular de 40m<sup>2</sup>.

Este estudo permite apontar mais esta utilização para este resíduo da construção, amplamente gerado nas obras da nossa malha viária, e direciona seu uso para a confecção do concreto que atende aos preceitos básicos da sustentabilidade, pois além de atender aos critérios técnicos, atende ao aspecto ambiental, social e econômico.

### **10.1. Sugestão de trabalhos futuros**

Sugere-se que seja estudado, para os concretos desenvolvidos com fresado asfáltico, a variação das resistências e comportamento em função da variação da temperatura ambiente, pois altera a fluência do concreto asfáltico que compõe o fresado, tendo em vista a grande amplitude térmica em nosso país e, ainda, a sensibilidade deste resíduo às oscilações de calor.

Estudar a influência do teor de asfalto na resistência do concreto com fresado asfáltico, pois o teor de asfalto no concreto asfáltico gerador do fresado pode impactar nos resultados físicos obtidos através dos ensaios laboratoriais e nas peças moldadas, alterando assim sua fluência.

Estudar a influência da idade do concreto asfáltico, gerador do fresado asfáltico, para observar qual sua influência sobre os resultados físicos obtidos devido à oxidação do cimento asfáltico de petróleo, além do comportamento do concreto com o fresado asfáltico com a evolução da sua idade para garantir que este resíduo não ofereça problemas o passar do tempo.

Estudar a influência do tipo de mistura asfáltica como misturas abertas e densas, utilizada nas camadas de revestimento das nossas vias, pois apresentam composições diferenciadas e que podem alterar os resultados quando incorporados na mistura do concreto de cimento Portland.

Estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental para a aplicação de concreto com fresado asfáltico na fabricação de mourões e esticadores para cerca em concreto.

Estudar a viabilidade do uso do concreto com fresado asfáltico com adição de fibras, diminuindo desta forma o tempo de execução de elementos viários fabricados com concreto armado.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-MOHTI; A. SHEN, H.; KHODAIR, Y. *Characteristics of self-consolidating concrete with RAP and SCM*. Construction and Building Materials, v. 102, n. 1, p. 564-573, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306395>>. Acesso em: 20 set. 2016.

ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014*. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

AECWEB. *Portal dos equipamentos: Trituradores são destaques na Rubble Master*. Disponível em: <[http://www.aecweb.com.br/bauma/trituradores\\_sao\\_destaquas\\_da\\_rubble\\_maste\\_r.asp](http://www.aecweb.com.br/bauma/trituradores_sao_destaquas_da_rubble_maste_r.asp)>. Acesso em: 30 abr. 2015.

ALVES, R.S.; OLIVEIRA, L. A.; LOPES, P. L. CRÉDITO DE CARBONO: *O mercado de crédito de carbono no Brasil*. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA PARA A COMPETIVIDADE, 2013, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/2018412.pdf>>. Acesso em: 11 set 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 328R-14)*. 2014.

ANDRADE, C. *Pesquisa CNT de Rodovias 2016: Relatório Gerencial*. Brasília: CNT:SEST:SENAT, 2016. 399 p. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20\(ALTA\).pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20(ALTA).pdf)>. Acesso em: 07 fev. 2017.

ANTONIO, A. C.; ANDRADE, B. C.; PAIVA, E. F.; FACCHINI, F. D.; SILVA, F. S.; SOUZA, G. H; MALDONADO, M. R.; MANTVANI, E. C. *Crédito de carbono: Investimento sustentável*. Disponível em: <[http://www.ceunsp.edu.br/revistas/alumni/revistaalumni/artigos/edEspecialMaio2012/vol2\\_noespecial\\_artigo\\_11.pdf](http://www.ceunsp.edu.br/revistas/alumni/revistaalumni/artigos/edEspecialMaio2012/vol2_noespecial_artigo_11.pdf)>. Acesso em: 05 maio 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10786: Concreto — Determinação do coeficiente de permeabilidade à água*. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº200)*. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland- Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16208*: Misturas asfálticas — Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733*: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739*: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: *Projeto de estruturas de concreto*. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522*: Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779*: Argamassa e concretos endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 6892-1*: Materiais metálicos — Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 51*: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 53*: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 7211: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

BACCHETTI, B. PIB da região supera o de 18 estados. *Correio Popular*, Campinas, 18 dez. 2015. Disponível em: <[http://correio.rac.com.br/\\_conteudo/2015/12/campinas\\_e\\_rmc/404770-pib-da-regiao-supera-o-de-18-estados.html](http://correio.rac.com.br/_conteudo/2015/12/campinas_e_rmc/404770-pib-da-regiao-supera-o-de-18-estados.html)>. Acesso em: 07 dez. 2016.

BALBO, J. T. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BACEN. Índices Econômicos: Dólar comercial. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

BIANCHI, R. *Rodovia dos Tamoios, SP-99*. 2015. Disponível em: <<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1542430&page=169>>. Acesso em: 10 out. 2015.

BIDA, S. M.; DANRAKA, M. N.; MA'ALI, J. M. *Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Replacement of Fine Aggregate in Concrete*. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 5, p. 65-67, 2016. Disponível em: <<https://www.ijsr.net/archive/v5i4/NOV162395.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal of Cleaner Production*, n. 66, p. 27-36, 2014.

BONFIM, V. *Fresagem de Pavimentos Asfálticos*, 3. ed. São Paulo: Editora Exceção, 2007.

BRACKEN COUNTY. *Subdivision Regulations: Appendix A*. Kentucky, 2016. Disponível em: <<http://www.brackencounty.ky.gov/Bracken+County+Planning+Commission.htm>>. Acesso em: 08 out. 2016.

BRASIL, Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em 14 abr. 2015.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONAMA, *Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002*. Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, p. 95-96.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONAMA, *Resolução nº 448, de 18 de janeiro de 2012*. Publicada no DOU nº 14, de 18/01/2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

BRASIL. José Florentino Caixeta. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte - Sistema de Gerência de Pavimento (sgp) (Org.). *Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais*: São Paulo. Brasília: Dnit, 2013. 32 p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/relatorio-sgp-2012-2013-sp.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2015.

BRASIL. Lei n. 7990, de 28 de dezembro de 1989. *Compensação financeira pelo resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica, de recursos minerais em seus respectivos territórios, plataforma continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva*. Brasília, DF: Dou, 29 dez. 1989. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L7990.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7990.htm)>. Acesso em: 25 set. 2015.

BRASIL. Portaria Ministério das Minas e Energia nº 503, de 28 de novembro de 1999. *O valor da taxa anual por hectare*. Brasília, DF: Dou, 29 dez. 1999. Disponível em: <[http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Port\\_503\\_99.htm](http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Port_503_99.htm)>. Acesso em: 25 set. 2015.

BRASIL. Senado Federal. *Projeto de Lei do Senado (PLS) nº 1, de 2011*. Brasília, DF: 01 dez. 2015. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/atividade/materia/getPDF.asp?t=184561&tp=1>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 40/2012. Grupo IRelator: Walton Alencar Rodrigues. Processo TC 013.341/2009-0. Ata 1/2012. Brasília, DF, Seção 18/01/2012b. Disponível em: <[http://portal3.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/noticias\\_arquivos/s/40-2012%20p.pdf](http://portal3.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/noticias_arquivos/s/40-2012%20p.pdf)>. Acesso em 20 nov. 2015.

BRASILEIRO, L. L. *Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural do Concreto Asfáltico*. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais, Programa de Pós-graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013. Disponível em: <<http://www.ufpi.br/subsiteFiles/materiais/arquivos/files/DISSERTACAO-Luzana.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2015.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – CAIXA. *Sistema de Preços, Custos e Índices*. Disponível em: <<https://www.sipci.caixa.gov.br/SIPCI/servlet/TopController>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

CAMPINAS. *Censo demográfico de 2010 – IBGE – Totalização dos domicílios: Divisão por unidades territoriais básicas (UTBs)*. Disponível em: <[http://www.campinas.sp.gov.br/governo/seplama/publicacoes/censo\\_demografico\\_2010\\_ibge\\_totalizacao\\_domicilios.php](http://www.campinas.sp.gov.br/governo/seplama/publicacoes/censo_demografico_2010_ibge_totalizacao_domicilios.php)>. Acesso em: 25 nov. 2016.

CAMPINAS. Lei Complementar nº 15, de 27 de dezembro de 2006. *Plano Diretor do Município de Campinas*. Disponível em: <[http://www.campinas.sp.gov.br/governo/seplama/plano-diretor-2006/doc/tr\\_pavim.pdf](http://www.campinas.sp.gov.br/governo/seplama/plano-diretor-2006/doc/tr_pavim.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2015.

CASTRO, L. N. *Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto*. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2003/teses/CASTRO\\_LN\\_03\\_t\\_M\\_geo.pdf](http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2003/teses/CASTRO_LN_03_t_M_geo.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2015.

CATERPILLAR PAVING. *Proyecto de repavimentación em Brasil. Carreteras Pan-Americanas*, Miami, Florida, E.U.A., n. 1, p. 44-46, nov. 2015.

CATHER, R.; FIGG, J. W.; MARSDEN, A. F.; O'BRIEN, T. P. *Improvements to the Figg Method for determining the air permeability of concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 36, n. 129, p. 241-245. Reino Unido, 1984, *apud* SOTO, N. T. A. Avaliação das propriedades do concreto de pós reativo: um estudo de durabilidade. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) – Departamento Acadêmico de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3855>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

CIBER. *Eficiência na fresagem a frio*. Disponível em: <[http://www.ciber.com.br/pt/noticias-y-eventos/press-releases/press\\_release\\_193.html](http://www.ciber.com.br/pt/noticias-y-eventos/press-releases/press_release_193.html)>. Acesso em: 30 abr. 2015.

CONSTRUCCION PAN-AMERICANA, *Rehabilitación de carreteras a menor costo*. 2010. Disponível em: <<http://www.cpampa.com/cpa/print/index.php?page=5106>>. Acesso em: 08 abr. 2015.

COSTA, B. L. C. *Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil*. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/1-mestrado/2-2012?Itemid=>](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/1-mestrado/2-2012?Itemid=>)>. Acesso em: 20 set. 2015.

CRÉDITO carbono futuro – dez16 (CFI2Z6). Investing, 2016. Disponível em: <<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

DAMHA, A. *Encalço*. Revista Grupo Encalço. São José do Rio Preto, 1996.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed, 2006, *apud* FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. [da]. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Person (r). Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, 2009. Disponível em: <<http://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852/3156>>. Acesso em: 15 out. 2016.

DEARO, G. *As 20 maiores malhas rodoviárias do mundo*. Revista Exame: Exame.com, São Paulo, p.1-1, 27 nov. 2013. Mundo. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br//mundo/album-de-fotos/as-20-maiores-malhas-rodoviarias-do-mundo/lista>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

DELWAR, M., FAHMY, M., RAMZI, T. *Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete*. Materials Journal, v. 94, n.3 , p. 251-256 , 1997. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/i/306.aspx>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *PP-DE-H07/003*: Sarjetas e canaletas de plataforma. DER-SP, [s.d.]a. 1 p. Disponível em: <[http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas\\_tecnicas.aspx](http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas_tecnicas.aspx)>. Acesso em: 10 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *PP-DE-H00/018-A*: Meio-Fio, Sarjetas e Sarjetões. DER-SP, [s.d.]b. 1 p. Disponível em: <[http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas\\_tecnicas.aspx](http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas_tecnicas.aspx)>. Acesso em: 10 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Estatística de tráfego: Volume diário médio de tráfego (VDM)*. 2016. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Acessos/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>>. Acesso em: 20 maio 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *ET-DE-C00/007-A*: Dispositivos de Proteção. São Paulo: DER-SP, 2006a. 5 p. Disponível em: <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-C00-007\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-C00-007_A.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *ET-DE-H00/018-A*: Meios-fios, Sarjetas e Sarjetões. Drenagem. São Paulo: DER-SP, 2006d. 5 p. Disponível em: <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-H00-018\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-H00-018_A.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *ET-DE-P00/038-A*: Fresagem de Pavimento Asfáltico. São Paulo: DER-SP, 2006b. 6 p. Disponível em: <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-038\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-038_A.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *IP-DE-P00/001-A: Fresagem de Pavimento Asfáltico*. São Paulo: DER-SP, 2006c. 53 p. Disponível em: <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-001\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Malha Rodoviária do Estado de São Paulo*, 2015. Disponível em: <[http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/rodovias\\_vicinas.aspx](http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/rodovias_vicinas.aspx)>. Acesso em: 10 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinas*. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/Website/Arquivos/MALHARODOVIARIA/malhaRod2010.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *PP-DE-L03/014-A: Barreira rígida simples baixa – Formas e armação*. DER-SP, [s.d.].c. 1p. Disponível em: <[http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas\\_tecnicas.aspx](http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/normas_tecnicas.aspx)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *Album de projetos-tipo de dispositivos de drenagem*. Brasília, 2006d. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/..%5Carquivos\\_internet%5Cipr%5Cipr\\_new%5Cmanuais%5Calbum\\_proj\\_tipos\\_disp\\_dren\\_versao\\_14.02.2007.pdf](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5Calbum_proj_tipos_disp_dren_versao_14.02.2007.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *DNIT 018/2006 – ES: Drenagem – Sarjetas e valetas - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006a. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT018\\_2006\\_ES.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT018_2006_ES.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *DNIT 020/2006 – ES: Drenagem - Meios-fios e guias - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT020\\_2006\\_ES.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT020_2006_ES.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *DNIT 109/2009 – PRO: Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário - Projeto de barreiras de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2009a. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT109\\_2009\\_PRO.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT109_2009_PRO.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *DNIT 110/2009-ES: Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário - Execução de barreiras de concreto - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2009b. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT110\\_2009\\_ES.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT110_2009_ES.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *DNIT 159/2011-ES: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT110\\_2009\\_ES.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT110_2009_ES.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *Relatório de Gestão Temático: Ações 2014*. Diretoria de Planejamento e Pesquisa-DPP. Coordenação-Geral de Planejamento e Programação de Investimentos – CGPLAN/DPP. p.20. Brasília, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *Sistema de Custos Rodoviários: Resumo dos Custos de Referência SICRO2*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sudeste/sao-paulo/2016/julho/sao-paulo-julho-2016>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Informe Mineral: 2º/2015*. Julho – Dezembro 2015. ISSN807-0388. Brasília, jun 2016. Disponível em: <<file:///C:/Users/vapir/Desktop/Informe%20Mineral%202015.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2016.

DIAS, P. S.; PINTO, I. E.; COSTA, C. *Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argilo siltoso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis*. In: 44ª Reunião Anual de Pavimentação e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2015, Foz do Iguaçu. Disponível em: <[http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal\\_143.pdf](http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_143.pdf)>. Acesso em: 01 set. 2016.

ERDEM, S.; BLANKSON, M. A. *Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 264, n. 15, p. 403-410, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389413008911>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

EUROPEAN CONCRETE PAVING ASSOCIATION. *Concrete Safety Barriers: A Safe and Sustainable choice*. 2012. Disponível em: <<http://www.righttoride.co.uk/virtuallibrary/barriers/eupave-concrete-safety-barriers.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book*. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/19.cfm>>. Acesso em: 31 mar. 2015.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Safety-shape Median Barrier: SGM11 a-b*. 2005. Disponível em: <<http://mwrsf-qa.unl.edu/attachments/eb0fee5b04e8b243fe01dbcae064dfc6.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

FERNANDES JÚNIOR, A. et al. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGI-RSU*. Campinas: [s.i.], 2012. 80 p. Disponível em: <[http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/diagnostico\\_pgi\\_rsu\\_campinas.pdf](http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/diagnostico_pgi_rsu_campinas.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2015.

FERNÁNDEZ, Y.F.; LÓPEZ, M.A.F.; HERNÁNDEZ, D.G.; BLANCO, B.O. *El efecto regulador de los Planes Nacionales de Asignación sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>*. Revista de Economía Mundial 40, 2015, 47-66. Disponível em: <<http://www.sem-wes.org/sites/default/files/revistas/05%20OImedillas%20REM%2040.pdf>>. Acesso em 07 set 2016.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. [da]. *Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Person (r)*. Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, 2009. Disponível em: <<http://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852/3156>>. Acesso em: 15 out. 2016.

FREIRE, J. F.; GÓIS, T. S.; DOMINICINI, W. K.; TEIXEIRA, J. E. S. L. *O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo*. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 28º, 2014, Curitiba. **Anais...**. Curitiba: ANPET, 2014. p. 1 - 26. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/xxviii anpet/anais/documents/AC401.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

GRASS, P. T. *Manual de Asfalto*. Lexington, KY, E.U.A: Instituto do Asfalto, 2002. 599 p. (Manual nº 4 (MS-4))

HAMMOND, G.P.; JONES, C.I. *Embodied energy and carbon in construction materials*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy 161. May 2008 p. 87-98, 2008. Disponível em: <[http://opus.bath.ac.uk/12382/1/Hammond\\_%26\\_Jones\\_Embodied\\_energy\\_%26\\_carbon\\_Proc\\_ICE-Energy\\_2008\\_161\(2\)\\_87-98.pdf](http://opus.bath.ac.uk/12382/1/Hammond_%26_Jones_Embodied_energy_%26_carbon_Proc_ICE-Energy_2008_161(2)_87-98.pdf)>. Acesso em: 03 maio 2016.

HASSAN, K. E.; BROOKS, J. J; ERDMAN, M. *The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete*. In: Waste Materials in Construction Wascon 2000 — Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England, v. 1, p. 121-128, 2000.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: PINI, Brasília: SENAI, 1992.

HOLTZ, K.; EIGHMY, T. T. *Scanning European Advances in The Use of Recycled Materials in Highway Construction*. 2000. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/00julaug/recycscan.cfm>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

HORVATH, A. Construction materials and the environment. Annual Review of Environment and Resources, v29, p. 181-204, 2004.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 10, p. 2008-2013, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605001390>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Estimativa da População Residente no Brasil e Unidades da Federação: com data de referência em 1º de julho de 2014*. 2014. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2014/estimativa\\_dou\\_2014.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2014/estimativa_dou_2014.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Estimativa da População Residente no Brasil e Unidades da Federação: com data de referência em 1º de julho de 2016*. 2016. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2016/estimativa\\_dou\\_2016\\_20160913.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_dou_2016_20160913.pdf)>. Acesso em: 11 dez. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI: janeiro 2017*. 2017. Disponível em: <[http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/242/ind\\_sinapi\\_2017\\_jan.pdf](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/242/ind_sinapi_2017_jan.pdf)>. Acesso em: 7 fev. 2017.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; KHODAIR, Y.; PAIBANDLA, V. C. *Fresh, Mechanical, and Durability Characteristics of Self-Consolidating Concrete Incorporating Recycled Asphalt Pavements*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 4, p. 668-675, 2014.

IMB Indústria Metalúrgica Ltda. *Extrusora de Perfis de Concreto*: catálogo. Campina Grande do Sul, 2015. 23 p.

IRONMART. *Used Recycling & Forestry Equipment: Doppstadt SM-720k*. Disponível em: <[http://m.ironmart.com/equipment\\_details.aspx?eid=bOAa9tHtv5E%3D](http://m.ironmart.com/equipment_details.aspx?eid=bOAa9tHtv5E%3D)>. Acesso em: 30 abr. 2015.

JAMES INSTRUMENTS INC. *C-P-6000, C-P-6050 Poroscope™: Operator's Manual*. 2012.

LAKE OSWEGO. Standard curb and gutter detail: S2-02. Oregon. 2012. Disponível em: <<https://www.ci.oswego.or.us/sites/default/files/fileattachments/publicworks/webpage/19669/s2-02.pdf?t=1476990322160>>. Acesso em: 08 out. 2016.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em:< [http://www.lume.ufrgs.br/bitstream\\_id/45864/000292768.pdf?locale=pt\\_BR](http://www.lume.ufrgs.br/bitstream_id/45864/000292768.pdf?locale=pt_BR)>. Acesso em: 15 out. 2015.

LEVY, S. M.; Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LISBOA, V. *Associação pede isenção de ICMS no Rio para materiais de construção reciclados*. Agencia Brasil – EBC. Rio de Janeiro, 04 mar. 2015. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-03/associacao-pede-isencao-de-icms-no-rio-para-materiais-de-construcao>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

MANITOBA. *Specifications for concrete curbing*. 2013. Disponível em:< <https://www.gov.mb.ca/mit/contracts/pdf/manual/860i.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.

MARTINS, I. R. de F. *Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 149 p., 2005.

MATHIAS, V.; SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads. In International RILEM Conference on the Use of Recycled in Buildings and Structures, 1. 2004, Barcelona, Spain. p. 66-75. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=nZVJXxFJN\\_oC&pg=PA66&lpg=PA66&dq=RECYCLING+RECLAIMED+ASPHALT+PAVEMENT+IN+CONCRETE+ROADS+Vincent+Mathias+\(1\),+Thierry+Sedran+\(1\)+and+Fran%C3%A7ois+de+Larrard+\(1\)&source=bl&ots=tjCylKlodi&sig=xDpaVD5dlmNlrZXgf\\_9vWIUncWM&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj3zuL32dDPAhXJkZAKHaW7AkgQ6AEIlzAB#v=onepage&q=RECYCLING%20RECLAIMED%20ASPHALT%20PAVEMENT%20IN%20CONCRETE%20ROADS%20Vincent%20Mathias%20\(1\)%20Thierry%20Sedran%20\(1\)%20and%20Fran%C3%A7ois%20de%20Larrard%20\(1\)&f=false](https://books.google.com.br/books?id=nZVJXxFJN_oC&pg=PA66&lpg=PA66&dq=RECYCLING+RECLAIMED+ASPHALT+PAVEMENT+IN+CONCRETE+ROADS+Vincent+Mathias+(1),+Thierry+Sedran+(1)+and+Fran%C3%A7ois+de+Larrard+(1)&source=bl&ots=tjCylKlodi&sig=xDpaVD5dlmNlrZXgf_9vWIUncWM&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj3zuL32dDPAhXJkZAKHaW7AkgQ6AEIlzAB#v=onepage&q=RECYCLING%20RECLAIMED%20ASPHALT%20PAVEMENT%20IN%20CONCRETE%20ROADS%20Vincent%20Mathias%20(1)%20Thierry%20Sedran%20(1)%20and%20Fran%C3%A7ois%20de%20Larrard%20(1)&f=false)>. Acesso em 25 jul. 2016.

MCBEAN, G. ; ALEKSEEV, G.; CHEN, D.; FØRLAND, E.; FYFE, J.; GROISMAN, P. Y.; KING, R.; MELLING, H.; VOSE, R.; WHITFIELD, P. H.. *Artic Climate: Past and Present*. Artic Climate Impact Assessment. Cambridge: C. Symon, L. Arris and B. Heal Ed., Cambridge University Press, p.21-60, 2001. Disponível em:< [http://www.acia.uaf.edu/PDFs/ACIA\\_Science\\_Chapters\\_Final/ACIA\\_Ch02\\_Final.pdf](http://www.acia.uaf.edu/PDFs/ACIA_Science_Chapters_Final/ACIA_Ch02_Final.pdf)>. Acesso em 04 set 2016.

MIRANDA, H. S. *Curso de Direito Administrativo*, 3ª ed. Brasília: Senado Federal, 2005.

MOREIRA, J.P.V., PEREIRA, P., CORREIA, A.G. *Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento*. IV Congresso Rodoviário Português – Abril 2006. Disponível em: <[http://www.crp.pt/docs/A18S104-6\\_2\\_JoaoPedroMoreira.pdf](http://www.crp.pt/docs/A18S104-6_2_JoaoPedroMoreira.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2015.

NAPA, National Asphalt Pavement Association. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014*. 2015a. Disponível em: <[http://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2014\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Final.pdf](http://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2014_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2015.

NAPA, National Asphalt Pavement Association. *Asphalt Pavement Mix Production Survey: Reclaimed Asphalt Pavement, Reclaimed Asphalt Shingles, Warm-mix Asphalt Usage: 2009-2010*. 2011. Disponível em: <[http://www.asphaltpavement.org/images/stories/is-138\\_rap\\_ras\\_wma\\_survey\\_2009\\_2010.pdf](http://www.asphaltpavement.org/images/stories/is-138_rap_ras_wma_survey_2009_2010.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2015.

NAPA, National Asphalt Pavement Association. *Recycling*. 2015b. Disponível em: <[http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=25&Itemid=45](http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=45)>. Acesso em: 20 nov. 2015.

NASCIMENTO, L. F. *Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. Disponível em: [http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Livrotexto\\_Gestao\\_Ambienta1\\_Sustentabilidade2.pdf](http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Livrotexto_Gestao_Ambienta1_Sustentabilidade2.pdf). Acesso em: 05 maio 2016.

NETO, J.P.M., *Uso De Material Fresado de CBUQ Em Revestimentos Primários*. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/4encontroTecnico/ApresentacaoMaterialFresado.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

O GLOBO, *Washington Luiz inaugura a primeira rodovia asfaltada do Brasil*. Geral, p.1, 25 ago. 1928. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/rio-de-historias/washington-luis-inaugura-primeira-rodovia-asfaltada-do-brasil-8849272#>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. *Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto*. In: Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 56º, 2014, Belém. Anais... CBC2014. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2016.

PAIVA, P. A. de; RIBEIRO, M. S. *A reciclagem na construção civil: como economia de custos*. REA - Revista Eletrônica de Administração, Franca, v. 4, n. 1, p.1-16, 1 jul. 2005. Semestral. Disponível em: <<http://periodicos.unifacef.com.br/index.php/rea/article/view/185>>. Acesso em: 10 out. 2015.

PEDÁGIO Itupeva. In: Google Earth. 2016. *Pedágio Itupeva*. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/search/pedagio+itupeva/@-22.9497135,-47.1973416,42115m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 06 maio 2016.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA, *Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs)*. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap#>>. Acesso em 29 mar. 2015.

PINTO, C.S. *Reutilização de Material Asfáltico Fresado: Avaliação da Potencialidade de Utilização em Aterros Rodoviários*. TCC – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26025/000754983.pdf?sequence=1>>. Acesso em 30 mar. 2015.

PORTAL BRASIL. Meio Ambiente: *Entenda como funciona o mercado de crédito de carbono*. 2012. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acesso em: 08 ago 2016.

QUEENSLAND. Department of Transport and Main Roads. *Single slope concrete barrier: Precast Concrete Barrier fabrication details drawing details drawing 1 and 2*. Austrália, 2009. Disponível em: <file:///C:/Users/vapir/Desktop/SD1458\_1.pdf >. Acesso em: 20 jul. 2016.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. *Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil*. Ambiente Construído: [on line], Porto Alegre, v. 14, n. 1, p.99-111, mar. 2014. Trimestral. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v14n1/v14n1a09.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015

SACHET, T. *Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2012. 186p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-18062013-153946/pt-br.php>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

SCREMIN, L. B.; CASTILHOS JUNIOR, A, B.; ROCHA, J. C. *Sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos de construção e demolição para municípios de pequeno porte*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s.l.], v. 19, n. 2, p.203-206, 2014. Trimestral. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s1413-41522014000200011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v19n2/1413-4152-esa-19-02-00203.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

SILVA, D. C. *Mundomoto Tristeza – O Autódromo de Jacarepaguá precisa viver*. Disponível em: <<http://www.mundomoto.esp.br/?p=41044>>. Acesso em: 29 mar. 2015.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO DE PEDRA BRITADA DO ESTADO DE SÃO PAULO - SINDIPEDRA (São Paulo) (Org.). PVP – *Programa de venda a peso*. 2012. Disponível em: <<http://www.sindipedras.org.br/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

SOLANKI, P., DASH, B. Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete. In: *Word of Coal Ash (WOCA)*, 2015, Nashville. Disponível em: < <http://www.flyash.info/2015/055-solanki-2015.pdf> >. Acesso em: 26 jul. 2016.

STACHERA JÚNIOR, T. *Avaliação de emissões de CO2 na construção civil: Um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. Anais... .Rio de Janeiro: Enegep, 2008. p. 1 - 13. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008\\_TN\\_STO\\_090\\_554\\_12351.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_090_554_12351.pdf)> . Acesso em: 15 dez. 2015.

TENÓRIO, J. J. L.; GOMES, P. C. C.; RODRIGUES, C. C.; ALENCAR, T. F. F. *Concrete produced with recycled aggregates*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 5, n. 5, p.692-701, out. 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s1983-41952012000500006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952012000500006&lang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000500006&lang=pt)>. Acesso em: 08 set. 2015.

UNIFRESA. *Bob Cat Equipada com Vassoura*. Disponível em: < <http://unifresa.com.br/bob-cat?show=slide>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

UNITED NATIONS. Framework Convention on Climate Change: *Kyoto Protocol*. 2014. Disponível em:<[http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php)>. Acesso em: 14 set 2016.

VIAPAR, Faixa de Domínio. Disponível em: < <http://www.viapar.com.br/vocedominio> >. Acesso em: 21 mar. 2015.

WEDLER, B.; HUMMEL A. Trümmerverwertung und ausbau von brandruinen. Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946. apud LEVY, S. M.; Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

WIRTGEN GMBH, *Wirtgen cold milling manual*. Windhagen-Alemanha, 2013. Disponível em: < [http://media.wirtgen-group.com/media/02\\_wirtgen/infomaterial\\_1/kaltfr\\_sen/kaltfraesen\\_technologie/kaltfrsenhandbuch\\_technologieundanwendung/BR\\_Handbuch\\_Kaltfraesen\\_EN.pdf](http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltfr_sen/kaltfraesen_technologie/kaltfrsenhandbuch_technologieundanwendung/BR_Handbuch_Kaltfraesen_EN.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2015.

WOODHEAD, H. (dir) *A elevação do espírito: A Pérsia em seu auge; O desabrochar helênico; A aurora romana; A luz do oriente*. Rio de Janeiro: Abril Livros, 1991a.

WOODHEAD, H. (dir) *Império em ascensão: A odisséia de Alexandre; Esplendor da Roma imperial; A busca do poder no Oriente; O florescer da China*. Rio de Janeiro: Abril Livros, 1991b.