

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação De Mestrado

Gildeci Souza de Aguiar

**BLOCOS INTERTRAVADOS EM CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO À
QUENTE - CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA**

**Belo Horizonte
Agosto de 2016**

Gildecy Souza de Aguiar

**BLOCOS INTERTRAVADOS EM CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO À
QUENTE – CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Flávio Renato de Góes Padula

**Belo Horizonte
Agosto de 2016**

A283b Aguilar, Gildeci Souza de.
Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente :
contribuição para o estudo de viabilidade técnica / Gildeci Souza de
Aguilar. - 2016.
143 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –

Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Bibliografia.

1. Asfalto - reciclagem. 2. Fresagem. 3. Concreto asfáltico. 4. Pisos.
5. Resíduos. I. Padula, Flávio Renato de Góes. II. Título.

CDD: 620.196



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

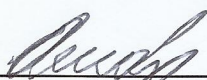
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente – Contribuição para o estudo de viabilidade técnica”

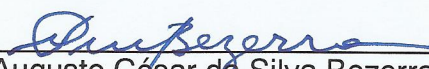
Autor: Gildeci Souza de Aguiar

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula


A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 24 de Agosto de 2016.

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho a Deus e ao nosso senhor Jesus Cristo por estarem sempre me orientando a seguir no melhor caminho, aos meus Pais e à Débora, por estarem sempre presentes em minha vida e nos momentos em que eu mais preciso deles, principalmente. Tenho certeza que estão muito orgulhosos de mim, por isso esta grande conquista também é deles, os quais merecem todo o meu amor, respeito e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por todas as maravilhas que tem me proporcionado, tanto na vida profissional quanto na pessoal, e em especial por ter me guiado na conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, José e Maria que com apoio, humildade, paciência, amor e criação me ajudaram muito na história da minha vida.

Agradeço a Débora por estar sempre ao meu lado, me apoiando nas conquistas e fazendo parte da minha história de vida.

Agradeço aos meus irmãos e familiares por estarem presentes em minha vida.

Ao Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula por ter acreditado na minha capacidade para desenvolver o tema proposto deste trabalho e ajudado a concluir esta obra. E ainda, por sua compreensão, visão crítica e bom senso no decorrer da execução este trabalho.

A todos os professores do CEFET/MG pelos anos de convivência, desde a fase de aluno especial até entrar como aluno regular, em especial ao Prof. Dr. Augusto Bezerra pela paciência, pelo precioso tempo e pelas dicas e ensinamentos.

Aos amigos da CEMIG pelas experiências adquiridas ao longo do desenvolvimento de minhas atividades profissionais e acadêmicas e em especial aos gerentes Eduardo Raposo e Walles Pereira que incentivaram esta busca pelo conhecimento.

A todos os amigos profissionais que participaram direta ou indiretamente na pesquisa, bem como o apoio do DNIT/SoloCap, os quais fizeram parte deste trabalho e enriqueceram o conteúdo apresentado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Mestrado de Eng.de Materiais, laboratórios de transporte e pessoal de escritório pelo trabalho eficiente no apoio às atividades do curso, em especial à Amanda, Prof. Mateus, Adilson.

A Késsia e professora Patrícia Patrício do laboratório de química, que realizaram alguns ensaios e me auxiliaram na interpretação dos resultados e que muito enriqueceram o conteúdo do trabalho.

Ao Bruno do laboratório de Materiais que disponibilizou os equipamentos e gerou as imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura e contribuiu de forma significativa no contexto deste trabalho.

“Para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento...”

Ecle 3

RESUMO

O trabalho busca contribuir para o estudo de viabilidade técnica do reuso do Concreto Asfáltico Fresado - CAF, proveniente das atividades de manutenção da pavimentação asfáltica, na confecção de Piso Asfáltico Reciclado (PAR). O CAF foi caracterizado fisicamente e por Termogravimetria (TGA) e posteriormente, definidas as propriedades mecânicas da mistura asfáltica produzida com 100% de fresado. Foram moldados corpos de prova pela metodologia Marshall para ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, absorção de água, ensaio cântabro, abrasão profunda e módulo de resiliência. A Resistência à compressão apresentou valores entre 9,66 e 14,06MPa. O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral mostrou valores entre 2,21 e 3,77MPa. Os elementos apresentaram baixa absorção de água. A perda de material no ensaio Cântabro ficou abaixo de 25%, atendendo aos requisitos da norma DNER-ES 386/99 e com boa resistência à abrasão profunda, quando comparados a elementos pré-moldados de concreto com cimento Portland. O resíduo estudado apresenta potencial para ser utilizado como elemento de piso intertravado para execução de ciclovias, praças e outros locais de baixa solicitação de carga, apresentando conjunto de características mecânicas próximas às mínimas exigidas em normas internacionais para este tipo de aplicação.

Palavras-chave: Reciclagem a quente; Concreto Asfáltico Fresado; Pisos Asfálticos; Pisos intertravados.

ABSTRACT

The work seeks to contribute to the technical feasibility study in the reuse of Concrete Asphalt Milling - CAF, obtained through asphalt paving maintenance activities, in manufacturing Recycled Asphalt Floor (PAR). The CAF was physically and thermogravimetry (TGA) characterized and subsequently, it was defined the mechanical properties of the asphalt mixture produced with 100% of milled asphalt. Test specimens were molded according to Marshall's methodology for compressive strength tests, diametrical compression strength, water absorption, Cantabrian test, deep abrasion and resilient modulus. The resistance to compression presented results between 9.66 and 14.06MPa. The Tensile Strength for diametrical compression test showed values between 2.21 and 3.77MPa. Low water absorption was observed in the tests elements. The material loss in the Cantabrian test was below 25%, meeting the requirements of DNER-ES 386/99 standard and, at the same time, it was verified good resistance to deep abrasion when compared to precast concrete with Portland cement. The studied residue has the potential to be used as interlocked floor element in cycle paths, plazas and other low load request sites construction, presenting mechanical properties whose values are close to the minimum required by international standards for this type of application.

Keywords: Recycling hot; Concrete Asphalt Milling; Asphalt floors; Interlocked floors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de pavimentos asfálticos.....	23
Figura 2 - Envelhecimento do ligante asfáltico	25
Figura 3 - Envelhecimento do betume.....	26
Figura 4 - Máquina fresadora de asfalto.....	30
Figura 5 - Usina do tipo <i>Drum mixer</i> com entrada central para o CAF	36
Figura 6 - Secador de fluxo paralelo e CAF adicionado no misturador contínuo.....	37
Figura 7 - Usina com misturador de contra fluxo com queimador interno	38
Figura 8 - Usina com misturador tipo Double Barrel.....	39
Figura 9 - Breve histórico da pavimentação intertravada	41
Figura 10 - Estruturas de um pavimento intertravado.....	42
Figura 11 - Modelos de Pavers de concreto com cimento.....	43
Figura 12 - Fluxograma de trabalho	53
Figura 13 - Amostras do CAF <i>in natura</i>	57
Figura 14 - Equipamento extrator de betume tipo Rotarex.....	60
Figura 15 - Massas consideradas para Gmm.....	68
Figura 16 - MEV Modelo SSX-550	70
Figura 17 - Quick coater: Metalização.....	70
Figura 18 - Porta amostras e amostras metalizadas	71
Figura 19 - Moldagem dos CPs Marshall	75
Figura 20 - Saturação dos corpos de prova	77
Figura 21 - Prensa mecânica	80
Figura 22 - Ensaio de compressão simples.....	82
Figura 23 - Abrasômetro com roda de borracha.....	87
Figura 24 - Máquina de abrasão Los Angeles.....	89
Figura 25 - Resultado dos teores de betume das amostras	93
Figura 26 - Prato com amostra após pesagem	94
Figura 27a,b - Recipiente com amostra após a extração do betume	94
Figura 28 - Curva granulométrica Materiais (A), (B) e (C).....	95
Figura 29 - Topografia dos agregados miúdos do Material (A)	100
Figura 30 - Topografia dos agregados miúdos do Material (B)	100
Figura 31 - Topografia dos agregados miúdos do Material (C)	100
Figura 32 - Topografia dos grumos do Material (A).....	102

Figura 33 - Topografia dos grumos do Material (B).....	102
Figura 34 - Topografia dos grumos do Material (C).....	103
Figura 35 - Material (B) - Grumo - Regiões 1 e 2	104
Figura 36 - Material (B) - Grumo – EDS (Regiões 1 e 2).....	104
Figura 37 - Gráfico TGA	106
Figura 38 - Resultados da massa específica seca Materiais (A), (B) e (C)	110
Figura 39 - Volumes dos materiais (A), (B) e (C)	111
Figura 40: Resultados do índice de vazios Materiais (A), (B) e (C)	112
Figura 41 - Resultados Absorção de água Materiais (A), (B) e (C)	112
Figura 42: Resistência à tração por compressão diametral Mat. (A), (B) e (C)	114
Figura 43 - Resistência à Compressão Materiais (A), (B) e (C)	116
Figura 44 - Resistência à Compressão x Resistência à Tração	118
Figura 45 - Corpos de prova ensaiados a compressão Materiais (A), (B) e (C)	118
Figura 46 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 0,0%CAP	120
Figura 47 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 0,5%CAP	121
Figura 48 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 1,0%CAP	121
Figura 49 - % de CAP x perda de material x Resistência à compressão	122
Figura 50 - Resultados do ensaio cântabro Materiais (A), (B) e (C)	123
Figura 51 - Foto dos CP's após o ensaio cântabro	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de Pavers (normas ASTM C936, C140 e NBR 9781).....	48
Tabela 2 - Requisitos e propriedades de resistência dos elementos	50
Tabela 3 - Requisitos de propriedades de resistência de abrasão.....	51
Tabela 4 - Tolerâncias dimensionais.....	51
Tabela 5 - Especificações do CAP-50/70 - Classificação por penetração.....	58
Tabela 6 - Série de peneiras.....	62
Tabela 7 - Massa mínima por amostra de ensaio	63
Tabela 8 - Especificações granulométricas.....	65
Tabela 9 - Propriedades físicas e técnicas relacionadas em Análise Térmica	72
Tabela 10 - Tabela de índices baseados na superfície específica.....	73
Tabela 11 - Fator de correção em função da densidade real dos agregados	74
Tabela 12 - Requisitos para ensaio a compressão	82
Tabela 13 - Fator multiplicativo para espessura nominal da peça.....	83
Tabela 14 - Coeficiente de Student para (nível de confiança de 80 %)......	84
Tabela 15 - Requisitos da ABNT-NBR 9781/2013 E ASTM C902/2014.....	85
Tabela 16 - Corpos de prova/percentual de CAP para ensaio de abrasão	88
Tabela 17 - Teores de betume para CAF ensaiados.....	92
Tabela 18 - Granulometria Materiais (A), (B) e (C).....	96
Tabela 19 – Proporção de finos versus CAP dos Materiais (A), (B) e (C)	98
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de Gsa, Gsb e absorção dos agregados.....	98
Tabela 21 - Cálculo do Gmm das misturas	99
Tabela 22 - Relação temperatura x percentual de massa	107
Tabela 23 - Perdas de massa percentual.....	107
Tabela 24 - Cálculo do percentual de CAP teórico.....	107
Tabela 25 - Variação de ligante nos corpos de prova	108
Tabela 26 - Propriedades volumétricas dos Fresados e CP's.....	109
Tabela 27 - Resistência à tração por compressão diametral Mat. (A), (B) e (C)	113
Tabela 28 - Resistência à compressão Materiais (A), (B) e (C)	115
Tabela 29 - Resistência a Abrasão Profunda Materiais (A), (B) e (C)	119
Tabela 30 - Ensaio cântabro Materiais (A), (B) e (C)	124
Tabela 31 - Módulo de resiliência dos Materiais (A), (B) e (C)	125
Tabela 32 - Módulo de resiliência dos Materiais (A), (B) e (C)	126

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Newtons
%b	% de asfalto (betume)
%CAP	Percentual de CAP na mistura
E	Módulo de Elasticidade
F	Carga de ruptura (N)
n	Número de peças da amostra;
s	Desvio-padrão da amostra, expresso em megapascals (MPa)
t	Coefficiente de Student
ϵ	Deformação
σ	Tensão
σ_R	Resistência à tração (MPa)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARRA	<i>The Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials (USA)</i>
CAF	Concreto Asfáltico Fresado
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
capp	Peso específico do CAP
CARQ	Concreto asfáltico reciclado a quente
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpos de prova
CPG	Cromatografia por Penetração de Gel
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva de raios X
EVA	Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila
fp	Resistência média das peças, expressa em megapascals (MPa);
fpi	Resistência individual das peças, expressa em megapascals (MPa);
fpk,est	Resistência característica estimada à compressão, expressa em megapascals (MPa);
Gmb	massa específica aparente da mistura asfáltica compactada
Gmm	Densidade máxima da mistura
Gsa	Densidade real do agregado
Gsb	Densidade aparente do agregado
H	Altura do corpo de prova
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier
Kgf	Quilograma força
Mcp ao ar	Massa do corpo de prova ao ar
Mcp imerso	Massa do corpo de prova imerso em água
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
Ms	Massa seca do corpo-de-prova compactado
Msat	Massa do corpo de prova saturado, superfície seca
Mssub	Massa do corpo-de-prova compactado submerso em água
PAR	Pavimento Asfáltico Reciclado
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
PPC	Peças Pré-moldadas de Concreto
psi	Libras por polegadas quadradas
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> :
RBV	Relação Betume Vazios
RCC	Resíduos da Construção Civil
SUDECAP	Superintendência de Desenvolvimento da Capital
TGA	Análise Termogravimétrica
TKUs	Tonelada-quilômetro útil
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos da pesquisa	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.2	Justificativa.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Descrição dos pavimentos.....	22
2.2	Processo de envelhecimento das misturas asfálticas	23
2.2.1	Módulo de Resiliência.....	26
2.3	Fresagem de pavimentos	27
2.3.1	Asfalto um dos constituintes do CAF	31
2.3.2	Potencial de geração de CAF	31
2.3.3	Avaliação Ambiental do CAF	33
2.4	Usinas para reciclagem a quente de CAF.....	34
2.5	Pisos Asfálticos Reciclados Intertravados (PAR).....	39
2.5.1	Pavimento Intertravado - Peças de Concreto de Cimento Portland	40
2.5.2	Estudos e pesquisas <i>versus</i> normas técnicas.....	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	Materiais.....	56
3.1.1	O CAF	56
3.1.2	Cimento Asfáltico de Petróleo.....	57
3.2	Métodos.....	58
3.2.1	Ensaio de caracterização dos materiais constituintes do CAF	59
3.2.1.1	Determinação do percentual de Betume	59
3.2.1.2	Ensaio de granulometria do CAF (sem ligante).....	61
3.2.1.2.1	Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados gráudos/miúdos e densidade máxima da mistura.....	65
3.2.1.3	Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector (EDS).....	68
3.2.1.4	Análise termogravimétrica do CAF e CAP	71
3.2.1.5	Determinação dos percentuais teóricos de CAP das misturas	72
3.2.2	Ensaio nos CPs	74
3.2.2.1	Determinação das propriedades volumétricas da mistura asfáltica	76
3.2.2.2	Resistência à Tração por compressão diametral	80
3.2.2.3	Resistência à compressão.....	81

3.2.2.4	Resistência à abrasão profunda	85
3.2.2.5	Ensaio Cântabro	89
3.2.2.6	Módulo de resiliência das misturas recicladas	90
4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	91
4.1	Resultado dos ensaios de caracterização do fresado	91
4.1.1	Determinação do percentual de Betume	92
4.1.2	Ensaio de granulometria do CAF (sem ligante).....	95
4.1.2.1	Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados gráudos/miúdos e densidade máxima da mistura.....	98
4.1.3	Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector do tipo (EDS)..	99
4.1.4	Análises térmicas	105
4.2	Determinação dos percentuais teóricos de CAP das misturas	107
4.3	Resultado dos ensaios nos corpos de prova	108
4.3.1	Propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios	108
4.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	113
4.3.3	Resistência à compressão.....	115
4.3.4	Abrasão profunda	118
4.3.5	Ensaio cântabro.....	122
4.3.6	Módulo de resiliência das misturas recicladas	124
5	<i>CONCLUSÕES</i>	127
6	<i>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	129
7	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	130

1 INTRODUÇÃO

“O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil e é matéria prima das indústrias petrolífera e petroquímica” (LIRA, 2005, p. 2). Após refinado, o petróleo dá origem a vários subprodutos, dentre eles pode ser destacado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O CAP misturado com agregados de diversas granulometrias e aquecido em temperatura adequada, conforme características de viscosidade e temperatura do ligante resultam em Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) conforme (ANTT, 2014). Este material, também chamado de Mistura Asfáltica ou Concreto Asfáltico, é utilizado como camada de rolamento para pavimentação de vias.

O processo de manutenção destes pavimentos inclui a fresagem do material deteriorado da camada de rolamento, obtendo-se assim o Concreto Asfáltico Fresado (CAF), (FHWA, 1997). O CAF é composto por agregados soltos recobertos por ligante asfáltico. A fresagem é executada para que seja construída uma nova camada em substituição àquela deteriorada, chamada de recapeamento (SILVA, 2011b). A disponibilidade e geração de CAF são abundantes, pois o processo de manutenção de pavimentos asfálticos demanda a fresagem e recapeamento com certa frequência, sendo assim uma fonte contínua de geração de resíduos.

Segundo Zaumanis; Mallick e Franck (2014) a reutilização do CAF tem ocorrido principalmente como material para construção de revestimentos primários de vias não pavimentadas e bases de pavimentos, utilizações essas, onde o fresado é aplicado a frio sem qualquer tipo de tratamento. Conforme Baldo e Bodi (2004), tais aplicações não reciclam o asfalto presente no CAF para que esse desempenhe o papel de ligante. A reciclagem a quente do CAF contribui para a preservação ambiental de forma mais eficiente, a partir do momento em que aproveita as propriedades de aglutinação do ligante enrijecido, minimizando a demanda por petróleo e agregados minerais.

Nos Estados Unidos da América, assim como em alguns outros países, o CAF tem sido reciclado a quente para compor novas misturas asfálticas, as quais são

aplicadas em camadas de pavimentos de vias. O CAF tem sido adicionado em novas misturas em proporções que variam entre 10 e 50% e o restante de materiais virgens (agregado e ligante asfáltico), em usinas específicas chegando a aproveitamento de até 70% do fresado (KANDHAL e MALLICK, 1997). Algumas reciclagens a quente de 100% de CAF já foram feitas com bons resultados para aplicação em camadas de pavimentos de vias.

No Brasil, tal aplicação ainda é incipiente. Uma das dificuldades em se reciclar porcentagens elevadas de CAF, acima de 25%, em uma nova mistura, se encontra no fato de que o ligante do CAF encontra-se envelhecido e, conseqüentemente, mais susceptível à fadiga. Outro agravante para o processo de reciclagem é que durante o processo de fresagem, o CAF passa a apresentar granulometria mais fina que a mistura original (BALBO e BODI, 2004). Isso se deve ao fato de que a máquina fresadora quebra os agregados graúdos, diminuindo seu tamanho e conseqüentemente elevando a quantidade de finos, o que resulta em aumento da área superficial dos agregados. Assim, na reciclagem de altas porcentagens de fresado, também há necessidade de se adicionar ligante asfáltico virgem para compensar esse aumento de área superficial dos agregados.

Em misturas asfálticas recicladas com elevada porcentagem de CAF para uso em camadas de rolamento de pavimentos asfálticos, deve-se buscar soluções para que o módulo de resiliência, aumentado pelo processo de envelhecimento e excesso de finos, esteja dentro dos limites de uso para as misturas asfálticas. Assim, a rigidez do ligante presente no CAF deverá ser compensada através da adição à mistura, de um ligante asfáltico virgem, menos viscoso. Os dois ligantes misturados, do CAF e o virgem, vão juntos formar o ligante da mistura reciclada (VASCONCELOS e SOARES, 2004). Segundo Silva (2011a), essa rigidez pode ser melhorada ainda, através da adição de rejuvenescedores, os quais servem para restaurar as características visco-elásticas do ligante asfáltico envelhecido.

A reciclagem a quente de CAF demanda o uso de usinas de misturas asfálticas apropriadas para a produção do Concreto Asfáltico Reciclado a Quente - CARQ. Segundo Kandhal e Mallick (1997) as usinas convencionais sofreram adaptações ao longo da evolução da indústria para receberem o CAF, mas a qualidade do CARQ a

ser produzido e a quantidade de CAF a ser adicionada dependem da tecnologia da usina a ser utilizada no processo, e tais adaptações apresentam variações no processo de reciclagem.

Existem usinas recicladoras de pequeno porte (mini recicladoras) a custo mais acessível que permitem a reciclagem de 100% do CAF. Tais usinas estão disponíveis nos mercados de países da Europa e Estados Unidos, dentre outros, onde são utilizadas, principalmente, para reciclagem do CAF e aplicação do CARQ em operações de tapa buracos. As mini recicladoras de CAF são móveis, construídas sobre carretas que podem ser rebocadas por veículos leves, o que permite a reciclagem in loco e, conseqüentemente, podem minimizar custos operacionais. Acredita-se que estes equipamentos também possam ser utilizados para reciclar 100% de CAF para aplicação do CARQ como piso asfáltico intertravado em locais de baixa solicitação de carga, o que facilitaria a viabilização da aplicação sugerida.

Na tentativa de se identificar adequada aplicabilidade de 100% de CAF reciclado a quente ao menor custo possível, ou seja, sem qualquer necessidade de processamento do CAF para correção da granulometria ou adição de materiais para diminuição da rigidez resultante do ligante asfáltico envelhecido, investigou-se a possibilidade de uso do CARQ como Piso Asfáltico Reciclado (PAR). Adotou-se a hipótese de que a rigidez do CARQ com 100% de CAF, resultante do asfalto oxidado e do excesso de agregados finos, possam ser características que contribuam para o bom desempenho do PAR. As aplicações do CARQ sugeridas no trabalho parecem ser inovadoras, uma vez que não foram encontrados trabalhos científicos que relatam tal tema.

Piso Asfáltico é aqui definido como camada de concreto asfáltico que constitui a superfície destinada ao trânsito de pedestres e bicicletas e sua utilização em passeios, praças, ciclovias, dentre outros. Já os pavimentos de vias são estruturas em camadas planas destinadas a suportar os carregamentos do tráfego de veículos.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo da pesquisa foi contribuir para o estudo de viabilidade técnica de uso de Concreto Asfáltico Reciclado a Quente (CARQ), a partir da reciclagem a quente de 100% de Concreto Asfáltico Fresado (CAF), para construção de Pisos Asfálticos Reciclados (PAR) intertravados.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, buscou-se no presente estudo:

- Caracterizar o CAF de três diferentes origens, identificando os percentuais de asfalto presente, a distribuição granulométrica, bem como as propriedades de massa da mistura e do agregado *in natura*, além da influência destas características no desempenho mecânico do PAR;
- Avaliar a necessidade de adição de CAP novo na reciclagem de 100% de CAF;
- Averiguar se o CAF retirado de diferentes trechos de rodovias pode ser reciclado a quente à taxa de 100%, para uso como Piso Asfáltico Reciclado;
- Verificar a viabilidade técnica de uso do CARQ como PAR.

1.2 Justificativa

A pesquisa é justificada pelos seguintes aspectos:

- A reciclagem a quente de 100% de CAF pode ser realizada em pequena escala através de mini usinas recicladoras;
- O processo construtivo do PAR pode ser de fácil execução e bom acabamento;
- As características mecânicas do CARQ com 100% de CAF, por exemplo: maior módulo de resiliência, pode ser adequada para resistir aos carregamentos de pisos sem necessidade de ajuste na granulometria ou utilização de aditivos na mistura;
- Os benefícios econômicos e ambientais podem ser significativos ao usar o CARQ para construção de PAR;
- Redução do passivo de materiais fresados que são mantidos em depósitos de prefeituras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descrição dos pavimentos

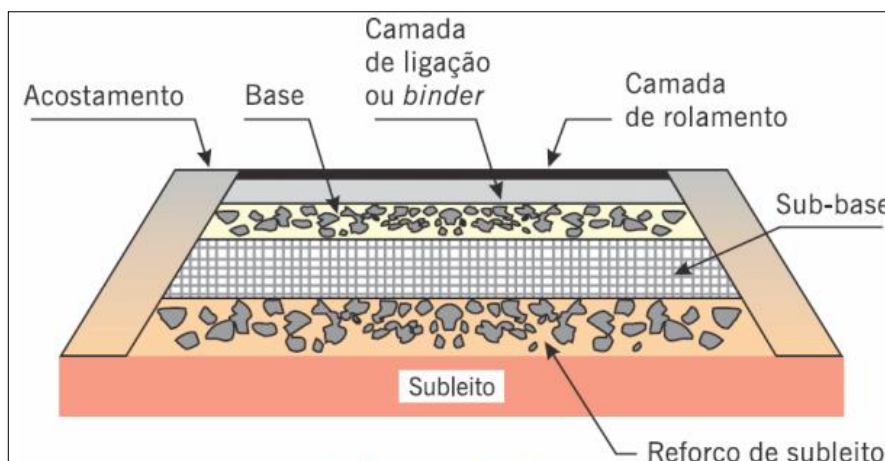
De acordo com DNIT (2006), os pavimentos são superestruturas constituídas por um sistema de camadas pré-definidas, assentados sobre infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada como subleito. Reforçando o conceito, para Bernucci *et al.* (2008) pavimento é uma composição de várias camadas de espessuras finitas, executada sobre solo terraplenado, dimensionado para que atenda aos requisitos técnicos, econômicos e garanta resistência aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, permitindo assim, melhoria nas condições de rolamento, como conforto, economia e segurança.

A definição do tipo de pavimento é feita com base nas características de tráfego, clima, materiais disponíveis, condições de fundação e custos de execução. A partir da avaliação destas variáveis são definidos os tipos de revestimentos, os quais são classificados segundo os materiais utilizados e o seu comportamento mecânico, podendo ser do tipo rígido ou flexível (SANTOS, 2010).

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos possuem estrutura superficial, chamada de camada de rolamento, constituída por material ligante (asfalto) misturado com materiais granulares (agregados), de forma que sua composição irá definir as características mecânicas (SANTOS, 2010). Reforçado por Bernucci *et al.* (2008) que cita que os revestimentos asfálticos são formados por associações de ligantes asfálticos, de agregados e, em alguns casos, de produtos complementares, sendo que estas associações devem resultar em um revestimento que garanta que sua estrutura seja durável em sua vida útil.

A Figura 1 mostra um esquema construtivo onde são representadas as camadas que geralmente constituem os pavimentos flexíveis cuja pista de rolamento é composta por cimento asfáltico e agregados.

Figura 1 - Camadas de pavimentos asfálticos



Fonte: (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008)

2.2 Processo de envelhecimento das misturas asfálticas

O envelhecimento das misturas asfálticas está relacionado a diversos fatores como a oxidação, os efeitos da exsudação, da ação dos raios ultravioleta, evaporação e efeitos ligados ao volume de tráfego de veículos, os quais diminuem a durabilidade do pavimento (LIMA, 2003). O envelhecimento de ligantes asfálticos leva ao seu endurecimento, resultando em aumento de sua viscosidade com consequente modificação de suas propriedades físicas, químicas e reológicas (TONIAL, 2001 *apud* DIAS, 2009). O asfalto é um ligante betuminoso que apresenta baixa reatividade química, mas, nem por isto deixa de sofrer processo de envelhecimento por contato com o ar e água, também relatado por (BERNUCCI *et al.*, 2008). Airey e Brown (1998) *apud* Morilha Junior (2004) ainda cita que o desempenho do ligante, por ser um elemento termoplástico, que se comporta como um material semi-sólido, viscoelástico e fluido viscoso à medida em que se eleva sua temperatura, dependerá das variações de carga, do tempo de aplicação e em qual temperatura estas solicitações acontecerão.

Ainda, de acordo com Vasconcelos e Soares (2004, p. 186), “é sabido que o ligante asfáltico endurece em curto prazo após o aquecimento devido à perda de voláteis e no longo prazo devido, principalmente, a oxidação da mistura em campo”. Cita ainda Tonial *et al.* (2001) que a espessura da película de ligante sobre o agregado é de fundamental importância para a determinação do envelhecimento do ligante no curto

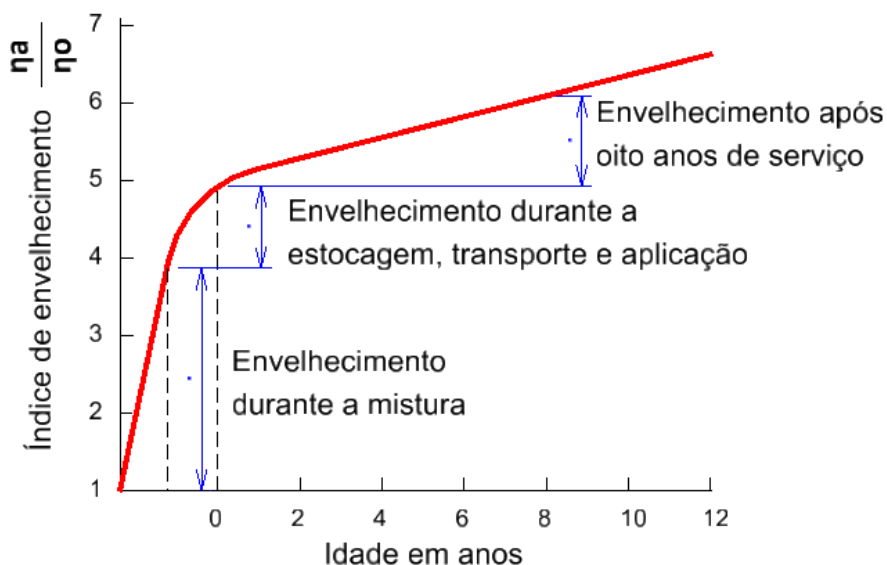
prazo e pode ainda se tornar importante também para a determinação do envelhecimento de longo prazo em massas com elevado teor de vazios.

Junior (2004) relata que o envelhecimento de curto prazo é decorrente da usinagem, transporte, distribuição e compactação da mistura asfáltica na pista. Durante essas etapas, o ligante asfáltico é exposto a altas temperaturas e grande superfície de exposição em um período relativamente curto de tempo: 25 a 50 segundos a depender do tipo de usina de asfalto usada.

Lima (2003) cita dentre os elementos responsáveis pela abreviação da durabilidade das misturas asfálticas, os fatores relacionados ao endurecimento oxidativo, evaporativo e exudativo do CAP. O envelhecimento do Cimento asfáltico acontece ainda na fase de preparo da mistura, quando este é misturado com os agregados aquecidos e se prolonga na fase de estocagem, aplicação na pista e ao longo de toda sua utilização como camada de rolamento. O ligante pela ação das intempéries perde voláteis e tem sua viscosidade aumentada resultando em aumento de rigidez e facilitando o aparecimento de fissuras e trincas, de acordo com (WHITEOAK, 1990).

Outros autores como Silva (2011a) cita que no processo de envelhecimento da mistura, cerca de 60% da degradação do CAP ocorre na fase de preparo do material, sendo os outros 40% ocorrendo na fase de aplicação e utilização. Podem ser observadas na figura 2 as fases do envelhecimento das misturas asfálticas. A alta taxa de oxidação na fase de preparo da mistura é confirmada por Whiteoak (1990) apud Morilha Junior (2004) que segundo o autor está relacionada diretamente ao aumento da temperatura, superfície e tempo de exposição, bem como da espessura da película do ligante asfáltico, sendo que a taxa de oxidação dobra a cada 10°C de acréscimo na temperatura do ligante para valores acima dos 100°C.

Figura 2 - Envelhecimento do ligante asfáltico

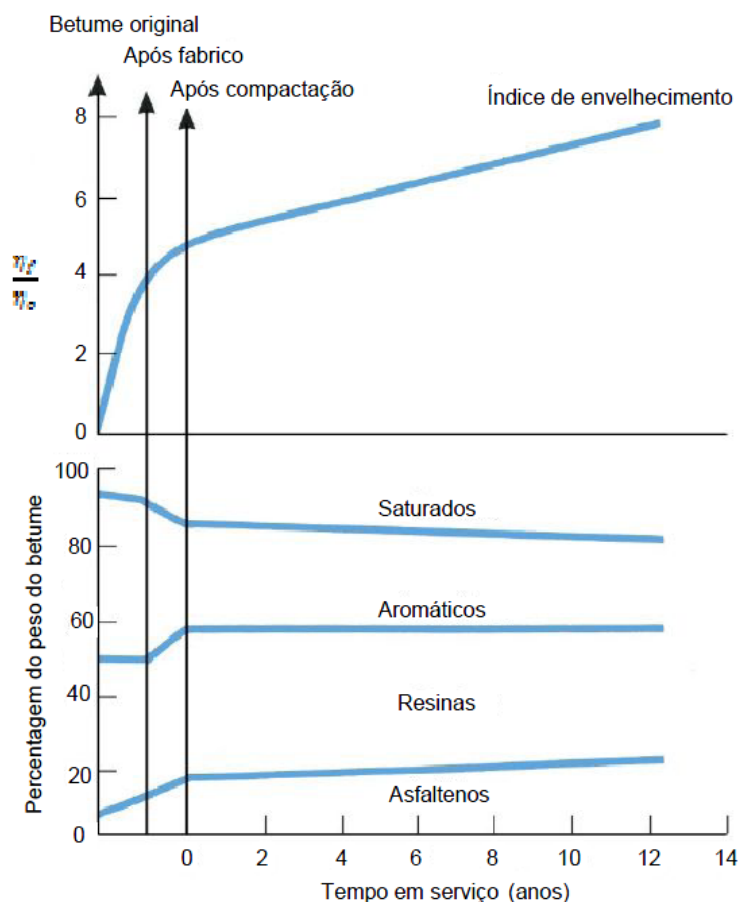


Fonte: (WHITEOAK, 1990)

Para Araújo (2012), a alta taxa de degradação que ocorre na mistura asfáltica antes de sua aplicação como camada de rolamento está relacionada à composição química do ligante asfáltico, a qual é representada pelos asfaltenos, fração insolúvel e maltenos, a parte solúvel, que é subdividida em saturados, aromáticos e resinas, principais agentes no processo de envelhecimento. Para Roberts *et al.* (1996) a reação com o oxigênio da atmosfera e volatilização dos maltenos é o principal fator no processo de envelhecimento de curto prazo, sendo a variação nos constituintes asfaltenos e maltenos a responsável pelo aumento da viscosidade (AL-QADI *et al.* 2007, *apud* Zaumanis e Mallick, 2014). De acordo com Mercado *et al.* (2005) o aumento da temperatura favorece as reações de oxidação.

Pellinen; Xião e Shah (2008) confirma que o aumento da volatilização dos maltenos resulta em um ligante mais viscoso e desta forma provoca a redução da interação com os agregados, acarretando em maior rigidez da mistura. Pela figura 3 pode ser observada a redução nos componentes maltenos e consequente elevação dos asfaltenos ao longo do processo de envelhecimento de curto prazo nas misturas asfálticas.

Figura 3 - Envelhecimento do betume



Fonte: Adaptado de (Shell, 2003)

2.2.1 Módulo de Resiliência

Segundo Bernucci *et al.* (2008), um dos fatores que contribuem para a degradação de pavimentos está ligado ao envelhecimento do ligante asfáltico, o qual passa por um processo de oxidação em função das adversidades climáticas relativas ao contato com a água, o ar, radiação ultravioleta e cargas de tráfego, tornando-se um material com módulo de resiliência mais elevado.

O módulo de resiliência segundo Siswosoebrotho; Ginting e Soedirdjo (2005) é um parâmetro importante para a determinação do desempenho do pavimento e é baseado na análise da resposta do pavimento à aplicação de carga repetida, que simula o carregamento do tráfego sobre a estrutura. O termo “resiliência” é definido por Hveem (1955) como a energia que é devolvida por um corpo que se deformou elasticamente em função de uma carga qualquer, quando cessaram as tensões causadoras destas deformações. Segundo Nascimento (2011) “Tanto o Módulo de

Resiliência (MR) como o Módulo de Elasticidade (E), são definidos como relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ).” Entretanto, a diferença é que o módulo de elasticidade diz respeito à capacidade que os materiais têm de voltar à forma original após a ação das cargas.

Dias (2009) em experiência para a comparação dos módulos de rigidez entre misturas envelhecidas e novas, através de ensaio de carga repetida a flexão, também concluiu que as misturas oxidadas possuem maior módulo de rigidez. Ao comparar ensaios com misturas realizadas com ligantes asfálticos de diferentes consistências comprovou que as composições com ligantes mais viscosos apresentam módulo de rigidez proporcionalmente maior. Foram comparados ligantes do tipo 35/50 e 50/70, sendo o primeiro tipo, para a mesma temperatura, mais viscoso, o que consequentemente resultou em mistura de maior rigidez.

Segundo pesquisa de Araújo (2007) que expôs a mistura asfáltica em câmara com radiação de arco xenônio, simulando a ação da radiação ultravioleta, através do ensaio de (GPC) Cromatografia por Penetração de Gel, demonstrou que as misturas submetidas a longo tempo de exposição tende a perder massa molecular. Fato este, explicado por Leite (1999) que cita que nesta faixa de exposição são produzidos radicais livres que dão origem a hidroperóxidos, cetonas e álcoois, que possuem massa molar menor e são os responsáveis pela oxidação do CAP.

2.3 Fresagem de pavimentos

Pavimentos são estruturas que sofrem degradação constante em função de exposição às intempéries, características dos materiais utilizados e deformações plásticas e elásticas quando sob cargas dinâmicas de veículos (DIAS, 2009). As deformações elásticas são responsáveis pelo aparecimento de trincas por fadiga na camada superficial do pavimento, a capa asfáltica (SILVA, 2011a). Ligantes asfálticos mais elásticos, menos quebradiços e rígidos são desejados para minimizar tais ocorrências. Assim, a remoção da camada asfáltica envelhecida é necessária e deve-se substituí-la por camada com materiais com melhor elasticidade. No processo de reciclagem do CAF, para aplicação como nova camada de rolamento

em pavimentos, tal problema deve ser resolvido para se evitar o surgimento de trincas prematuras na camada asfáltica.

Santos (2010) destaca dentre os processos de manutenção de pavimentos asfálticos a fresagem da capa asfáltica seguida de recapeamento, mantendo-se a cota da superfície de rolamento. Balbo e Bodi (2004) já relatavam que quando se tem restrição de cota do pavimento, a melhor técnica é a fresagem, pois permite substituir a camada deteriorada por uma nova sem alterar o greide da pista. Santos (2010) reforça também a possibilidade da fresagem profunda, que permite substituir as camadas de suporte do pavimento restabelecendo sua capacidade estrutural.

Sendo assim, a fresagem pode ser definida como a operação de corte com utilização de maquinário especial, o qual permite remover uma espessura específica da camada de rolamento ou até mesmo as camadas de suportes da via (BERNUCCI *et al.*, 2008). Quando a fresagem é feita apenas no material da camada superficial do pavimento, a capa asfáltica, resulta-se na obtenção do Concreto Asfáltico Fresado (CAF).

A extração do material envelhecido da camada de rolamento e sua configuração como material fresado é geralmente realizada por procedimento a frio, apesar de haver alguns casos onde a fresagem é realizada a quente (BONFIM, 2007). A principal diferença nestas duas técnicas está na faixa granulométrica conseguida após o processo; a explicação está vinculada ao fato de que a fresagem a quente, embora possa contribuir no processo de envelhecimento do ligante, mantém a faixa granulométrica bem próxima à da mistura original, quando foi aplicada no pavimento. Já no procedimento a frio ocorre a fratura do material, o que gera uma nova faixa granulométrica com maior percentual de finos, sendo esta elevação dependente de fatores como: condições de coesão da mistura e características do equipamento fresador (SILVA, 2011b). Outro fator que pode contribuir para aumento do teor de finos é a velocidade da fresagem, sendo que, quanto mais alta, maior a quantidade de finos a ser gerada (DAVID, 2006).

Para Bernucci *et al.* (2008) a distribuição granulométrica com maior quantidade de agregados miúdos caracteriza-se também como um fator para o aumento do módulo

de rigidez de misturas asfálticas, o que faz com que estes materiais estejam propensos a trincamento prematuro em função da maior capacidade de reter esforços em si mesmos, gerando elevadas tensões em seu interior. Sendo assim, O excesso de finos pode ser prejudicial a uma nova mistura asfáltica e desta maneira, a quantidade de CAF a ser adicionada no processo de reciclagem pode ser limitada, ou o CAF deverá sofrer processamento para separação deste em duas ou mais granulometrias, o que permitiria a adição de maior quantidade, isto se considerado um aproveitamento como nova camada de rolamento.

Desta forma, para que sejam garantidas as propriedades das misturas recicladas, os agregados devem estar contidos em faixas granulométricas que permitam a melhor interação entre estes e os ligantes asfálticos. Para tanto é necessário que o fresado seja selecionado e classificado de acordo com curva granulométrica específica.

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA*) cita que existem atualmente cinco categorias principais de diferentes métodos de reciclagem: a frio (*Cold planning*); a quente (*Hot recycling*); a quente *in situ* (*Hot in-place recycling*); a frio *in situ* (*Cold in place recycling*); e também o processo de reciclagem que envolve a reutilização do fresado como camada de base do pavimento (*Full depth reclamation*).

A reciclagem profunda é um processo no qual 100% do material fresado é reaproveitado como camada de base de um pavimento. Neste processo, também chamado de reciclagem do pavimento, a fresagem atinge a capa e a base simultaneamente, sendo os materiais misturados e adicionados outros materiais virgens para melhorar o desempenho da nova base (KANDHAL, 1997). Após a reconstrução da base, uma nova capa de rolamento de mistura asfáltica deve ser executada. Esse e outros processos que usam o CAF a frio, não aproveitam o ligante asfáltico do CAF como aglutinante. Nesses casos, o asfalto presente no CAF é perdido em meio aos agregados. O ligante asfáltico presente no fresado tem que ser aquecido para que sua função de aglutinante seja desempenhada, e tal processo ocorre apenas na reciclagem a quente.

A figura 4 apresenta um exemplo de maquinário utilizado para as operações de fresagem de pavimentos flexíveis e o detalhe do cilindro fresador. Esta máquina faz a raspagem do asfalto em profundidades pré-ajustadas e direcionam por meio de esteira deslizante, para um compartimento de carga, geralmente caçambas, todo o material fresado da via (KANDHAL e MALLICK, 1997).

Figura 4 - Máquina fresadora de asfalto



Fonte: (KANDHAL e MALLICK, 1997)

O CAF é um material que possui grande valor agregado se for avaliado do ponto de vista da energia gasta para a obtenção de seus componentes, da degradação acarretada ao meio ambiente com a abertura/exploração de novas jazidas e pedreiras para obtenção de materiais virgens, assim como a extração dos ligantes derivados do petróleo, cujo processo é de alto custo.

Kandhal e Mallick (1997) ressaltam que o reaproveitamento do material retirado das camadas de pavimentos deteriorados em misturas novas de asfalto contribui para a redução das explorações de jazidas, conseqüentemente levando a menor custo e redução na utilização de energia. Conforme é reforçado por Balbo e Bodi (2004, p.175) “A reciclagem integral, incluído o CAP envelhecido dos materiais removidos de revestimentos e camadas asfálticas de pavimentos existentes resultaria em diversas economias nos investimentos de infraestrutura viária”.

2.3.1 Asfalto um dos constituintes do CAF

O Asfalto, um dos constituintes do CAF, um produto que uma das formas de obtenção é através do refinamento do petróleo, apresenta, segundo Santos (2010), uma composição genérica de 54% de betume asfáltico, 36% minerais e 10% matéria orgânica, sendo a quantidade de asfalto contida no petróleo da ordem de 10 a 70% (MARQUES, 2002). Complementado por Nascimento (2011) que cita que a constituição do CAP é representada por 90% a 95% de hidrocarbonetos (Não polares) e de 5 a 10% de heteroátomos, sendo eles (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais, vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) os quais são unidos por ligações covalentes.

De acordo com a *European Committee for Standardization*, (2000) apud Mothé (2009) “asfalto é definido como um material à prova d’água, aglutinante, completamente solúvel em tolueno, muito viscoso...” e por ser muito viscoso, pode apresentar comportamento de sólido ou líquido, dependendo de sua temperatura. Mothé (2009) ainda cita que ele pode ser obtido pelo refino do petróleo retirado do subsolo ou originado naturalmente pela ação das intempéries, sol e ventos, sobre afloramentos de depósitos naturais de petróleo, que evaporam os gases e óleos leves dando origem ao asfalto natural, geralmente muito duro. Bernucci *et al.* (2008) apresenta uma terceira forma de ligante asfáltico, o alcatrão, que é obtido pela queima ou destilação destrutiva do carvão/madeira.

2.3.2 Potencial de geração de CAF

No âmbito regional, dentro da área de influência do estudo, e levando em consideração o material gerado na recuperação de vias pavimentadas, foi verificado em consulta à Gerência da Divisão de Manutenção de Vias Públicas da SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital) que a Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) estoca o material fresado em 09 (nove) depósitos (abertos) distribuídos em suas regionais. Entretanto, o material fresado estocado não é descartado. Este material é reaproveitado, dentre outras aplicações, como revestimento primário, como sub-base ou base ou até mesmo como complemento para asfaltar vias locais, dentro das próprias regionais. Todas essas aplicações são

à frio, ou seja, sem a reciclagem do asfalto à quente, o que resulta em perda considerável de potenciais benefícios econômicos e ambientais.

Neste contexto, a quantidade de material fresado gerado na restauração de pavimentos, na cidade de Belo Horizonte, varia de acordo com as prioridades de intervenção, avaliação e diagnóstico técnico da estrutura do pavimento. Nesta classificação, segundo a Gerência, vias que já apresentam greide final elevado frente às intervenções anteriores (recapeamentos) têm seu revestimento fresado em espessura que evite que a nova camada, depois de finalizada, eleve o greide da pista.

De acordo com a gerência da Divisão de Manutenção de Vias Públicas da SUDECAP, o serviço de fresagem é relativamente novo no Brasil (década de 80) e, anteriormente ao mesmo, as intervenções consistiam na aplicação de camadas de CBUQ sobre o revestimento antigo, o que acarretou em elevação do greide de grande parte das vias, tornando este serviço fundamental hoje em dia. Segundo a superintendência, o montante de fresado retirado é relativamente grande, principalmente quando são restaurados os grandes corredores. Estima-se cerca de 75km/Ano de vias restauradas pelo processo de recapeamento total ou parcial, gerando aproximadamente 100.000T/ano de fresado.

A superintendência relata ainda, que o material disponibilizado aos depósitos também é reaproveitado como revestimento primário de pavimentos, que são camadas aplicadas diretamente sobre o subleito compactado em vias não pavimentadas, com a função de assegurar condições de tráfego satisfatórias, bem como utilizados como base de pavimento em pequenas intervenções (adequações viárias, etc) ou nos processos de recomposição de valas. Verifica-se o grande potencial de material gerado no processo de recapeamento de vias no âmbito da PBH e a possibilidade de uma aplicabilidade mais nobre a este resíduo.

Em âmbito nacional, segundo pesquisa CNT (2014) foi constatado que, 63,8% do total de rodovias pavimentadas do Brasil apresentaram problemas no pavimento, na sinalização e na geometria da via e receberam avaliação “regular”. Isto indica

condições insatisfatórias, com necessidade de intervenções em considerável parcela da malha rodoviária, potencializando a geração de CAF.

2.3.3 Avaliação Ambiental do CAF

Segundo definição da NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos podem ser do tipo sólido e semi-sólido, e são gerados pelas atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Para a classificação dos resíduos deve ser identificado o processo ou atividade que os gerou, bem como seus constituintes e características. Posteriormente, faz-se a comparação destes constituintes com resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido conforme descrito em NBR 10.004 (ABNT, 2004). Segundo a referida norma, os resíduos sólidos são classificados da seguinte maneira:

- Classe I – Perigosos; Apresentam periculosidade em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Classe II A – Não perigosos / não inertes; Resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B – Não perigosos / inertes; Resíduos que, ao serem submetidos aos testes de solubilização (NBR 10.007) não têm nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

O CAF é um Resíduo da Construção Civil (RCC) e estes resíduos pertencem a Classe II B, conforme NBR 10.004, entretanto o CONAMA 307/2002 e 348/2004 subdividem os resíduos da construção civil em quatro outras classes, respectivamente (A, B, C e D) sendo o asfalto enquadrado na Classe B, na qual é identificado como material reciclável para outras destinações os quais deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Para Silva (2011b) as regulamentações nacionais não são abrangentes e nem entram no detalhe sobre a destinação de RCC's e ainda lembra que a resolução nº5 que trata da Gestão de Resíduos e Produtos Perigosos do CONAMA estipula que quando o material for inerte, este deve receber tratamento e disposição final da mesma forma que os resíduos domiciliares.

2.4 Usinas para reciclagem a quente de CAF

Para a reutilização do CAF em novas misturas para uso em camadas de rolamento de pavimentos, as propriedades do CAP que foram degradadas precisam ser restabelecidas de forma a devolver suas características como agente aglutinador. Desta forma, agente rejuvenescedor ou ligante asfáltico virgem, menos viscoso “mais mole” deve ser utilizado para diminuir a rigidez do ligante do CAF (TRAN; TAYLOR e WILLIS, 2012). Neste procedimento, o aquecimento do CAF envelhecido ocorre via condução térmica através da mistura com o agregado virgem superaquecido.

O ligante envelhecido e oxidado, bem como as tecnologias de aquecimento e mistura do fresado, disponíveis no mercado atualmente, limitam a quantidade de CAF a ser reciclado em uma nova mistura asfáltica. Kandhal e Mallick (1997) relatam que este percentual pode variar de 10% a 35%, chegando em casos especiais a valores da ordem de 50% em usinas do tipo gravitacional, e aproveitamento de fresados na ordem de 30% a 50% quando se utiliza usina do tipo *Drum mixer*, chegando a casos em que é possível aproveitar até 70% do material reciclável proveniente da pista de rolamento.

Os misturadores de tambor do tipo *Drum mixer* foram efetivamente utilizados para reciclagem ao longo dos anos 70 e 80. Entretanto, em função das crescentes restrições de normas Americanas sobre as emissões àquela época, estas plantas foram muito criticadas devido ao fato de causar a produção de emissões poluentes. *Pavement Recycling Guidelines* (1987) evidencia que este problema de emissões poderia ser resolvido através de vários processos, tais como a redução da taxa de produção de mistura reciclada, o aumento do teor de água do CAF, diminuição da temperatura de descarga da mistura reciclada, utilização de menor percentual de

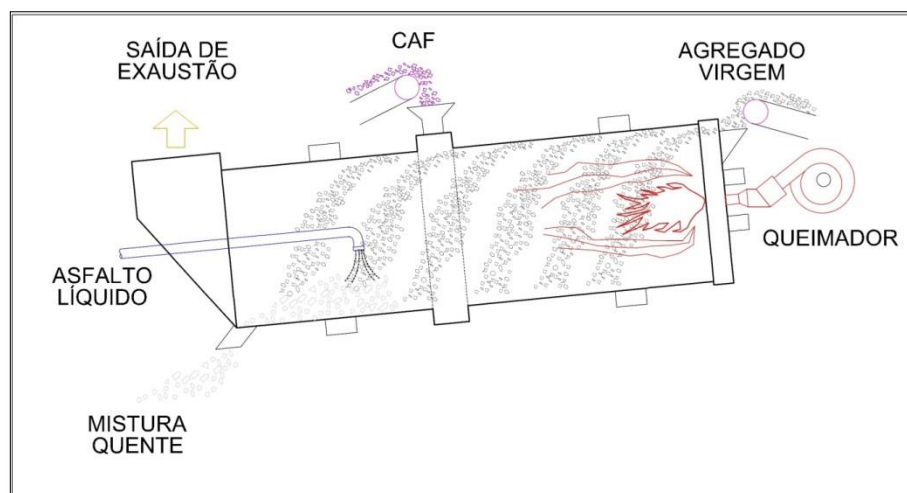
fresado, entretanto a forma mais eficaz e que garantiria maior produção seria modificar o projeto deste tipo de usina, adaptando às necessidades do material a ser reciclado. Desta forma, foram construídas várias versões modificando estas usinas para combater o problema da emissão (KANDHAL e MALLICK, 1997).

Para este tipo de usina a introdução do CAF não poderia ocorrer pela entrada de agregados virgens, como era a proposta inicial, pois desta forma o fresado entraria em contato com a chama de fogo do queimador para secagem e aquecimento. O CAF quando em contato direto com a chama provoca a queima do ligante asfáltico e consequente emissão de fumaça escura (CASTRO, 2009) e de acordo com *Asphalt Institute Manual* (1986), outro fator que agrava estas emissões é a grande quantidade de finos presentes no CAF.

Segundo Kandhal e Mallick (1997), essas usinas quando não são projetadas para o recebimento de CAF podem ser adaptadas para tal função através da abertura de entrada central para recebimento do material a ser reciclado. Tal abertura permite que o CAF entre no tambor secador em uma zona onde a temperatura não ultrapassa os limites demandados pelo ligante asfáltico e não tenha contato com as chamas.

De acordo com *Proven Guidelines for Hot-Mix Recycling* (1986), a abertura central permite que o CAF entre em contato com os agregados virgens já aquecidos e secos a jusante da chama do queimador, sendo que estes aquecerão por condução térmica o material a ser reciclado. Dentro destes tambores existem barramentos que ajudarão a aumentar o tempo de permanência total do agregado na primeira metade do cilindro, a zona quente, o que permitirá que o material virgem seja aquecido a cerca de 260°C. Por fim, o ligante asfáltico virgem é introduzido e misturado aos demais materiais, conforme mostrado na figura 5. RTAC (1983) ainda relata as vantagens deste tipo de planta em comparação às do tipo gravitacional, sendo elas; portabilidade e menor tempo de instalação, o maior aproveitamento em percentual de CAF na mistura, a produção não ser afetada pela variação no percentual de CAF, além de garantir misturas mais homogêneas.

Figura 5 - Usina do tipo *Drum mixer* com entrada central para o CAF



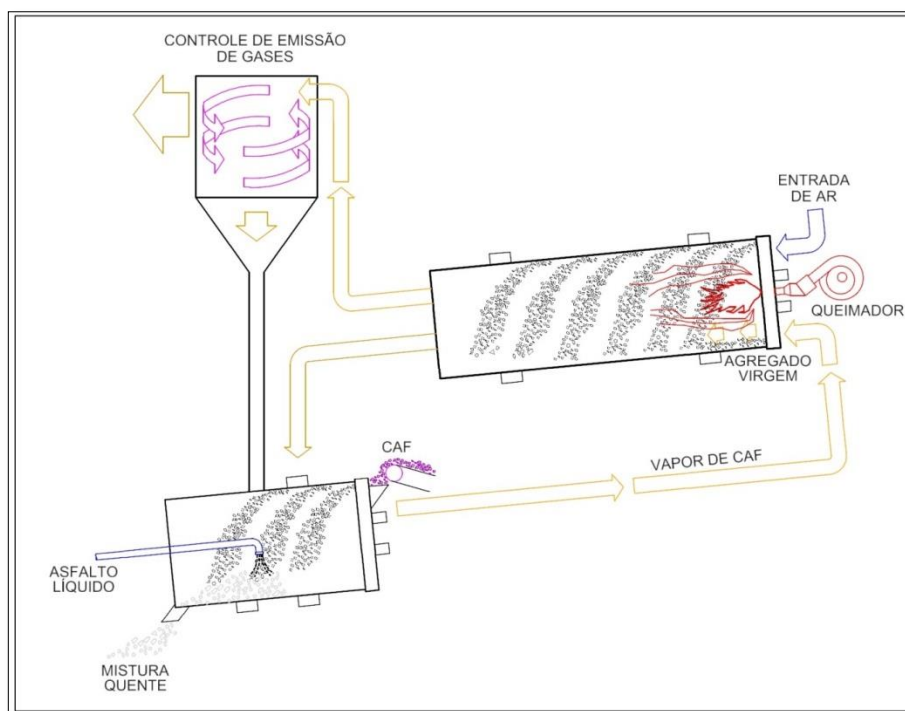
Fonte: Adaptado de (KANDHALL e MALLICK, 1997)

Segundo Castro (2009), um dos problemas elencados para as usinas *Drum mixer* com entrada central é o fato de o processo provocar o endurecimento do asfalto devido ao vapor d'água proveniente do agregado virgem e do CAF. Isto ocorre porque o asfalto é aspergido dentro do misturador, em grande área e a ação do vapor d'água, do calor e dos gases de combustão, produz destilação do asfalto, removendo sua parte mais volátil (DER-MG, 2008).

Posteriormente a indústria desenvolveu outros modelos onde a mistura do agregado virgem, asfalto e CAF, acontecia em um misturador fora do secador, ilustrado na figura 6. O CAF e o asfalto entram no misturador sem passar pelo secador. O aquecimento do CAF e do asfalto acontecerá por condução térmica via agregado virgem que foi aquecido no secador principal de fluxo paralelo.

Como desvantagem pode ser citado o pequeno tempo de mistura, acarretando também em uma mistura pouco homogênea, o que limita a quantidade de CAF. Este processo também exige que o agregado seja superaquecido a 316-343°C, conforme (CASTRO, 2009).

Figura 6 - Secador de fluxo paralelo e CAF adicionado no misturador contínuo

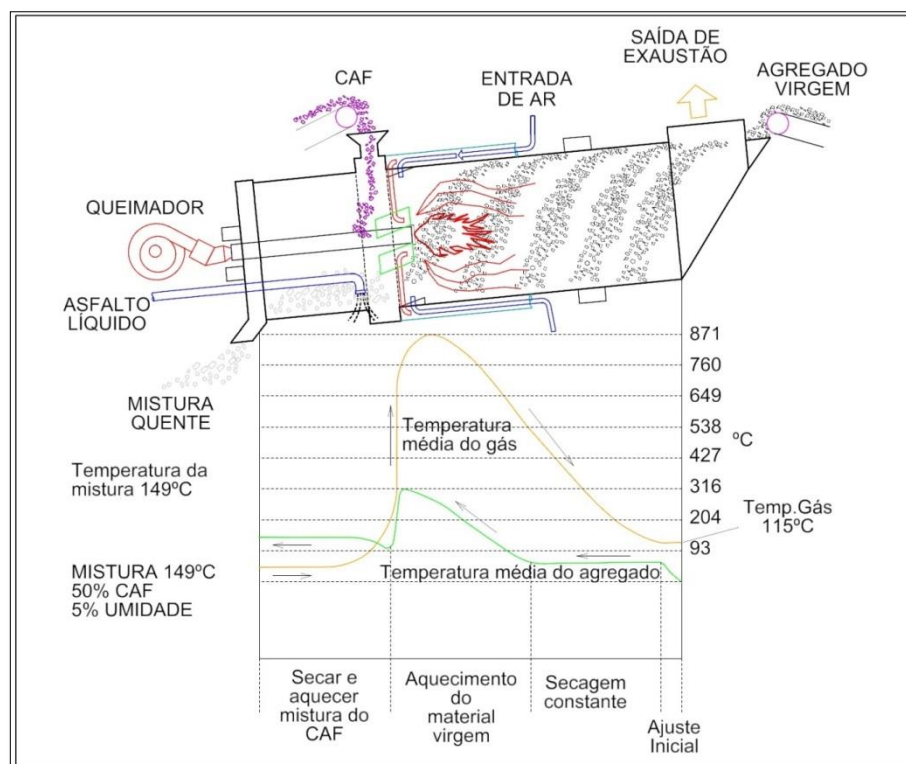


Fonte: Adaptado de (KANDHALL e MALLICK, 1997)

Outro modelo, conforme figura 7, apresenta tambor secador misturador com o queimador em seu interior, permitindo que sua parte traseira não fique sob ação direta da chama e dos gases da combustão oriundos do queimador, sendo aí injetado o CAF. Construtivamente a carcaça permite resfriamento via circulação de ar, o qual já penetra no interior do misturador pré-aquecido (KANDHALL e MALLICK, 1997).

Neste modelo o asfalto líquido também é introduzido atrás do queimador, sendo assim misturado com o CAF e agregado virgem. Este tipo de usina permite a utilização de 50% de CAF.

Figura 7 - Usina com misturador de contra fluxo com queimador interno



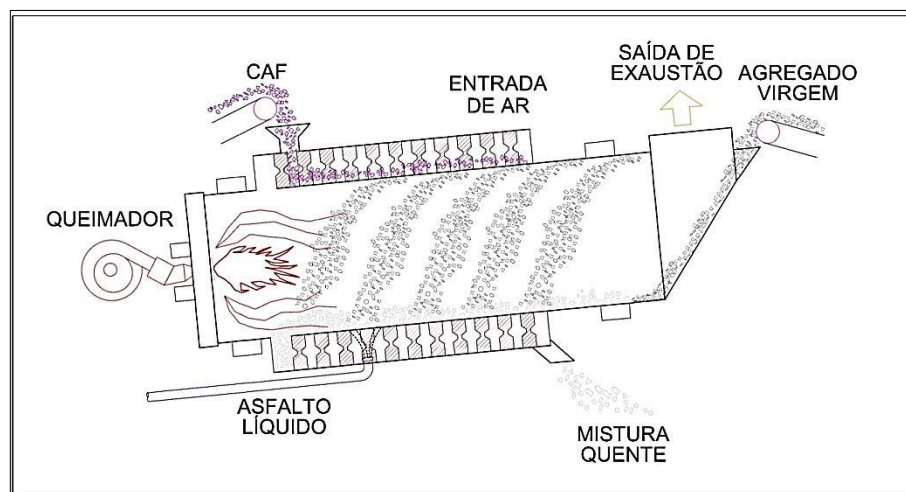
Fonte: Adaptado de (CASTRO, 2009)

Outro modelo bastante inovador é o do tipo *Double Barrel* que é a montagem de um tambor dentro do outro. O tambor interno gira dentro do exterior que é fixo conforme (CASTRO, 2009). Pela figura 8 pode ser observado o detalhamento interno da usina *Double Barrel*. Este tipo de usina possui aletas em seu interior que são responsáveis pela mistura do agregado virgem e que depois de aquecidos a 315°C~343°C são lançados através da parede do cilindro para a câmara onde se encontra o CAF. Nesta câmara a temperatura média é de cerca de 49°C. Neste método, o agregado virgem e o CAF não estarão expostos aos gases quentes do vapor ou do processo de secagem e, assim, voláteis não são removidos da mistura. Este tipo de planta degrada muito menos a mistura asfáltica no curto prazo e apresenta também a vantagem de possuir maior espaço para a mistura (KANDHALL e MALLICK, 1997).

Nas usinas *Double Barrel*, os furos através do qual os agregados virgens são direcionados para a câmara exterior também são os responsáveis por canalizar a fumaça e direcionar os poluentes para a chama onde são incinerados. Construtivamente o secador contracorrente também leva a maiores taxas de

produção com o consumo de combustível muito baixo (KANDHALL e MALLICK 1997).

Figura 8 - Usina com misturador tipo Double Barrel



Fonte: Adaptado de (KANDHALL e MALLICK, 1997)

2.5 Pisos Asfálticos Reciclados Intertravados (PAR)

Como já especificado anteriormente, Piso Asfáltico Reciclado (PAR) é aqui definido como camada de concreto asfáltico reciclado a quente com 100% de CAF e que constitui a superfície destinada ao trânsito de pedestres e bicicletas. Diferentemente de pavimento que é uma estrutura em camadas destinada a suportar carregamentos de veículos.

A rigidez aumentada do Concreto Asfáltico Reciclado a Quente (CARQ) devido ao ligante envelhecido e ao excesso de finos presentes no CAF pode ser favorável para a confecção de peças pré-moldadas para uso como piso intertravado. Tais peças tendem a apresentar maior resistência à compressão, o que pode ser considerado um benefício quando se pensa em peças pré-moldadas a partir do CAF reciclado a quente. Neste mesmo sentido, os demais problemas gerados em pavimentos asfálticos pela maior rigidez do CARQ (trincas por fadiga) são eliminados em pisos intertravados, uma vez que os pisos são construídos com juntas que permitem a flexibilidade sem o surgimento de trincas.

Neste tópico são estudados conceitos e especificações sobre pisos intertravados de concreto de cimento Portland que possam ser aplicados aos pisos asfálticos reciclados intertravados. Por se tratar de tema inédito, uma vez que não foram encontradas bibliografias que tratam desse assunto, são estudadas normas, especificações e trabalhos de outros autores na pavimentação intertravada, que podem servir como referência para contribuição ao estudo da viabilidade técnica do piso asfáltico proposto.

2.5.1 Pavimento Intertravado - Peças de Concreto de Cimento Portland

Os elementos atualmente utilizados para pavimentos intertravados utilizam como aglomerante o cimento Portland acrescido de agregados graúdos e miúdos (concreto), também chamados de elementos pré-moldados de concreto ou Pavers. Segundo Smith (2003), este tipo de sistema foi desenvolvido na Holanda como um substituto dos blocos de tijolo de barro.

De acordo com Cruz (2003), relatos levam a acreditar que o início da produção de Pavers de concreto de cimento Portland foi no final do século XIX, sendo encontrados registros de patentes mesmo antes do começo da Primeira Guerra Mundial. Sendo que os principais avanços na tecnologia de fabricação e execução de pavimento intertravado ocorreram na Holanda e Alemanha no período de reconstrução dos países após a Segunda Guerra Mundial. Na década seguinte se evoluiu muito em função do desenvolvimento de novos modelos de fôrmas para a fabricação dos Pavers (FIORITI, 2007).

Segundo Fioriti (2007) as primeiras fôrmas produziam peças que seguiam o mesmo padrão dos tijolos e pedras aparelhadas que eram utilizadas na construção de caminhos e estradas antigas, conforme ilustrado na figura 9, onde é relatado um breve histórico da pavimentação intertravada. A vantagem dos Pavers, sobre as pedras aparelhadas está no menor custo de produção e execução, bem como homogeneidade dimensional.

Figura 9 - Breve histórico da pavimentação intertravada



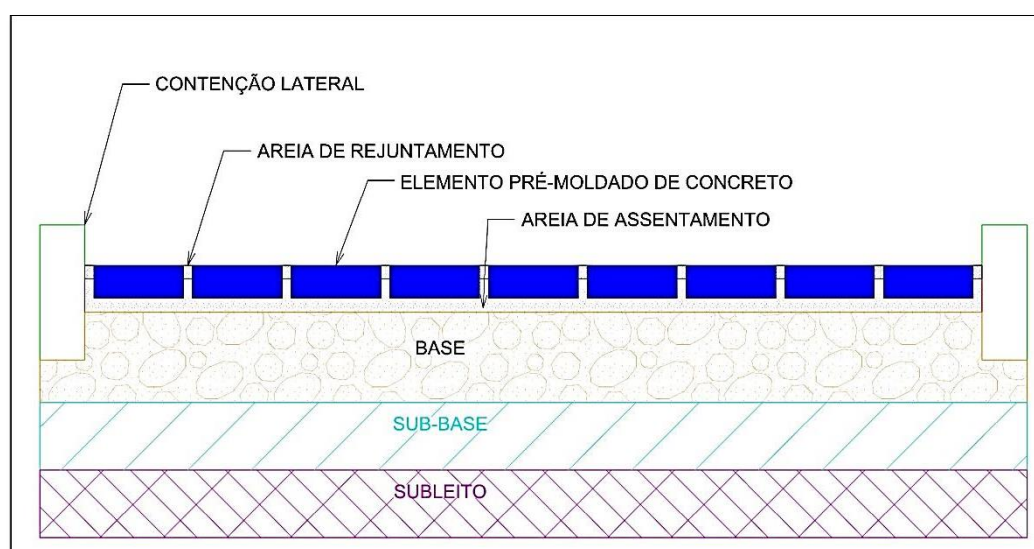
Fonte: (ABCP, 2015)

A pavimentação intertravada pode ser definida como um sistema em que os blocos de concreto são encaixados entre si na pavimentação, distribuindo as tensões e os carregamentos entre as peças, em um comportamento solidário. O sistema intertravado em função de suas características deve ser executado com preenchimento das juntas entre as peças e possuir contenção lateral, sendo o sistema de contenção descrito conforme o manual técnico *Edge Restraints for Interlocking Concrete Pavements do Interlocking Concrete Pavement Institute* (2011a), como elementos necessários no sistema de execução de pavimentos com blocos intertravados de concreto, sendo sua principal função delimitar o trecho pavimentado e restringir a movimentação dos blocos. O mesmo manual ainda relata que estas restrições laterais também são empregadas quando houver necessidade de mudanças de padrão de assentamento, seja ela com alteração do layout dos blocos ou com a diversificação do tamanho dos elementos.

A norma que se aplica à pavimentação intertravada com peças de concreto sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos é a NBR 15.953 – Pavimento Intertravado com peças de concreto - execução. A qual define o pavimento Intertravado como pavimento

flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída de peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento, sendo as juntas entre as peças preenchidas por material de rejuntamento e intertravadas por um sistema de contenção, conforme ilustrado na figura 10. As peças pré-moldadas compõem a pista de rolamento, sendo esta, considerada como um revestimento de grande durabilidade e resistência, sendo assentada sobre uma camada delgada de areia.

Figura 10 - Estruturas de um pavimento intertravado



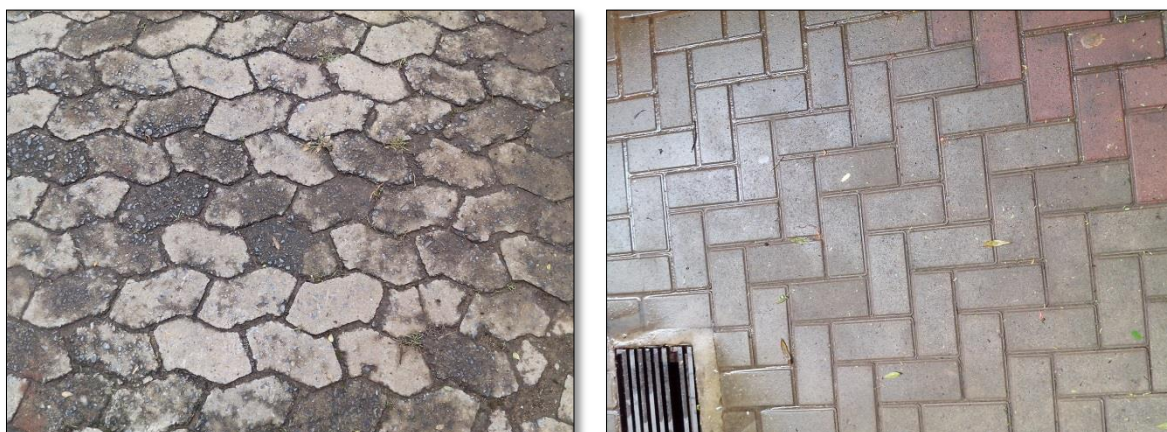
Fonte: Adaptado de (HALLACK, 1998)

Os elementos da pavimentação intertravada devem ter resistência suficiente para suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego, boa resistência à abrasão e capacidade de redistribuição das cargas para a camada de base, bem como manter as estruturas inferiores com baixos níveis de umidade permitindo melhor estabilidade do material constituinte, em consonância com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1999) e Hallack (1998), apud Fioriti (2007). Estudos de Knapton (1996) apud Silva (2011c) reforçam a preocupação com as camadas inferiores (bases), as quais devem ser pouco permeáveis ou impermeáveis, de forma a evitar a penetração da água e a prematura deterioração do subleito.

De acordo com Cruz (2003), a cidade do Rio de Janeiro se destaca na utilização de Paviers de concreto sendo que conta com mais de um milhão de metros quadrados

executados. Fioriti (2007) destaca que foi registrado um crescimento da ordem de 35% em todo Brasil entre os anos de 2002 e 2003 e quase o dobro deste valor nos anos seguintes 2003 e 2004. Atualmente, de acordo com a Bloco Brasil-Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto, são produzidos 6 milhões de metros quadrados por ano no Brasil. A figura 11 ilustra dois modelos de elementos pré-moldados de concreto.

Figura 11 - Modelos de Pavers de concreto com cimento



Fonte: Próprio autor

Segundo Hallack (1998) a camada de rolamento responde também pela função estrutural do pavimento devido à alta rigidez do concreto aliada ao sistema de intertravamento das peças pré-moldadas. Porém, é verificado que mesmo com alta rigidez das peças, ocorre uma pequena deformação da camada de assentamento quando esta é solicitada pelo tráfego, o que gera outro efeito, só que positivo, que é o rearranjo das peças ocasionadas pelo sistema de intertravamento que faz com que o pavimento melhore a sua forma estrutural (SIMIELI *et al.*, 2007).

Estudos de Shackel (1990) compararam Pavers com espessura de 6 e 8cm respectivamente e chegaram a conclusão que as peças de maior espessura apresentam menor deformação permanente com a mesma carga aplicada, e outro fato interessante verificado é que independente da espessura, a deformação inicial dos elementos é bem significativa, estabilizando com o passar do tempo.

2.5.2 Estudos e pesquisas *versus* normas técnicas

A norma brasileira que rege este tipo de pavimento, ABNT NBR 9781-2013 “Pecas de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio” que substitui e cancela as normas ABNT NBR 9781/87 e ABNT NBR 9780/87 define as características estruturais e dimensionais dos elementos que compõem o sistema e trata da realização dos ensaios de resistência a compressão, absorção de água e da resistência a abrasão. Segundo a referida norma, a resistência à compressão que define a qualidade dos elementos, deve ser de 35 Mpa para as solicitações de veículos comerciais de linha e 50 Mpa, quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão. Não existem normas brasileiras referentes a elementos pré-moldados para pisos intertravados feitos com outro tipo de material, além do cimento Portland e agregados.

Muitos estudos foram realizados por pesquisadores com a intenção de mudar ou de adicionar outros tipos de agregados na fabricação dos Pavers. Como exemplos, podem ser citados: Fioriti (2007), que estudou a adição de resíduos de pneus inservíveis em substituição ao agregado miúdo na mistura de concreto, que embora não tenha atingido o valor mínimo de resistência requerida pela Norma NBR 9781 que é de 35 MPa, chegou-se a valores da ordem de 18 MPa a 22 MPa com adições de 8% e 12% de resíduos de pneus. O autor cita ainda outros progressos acarretados nesta substituição em comparação às dosagens de controle, que são a melhoria da resistência à abrasão, menor absorção de água, maior resistência ao impacto e baixa expansão por umidade, desta forma defende o autor a utilização destes elementos pré-moldados de concreto em locais de baixa solicitação de carga, mesmo não se atingindo a resistência limite de norma; e, Simieli (2007) onde foi proposta a utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. Simieli destaca a importância da utilização destes resíduos como uma forma de se reduzir o impacto ambiental causado pela deposição inadequada destes materiais no meio ambiente. Segundo seus estudos foram alcançadas resistência a compressão acima do requerido por Norma, que é de 35 MPa, além de resultados satisfatórios em termos de módulo de elasticidade. O trabalho de Simieli propôs a substituição de 40% do agregado natural por resíduos da construção civil e segundo o autor, com

estes resultados, o produto poderia ser utilizado em calçadas, pavimentação de quintais e espaços urbanos em geral.

Na mesma linha, o trabalho de Lyra (2007) que estudou e avaliou a fabricação de elementos de pavimento intertravado com a adição de resíduos de Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila – EVA – para pavimentação de calçadas e passeios públicos em sua dissertação de mestrado. Neste estudo, avaliou-se a utilização de resíduos de EVA moídos e o pó de EVA em diferentes proporções no desenvolvimento de compósito cimentício. Para os ensaios de resistência a compressão foram conseguidos valores 29% inferior aos elementos de referência, atingindo patamares da ordem de 25 MPa quando foram substituídos 50% do volume de areia por resíduos de EVA moído, sendo que esta quantidade representa 27% em volume de agregados da dosagem. Entretanto, quando foi substituído o pó de pedra pelo resíduo de Pó de EVA, representando o equivalente a apenas 7% do volume de agregados naturais totais da dosagem referencial, a resistência caiu drasticamente, o que demonstra a importância do agregado fino, pó de pedra, para uma melhor compactação e desempenho dos elementos. Para as dosagens com pó de EVA e EVA moída obtiveram valores de resistência à compressão 50% e 46% inferior em comparação à dosagem de referência. Desta forma, e com base nos resultados do trabalho, o autor vislumbra a possibilidade de utilização da dosagem de EVA moída em substituição à areia na composição da mistura, desde que para fabricação de elementos de pavimento intertravado de concreto para serem utilizados em locais de baixa solicitação de carga. Além disso, defende o aprofundamento dos estudos em outras dosagens com a incorporação de EVA, de maneira a viabilizar o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios no mercado da construção civil.

Destaca-se também o estudo de Silva (2011c), que propôs substituir o agregado por escória de aciaria, sendo que neste trabalho o autor concluiu que as propriedades físicas dos agregados de escória eram iguais ou melhores quando comparados aos agregados naturais. Depois de misturados e moldados os elementos apresentaram menor absorção de água, menor porosidade, massa específica seca maior, maior resistência à compressão nas idades iniciais e elevada resistência à flexão em todas as idades. O trabalho ainda conclui que é viável e de interesse técnico, ambiental e

sustentável a utilização deste resíduo com esta finalidade. Outras pesquisas, como o Trabalho de Bahiense (2011) que avaliou a influência da incorporação da Lama de Beneficiamento de rochas ornamentais como agregado na constituição dos pavimentos intertravados em sua tese de doutorado. Neste trabalho o autor chegou a valores de resistência a compressão da ordem de 36,70 MPa, valor superior à norma NBR 9781 que define o mínimo de 35,0 MPa para utilização em locais de circulação de veículos comerciais e de linha.

Dentre outros trabalhos, pode ser citado o de Freire (2012) que propôs a substituição dos agregados naturais pelo resíduo do beneficiamento do itabirito (minério de ferro) em sua tese de doutorado, no qual o autor chega à conclusão de que é possível a substituição do agregado miúdo na fabricação de blocos de pavimentação, mesmo estes agregados apresentando módulo de finura abaixo da zona utilizável. Os blocos apresentaram resistência entre 13,13 e 18,09 MPa e segundo suas observações estes elementos poderiam ser utilizados em calçadas e estacionamentos.

A utilização deste tipo de pavimentação vem crescendo muito nos últimos anos, desde o pioneirismo da produção que aconteceu primeiramente na Europa com Alemanha, Holanda, Bélgica e França, posteriormente contando com a participação dos Estados Unidos e Canadá (GODINHO, 2009). Cruz (2003) destaca que os países estão em busca de melhorias nos processos normativos, de forma a obter consenso sobre os tipos de ensaios utilizados para atestar o desempenho dos elementos de concreto para pavimentação, além de estabelecer especificações de qualidade para controle de recebimento, bem como das técnicas construtivas.

Conforme definido por Shackel (1990) as especificações gerais sobre Pavers compreendem cinco características consideradas importantes para o respectivo controle, sendo elas:

- As relativas aos materiais que são utilizados em sua produção – Cimento, agregados, aditivos, pigmentos e água, os quais seguem as normas de concreto específicas de cada país;
- Os itens relativos ao dimensional e tolerâncias que influenciam diretamente a forma de assentamento das peças bem como a homogeneidade das juntas e

nivelamentos. A maioria das especificações existentes indica tolerâncias máximas de variação do comprimento e largura das peças em 2,0 a 3,0mm, enquanto para a espessura são de 2,0 a 5,0mm;

- A resistência, sendo esta característica relativa à capacidade do elemento de ser manuseado durante sua execução, aplicação no pavimento e ser capaz de suportar as ações do tráfego e quaisquer outras formas de utilização;
- A durabilidade, que é uma característica balizada pela resistência à Abrasão;
- Aparência, que diferencia os Pavers de outros revestimentos, e segundo as normas ainda é tratada de forma muito subjetiva, sendo que dos itens que compõem a aparência dos elementos de concreto, podemos citar a uniformidade, textura e cor da superfície.

Conforme norma americana ASTM C936/C936M (2013), ASTM C140C/140M(2014) e ABNT NBR 9781(2013) pode ser visualizado na tabela 1, as características físicas e mecânicas mínimas exigidas nas referidas normas. Cabe ressaltar que estas normas tratam de especificações para elementos intertravados de concreto cujo aglomerante é o cimento Portland, sendo estes elementos os constituintes da camada de rolamento de pavimentos que necessitam atender às solicitações do tráfego de veículos leves e pesados. No quesito resistência à compressão, Shackel (1990) em experimentos realizados na África do Sul cita que não há correlação entre a resistência do elemento e o comportamento estrutural do pavimento quando comparados pavimentos executados com Pavers com resistência entre 25 e 50 MPa, o que reforça a tese de que não é necessária uma alta resistência do elemento para que o pavimento tenha boa performance. A norma Brasileira prevê resistência mínima de 35 MPa.

De acordo com estudos de Cruz (2003) as normas no geral ainda não entraram em consenso sobre os métodos de ensaios utilizados, tipos de equipamentos, corpos de prova (peça inteira, cilindros, cubos serrados), condições de umidade da amostra a ser ensaiada (saturada com superfície seca, seca em ambiente natural, seca em estufa), idade de ensaio e número de corpos de prova que deve ter cada amostra. Fioriti (2007) em consonância com Cruz (2003) destaca que há muitas lacunas na norma NBR 9781 por esta não tratar da aplicação de elementos de concretos em

pavimentação de áreas como portos, aeroportos e rodovias de tráfego médio, bem como outras aplicações de baixa solicitação.

Tabela 1 - Requisitos de Pavers (normas ASTM C936, C140 e NBR 9781)

Requisitos		Limites Aceitáveis	
		ASTM-C936	NBR-9781
Dimensões das Peças	Área do Paver	< 0,065 m ²	-
	Relação comprimento/espessura	≤ 4	≤ 4
Tolerância Dimensional (mm)	Comprimento	± 1,6	± 3,0
	Largura	± 1,6	± 3,0
	Altura	± 3,2	± 3,0
Resistência à Compressão (MPa)	Média	≥55,0	-
	Individual	≥50,0	-
	Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais	-	≥35,0
	Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	-	≥50,0
	Corpo de Prova	Peça inteira	Peça inteira
Área considerada no ensaio de Resistência à Compressão		Área líquida conforme ASTM C 140-02	-
Absorção	Média	≤ 5%	≤ 6%
	Individual	≤7,0%	≤7,0%
Resistência ciclos gelo-degelo		Perda de massa <1,0% (após 50 ciclos)	-
Resistência a abrasão (Perda de volume)		≤15 cm ³ /50 cm ²	* ≤ 23mm
			** ≤ 20mm

* Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha

** Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados

Fonte: ASTM C936, 2013, C140 e ABNT-NBR 9781

Cruz (2003) cita que a normalização brasileira ainda tem muito a evoluir, se comparado a outros exemplos de sucesso como Estados Unidos, Canadá, Colômbia e União Europeia, cujas normas estabelecem dentre outros quesitos, critérios de qualidade na produção, inclui-se ai o ensaio de escorregamento com pêndulo britânico, bem como sugere alguns ensaios de verificação durante o processo de

fabricação, de forma a garantir homogeneidade dimensional dos Pavers e procedimentos na hora de recepção do material em obra.

Fioriti (2007) destaca que o valor mínimo de resistência à compressão exigido no Brasil (35 MPa segundo a NBR 9781) é superior ao valor especificado na Austrália e África do Sul, que é de 25 MPa, em função do tipo de uso do Paver. O mesmo autor reforça que Austrália e África do Sul possuem mais experiência e domínio da técnica em comparação ao Brasil.

Cruz (2003) salienta que as normas brasileiras sobre Pavers ficam aquém da necessidade do mercado de pavimentação intertravada. Cita também exemplos de pavimentos executados na cidade do Rio de Janeiro cuja espessura dos elementos é de apenas 40mm, inferior aos quesitos de norma que estabelece 60mm no mínimo, pavimentos estes que estão sendo utilizados em locais de baixa solicitação de tráfego e carga, como praças, ciclovias, calçadas, etc., sendo que pelo menos 20% destas obras já executadas a mais de 8 anos e apresentando um excelente desempenho.

Conforme norma americana ASTM C902 *Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick*, que trata da especificação de pisos para tráfego de pedestres e pavimentos de baixa solicitação de carga, pode ser observado, conforme apresentado na tabela 2, os valores de resistência adotados por tal norma que dependendo do ambiente e das condições do clima, permite a utilização de elementos com resistência mínima de 17,2 MPa, conforme classificação [MX], ou seja ambientes externos que quando molhados, não estão sujeitos às ações de gelo e degelo, enquadrando-se aí os revestimentos exclusivos para tráfego de pedestres, conforme título da própria norma.

Tabela 2 - Requisitos e propriedades de resistência dos elementos

Classe	Resistência a compressão (MPa)		Absorção de água (%)	
	Média de 5 elementos	Individual	Média de 5 elementos	Individual
SX	≥55,2	≥48,3	8	11
MX	≥20,7	≥17,2	14	17
NX	≥20,7	≥17,2	sem limites	sem limites

Fonte: ASTM C902/2014

A ASTM C-902 classifica os elementos de acordo com: (1) Resistência em relação ao intemperismo ao qual o piso estará sujeito e (2) conforme o tráfego. Sendo o intemperismo subdividido em três classes; SX, MX, NX, assim definidas:

- SX: Classe mais rígida, na qual o elemento está sujeito às ações de gelo e degelo;
- MX: Para ambientes externos que quando molhados não estão sujeitos às ações de gelo e degelo;
- NX: Ambientes internos que quando molhados não estão sujeitos às ações de gelo e degelo;

No Brasil e mais precisamente no sudeste brasileiro, por ser caracterizado como uma região de clima tropical, conforme (SANTOS, 2002) não apresentaria nenhuma restrição ao uso das classes MX e NX, podendo apresentar elementos com resistência a compressão de no mínimo 17,2 MPa e valor médio para cinco elementos testados em 20,7MPa.

Em relação ao tráfego, conforme ASTM C902, a característica que determina a utilização é a resistência à abrasão, a qual é dividida em três classes, sendo elas:

- Tipo I – Quando os elementos estão sujeitos à abrasão extensa;
- Tipo II – Quando os elementos estão sujeitos à abrasão intermediária;
- Tipo III – Quando submetido à baixa abrasão.

Os requisitos mínimos sobre a resistência a abrasão exigidos por esta norma podem ser visualizados na tabela 3, sendo que o índice de abrasão é determinado conforme fórmula abaixo:

$$i = \frac{100 \times A}{R} \quad \text{Equação [1]}$$

Sendo:

- i = índice de abrasão; A = Absorção; R = Resistência à compressão.

Onde a absorção é definida em porcentagem e a resistência à compressão em libras por polegadas quadradas (psi).

Tabela 3 - Requisitos de propriedades de resistência de abrasão

	Índice de abrasão (max)
Tipo I	0,11
Tipo II	0,25
Tipo III	0,50

Fonte: ASTM C902/2014

Para as tolerâncias dimensionais a ASTM C902 permite variações maiores se comparadas com a NBR 9781 e ASTM C-936 sendo indicados na tabela 4 seus valores:

Tabela 4 - Tolerâncias dimensionais

Dimensão (mm)	Máxima variação admissível da dimensão especificada, mais ou menos		
	Aplicação PS	Aplicação PX	Aplicação PA
< 76	3,2	1,6	Sem limites
76 < 127	4,7	2,4	Sem limites
127 < 203	6,4	3,2	Sem limites
> 203	7,9	5,6	Sem limites

Fonte ASTM C902/2014

Onde:

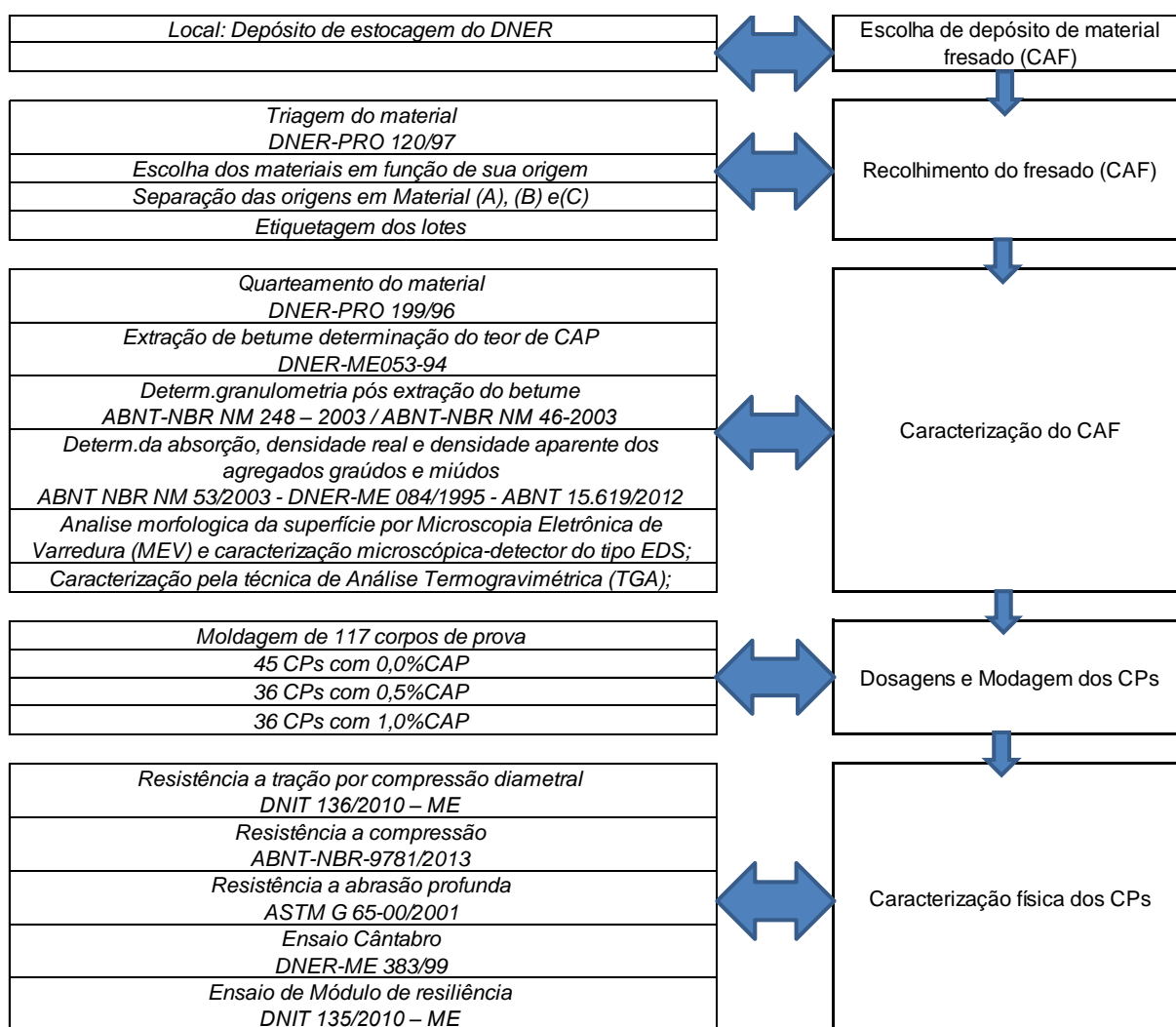
- PS - Elemento para uso geral com ou sem juntas individuais sem grande rigor nas tolerâncias dimensionais.
- PX - Elementos para uso geral, instalados sem juntas individuais e maior exigência na uniformidade entre os elementos.
- PA - Elementos para pavimentação que produzirão efeitos arquitetônicos característicos da não uniformidade do tamanho, cor e textura dos elementos.

A Norma NBR 9781/2013 revisada há pouco mais de três anos, norma esta que esteve vigente há pelo menos 26 anos, sem nenhuma alteração no período, mantém algumas especificações consideradas rígidas demais pela comunidade científica, mesmo com uma série de trabalhos e estudos desenvolvidos neste intervalo, os quais sempre reivindicaram mudanças em alguns critérios na fabricação e utilização deste tipo de pavimento de forma a otimizar a aplicabilidade do material garantindo também a padronização e controle de qualidade do mesmo. Dentre as reivindicações de alguns autores, consta na ABNT NBR 9781 de 2013 os critérios e métodos para determinação da absorção de água e resistência a abrasão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental proposto visou atender o objetivo geral e específico da pesquisa. A figura 12 apresenta resumidamente o fluxograma do programa experimental desenvolvido.

Figura 12 - Fluxograma de trabalho



Fonte: Próprio autor

Neste capítulo são indicadas as origens do CAF que foram objeto da pesquisa, os quais, depois de aquecidos e misturados resultaram no CARQ. Apresenta-se também a descrição dos ensaios de caracterização realizados no CAF e nas misturas a quente, após moldagem dos corpos de prova.

Para o estudo proposto, o CAF foi caracterizado e posteriormente foram moldados os corpos de prova utilizando o compactador Marshall. Foram utilizados CAF's de três pontos distintos de uma mesma rodovia, sendo considerados para a confecção dos CPs, exemplares sem adição de CAP e com acréscimo de 0,5% e 1,0% de CAP em relação ao peso total da mistura. Caracterização conforme abaixo:

Fresado (CAF):

- Determinação do Teor de Betume;
- Determinação das Curvas Granulométricas;
- Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados graúdos/miúdos e densidade máxima da mistura;
- Análise da morfologia da superfície dos fresados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS, instalado na câmara de vácuo do microscópio;
- Caracterização pela técnica de Análise Termogravimétrica (TGA);

Corpos de Prova (CPs):

- Moldagem de 117 corpos de prova, divididos conforme relação de ensaios abaixo:
 - Moldagem de 54 CP's para o ensaio de Resistência a compressão, sendo 18 CP's por procedência, compreendendo os materiais de origem (A), (B) e (C) respectivamente. Os 18 CP's por material de origem foram divididos em 6 CP's para 0,0% de CAP, 6 com adição de 0,5% de CAP e 6 com acréscimo de 1,0% de CAP;
 - Moldagem de 27 corpos de prova para o ensaio de Absorção de água/ Resistência a tração por compressão diametral, sendo 9 CP's por procedência, compreendendo os materiais de origem (A), (B) e (C) respectivamente. Os 9 CP's por material de origem foram divididos em 3 CP's para 0,0% de CAP, 3 com acréscimo de 0,5% de CAP e 3 para adição de 1,0% de CAP;
 - Moldagem de 27 CP's para o ensaio de Resistência a abrasão profunda/Ensaio Cântabro, sendo 9 CP's por procedência, compreendendo

os materiais de origem (A), (B) e (C) respectivamente. Os 9 CP's por material de origem foram divididos em 3 CP's para 0,0% de CAP, 3 com acréscimo de 0,5% de CAP e 3 para adição de 1,0% de CAP;

- Moldagem de 9 CP's para o ensaio de Módulo de resiliência, sendo 3 CP's por procedência, compreendendo os materiais de origem (A), (B) e (C) sem adição de CAP;

Os materiais disponibilizados para a pesquisa foram cedidos pelo DNIT e recolhidos do depósito localizado no bairro Olhos D'água-BH/MG. Estas amostras são originárias de material fresado da rodovia BR-040, de trechos recapeados no perímetro da cidade de Belo Horizonte, sendo que as pilhas depositadas no pátio estavam separadas por tempo de exposição e envolvia obras realizadas em épocas distintas.

Estas características são interessantes do ponto de vista da diversidade do material, pois uma das respostas que se espera da pesquisa é determinar se seria possível a utilização deste material independentemente de sua origem e sem muita preocupação com o grau de oxidação, granulometria, bem como traços de contaminação com terra ou matéria orgânica, que fatalmente acaba se misturando, seja no carregamento, transporte ou exposição a longos períodos nos pátios de estocagem. Sendo assim, verificar a possibilidade, após inspeção visual e expedita, de utilizar este fresado na fabricação de elementos pré-moldados para pisos.

Foi idealizado um planejamento experimental para análise do comportamento da mistura de CARQ compactados pela metodologia Marshall e também a caracterização do CAF utilizado nesta mistura, para o conhecimento de suas principais propriedades, assim como seus constituintes, os quais interferem diretamente no desempenho mecânico e estrutural dos elementos pré-moldados.

As misturas utilizaram o material fresado com o ligante envelhecido sem adição de agentes rejuvenescedores. O objetivo consistiu na reciclagem do pavimento em uma escala de 100% de CAF. Foi avaliada também a adição de pequenas quantidades de ligante novo nas misturas das três origens, com a finalidade de verificar possíveis alterações no comportamento mecânico dos elementos moldados e fornecer

parâmetro para a definição do melhor custo benefício nas propriedades finais das misturas asfálticas recicladas. Estas adições permitiram trabalhar com misturas próximas ao teor ótimo de ligante. Tais adições de ligante se justificam pelo aumento de área superficial dos agregados durante o processo de fresagem.

3.1 Materiais

Aqui são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, e dentro deste item podem ser citados: O CAF, fresado composto por agregados graúdos/miúdos, aglutinados pelo cimento asfáltico oxidado e envelhecido e o CAP novo, adicionado nas misturas.

3.1.1 O CAF

Este material foi recolhido no depósito do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), antigo DNER, localizado no bairro olhos d'água, na cidade de Belo Horizonte/MG. O CAF foi dividido em três grupos, os quais serão referenciados a partir deste momento em Material (A), Material (B) e Material (C), sendo cada um deles originários de trechos diferentes de uma mesma rodovia. Em inspeção visual, o Material (A) aparentemente apresentou pequenos pontos de material terroso, possivelmente oriundos do processo de fresagem mais profunda ou interferência com horizontes heterogêneos das camadas de rolamento da via, a qual tenha sido contaminada com pequenos fragmentos da base. O Material (B), um material visualmente mais limpo e homogêneo com coloração mais escura, típica de fresagem de camada de rolamento com profundidades menores, não apresentando sinais de contaminação por agregados da base e finalmente o Material (C), que se apresenta mais fragmentado, mas também com aparência homogênea, sem sinais de contaminação com material da base do pavimento.

O total de material utilizado na pesquisa foi cerca de 400 quilos. A figura 13 representa as amostras das três origens de materiais, respectivamente, material (A), (B) e (C).

Figura 13 - Amostras do CAF *in natura*



Fonte: Próprio autor

Segundo suas identificações, os materiais foram divididos em 3 (três) conjuntos, sendo o primeiro composto por CAF sem adição de CAP, o segundo com adição de (0,5%) de ligante e por fim, o terceiro conjunto com acréscimo de (1,0%) de Cimento Asfáltico de Petróleo em relação ao peso total da mistura. Não foram usados agregados novos na composição da mistura, sendo utilizados 100% de CAF em todas as amostras.

3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo

O material utilizado foi o CAP 50/70 da Petrobras, cujas características podem ser identificadas na tabela 5. Foram adicionadas porcentagens de 0,5% e 1,0% de CAP, em relação ao peso total da mistura, para avaliar a influência destas adições nas propriedades mecânicas dos corpos de prova e verificar o custo/benefício para a aplicabilidade proposta do material reciclado, visto que o CAP é o componente que representa o valor principal em uma mistura asfáltica. Utilizou-se cerca de 2 (dois) quilos de ligante novo. Estas porcentagens foram definidas em função da granulometria apresentada pelos materiais (A), (B) e (C), e de forma que as misturas fossem caracterizadas mecanicamente com pequenas variações em torno do Teor Teórico de CAP. O Teor Teórico de CAP foi calculado com base nos estudos de Moreira (2009), no qual o autor avalia os conceitos e a prática deste percentual teórico em uma mistura de CBUQ.

Tabela 5 - Especificações do CAP-50/70 - Classificação por penetração

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	CAP 50 / 70	MÉTODOS		
			ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 - 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento	°C	46	NBR 6560	D 36	-
Viscosidade Saybolt Furol	-	-	NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín	s	141			
a 150 °C, mín		50			
a 177 °C		30 - 150			
Viscosidade Brookfield			NBR 15184	D 4402	-
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín	cP	274			
a 150 °C, SP 21, mín.		112			
a 177 °C, SP 21		57 - 285			
Índice de susceptibilidade térmica	-	(1,5) a (+0,7)	-	-	-
Ponto de fulgor mín	°C	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min					
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	-	D 2872	-
Ductilidade a 25° C, mín	cm	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	NBR 6560	D 36	-
Penetração retida, mín (3)	%	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: ANP – RESOLUÇÃO Nº 19 DE 11.07.2005

3.2 Métodos

Para atingir os objetivos propostos, foi necessária uma série de atividades que serão detalhadas conforme sequência abaixo.

3.2.1 Ensaios de caracterização dos materiais constituintes do CAF

Na primeira etapa foi verificado o teor de betume das amostras com a utilização de máquina centrífuga do tipo extrator Rotarex. Este extrator foi utilizado também para separar todo o material necessário para viabilizar o ensaio de granulometria do CAF, bem como as determinações de absorção do agregado graúdo, densidade aparente e densidade real dos agregados graúdo e miúdo. Os fresados foram caracterizados conforme abaixo:

- Extração de betume pelo extrator Rotarex atendendo a norma DNER-ME053-94 - Misturas betuminosas - percentual de betume;
- Definição da curva granulométrica conforme ABNT-NBR NM 248 - 2003 - Agregado - Determinação da Composição Granulométrica, DNER-ME083-98 - Agregados - Análise granulométrica e ABNT-NBR NM 46 – 2003 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem;
- Análise da morfologia da superfície dos fresados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS instalado na câmara de vácuo do microscópio;
- Caracterização pela técnica de Análise Termogravimétrica (TGA);
- Determinação do Gmm (Densidade máxima da mistura).

3.2.1.1 Determinação do percentual de Betume

Este ensaio conforme citado por Marques (2002), utiliza um extrator centrífugo conhecido por Rotarex, o qual permite a separação da parte granular da parte ligante das amostras do material fresado. Foram ensaiadas (3) três amostras de cada origem dos materiais (A), (B) e (C).

Para a realização do ensaio foi utilizado o laboratório de transportes do CEFET/MG e o equipamento disponibilizado foi o extrator de betume do tipo Rotarex, conforme ilustrado na figura 14. O solvente utilizado para a extração foi o tricloroetileno. Todas as amostras continham 1000g do fresado.

Figura 14 - Equipamento extrator de betume tipo Rotarex



Fonte: Próprio autor

Com a amostra de CAF recolhida em campo, coletada segundo as recomendações da norma DNER-PRO-120/97-Coleta de amostras de agregados e ABNT NBR NM 26 - 2001 - Agregados - Amostragem, foi realizada a técnica de quarteamento para seleção das amostras ensaiadas. Esta técnica seguiu as premissas de DNER-PRO 199/96 - Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.

Os procedimentos do ensaio seguiram as determinações da norma DNER-ME053-94 - Misturas betuminosas - percentagem de betume, conforme abaixo:

- Pesagem das amostras e disposição em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por uma hora.
- Desmanche dos grumos e quarteamento da mistura para obtenção de porções de cerca de 1000g;
- Classificação das amostras em A1, A2 e A3, para o material A. B1, B2 e B3 para o material B e C1, C2 e C3 para o material de origem C;
- Disposição do reagente sobre a amostra, com tempo de espera de 15 minutos;
- Fixação do prato sobre o extrator, com respectivos filtros;
- Energização e funcionamento da máquina centrífuga;
- O processo foi repetido, com o acréscimo de reagente no sistema até que não foi mais observada na mangueira de saída do extrator a presença de betume;

- Em seguida todo o material foi retirado da máquina extratora e acondicionamento em um armário do laboratório para que ocorresse a secagem ao tempo, ficando em repouso por aproximadamente 24 horas;
- Decorrido o tempo, o material foi pesado e anotado a sua massa.

Para o ensaio foi usado aproximadamente 500 ml de solvente por amostra de 1000g de CAF. Este ensaio poderia ter sido realizado com a utilização de vários tipos de reagentes, tais como gasolina, querosene, tricloro ou percloro etileno dentre outros, porém, em função da máquina disponível no laboratório do CEFET ser elétrica, não seria aconselhável a utilização de reagentes inflamáveis, por isto, foi empregado o tricloroetileno, o qual não é inflamável.

O resultado do teor de betume foi calculado conforme preconiza a Norma DNER-ME053-94 de acordo com a equação 2:

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \times 100 \quad \text{Equação [2]}$$

3.2.1.2 Ensaio de granulometria do CAF (sem ligante)

Para a determinação da curva granulométrica do CAF sem betume foram seguidos os procedimentos da norma ABNT-NBR NM 248 – 2003- Agregados - Determinação da composição granulométrica e ABNT-NBR NM 46-2003-Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Para a realização do ensaio foram utilizados 2,0kg de fresado em cada uma das amostras, totalizando aproximadamente 20kg de agregado sem ligante.

As peneiras utilizadas no ensaio foram as da série normal, conforme NM 248-2003, representadas na tabela 6, acrescida da peneira #0,075, visto que necessitávamos conhecer o percentual de materiais passantes nesta peneira, para comparar as amostras com os limites inferiores e superiores da faixa “C” do DNIT, utilizada como referencial. O conhecimento desta porcentagem de materiais finos presentes nas amostras apresenta-se de grande importância para a compreensão das possíveis alterações nas características mecânicas dos elementos pré-moldados.

Tabela 6 - Série de peneiras

Série Normal	Série Intermediária
76mm	
-	64mm
-	50mm
38mm	-
-	32mm
-	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,8mm	-
2,4mm	-
1,2mm	-
0,6mm	-
0,3mm	-
0,15mm	-

Fonte: ABNT NBR NM 248, 2003

A quantidade mínima de material para o ensaio foi lastreada pela tabela 7, referenciada na mesma norma e transcrita abaixo. Para a determinação deste valor foi realizado um ensaio prévio para definição da dimensão máxima característica do fresado. A partir deste resultado estabeleceu-se uma porção mínima de 2kg por origem de material. Para tanto, cabe ressaltar que segundo a norma NM 248, 2003 a determinação da dimensão máxima característica pode ser definida pela peneira que retém uma quantidade acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Deste ensaio também foi calculado o módulo de finura, o qual é representado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Estas duas grandezas são importantes e orientam quanto a classificação dos agregados, sendo que na comparação com materiais de mesma dimensão máxima característica e com curvas granulométricas distintas, a amostra que apresentar o menor valor para o módulo de finura será considerada a mais fina.

Tabela 7 - Massa mínima por amostra de ensaio

Dim.máxima nominal do agregado mm	Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19	5
25	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300
(*)Após secagem	

Fonte: ABNT NBR NM 248, 2003

A base do ensaio foi o peneiramento grosso e fino conforme as definições das normas citadas, onde foram utilizadas as peneiras #25,0, #19,0mm, #12,5, #9,5mm, #4,8mm e #2,0mm para o peneiramento grosso e #1,2mm, #0,6mm, #0,42mm, #0,25mm, #0,15mm e #0,075mm para o peneiramento fino. Os materiais retidos foram pesados em balança de precisão de 0,1g.

Para a separação em material grosso e fino utilizou-se a peneira de nº10 (#2,0mm) na qual todo material retido foi classificado como grosso e o material passante definido como fino. Do material passante pela peneira #2,0mm tomou-se 300g, o qual foi lavado na peneira de malha #0,075mm. Após lavagem o material ficou em estufa com temperatura variando de 110°C ± 5°C para secagem. Optou-se por tomar como referência adicional a Norma ABNT NBR 7181/84 - Solo - Análise Granulométrica, para a verificação da influência do teor de umidade na composição granulométrica da fração de finos. O detalhamento do peneiramento pode ser observado abaixo:

Peneiramento fino:

- O material foi passado nas peneiras de #1,2mm; #0,6mm; #0,42mm; #0,25mm; #0,15mm e #0,075 mm, com a utilização de peneiramento mecanizado (aproximadamente 15 minutos);
- Foram determinadas com exatidão de 0,01 g as massas retidas acumuladas em cada peneira.

Peneiramento grosso:

- O material retido na peneira de #2,0 mm, foi passado nas peneiras de malha #25mm; #19mm; #12,5, #9,5mm; #4,8mm e #2,0 mm com a utilização de peneiramento mecanizado (aproximadamente 15 minutos);
- Foram identificadas as massas retidas acumuladas em cada uma das peneiras com exatidão de 0,01g.

Para a determinação do teor de umidade tomou-se uma porção de 50g conforme DNER-ME 213/94- Solos Determinação do teor de umidade. Foram feitas três determinações do teor de umidade.

Para efeito comparativo a tabela 8 ilustra as curvas granulométricas dos agregados conforme (DNIT, 2006), sendo a faixa “C” a utilizada em camada de rolamento para pavimentos.

As curvas granulométricas foram plotadas em gráficos, de acordo com os valores retidos em cada uma das peneiras, para que fosse possível analisar seu deslocamento em relação às especificações do DNIT, posteriormente justificativas serão apresentadas com a finalidade de entender melhor as variações.

Tabela 8 - Especificações granulométricas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: (DNIT, 2006)

3.2.1.2.1 Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados graúdos/miúdos e densidade máxima da mistura

Após a determinação das curvas granulométricas, os agregados graúdos e miúdos dos materiais (A), (B) e (C) tiveram sua densidade real em g/dm³ definida conforme os critérios de ensaio das normas ABNT NBR NM 53-2003 e DNER-ME 084/95 respectivamente, propriedade que será utilizada para definição do Teor Teórico de CAP segundo (MOREIRA, 2009). Sendo assim, de acordo com equação 3 é definida a densidade aparente dos agregados. A equação 4 ilustra a formulação para obtenção da densidade real dos agregados. Para a definição da propriedade de absorção de água, foi utilizada a fórmula referenciada também na norma NM 53, conforme equação 5.

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C}$$

Equação [3]

Onde:

- Gsb = Densidade aparente do agregado;
- A = Massa seca do agregado em g;
- B = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em (g);
- C= leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em (g) (pesagem hidrostática).

$$Gsa = \frac{A}{A-C} \quad \text{Equação [4]}$$

Onde:

- Gsa = Densidade real do agregado.

$$a = \frac{B-A}{A} * 100 \quad \text{Equação [5]}$$

Onde:

- a= Absorção de água do agregado definida em percentual.

Para a determinação da (Gmm) ou densidade específica Rice, do CAF, cujo resultado será utilizado para cálculo do percentual de vazios das misturas asfálticas compactadas, foram utilizados os procedimentos com bomba de vácuo e de acordo com a determinação da norma ABNT 15.619/2012 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.

O ensaio foi adaptado em relação aos procedimentos de norma, sendo utilizadas 6 (seis) amostras por material (A), (B) e (C), em picnômetros de 600ml. As amostras foram fracionadas em porções de 500g cada, para se adaptar a aparelhagem disponível no laboratório.

Aparelhagem utilizada

- Picnômetro de 600ml com saída superior e tampa de cortiça provida com tubulação de cobre para fixação à bomba de vácuo;
- Balança com precisão de 0,01g;
- Bomba de Vácuo capaz de evacuar o ar do recipiente com uma pressão residual de 4 kPa (30 mm de Hg) com manômetro acoplado;
- Termômetro com precisão de 0,5° C;
- Banho de água (Banho Maria) para imersão do recipiente de vácuo capaz de manter a temperatura constante do meio líquido entre 25±3°C;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 110 ± 5° C;
- Panela, bandeja de alumínio, luvas e Fogareiro.

Procedimentos de ensaio

- Pré-aquecimento da mistura em estufa por 15 minutos, seguida de aquecimento na panela e fogareiro até a temperatura aproximada de 140°C;
- Disposição da mistura ainda quente sobre bandeja, promover a separação das partículas da mistura com as mãos, com o devido cuidado, evitando a quebra de partículas e mantendo as porções de agregados finos inferiores a 6mm;
- Após resfriamento à temperatura ambiente, colocar a amostra no picnômetro e promover a pesagem ao ar;
- Adicionar água a uma temperatura de aproximadamente 25°C até cobrir a amostra completamente, dentro do picnômetro;
- Colocar o recipiente com a amostra e água sobre o agitador mecânico e conectá-lo na mangueira proveniente da bomba de vácuo. Ligar o agitador mecânico e iniciar a remoção de ar da amostra pelo aumento gradual da pressão de vácuo até o manômetro indicar uma pressão residual de 30 mm de Hg por 15min;
- Preencher o picnômetro com água de forma a não introduzir ar na amostra;
- Colocar o picnômetro em um banho de água por 10 ± 1min até estabilizar as temperaturas. Medir e registrar a temperatura da água dentro do frasco;
- Determinar a massa do frasco com a amostra e completo com água.

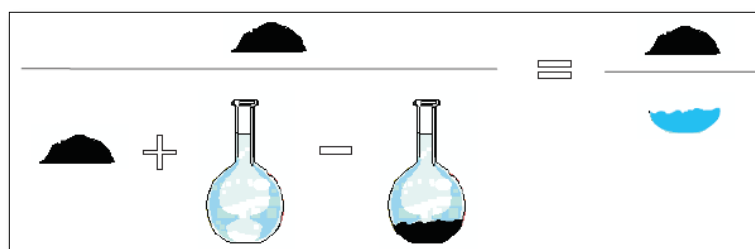
A determinação da (G_{mm}) densidade máxima da mistura é feita conforme a equação 6:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad \text{Equação [6]}$$

Onde:

- A = massa da amostra seca em ar, (g);
- B = massa do recipiente com volume completo com água, (g);
- C = massa do recipiente + amostra submersa em água, (g).

Figura 15 - Massas consideradas para G_{mm}



Fonte: (BERNUCCI *et al.*, 2008)

3.2.1.3 Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada objetivando avaliar forma, tamanho e a porosidade dos grumos de CAF, bem como a interação entre a interface agregado/CAP, além da definição dos microconstituintes das amostras. Estas análises permitirão também comparar as porosidades da microestrutura dos grumos de CAF das três amostras de maneira a avaliar qualitativamente suas possíveis diferenças e correlacionar com as informações colhidas na análise termogravimétrica. Também foram geradas imagens do material granular, presente nas amostras das três origens, as quais permitiram a visualização da interação do CAP com os agregados miúdos que representam a porção fina do fresado.

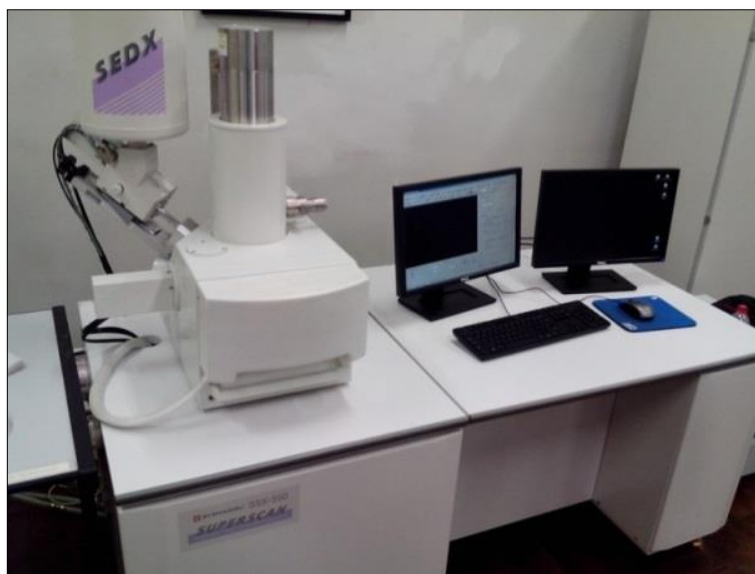
Sendo assim, as amostras foram divididas em dois conjuntos, sendo o primeiro obtido do pó solto, constituinte das partículas finas retiradas do fresado *in natura*, o qual foi preparado com recobrimento de ouro e em seguida analisado no MEV. O

segundo conjunto de amostras composto por grumos de fresado, foi dividido em duas metades, que posteriormente foi preparado da mesma maneira que os pós, seguido da microscopia. Foram geradas imagens preliminares em diversas ampliações para em seguida definir em quais escalas seriam conseguidas imagens mais nítidas. Após exame preliminar optou-se por ampliações de x100, x500 e x1000, para as amostras do pó e ampliações de x50 para os grumos dos fresados.

Devido ao material fresado ser tipicamente de uma mesma região do Brasil, optou-se por fazer a caracterização microscópica (EDS) de apenas uma das amostras, e a que se apresentava mais homogênea, sendo escolhida neste caso a amostra (B). Neste tipo de procedimento, uma região, linha ou ponto é selecionado e posteriormente tem seus átomos excitados por um feixe de elétrons, que ao retornarem para o estado fundamental emitem fótons que possuem energia que são típicas para cada átomo. O detector de raios X faz a contagem e a identificação da energia emitida pelos fótons gerando um espectro característico que representa os elementos químicos presentes na amostra.

Para a obtenção das imagens foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X(EDS) elétrons secundários marca Shimadzu modelo Superscan SSX – 550, disponível no laboratório do CEFET/MG, conforme figura 16. Foram separados grumos dos três materiais fresados (A), (B) e (C) de aproximadamente 20g que posteriormente foram separados em duas metades, as quais foram dispostas no equipamento Coater, modelo SC-701 Quick Coater, para metalização, através de recobrimento com ouro, conforme figura 17.

Figura 16 - MEV Modelo SSX-550



Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Quick coater: Metalização



Fonte: Próprio autor

As amostras ensaiadas são do tipo não-biológicas, entretanto foi necessário o recobrimento das superfícies com uma película de ouro, para torna-las eletricamente condutoras e proporcionarem imagens mais nítidas. O processo de recobrimento envolveu a técnica do tipo Sputtering na qual átomos ou moléculas são ejetados de um alvo, no caso o ouro, pelo bombardeamento de íons positivos, provenientes de uma descarga elétrica em gás, fazendo com que o material desprendido se deposite

sobre o material a ser revestido. Na figura 18 é apresentado o porta amostras com as amostras metalizadas.

Figura 18 - Porta amostras e amostras metalizadas



Fonte: Próprio autor

As amostras foram selecionadas de forma a constituir uma porção mais representativa possível das condições estáveis do material examinado e foram manuseadas evitando desgaste por atrito, contaminações por líquidos ou poeira. O procedimento básico consistiu em:

- Coleta da amostra;
- Separação em duas metades;
- Fixação ao porta amostras através de fita adesiva apropriada;
- Realização do procedimento de metalização;
- Transporte da amostra metalizada para o porta amostras do MEV;
- Definição da área de interesse na amostra e setup do software, ajustando o foco, contraste e ampliação de maneira a se conseguir a melhor imagem.

3.2.1.4 Análise termogravimétrica do CAF e CAP

Dentre as principais técnicas de análise térmica, conforme (DENARI e CAVALHEIRO, 2012), este trabalho optou por utilizar a TGA, por permitir trabalhar com as propriedades de massa e temperatura, e correlacioná-las com a

decomposição/desidratação e as mudanças de fase que ocorrem durante as reações, conforme detalhado na tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades físicas e técnicas relacionadas em Análise Térmica

TÉCNICA	ABREVIATURA	PROPRIEDADE	USOS
Análise Termogravimétrica	TGA	Massa	Decomposição

Fonte: Adaptado de Denari e Cavalheiro (2012)

O ensaio de Termogravimetria foi feito pelo Departamento de Química do Cefet/MG. Amostras de 10 mg, tanto de CAP novo, quanto de CAF, foram aquecidas num cadinho padrão de alumina e os experimentos foram efetuados em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min com razão de aquecimento de $15^{\circ}\text{C min}^{-1}$, com início de escala a temperatura ambiente até a temperatura de 900°C .

As amostras do CAF foram selecionadas de forma a constituir uma porção mais representativa possível das condições estáveis do material examinado, incluindo ligante oxidado e agregados miúdos, sendo manuseados evitando desgaste por atrito e contaminações por líquidos ou poeira. O procedimento básico consistiu em:

- Coleta da amostra;
- Separação em duas metades;
- Pesagem de aproximadamente 10mg de amostra;
- Fixação ao porta amostras;
- Início do procedimento de aquecimento controlado;
- Aquisição dos dados por segundo com taxa de aquecimento de $15^{\circ}\text{C m}^{-1}$.

3.2.1.5 Determinação dos percentuais teóricos de CAP das misturas

É importante a interação de todos os resultados apresentados pelo fresado para entender o comportamento mecânico exibido pelas misturas recicladas. Desta forma, com a finalidade de verificar as possíveis variações nas características mecânicas dos corpos de prova moldados e o custo benefício da adição de ligante, foram acrescentados 0,5% e 1,0% de CAP em relação ao peso total da mistura, adições

estas que representam variações entre 5,0% e 20,0% do teor de CAP dimensionado para misturas utilizadas em pavimentação. Posteriormente os percentuais finais de ligante em cada amostra foram comparados com o Teor Teórico de CAP, o qual é definido em função da curva granulométrica apresentada pela amostra. O Teor Teórico de CAP foi obtido conforme estudo de Moreira (2009), em função da superfície específica apresentada por seus agregados, sendo esta superfície traduzida em índices que levam em consideração o percentual de material retido em cada peneira, conforme tabela 10.

Tabela 10 - Tabela de índices baseados na superfície específica

CÁLCULO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA			
GRADUAÇÃO	FRAÇÃO #		ÍNDICES
	PASSADO	RETIDO	C. MOREIRA
G-4	1	19,1	0,04
G-3	19,1	12,7	0,07
G-2	12,7	9,5	0,14
G-1	9,5	4,8	0,33
M-4	4,8	2	0,72
M-3	2	0,42	2,36
M-2	0,42	0,18	8,1
M-1	0,18	0,074	19,28
F	0,074	Fundo	108,72

Fonte: Moreira (2009)

Estes índices foram calculados em experiências práticas do citado autor, sendo o Teor Teórico de CAP definido conforme equação 7:

$$\%CAP = k * \sqrt[5]{\frac{\sum S. esp}{100}} \quad \text{Equação [7]}$$

Sendo:

- %CAP = % de cimento asfáltico em relação ao peso total da mistura;
- K = coeficiente definido como módulo de riqueza; (é função da ação combinada dos fatores: forma, densidade real, absorção dos agregados, viscosidade e densidade real do asfalto, tráfego e tipo da camada do revestimento), variando

de 3,5 a 4,0; sendo o que o autor adota = 3,75 para misturas destinadas a revestimento de rodovias, com utilização de CAP-50/70 e será o valor tomado como referencia neste estudo;

- ΣS_{esp} = somatório da superfície específica de cada fração do agregado – em m^2/kg . A S_{esp} (superfície específica = Σ da área superficial dos fragmentos das frações da mistura, e é calculada com base nas porcentagens retidas em cada peneira, multiplicadas por índices relativos aos diâmetros).

Estes índices foram recentemente estudados por (MOREIRA, 2009) e se referem a partículas que apresentam densidade real = $2,65 \text{ g}/\text{dm}^3$, para outras densidades o autor indica um fator de correção (F_c) conforme tabela 11, sendo os fatores de correção para as densidades dos fresados, objetos do estudo, obtidos por interpolação desta tabela.

Tabela 11 - Fator de correção em função da densidade real dos agregados

Densidade real	FATOR – F_c .
2,35	1,13
2,45	1,08
2,55	1,02
2,65	1,00
2,75	0,97
2,85	0,93
2,95	0,90

Fonte: Moreira (2009)

3.2.2 Ensaio nos CPs

Os corpos de prova foram moldados pela metodologia Marshall e em seguida caracterizados mecanicamente de acordo com os procedimentos de normas específicas, sendo executados os ensaios para determinação da massa específica aparente da mistura compactada (G_{mb}), suas propriedades volumétricas, índice de vazios, absorção de água, resistência à tração por compressão diametral, resistência a compressão, abrasão profunda, ensaio cântabro e módulo de resiliência.

Para avaliação das características mecânicas das misturas de CARQ com 100% de CAF os CP's com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP foram moldados no compactador

Marshall segundo a norma DNER–ME 43/95 - Ensaio Marshall. Foram moldados 117CP's para a realização dos ensaios.

A cronologia da moldagem pode ser observada nas sequências 01 a 06 da figura 19. Primeiramente o fresado foi pré-aquecido em forno por cerca de 10 minutos a 110°C, de maneira que fosse possível o desmanche dos grumos. Posteriormente o CAF foi aquecido em panela até a temperatura aproximada de 140°C, sendo promovida a mistura de todo conteúdo até se obter o aquecimento homogêneo do material. Na sequência o fresado foi disposto no molde pré-aquecido, o qual foi fixado ao compactador Marshall sendo iniciado o processo de compactação com 75 golpes do martelo em cada face do corpo de prova. Após a fase de compactação, os CP's foram mantidos nos moldes até que se atingisse temperatura próxima a ambiente, sendo desmoldados em seguida com a utilização de equipamento extrator.

Figura 19 - Moldagem dos CPs Marshall



Fonte: Próprio autor

3.2.2.1 Determinação das propriedades volumétricas da mistura asfáltica

A determinação da massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb}) foi realizada pelos procedimentos da norma DNER-117/94, a qual é definida pela razão entre a massa seca (M_s) do CP, a uma temperatura prefixada, e o volume deste corpo de prova, de acordo com formulação abaixo:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{s_{sub}}} * 0,9971 \quad \text{Equação [8]}$$

Onde:

- M_s = massa seca do corpo-de-prova compactado;
- $M_{s_{sub}}$ = massa do corpo-de-prova compactado submerso em água, (g);
- 0,9971 = massa específica da água a 25°C, (g/cm³).

A partir da (G_{mm}) densidade máxima da mistura, definida no item 3.2.1.2.1 e a (G_{mb}) do CP serão calculados os parâmetros volumétricos: (V_v) Volume de Vazios, (V_{CB}) Vazios Cheios de Betume, (V_{AM}) Vazios do agregado mineral (RBV) relação betume vazios, conforme a seguir:

$$V_v = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \text{Equação [9]}$$

$$V_{CB} = \frac{\%CAP}{c_{app}} * G_{mb} \quad \text{Equação [10]}$$

$$V_{AM} = V_v + V_{CB} \quad \text{Equação [11]}$$

$$RBV = \frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} * 100 \quad \text{Equação [12]}$$

Onde:

- G_{mb} = massa específica aparente do CP, (g/Cm³);
- c_{app} = peso específico do CAP, (1,025g/Cm³);
- %CAP = Percentual de CAP na mistura.

O índice de vazios foi calculado utilizando as considerações especificadas da Norma NBR 9778-1987 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica, sendo apurado pela relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, e a equação que relaciona esta característica esta representada abaixo.

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} * 100$$

Equação [13]

Onde:

- M_{sat} = massa do corpo de prova saturado, superfície seca;
- M_s = massa seca do corpo-de-prova compactado;
- M_i = massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

A saturação dos corpos de prova ocorreu por imersão em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas, conforme figura 20 abaixo. Em função das características típicas dos moldes e quantidade de material utilizado, corpos de prova moldados pela metodologia Marshall apresentam média aproximada de volume de 500Cm^3 .

Figura 20 - Saturação dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

Os procedimentos para determinação dos índices de vazios dos elementos seguiu os passos abaixo, adaptado da Norma NBR 9778-1987:

- Obtenção da massa da amostra seca ao ar. Em função das características do material constituinte do corpo de prova, o cimento asfáltico, não foi possível mantê-lo em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ pois poderia desestruturar o CP, sendo mantida a temperatura de 40°C por 24 horas;
- Pesagem do CP em balança hidrostática para obtenção da massa submersa;
- Imersão dos CP's em água à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 72 h, sendo que os corpos de prova foram mantidos com 1/3 de seus volumes imersos nas primeiras 4hs, 2/3 nas 4hs subsequentes e totalmente imersos no período restante;
- Obtenção da massa dos corpos de prova saturados com superfície seca após o período de imersão; Para o procedimento, o CP foi colocado sobre uma tela metálica por 1 minuto e removida a água superficial visível com um pano úmido;
- Em seguida foi realizado o procedimento de pesagem dos CP's em balança hidrostática para obtenção da massa do corpo de prova saturado submerso em água.

O ensaio de absorção de água dos CP's foi executado de acordo com a Norma ABNT NBR 9781/2013 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio, por esta norma estabelecer um valor máximo para a absorção das peças pré-moldadas. Esta característica expressa o acréscimo de massa em uma determinada amostra em função do preenchimento de seus vazios permeáveis com água. Seu índice é determinado em percentual e é o resultado da relação entre a massa saturada e a massa seca.

Também neste ensaio foi proposta uma adaptação nos procedimentos da norma, em relação ao processo de secagem, com a limitação da temperatura de aquecimento da estufa a 40°C , de forma a manter o CP com temperatura abaixo de seu ponto de amolecimento, que segundo Silva et. al (2011) é $54,5^{\circ}\text{C}$. Decorridas as 24 horas de exposição os CP's foram retirados da estufa e deixados em repouso até atingirem a

temperatura ambiente, posteriormente foram medidas as massas das amostras secas.

A mistura reciclada apresenta características de material impermeável, visto que o ligante, o material aglutinante da composição, de acordo com o IA (2002) é impermeável, fato que possivelmente influencia de forma significativa o índice de absorção dos corpos de prova. Para a saturação das amostras os CP's foram imersos em água à temperatura de (23 ± 5) °C, e permaneceram nesta condição por 24 h.

Decorrido o tempo de imersão os CP's foram pesados individualmente na condição saturada com superfície seca, a qual, segundo a NBR 9781/2013 é conseguida drenando o corpo de prova sobre uma tela metálica por 1 minuto e removendo a água superficial visível com um pano úmido. Este procedimento foi adotado na segunda hora subsequente e não foi encontrada variação superior a 0,5% nos valores anotados na primeira medição. O valor da absorção de água de cada corpo de prova foi calculado utilizando-se a equação 14.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100$$

Equação [14]

Onde:

- A = é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);
- m1= é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);
- m2= é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Segundo a NBR 9781/2013, para peças de concreto, a amostra deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, e não são admitidos valores individuais superiores a 7 %.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios para determinação da massa específica aparente, índice de vazios e absorção de água foram os mesmos.

3.2.2.2 Resistência à Tração por compressão diametral

Este ensaio foi baseado na norma DNIT 136/2010 – ME “Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.” O objetivo deste ensaio é determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas. Neste ensaio foram utilizados os corpos de prova moldados no compactador Marshall. A prensa mecânica utilizada foi a disponível no laboratório de mecânica dos pavimentos e materiais do CEFET/MG e está ilustrada na figura 21.

Figura 21 - Prensa mecânica



Fonte: Próprio Autor

Segundo a norma DNIT 136/2010 os CP's devem ter altura entre 3,50Cm e 6,50Cm, com diâmetro de 10Cm \pm 0,2Cm. Para o ensaio foram realizadas três medições com a utilização de paquímetro no corpo do elemento para a determinação do diâmetro e altura médios dos CP's.

O ensaio foi realizado dispondo o corpo-de-prova sobre o prato da prensa e aplicando uma força [F] com deslocamento progressivo a uma razão de 0,8mm por segundo sobre frisos metálicos padronizados de 1,27Cm apoiados sobre os CP's. A força aplicada produz tensões de tração ao longo do diâmetro vertical do CP provocando sua ruptura. Falcão e Soares (2002) em seus estudos relataram que a

largura destes frisos metálicos influencia no valor de resistência a tração, visto que estas variações provocam alterações nas tensões cisalhantes sobre o CP. Frisos com largura menor provocam aumento das tensões cisalhantes. Entretanto, Bernucci *et al.* (2008) reforça que a ASTM D 4123-82 não considera a influência destes frisos no cálculo de RT, o mesmo sendo verificado em DNIT 136/2010. Conforme Nascimento (2011) a expressão que representa o resultado da RT é:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad \text{Equação [15]}$$

Onde:

- σ_R = Resistência a tração (Mpa);
- F = Carga de ruptura (N);
- D = Diâmetro do corpo de prova (Cm);
- H = Altura do corpo de prova (Cm).

3.2.2.3 Resistência à compressão

Conforme observação de Fioriti; Ino; Akasaki (2007) as normas nacionais e internacionais definem o ensaio de resistência à compressão como um dos principais parâmetros de qualidade dos Paviers, em função disto, foi realizado o ensaio de resistência à compressão conforme determinações da ABNT-NBR 9781/2013-Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de Ensaio e em consonância com a ASTM C140-*Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*.

Pode ser observado na tabela 12 o comparativo das duas normas sobre os principais requisitos dos CPs para a realização dos ensaios. Ainda de acordo com a NBR 9781/2013 é permitida a utilização de peças com largura inferior a 100 mm, desde que possua uma área plana isenta de rebaixos e juntas falsas onde possa ser inscrito um círculo de 85 mm de diâmetro, desta forma, justifica-se a utilização dos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall e ensaiados de maneira a atender à faixa de valores citados, seguindo a rotina prescrita no Anexo-A desta norma.

Tabela 12 - Requisitos para ensaio a compressão

Descrição	NBR 9781	ASTM-C140C140M
Quantidade de CPs	3	3
Comprimento	<250mm	***
Largura	> 97 mm *	***
Espessura	>60 mm **	***
Temperatura de saturação em água	23±5 °C por 24h	24±8 °C por 48h
Umidade relativa	≤80%	-

*Na área da peça destinada à aplicação de carga.

**Especificada em múltiplos de 20 mm;

*** Relação largura espessura de no mínimo 2 para 1 e comprimento em relação a espessura de 4 para 1. A espessura do CP deve ser tão grande quanto possível, limitada a capacidade de teste da máquina e não devem ser inferior a 30 mm.

Fonte: NBR 9781/2013 e ASTM C140C140M/2014

Dentre os requisitos para o equipamento de ensaio é o atendimento aos valores máximos admissíveis determinados pela ABNT NBR NM ISO 7500-1, bem como controle de aplicação da força sobre a peça colocada entre os pratos de compressão, e movimento de deslocamento na direção vertical, perpendicular ao prato fixo do aparelho. A figura 22 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.

Figura 22 - Ensaio de compressão simples

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, os CP's Marshall apresentaram todas as características dimensionais definidas na tabela 12, os quais, no processo de preparação para o ensaio, tiveram

suas superfícies de carregamento niveladas com solução de enxofre fundido, com espessura inferior a 3mm. Os corpos de prova foram testados uma unidade por vez, sendo posicionados rigorosamente nos suportes de forma que seu eixo coincidisse com o do equipamento, e desta maneira garantisse que a resultante das forças passasse pelo centro do CP. O Carregamento foi efetuado de forma contínua, com velocidade de 550 kPa/s, com variação de mais ou menos 200 kPa/s até o rompimento completo da peça. Após a ruptura foi anotada a carga expressa em quilograma-força (kgf), sendo que para a representação da resistência a compressão da peça em MPa, foi necessário dividir a carga pela área do carregamento, expressa em centímetros quadrados. Como a altura do elemento influencia na sua resistência a compressão foi utilizado fator multiplicativo conforme tabela 13 abaixo para determinação do valor final de resistência.

Tabela 13 - Fator multiplicativo para espessura nominal da peça

Espessura nominal da peça (mm)	p
60	0,95
80	1
100	1,05

Fonte: NBR 9781/2013

A mesma norma admite que as resistências à compressão obedeçam à distribuição normal, desta forma, o valor característico estimado foi determinado conforme equação abaixo:

$$f_{pk,ext} = f_p - t \times s$$

Equação [16]

Onde “s” é extraído seguindo o critério de cálculo da equação 17:

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

Equação [17]

Sendo:

- f_p = Resistência média das peças, expressa em megapascals (MPa);
- f_{pi} = Resistência individual das peças, expressa em megapascals (MPa);
- $f_{pk,est}$ = Resistência característica estimada à compressão, expressa em megapascals (MPa);
- n = Número de peças da amostra;
- s = Desvio-padrão da amostra, expresso em megapascals (MPa);
- t = Coeficiente de Student, fornecido pela Tabela 14, em função do tamanho da amostra (quantidade de corpos de prova).

Tabela 14 - Coeficiente de Student para (nível de confiança de 80 %)

n	t
6	0,92
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,87
16	0,866
18	0,863
20	0,861
22	0,859
24	0,858
26	0,856

Fonte: NBR 9781/2013

Pode ser observado na tabela 15 abaixo, os valores admissíveis para as tolerâncias dimensionais e de resistência à compressão dos Paviers, sendo esta última, conforme definida em ABNT-NBR 9781 criticada por Fioriti (2007) pela norma não considerar que estes elementos poderiam ser utilizados em locais de baixa solicitação de carga, não justificando a necessidade de a resistência à compressão ser tão elevada e o mesmo fato citado por Lyra (2007) que relata que as normas brasileiras não contemplam resistência mínima que atenda exclusivamente a pisos de praças, calçadas e passeios destinados ao uso somente de pedestres. Ainda, considerando a citada tabela, é apresentada a comparação com os valores

referenciados na norma americana ASTM C902/2014, que considera os campos de utilização questionados por autores brasileiros. As explicações sobre a classe e aplicação indicadas na tabela estão descritas no capítulo 2, item 2.5.2. Não foi encontrado na literatura nenhum relato de misturas asfálticas submetidas ao ensaio de resistência à compressão.

Tabela 15 - Requisitos da ABNT-NBR 9781/2013 E ASTM C902/2014

Requisitos físicos	Limites admissíveis		
Tolerância dimensional (mm)	Comprimento (mm)	± 3,0	
	Largura (mm)	± 3,0	
	Altura (mm)	± 3,0	
Resistência à compressão (MPa)	1	≥35,0 Solicitações de veículos comerciais de linha	
	2	≥ 50,0 Solicitações de veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão	
ASTM-C902/2014			
Dimensão (mm)	Máxima variação admissível da dimensão especificada,		
	Aplicação PS	Aplicação PX	Aplicação PA
< 76	3,2	1,6	Sem limites
76<127	4,7	2,4	Sem limites
127<203	6,4	3,2	Sem limites
>203	7,9	5,6	Sem limites
Classe	Resistência a compressão (Mpa)		
	Média de 5 elementos	Individual	
SX	≥55,2	≥48,3	
MX	≥20,7	≥17,2	
NX	≥20,7	≥17,2	

Fonte: NBR 9781/2013 e ASTM C902/2014

3.2.2.4 Resistência à abrasão profunda

Conforme relatado por Fioriti (2007) o ensaio de resistência à abrasão profunda indicará o quanto o elemento resiste à perda de material ao longo de sua vida útil quando submetido a forças que provocam seu desgaste.

Esta propriedade esta relacionada também a qualidade do material e seus parâmetros podem ser definidos para determinação de sua durabilidade na comparação com elementos pré-moldados de concreto, servindo de base também para auxiliar na aplicabilidade do PAR produzido com CAF.

Cruz (2003) relata que alguns países como Inglaterra e Holanda correlacionam a durabilidade dos elementos pré-moldados de concreto com a resistência à compressão e flexão, bem como pela relação água cimento, sendo assim quanto maior sua resistência mais durável seria o pavimento, entretanto Shackel (1990) já relatava que segundo observações e acompanhamento da vida útil de pavimentos Intertravados, foram verificadas várias patologias relacionadas a desgaste da superfície do material, e que estas ocorrências eram independente da resistência dos elementos de concreto, já alertando para a necessidade de ensaios específicos de resistência a abrasão como mais um critério para se apurar melhor a durabilidade dos pavimentos.

Fioriti (2007) em sua pesquisa, realizou este ensaio segundo o descritivo da NBR 13.818 (1997): Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios – Determinação da resistência à abrasão profunda – Anexo E, por esta norma seguir os mesmos parâmetros de normas internacionais e se basear na perda de volume do corpo de prova ensaiado.

Tratando do mesmo assunto, Sant'Ana Filho (2013) em seu estudo, no qual avaliou o reaproveitamento de resíduos das barragens de minério de ferro para a fabricação de blocos intertravados, verificou o desgaste à abrasão com abrasômetro tipo roda de borracha. Neste equipamento é avaliada a perda de massa ao longo do tempo e não a redução do volume. Este ensaio foi uma adaptação da norma ASTM G 65-00/2001 e consiste em um disco de aço recoberto com uma capa de borracha, que gira sob a amostra a ser testada, tendo como elemento abrasivo areia de granulometria controlada, que vai provocando o riscamento e desgaste do corpo de prova em toda sua extensão.

Para a definição da resistência ao desgaste, neste trabalho, optou-se pela utilização do abrasômetro tipo roda de borracha por permitir que se utilize o corpo de prova

moldado pela metodologia Marshall, sem necessidade de recorte e preparo específico, mantendo sua integridade e bem como medição direta da perda de massa através de uma balança de precisão.

A aparelhagem utilizada:

- Abrasômetro tipo roda de borracha, equipado com caixa de redução, regulador de velocidade e sistema de contagem de voltas, conforme figura 23;
- Balança com capacidade de 2000g, sensível a 0,01g;
- Corpo de prova obtido pela metodologia Marshall;
- 20,0kg de abrasivo - areia (granalha de alumina comercial) com granulometria 100 (ou tamanho médio de 0,15 mm);
- Peso de 3,23kg de forma a se obter a mesma pressão sobre o CP em kg/Cm² - (referência ao trabalho de (SANT'ANA FILHO, 2013)).

Figura 23 - Abrasômetro com roda de borracha



Fonte: Próprio autor

Procedimento:

- Fixação do CP no suporte do equipamento,
- Posicionamento do peso padrão sobre o corpo de prova;

- Programação da rotação para 15rpm;
- Funcionamento com paradas definidas a cada 300ciclos;
- Retirada e limpeza superficial do CP a cada 20 minutos de ensaio e pesagem em balança de precisão.

O Corpo de prova foi disposto no porta amostras do abrasômetro de forma que ficou posicionado a 10Cm em relação ao centro da roda de borracha, sendo assim, para que a amostra percorresse 1130m, foi necessário o ajuste da rotação para 15rpm, que corresponderia a 9,42m de percurso a cada minuto. Cada ensaio teve duas horas de duração, com medições de pesagem realizadas a cada 20 minutos.

Foram ensaiados 9 corpos de prova por origem, sendo assim divididas conforme tabela 16:

Tabela 16 - Corpos de prova/percentual de CAP para ensaio de abrasão

0,00%	0,50%	1,00%
A1	A1	A1
A2	A2	A2
A3	A3	A3
B1	B1	B1
B2	B2	B2
B3	B3	B3
C1	C1	C1
C2	C2	C2
C3	C3	C3

Fonte: Próprio autor

Os resultados parciais foram obtidos através do desgaste ocorrido a cada ciclo de 20 minutos, pela diferença de massa inicial e final do CP, conforme abaixo:

Cálculo:

$$P_m = (M_i - M_f)$$

Equação [18]

Sendo:

- P_m = Perda de massa a cada intervalo de 20 minutos em (g);
- M_i = massa inicial;
- M_f = massa final;

3.2.2.5 Ensaio Cântabro

O ensaio de desgaste por abrasão simula o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Sendo assim, o ensaio avaliou o comportamento da mistura asfáltica quanto à perda de material. Como não existe norma específica para misturas recicladas a quente foi utilizada a norma DNER-ME 383/99-Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro. De acordo com a ABNT-NBR 15140/2004, este ensaio, mesmo estando relacionado a pavimentos drenantes, pode ser estendido para outros tipos de misturas asfálticas. A figura 24 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio, e a equação 19 a formulação para cálculo do desgaste.

Figura 24 - Máquina de abrasão Los Angeles



Fonte: Próprio autor

A aparelhagem necessária:

- Máquina Los Angeles, sem a respectiva carga abrasiva (esferas de aço);
- Balança com capacidade de 5 kg, sensível a 1,0g;
- Corpo de prova obtido pela metodologia Marshall.

Procedimento:

- Pesagem do CP Marshall;
- Introdução do CP no aparelho de abrasão de Los Angeles;
- Com temperatura mantida em 25°C, efetuar 300 revoluções na velocidade angular de 30 rpm;
- Retirada e pesagem do CP.

$$D = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100$$

Equação [19]

Sendo:

- D= valor do desgaste em %;
- M₁= massa do CP antes do ensaio;
- M₂= massa do CP depois do ensaio.

3.2.2.6 Módulo de resiliência das misturas recicladas

O Módulo de resiliência é um parâmetro importante para determinar o desempenho do pavimento e traduz a resposta da camada de rolamento às solicitações de carga do tráfego de veículos.

As determinações do módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas recicladas a quente foram efetuadas somente nas misturas sem acréscimo de CAP, com a finalidade de verificação de parâmetro que defina as diferenças em termos de envelhecimento dos 3 (três) materiais, (A), (B) e (C). O Módulo de resiliência foi obtido através de ensaios dinâmicos de compressão diametral de carga repetida, sendo seu valor determinado pela relação entre a tensão de tração indireta aplicada repetidamente no plano diametral vertical do corpo de prova cilíndrico da mistura asfáltica e a deformação específica recuperável correspondente à esta tensão.

Os ensaios foram executados nos laboratórios da SoloCAP/BH e seguiu os procedimentos da Norma DNIT 135/2010 – ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados com as respectivas discussões acerca da caracterização física do CAF e dos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall, obtidos nos laboratórios do CEFET/MG e na empresa SoloCAP/BH, seguindo o planejamento experimental e enumerados conforme baixo:

Caracterização do fresado (CAF):

- Definição do Teor de Betume;
- Determinação das Curvas Granulométricas;
- Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados graúdos/miúdos e densidade máxima da mistura;
- Análise da morfologia da superfície dos fresados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS;
- Caracterização pela técnica de Análise Termogravimétrica (TGA);

Caracterização dos corpos de prova (CP):

- Determinação da (G_{mb}) densidade aparente do CP, (V_v) volume de vazios, (VAM) vazios do agregado mineral, (RBV) relação betume vazio, absorção de água e índice de vazios;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Resistência à compressão;
- Abrasão profunda;
- Ensaio cântabro;
- Módulo de resiliência.

4.1 Resultado dos ensaios de caracterização do fresado

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais de origem (A), (B) e (C) são apresentados abaixo em tabelas, nas quais podem ser visualizados os valores obtidos para o teor de betume presente em cada origem, suas curvas granulométricas, densidades, absorção, morfologia e caracterização microscópica,

bem como análise termogravimétrica (TGA) e posteriormente as discussões acerca dos resultados.

4.1.1 Determinação do percentual de Betume

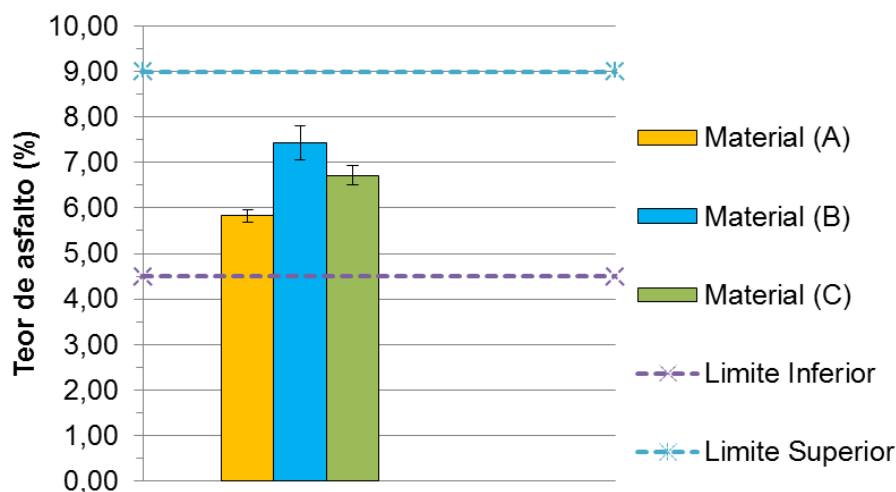
Este ensaio possibilitou identificar o percentual de betume presente em cada um dos materiais, sendo o ligante, o elemento que representa a maior parcela de custo nas misturas asfálticas. O percentual de CAP presente no CAF, após a extração com a utilização de Tricloroetileno foi de 5,83% para o material (A), 7,42% para o material (B) e 6,71% para o material (C), conforme pode ser identificado na tabela 17. Lima, (2003) em ensaio semelhante com extrator Rotarex encontrou o valor médio de 5,9% para o teor de ligante presente na mistura asfáltica de seu estudo. Rossato *et al.* (2014), em estudo de comparação entre os métodos de extração de ligante, para misturas de referência, encontrou valores superiores aos teores reais, tendo como possíveis causas a perda de finos durante o processo de centrifugação. Fato também estudado posteriormente por Gonçalves *et al.* (2015) reafirmando que os ensaios com extrator Rotarex elétrico leva a valores mais elevados para o percentual de betume em função da perda de finos e ainda conclui que, para extratores Rotarex do tipo manual, esta variação é ainda maior. Entretanto outros fatores também podem levar a variações nos resultados, como a absorção do agregado utilizado na mistura (ROSSATO *et al.*, 2014).

Tabela 17 - Teores de betume para CAF ensaiados

Amostras (%)	1	2	3	Média	Desvio Padrão	Variância
Material (A)	5,80	5,71	5,97	5,83	0,1320	0,0174
Material (B)	7,02	7,76	7,49	7,42	0,3745	0,1402
Material (C)	6,53	6,67	6,94	6,71	0,2084	0,0434

Fonte: Próprio autor

Estes resultados concluem que todas as amostras, apesar de possuírem características visuais diferenciadas, se encontram dentro da faixa especificada para teores de betume em uma mistura de CBUQ, sendo assim definida, conforme o conteúdo da norma DNIT 031/2006 ES, com percentuais variando entre 4,5% e 9,0% para as camadas de rolamento dimensionadas pela faixa “C”, como ilustrado na figura 25.

Figura 25 - Resultado dos teores de betume das amostras

Fonte: Próprio autor

Pode ser observado que o material (A), o que visualmente se encontrava mais contaminado com materiais terrosos, apresentou o menor percentual de CAP entre as amostras. O material (B) traduz também o que se esperava do material, visto que as amostras deste fresado eram as que visualmente se apresentavam com cor e textura de material mais nobre e mais homogêneo dos três. Da mesma maneira o material (C), apesar de visualmente ser representado por grumos de fresados mais fragmentados, apresenta percentual de betume compatível com misturas asfálticas para utilização em pavimentos.

Nascimento (2011), em ensaio para determinação do teor de betume do material fresado, utilizando o Xileno como solvente, chegou a valor médio de 6,3%, o que demonstra coerência de resultados para materiais extraídos da pavimentação asfáltica. A figura 26 exibe o CAF no prato do aparelho extrator antes do ensaio e a figura 27a, o fresado logo após o ensaio Rotarex e ainda úmido com o tricloroetileno. Após a extração o material foi deixado em repouso por um período mínimo de 24 horas, quando então foi pesado. A figura 27b mostra as partículas grossas que ficaram retidas na peneira de nº10 (#2,0mm).

Figura 26 - Prato com amostra após pesagem



Fonte: Próprio autor

Figura 27a,b - Recipiente com amostra após a extração do betume

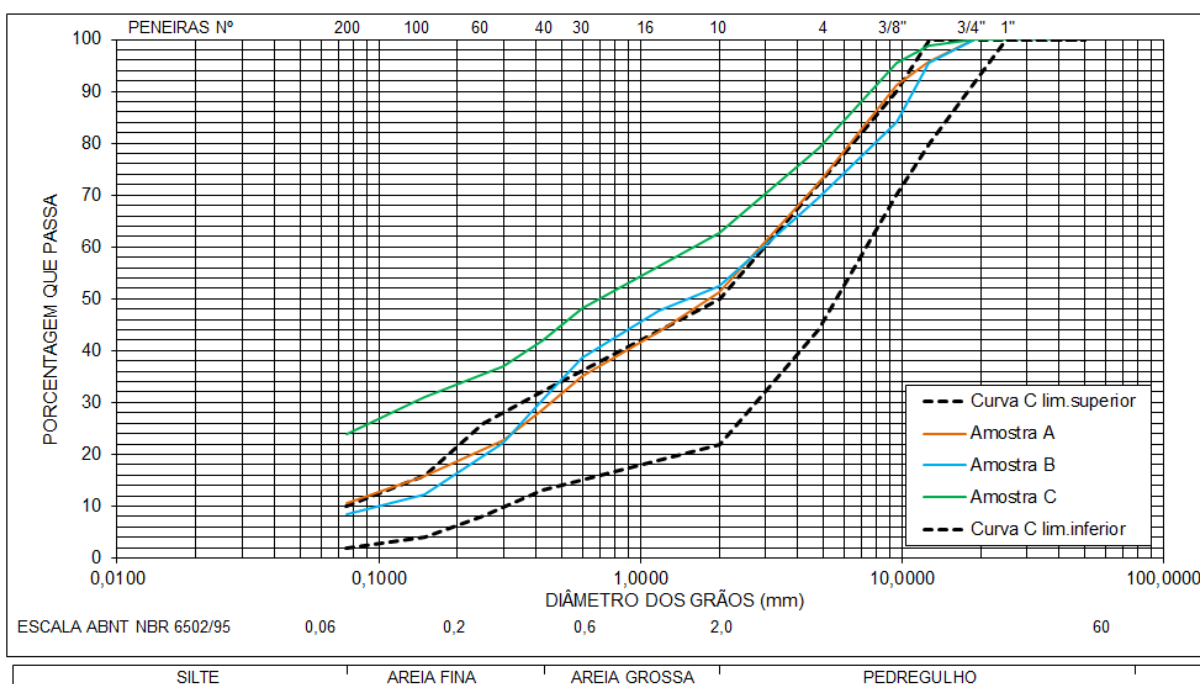


Fonte: Próprio autor

4.1.2 Ensaio de granulometria do CAF (sem ligante)

As curvas granulométricas resultantes dos ensaios e que caracterizam as três origens estão plotadas na figura 28. Os valores obtidos nos ensaios estão representados na tabela 18, onde também são listadas as umidades higroscópicas dos materiais.

Figura 28 - Curva granulométrica Materiais (A), (B) e (C)



Fonte: Próprio autor

Como pode ser observado, o resultado da análise granulométrica dos fresados de origem (A) e (B) apresentaram porcentagem de finos, em comparação aos limites da faixa "C" do DNIT, no limiar da curva superior e o fresado de origem (C) extrapolou este limite, que se referem a dosagens de misturas convencionais utilizadas na pavimentação. Estes percentuais elevados de finos já eram esperados, visto que no processo de fresagem ocorre a quebra/fratura dos agregados. Contudo, o histórico de manutenção desta camada de rolamento também pode levar a diferenças na granulometria do CAF caso o controle da granulometria, nestes vários processos, não tenha sido rigoroso, mas sempre tendenciando a uma elevação do percentual de finos na mistura.

Tabela 18 - Granulometria Materiais (A), (B) e (C)

Peneiras		A			B			C		
#	(mm)	% Ret. Acumul. médio	% Passa médio	% Ret. médio	% Ret. Acumul. médio	% Passa médio	% Ret. médio	% Ret. Acumul. médio	% Passa médio	% Ret. médio
1 1/2 "	38,000	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
1 "	25,000	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4 "	19,000	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2 "	12.700	4.19	95.81	4.19	4.47	95.53	4.47	1.25	98.75	1.25
3/8 "	9,500	8,75	91,25	4,56	15,84	84,16	11,36	4,41	95,59	3,15
nº 4	4,800	27,58	72,42	18,84	30,41	69,59	14,57	20,85	79,15	16,45
nº10	2,000	48,65	51,35	21,07	47,58	52,42	17,17	37,24	62,76	16,39
nº16	1,180	56,29	43,71	7,63	52,42	47,58	4,84	43,83	56,17	6,59
nº30	0,600	64,92	35,08	8,63	61,35	38,65	8,93	51,82	48,18	7,99
nº40	0,425	71,35	28,65	6,42	69,36	30,64	8,00	57,95	42,05	6,12
nº60	0,300	77,27	22,73	5,92	77,73	22,27	8,38	63,13	36,87	5,18
nº100	0,149	84,24	15,76	6,98	87,75	12,25	10,02	68,93	31,07	5,80
nº200	0,075	89,41	10,59	5,17	91,64	8,36	3,89	76,05	23,95	7,12
Fundo	-	100,00	0,00	10,59	100,00	0,00	8,36	100,00	0,00	23,95
Total	-	367,70	-	100,00	373,07	-	100,00	290,22	-	100,00
Módulo de Finura Média		3,68			3,73			2,90		
Dim.Máx. Característica		12,7			12,7			9,5		
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE HIGROSCÓPICA										
UMID.MÉDIA (%)		0,40			0,49			0,43		

Fonte: Próprio autor

Segundo Anderson; D'angelo; Huber (2001), com aumento no teor de finos ocorre um melhoramento da mistura, haja vista que maiores quantidades de finos tendem a produzir misturas com menor volume de vazios e como foram originados pela quebra de agregados maiores, resultando em misturas com menor tendência de segregação superficial ocasionadas por acúmulo de agregados maiores na superfície. Nascimento (2011) confirma que o excesso de finos modifica algumas propriedades mecânicas da mistura, tais como: diminuição da suscetibilidade térmica, aumento no ponto de amolecimento, aumento da viscosidade do asfalto, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência à tração. Harmelink *et al.* (2008) também relatou que o excesso de finos produz misturas com menor tendência a fendilhamento, pois os finos em maior quantidade diminuem a segregação superficial do material.

Por outro lado, para Morilha Junior (2004) o excesso de finos atua no sistema (finos betume) e faz com que as misturas fiquem mais rígidas devido ao atrito direto entre as partículas, em função da menor fluidez, visto que haverá diminuição da relação

betume/agregado nas interfaces entre as partículas. Misturas mais rígidas vão apresentar comportamento frágil, as quais apresentam baixa capacidade de resistir a ação de cargas repetitivas.

Bardini, Klinsky e Fernandes Jr. (2009), relatam a importância das partículas finas no comportamento das misturas, visto que são responsáveis pelo preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos, entretanto, gerando ligantes com maior viscosidade, desta forma afetando também as características de compactação e elevando o teor ótimo de ligante para a mistura. Todas estas interações tendem a modificar a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento.

Segundo Harris e Stuart (1995), através da máxima densificação do fíler, determinada sob condições padronizadas, baseada no índice de vazios de *Rigden*, é possível avaliar o efeito do fíler na mistura asfáltica, bem como verificação do volume de ligante necessário para preenchimento de todos os vazios da mistura.

Para Motta e Leite (2000) quando há excesso de ligante em relação ao índice de vazios de *Rigden* haverá lubrificação maior das partículas de agregados, diminuindo a rigidez da mistura, entretanto, o excesso de fíler tenderá a reduzir a quantidade de ligante livre na mistura, favorecendo sua rigidez. O autor ainda define que quanto mais fino o fíler, maior as consequências sobre a rigidez da mistura.

McGennis et al (1994) estabeleceu critérios para a especificação Superpave, relacionando em peso, o fíler e o ligante definido para as misturas, denominado de *dust proportion*, na qual o autor recomenda valores entre 0,6 e 1,8 de forma a se obter o percentual ideal de finos para as misturas. Conforme tabela 19, pode ser verificada a relação em peso, do fíler e do CAP presente nos três materiais.

Tabela 19 – Proporção de finos versus CAP dos Materiais (A), (B) e (C)

Material (A)			Material (B)			Material (C)		
Variação de CAP	%passante #200	Proporção de finos	Variação de CAP	%passante #200	Proporção de finos	Variação de CAP	%passante #200	Proporção de finos
	10,59			8,36			23,95	
5,83		1,816	7,42		1,126	6,71		3,569
6,33		1,673	7,92		1,055	7,21		3,322
6,83		1,550	8,42		0,993	7,71		3,106
Média		1,680	Média		1,058	Média		3,332

Fonte: Próprio autor

Conforme mostrado, o material de origem (C) apresenta relação fora da faixa definida como ideal por McGennis et al (1994), apresentando excesso de finos e falta de ligante. Para a amostra (C), acredita-se que a quantidade de ligante asfáltico foi insuficiente para preencher os vazios entre as partículas do fíler, ou seja, a quantidade de asfalto fixo está abaixo do necessário e, conseqüentemente, não houve asfalto livre.

4.1.2.1 Determinação da absorção, densidade real e aparente dos agregados graúdos/miúdos e densidade máxima da mistura

As densidades reais e aparentes (G_{sa}) e (G_{sb}) dos agregados graúdos e miúdos utilizados nos estudos foram determinadas de acordo com as normas ABNT NBR NM 53-2003 e, DNER-ME 84/95, respectivamente. O ensaio de absorção foi realizado somente para os agregados graúdos. Os seus valores médios são mostrados na tabela abaixo.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de G_{sa} , G_{sb} e absorção dos agregados

Material	Agregados				Densidade Real (média) G_{sa} (g/Cm ³)
	Graúdo			Miúdo	
	Absorção (%)	Densidade Real G_{sa} (g/Cm ³)	Densidade Aparente G_{sb} (g/Cm ³)	Densidade Real G_{sa} (g/Cm ³)	
A	0,50	2,837	2,798	2,560	2,695
B	0,71	2,874	2,816	2,599	2,730
C	0,83	2,812	2,748	2,552	2,648

Fonte: Próprio autor

Para a determinação da densidade máxima medida (Gmm) foram utilizados os procedimentos da norma ABNT 15.619/2012 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas e os resultados são apresentados abaixo. Os valores de Gmm serão utilizados para definição das propriedades volumétricas das misturas compactadas.

Tabela 21 - Cálculo do Gmm das misturas

Material (A)	Densidade máxima medida Gmm (g/Cm³)	Material (B)	Densidade máxima medida Gmm (g/Cm³)	Material (C)	Densidade máxima medida Gmm (g/Cm³)
A1	2,646	B1	2,598	C1	2,532
A2	2,660	B2	2,570	C2	2,580
A3	2,647	B3	2,516	C3	2,592
A4	2,614	B4	2,603	C4	2,575
A5	2,667	B5	2,594	C5	2,547
A6	2,671	B6	2,523	C6	2,591
Média	2,651	Média	2,567	Média	2,569

Fonte: Próprio autor

4.1.3 Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector do tipo (EDS)

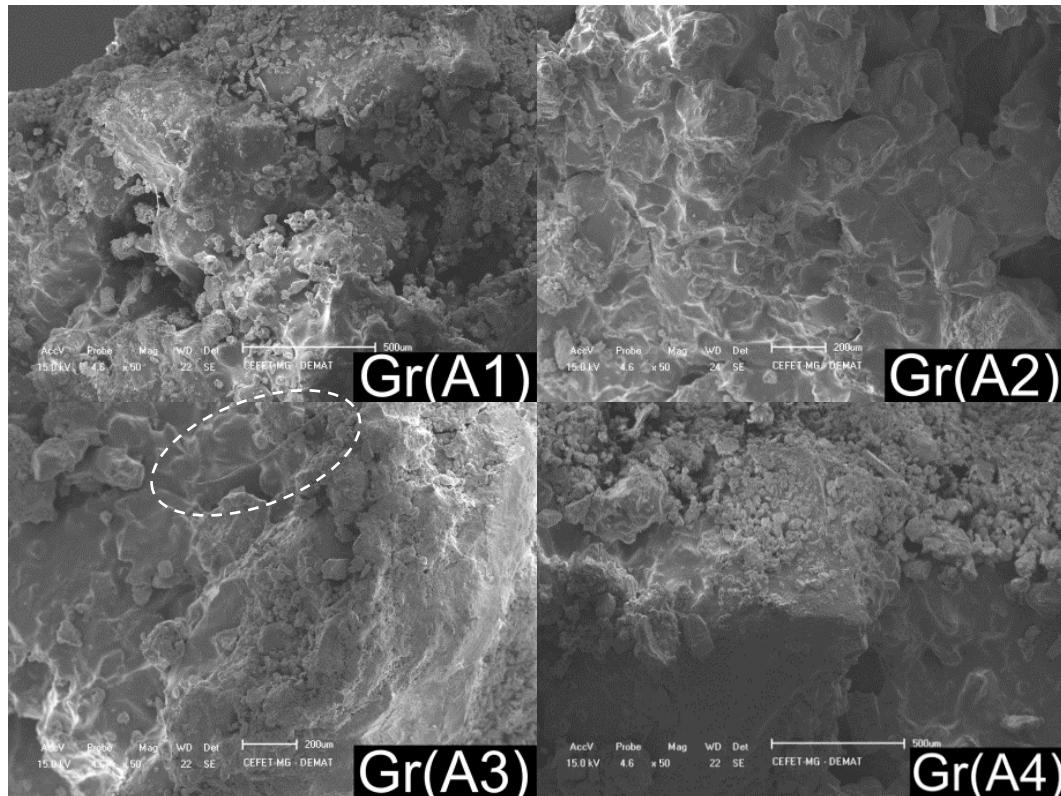
Através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura dos fresados foi possível constatar através das imagens obtidas, que estas revelam muitos detalhes das partículas finas que compõem os agregados miúdos, conforme figuras 29, 30 e 31. Verifica-se a presença de betume no material particulado solto, indício de uma boa interação entre o ligante e as partículas finas, que mesmo após sofrer processo de cisalhamento e quebra na fresagem, ainda se encontram traços do ligante aderidos aos agregados. É identificado também o formato dos agregados miúdos que se apresentam com formato angular e muito irregulares, e muita semelhança entre os formatos dos agregados apresentados nas três amostras, sugerindo que o processo de fresagem utilizado nas três amostras possa ter sido o mesmo. De acordo com Bernucci *et al.* (2008) o formato dos agregados influencia diretamente as características mecânicas e de trabalhabilidade das misturas, sendo que os de forma angular garantem melhor intertravamento entre os grãos.

obtidas pela microscopia dos grumos também é possível verificar a presença de pequenas cavidades formadas e partículas soltas aderidas aos agregados maiores.

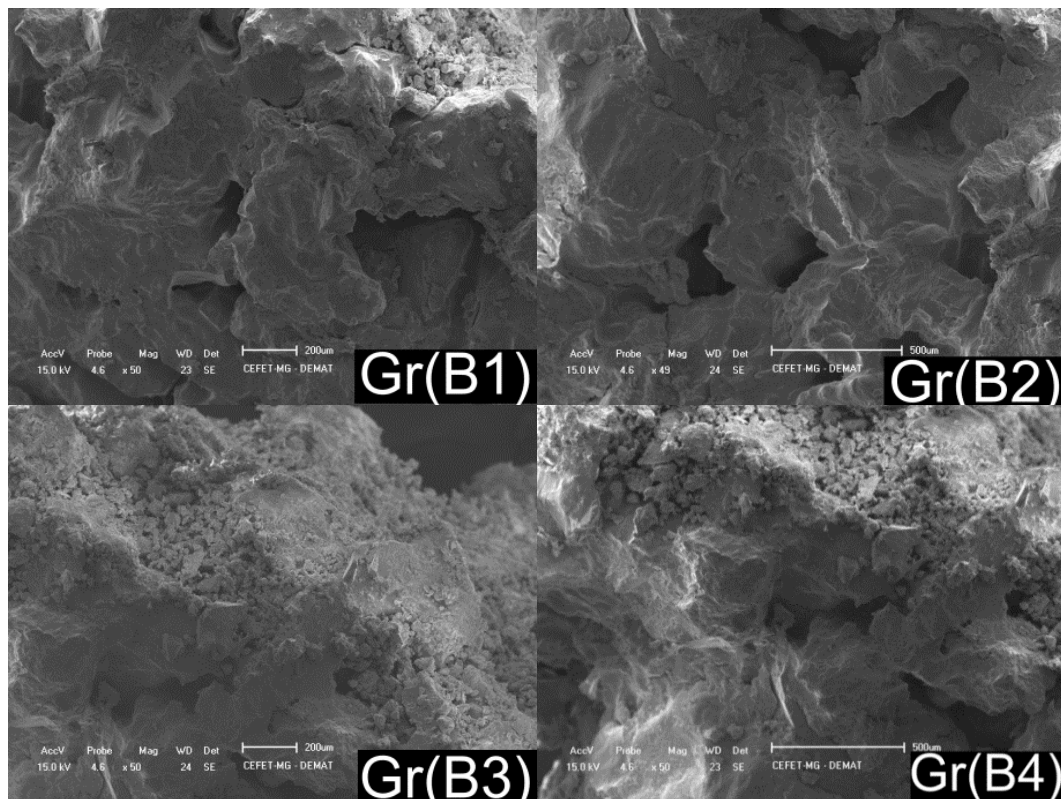
Percebe-se que as imagens geradas dos materiais (A) e (B) apresentam relevo e topografia bem similares, com extensa massa de ligante encobrindo os agregados de maiores dimensões e com a presença de alguns sulcos ou cavidades dispersas nas imagens que podem não estar relacionadas a poros abertos nas misturas, mas sim ao deslocamento dos agregados no processo de seccionamento do material para o preparo das amostras. É perceptível na imagem do material (A) identificada na figura 32 Gr(A3) a presença de material estranho à composição da mistura, provavelmente uma contaminação por matéria orgânica, oriundo do processo de extração do fresado ou até mesmo na estocagem.

O material (C) apresenta-se mais fragmentado e com presença maior de materiais particulados aderidos aos grumos do fresado e contemplam também a presença de sulcos em sua estrutura, entretanto, da mesma forma que as demais amostras, sugerem-se não ser relativos a poros abertos no corpo do material. Pode ser feita uma analogia entre as imagens obtidas no (MEV) e as curvas granulométricas dos agregados que compõem o CAF, nas quais está bem evidenciado o alto percentual de finos presentes no material (C).

Nota-se também em todos os materiais uma estrutura fechada, composta por agregados imersos em uma massa de ligante, estrutura bem compacta e densa, de características homogêneas e pouca presença de poros, o que sugere provavelmente ser uma estrutura de baixa absorção de água, fato condizente com os resultados específicos de absorção e índice de vazios verificados nos respectivos ensaios.

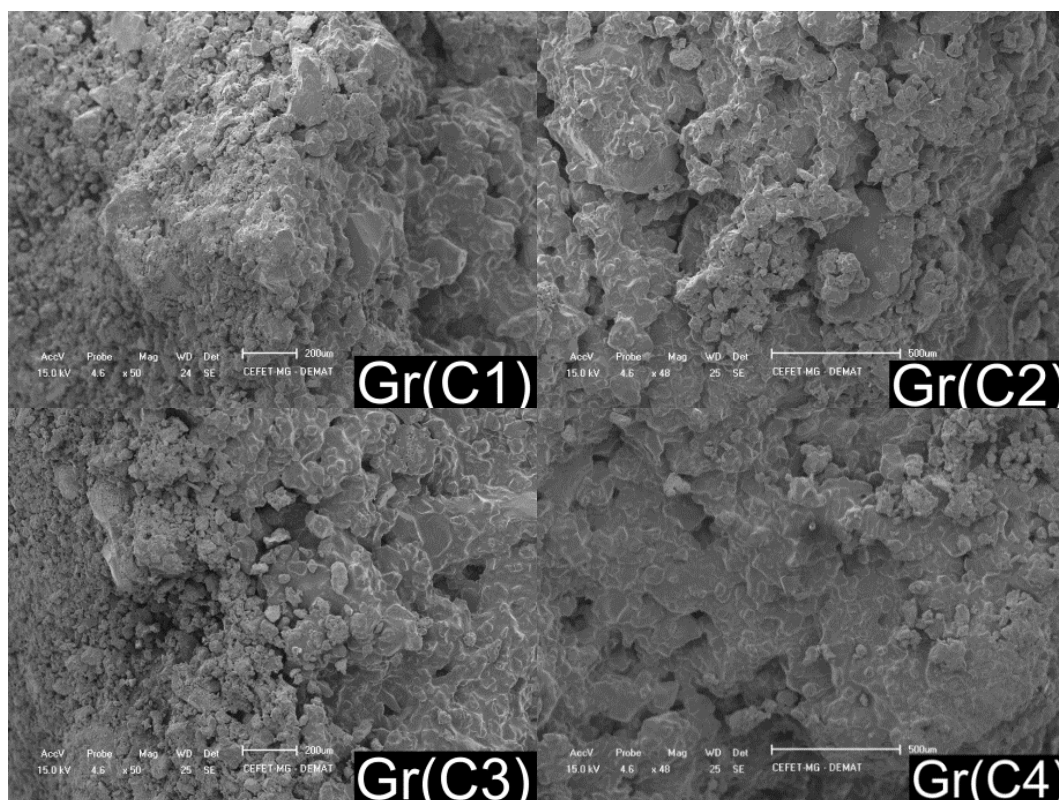
Figura 32 - Topografia dos grumos do Material (A)

Fonte: Próprio autor

Figura 33 - Topografia dos grumos do Material (B)

Fonte: Próprio autor

Figura 34 - Topografia dos grumos do Material (C)



Fonte: Próprio autor

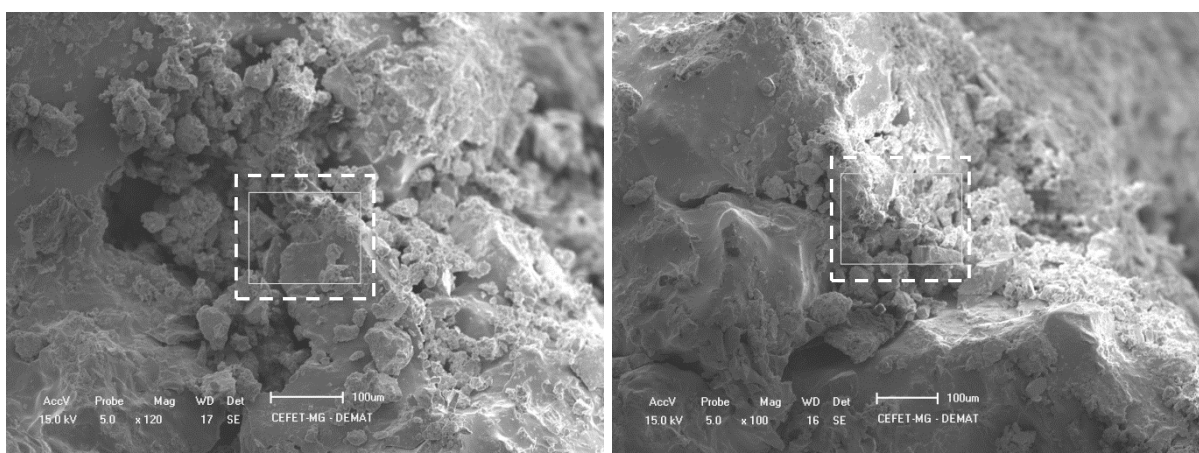
Para a caracterização, em função dos materiais serem provenientes de uma mesma região, optou-se pela análise apenas nos grumos da amostra do material (B), por ser o material visivelmente mais homogêneo e aparentemente menos sujeito a contaminações com solo, matérias orgânicas ou outros corpos estranhos que pudessem interferir na análise. A escolha se pautou pela inspeção visual do fresado *in natura*. O procedimento para obtenção das imagens ampliadas seguiu os mesmos moldes da análise topográfica, no qual as amostras foram divididas em duas metades e recobertas com material condutor. No entanto, para obtenção das ampliações, o que diferencia este ensaio do anterior é o fato do (MEV) estar acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X(EDS). Para definição e marcação da área de abrangência do detector, optou-se apenas pela representação das imagens com ampliação de x100 e x120.

Para execução do ensaio, foi retirada uma amostra de grumo aleatória do montante do material disponível para estudo, e as observações aqui esplanadas se ativeram na análise pontual, o que pode levar a variações na identificação dos elementos e

seus percentuais, quando comparados a amostras homogeneizadas do montante como um todo. Todavia, para o objetivo da pesquisa, esta análise é suficiente para identificar os constituintes básicos presentes em uma mistura típica de CBUQ oriunda de fresado de asfalto.

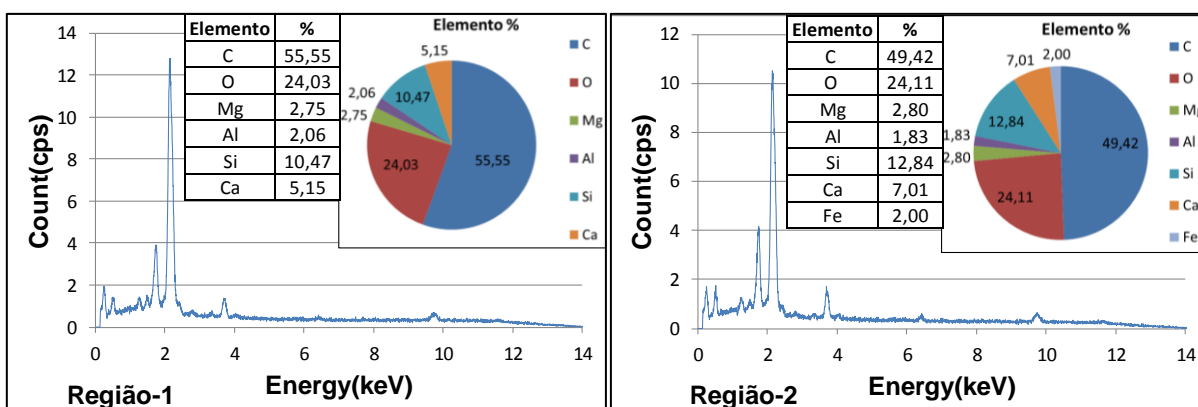
Pelas figuras 35 e 36, nas quais foram selecionadas duas regiões distintas da amostra do material (B), foram identificados os elementos carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, silício, cálcio e ferro, representados pelos espectros característicos destes elementos. Nota-se grande presença de carbono, que se constitui como o elemento principal no CAP, seguido do oxigênio. Observa-se também o cálcio, típico de rochas utilizadas como agregado na mistura asfáltica.

Figura 35 - Material (B) - Grumo - Regiões 1 e 2



Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Material (B) - Grumo – EDS (Regiões 1 e 2)



Fonte: Próprio autor

Os agregados utilizados em pavimentação devem possuir alta aderência com os ligantes asfálticos e esta adesividade é promovida principalmente pela adsorção química resultado da interação entre os átomos da superfície dos agregados e os átomos de líquidos ou gases que com ela tenham contato (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), "A maioria dos agregados silicosos tais como: arenito, quartzo e cascalho torna-se negativamente carregado na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem carga positiva na presença de água." Entretanto, muitos agregados são constituídos de minerais que apresentam carga negativa como sílica e positivas, como o cálcio, magnésio, alumínio ou ferro.

Através da composição da amostra, é possível supor também que este agregado apresenta características ultrabásicas, representada pela baixa porcentagem de sílica, resultando em um agregado com excelente adesividade ao ligante asfáltico.

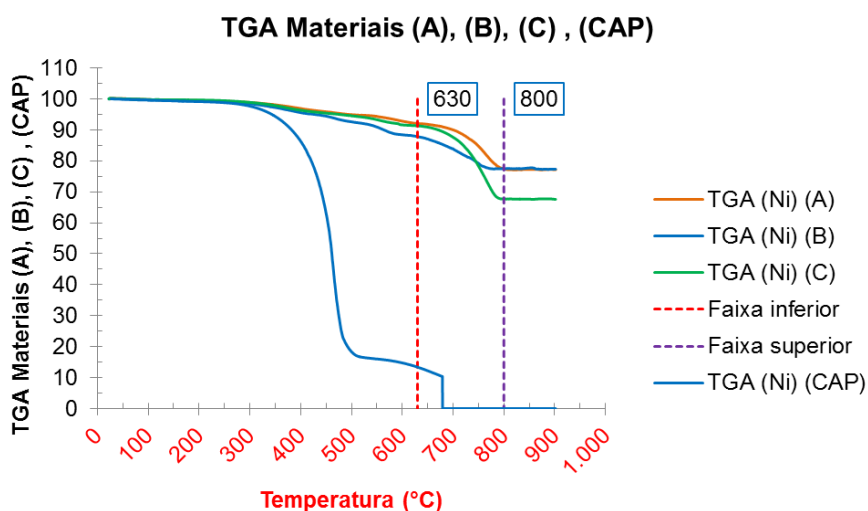
4.1.4 Análises térmicas

A análise térmica nos fresados *in natura* teve como objetivo identificar possíveis diferenças apresentadas pelos materiais (A), (B) e (C), de forma a classificar estas origens de acordo com o grau de oxidação apresentado, assim, permitindo fazer as relações dos níveis de degradação com as características mecânicas apresentadas pelos corpos de prova. As amostras foram retiradas do centro de grumos de fresado e todas elas continham mistura composta por agregados miúdos e asfalto. Como definido em literatura, o material que oxida em uma mistura asfáltica é o ligante, entretanto, foi proposta a análise da mistura agregado/ligante com a finalidade de manter as características reais do ligante, pois para a separação dos constituintes, no método de extração, há o risco de ocorrer processos que promovam algum tipo de degradação a mais no ligante, provocando alteração de suas propriedades. Entretanto foi realizado também o mesmo ensaio para a amostra de asfalto virgem, utilizada nas adições propostas às misturas, de forma a associar a perda de material com o nível de oxidação destes materiais.

Como pode ser observado pela figura 37, ao se comparar a perda de massa no processo de aquecimento controlado, identificado nas tabelas 22 e 23, verifica-se que o material (B) foi o que perdeu menor massa percentual, seguida do material (A)

e posteriormente o (C). Desta análise é possível supor que em uma classificação de degradação, o material que perdeu menor massa percentual é o que se apresenta mais degradado, e esta definição se baseia no fato que, parte dos constituintes voláteis que compõem a mistura já havia sido perdida durante o processo oxidativo decorrente do uso, vinculado a sua exposição às intempéries, sol, chuva, carregamentos e demais agentes responsáveis pelo envelhecimento do asfalto. Entretanto, em função da pequena representatividade do tamanho da amostra diante do montante de material utilizado nos ensaios, sua análise não pode ser feita de forma isolada, e nem afirmar que tal ensaio realmente define o grau de degradação da amostra, devendo ser verificadas com maior rigor outras propriedades do fresado e também correlacionadas com suas características mecânicas. Verifica-se para o CAP menor estabilidade térmica, em comparação às misturas, apresentado curva deslocada para a esquerda, com perda de massa ocorrendo a temperatura inferior à das misturas, fato condizente com os estudos de Araújo, (2012), onde é indicado que a estabilidade térmica do ligante e sua temperatura de degradação aumentam com o envelhecimento.

Figura 37 - Gráfico TGA



Fonte: Próprio autor

Tabela 22 - Relação temperatura x percentual de massa

A		B		C		CAP	
Temp.°C	(%) massa	Temp.°C	(%) massa	Temp.°C	(%) massa	Temp.°C	(%) massa
32,05	100,00	32,04	100,00	32,04	100,00	32,16	100,00
630,06	92,08	630,08	87,84	630,21	91,32	630,01	13,40
800,14	77,42	800,13	77,48	800,19	67,73	800,18	0,00

Fonte: Próprio autor

Tabela 23 - Perdas de massa percentual

Perda (%) de massa	32°-630°C	630°-800°C	32°-800°C
%A	7,92	14,65	22,58
%B	12,16	10,36	22,52
%C	8,68	23,59	32,27
%CAP	86,60	13,40	100,00

Fonte: Próprio autor

4.2 Determinação dos percentuais teóricos de CAP das misturas

Com os dados das curvas granulométricas dos agregados do fresado, percentual retido nas peneiras, foi calculado o Teor Teórico de CAP das misturas recicladas, conforme os dados da tabela 24.

Tabela 24 - Cálculo do percentual de CAP teórico

CÁLCULO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA									
GRADUAÇÃO	FRAÇÃO #		ÍNDICE	A		B		C	
	PASSADO	RETIDO	C. MOREIRA						
G-4	25,4	19,1	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G-3	19,1	12,7	0,07	4,19	0,29	4,47	0,31	1,25	0,09
G-2	12,7	9,5	0,14	4,56	0,64	11,36	1,59	3,15	0,44
G-1	9,5	4,8	0,33	18,84	6,22	14,57	4,81	16,45	5,43
M-4	4,8	2,0	0,72	21,07	15,17	17,17	12,36	16,39	11,80
M-3	2,0	0,42	2,36	22,69	53,55	21,78	51,40	20,71	48,88
M-2	0,42	0,18	8,10	12,90	104,49	18,39	148,96	10,98	88,94
M-1	0,18	0,074	19,28	5,17	99,72	3,89	75,00	7,12	137,24
F	0,074	Fundo	108,72	10,59	1151,01	8,36	908,90	23,95	2603,84
				∑ S.Esp.	1431,09	∑ S.Esp.	1203,33	∑ S.Esp.	2896,65
				Res. ∑	1,70		1,64		1,96
				Fc	1,00	Fc	0,988	Fc	0,976
				K	3,75	K	3,75	K	3,75
				%CAP	6,39	%CAP	6,17	%CAP	7,35
				%CAP Corrigido	6,39	%CAP Corrigido	6,09	%CAP Corrigido	7,18

Fonte: Próprio autor

A tabela 25 representa as variações do percentual de ligante nas misturas após as adições de 0,5% e 1,0%, em cada uma das amostras, e relaciona com o Teor

Teórico de CAP calculado. Em relação aos materiais (A) e (C), ao se acrescentar 0,5% e 1,0% de CAP, os corpos de prova ensaiados apresentaram teores de ligante com valores situados pouco acima e pouco abaixo do teor ótimo. O material (B) foi representado por corpos de prova com teor de ligante acima do teor ótimo.

Tabela 25 - Variação de ligante nos corpos de prova

A		B		C	
Ensaio Rotarex	5,83	Teor teórico	6,09	Ensaio Rotarex	6,71
+0,5%CAP	6,33	Ensaio Rotarex	7,42	Teor teórico	7,18
Teor teórico	6,39	+0,5%CAP	7,92	+0,5%CAP	7,21
+1,0%CAP	6,83	+1,0%CAP	8,42	+1,0%CAP	7,71
0,5% < ótimo	5,89	0,5% < ótimo	5,59	0,5% < ótimo	6,68
0,5% > ótimo	6,89	0,5% > ótimo	6,59	0,5% > ótimo	7,68

Fonte: Próprio autor

Os materiais de origem (A) e (C) traduzem de forma clara o entendimento de que no processo de fresagem a área superficial aumenta significativamente, haja vista que com a nova curva granulométrica apresentada, tais misturas necessitariam da adição de ligante frente a elevação do percentual de finos verificada na curva granulométrica. Todavia, o material (B) não mostrou esta tendência, indicando que o fresado *in natura* apresentou teor de ligante acima do teor ótimo, entretanto, este fato pode ser explicado pela falta de controle no processo de dosagem da mistura virgem quando da aplicação original na via, bem como, relacionado a vias que tiveram processos sucessivos de recapeamento, sem o devido controle das camadas.

4.3 Resultado dos ensaios nos corpos de prova

4.3.1 Propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios

A correlação da densidade máxima da mistura (Gmm) e as propriedades volumétricas dos CP's, definidas como densidade aparente (Gmb), volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume vazio (RBV), bem como absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova das amostras dos materiais (A), (B) e (C) são representadas abaixo, conforme tabela 26:

Tabela 26 - Propriedades volumétricas dos Fresados e CP's

	Material (A)	Material (B)	Material (C)	Correlação	Variação conf. DNIT031/2006
Gmm (g/cm³)	2,651	2,567	2,569	<i>Mistura</i>	-
Gmb (g/cm³)	2,446	2,379	2,493	<i>Corpo de prova</i>	-
%Asf	5,83	7,42	6,71	<i>Mistura</i>	4,5-9
Absorção	0,46	0,29	0,04	<i>Corpo de prova</i>	≤6% (NBR-9781/13)
índice de vazios (%)	1,11	0,68	0,09	<i>Corpo de prova</i>	-
Vv (%)	7,74	7,33	2,99	<i>Relação Gmm e Gmb</i>	3-5
VCB (%)	13,91	17,22	16,32	<i>Relação %CAP e Gmb</i>	-
VAM (%)	21,65	24,56	19,31	<i>Relação Vv e VCB</i>	>18
RBV (%)	64,24	70,13	84,51	<i>Relação VAM e Vv</i>	75-82

Fonte: Próprio autor

Para avaliações volumétricas nas misturas e CP's moldados sem acréscimo de CAP são feitas as seguintes considerações:

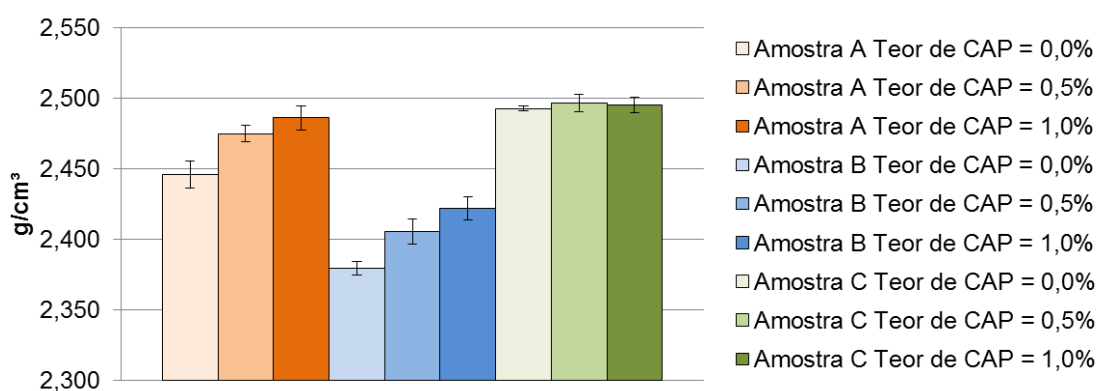
- O Gmm medido no ensaio Rice levou a valores entre (2,567 e 2,651)g/cm³. É observado que o material que possui o menor teor de asfalto, no caso o material (A), foi o que apresentou maior densidade máxima medida;
- O material (C) que possui a maior quantidade de materiais finos apresentou menor valor de absorção de água e volume de vazios. Pela constituição do fresado, que possui como componente o CAP, um aglutinante impermeabilizante, já era esperado um valor de absorção bem inferior para todas as peças pré-moldadas quando comparadas aos Paviers de concreto com cimento Portland;
- Para o índice de vazios, considerando que este ensaio correlaciona os volumes de poros permeáveis e o volume total, quando se tem elementos com baixa absorção de água, induzida pela impermeabilização das faces do CP pelo ligante, o conjunto também apresentará baixo valor para o índice de vazios. Ao se analisar o quadro, à medida que a absorção diminui, proporcionalmente ocorreu um decréscimo no índice de vazios;

- Também é verificado que o parâmetro (VAM) da mistura apresentou valores superiores aos 18% preconizados em norma, atendendo a este critério, apesar de que a (RBV) ficou fora dos parâmetros para camada de rolamento, definida entre (75% e 82%).

Observa-se que, do ponto de vista dos parâmetros volumétricos, as misturas recicladas com 100% de CAF não atendem aos critérios de dosagem para misturas a serem utilizadas como camada de rolamento para pavimento flexível. Entretanto, considerando a absorção de água e índice de vazios, quando comparados a elementos de pavimentação intertravada de concreto com cimento Portland, seus valores indicam que estas peças estarão menos sujeitas à penetração de água em seus poros e desta forma menos propensas às ações químicas e físicas que ocorrem nas peças de concreto e que estão ligadas diretamente à durabilidade do pavimento intertravado.

Para as avaliações das propriedades de massa, quando se adicionam os percentuais de 0,5% e 1,0% de CAP em peso da mistura, conforme pode ser observado na figura 38, a massa específica aparente dos corpos de provas dos materiais (A) e (B) tende a valores mais altos à medida que se adiciona ligante na composição, indicando que o acréscimo de CAP novo melhora a interação e o empacotamento, levando a misturas mais compactas.

Figura 38 - Resultados da massa específica seca Materiais (A), (B) e (C)

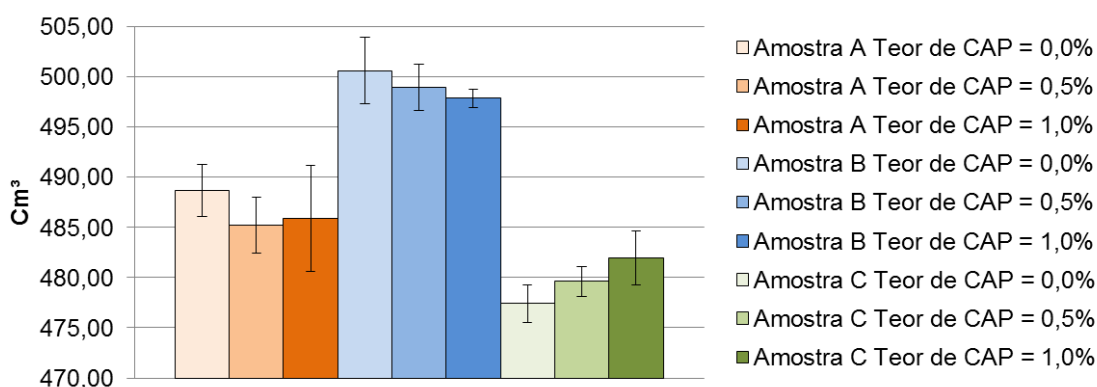


Fonte: Próprio autor

Entretanto, como a ordem de grandeza da variação da massa destes materiais é pequena, sugere-se que os percentuais de 0,5% e 1,0% produzem pouca influência nesta propriedade. Para os materiais de origem (C) fica evidenciado que não ocorreu variação significativa de sua massa específica para os percentuais de CAP acrescentados.

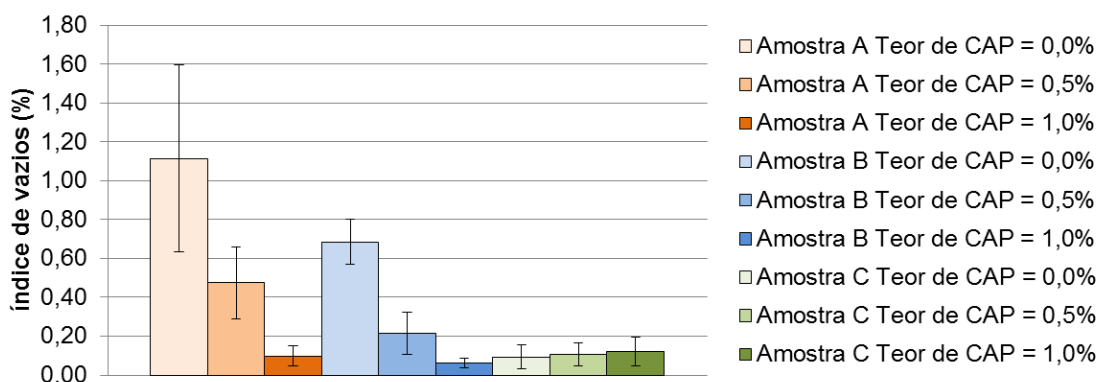
Pelas características das misturas observa-se ainda que o material (C) apresenta a maior massa específica aparente (G_{mb}), fato que pode estar ligado ao maior teor de finos presente na mistura, o que garante maior empacotamento dos CP's para uma mesma energia de compactação, fato também ilustrado pela representação dos dados relativos aos volumes dos CP's do material (C) mostrados na figura 39. Porém, observa-se também que os percentuais de CAP adicionados, pouco influenciam no volume dos corpos de prova.

Figura 39 - Volumes dos materiais (A), (B) e (C)



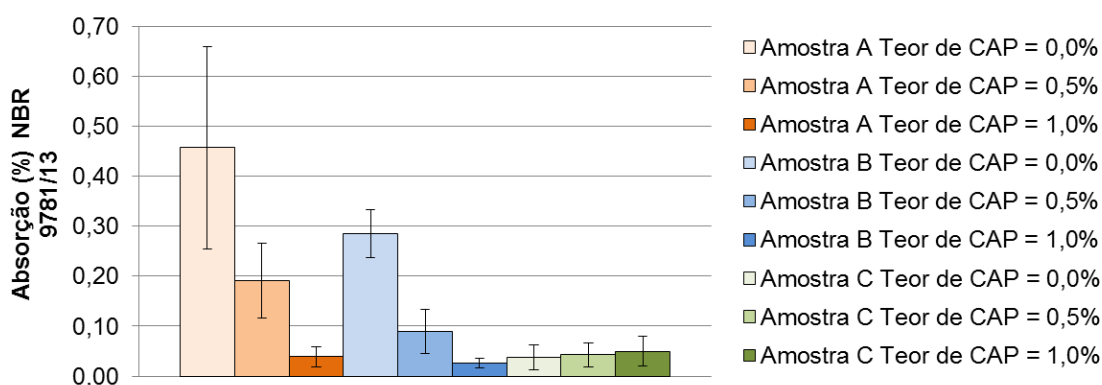
Fonte: Próprio autor

Ainda, pela análise da tabela 26 e figura 40 observa-se que o índice de vazios tende a diminuir com o aumento da massa específica da mistura e analogamente ao aumento do percentual de CAP para as amostras dos materiais (A) e (B) e pouca variação para o fresado de origem (C), fato também direcionado para a curva granulométrica deste material, indicando que o maior teor de finos garante uma amostra mais compacta e com menos poros.

Figura 40: Resultados do índice de vazios Materiais (A), (B) e (C)

Fonte: Próprio autor

As variações ocorridas no ensaio de índice de vazios e massa específica explicam a convergência observada para os ensaios de absorção de água, sendo verificado que à medida que se adiciona CAP nas misturas dos materiais (A) e (B) ocorre redução significativa nos índices de absorção. O ligante asfáltico auxilia no fechamento dos poros dos CP's e na interação entre os agregados. Novamente pode ser constatado que a absorção de água da amostra (C), que possui elevado teor de finos, foi pouco influenciada pela adição do CAP, e ainda, em relação às demais amostras, apresentou os menores valores de absorção conforme figura 41.

Figura 41 - Resultados Absorção de água Materiais (A), (B) e (C)

Fonte: Próprio autor

Em comparação com os elementos pré-moldados de concreto utilizados em pavimentos intertravados e segundo a norma ABNT-NBR 9781/2013 que relaciona o índice de absorção como propriedade ligada diretamente à qualidade e durabilidade destes elementos, pode-se verificar que devido às características dos constituintes

da mistura asfáltica, principalmente o ligante, que é um material com propriedade impermeabilizante, o conjunto proporciona uma peça pré-moldada com baixa absorção de água.

Conclui-se que, para as amostras estudadas, quando o percentual de finos é maior, a adição de CAP nas proporções indicadas não provoca alterações significativas nas propriedades volumétricas, massa específica aparente, absorção e índice de vazios.

Quando se compara os materiais (A) e (B) que possuem granulometria equivalente, ao se acrescentar os percentuais sugeridos, ocorre melhora significativa nas propriedades em referência.

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

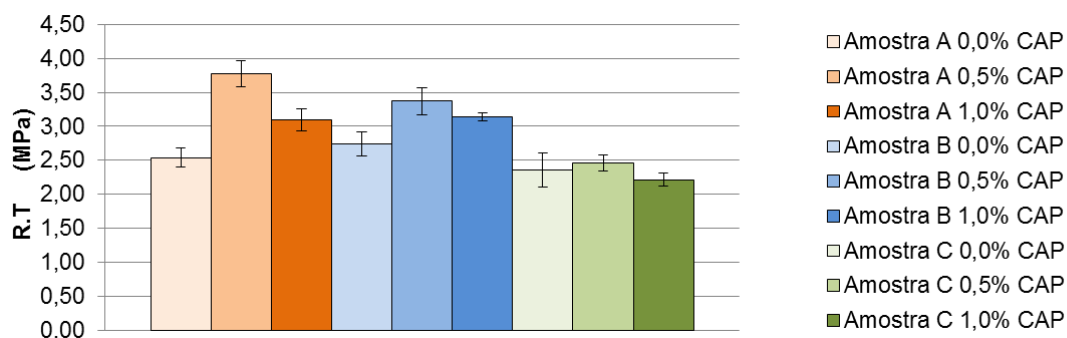
Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos através de uma prensa mecânica, conforme DNER-ME 136/2010, na temperatura de 25°C e estão representados abaixo conforme tabela 27 e figura 42. Foi observada uma variação de 179% entre o maior e o menor valor dentre as dosagens de CAP para as três origens de materiais, sendo o menor 2,21MPa e o maior 3,77MPa. Ao serem confrontados ao valor de referência da norma DNIT 031/2006, que estabelece o valor mínimo de RT em 0,65MPa para misturas novas, as resistências apresentaram respectivamente variação de 340% a 580% acima deste valor. Quando se compara com a norma Sul Africana (SANS 1058-2012), na qual especifica que os Pavers de concreto de cimento utilizados em pavimentação intertravada devem possuir resistência a tração variando entre 2,0MPa e 2,6MPa, observa-se que todos os corpos de prova atenderam a este quesito.

Tabela 27 - Resistência à tração por compressão diametral Mat. (A), (B) e (C)

%CAP	R.T (MPa)					
	Amostra A	Desv.Padrão	Amostra B	Desv.Padrão	Amostra C	Desv.Padrão
0,0%	2,54	0,139	2,74	0,176	2,36	0,250
0,5%	3,77	0,192	3,37	0,195	2,46	0,118
1,0%	3,10	0,162	3,14	0,065	2,21	0,096

Fonte: Próprio autor

Figura 42: Resistência à tração por compressão diametral Mat. (A), (B) e (C)



Fonte: Próprio autor

Estudos de Soares *et al.* (2000) já demonstravam que misturas que apresentam CAP mais consistente tendem a apresentar maior módulo de resiliência, maior resistência à deformação e à tração estática, sendo estas propriedades mais realçadas para as misturas com granulometrias mais grossas. Os materiais pesquisados apresentaram esta tendência, visto que o material (B), que apresenta maior quantidade de ligante oxidado, possui maior RT que o material (A), quando se analisa as amostras sem acréscimo de CAP. O material (C), o que apresentou menor resistência à tração, possui granulometria mais fina. Entretanto, estas características não podem ser analisadas isoladamente, pois dependem de outras variáveis, tais como teor de ligante, temperatura de ensaio etc.

A resistência à tração é uma característica que está diretamente vinculada à qualidade e durabilidade dos pavimentos asfálticos e está relacionada à capacidade de suportar as solicitações de fadiga imposta pelas cargas aplicadas ao pavimento, as quais tendem a fissurar as superfícies de rolamento das vias. Neste sentido, quanto maior a resistência à tração do conjunto pavimento, menor serão os efeitos negativos causados pelos esforços repetitivos atuantes na camada de rolamento.

Pode ser observado que os elementos moldados com 100% de fresado, em comparação com misturas asfálticas novas, as quais apresentam granulometria dentro da faixa "C" do DNIT, apresentam valores bem superiores de resistência à tração. Tal elevação se deve ao grau de oxidação do ligante, atrelado à maior quantidade de finos presentes na mistura. Quando se comparam os ensaios de Falcão e Soares (2002) realizados em mistura asfáltica convencional de CBUQ com percentual de ligante de 7%, os quais apresentaram valores de RT na ordem de

1,59MPa e os resultados de RT do fresado do material (A), cujo percentual de CAP está na mesma ordem de grandeza, verifica-se resistência quase duas vezes superior para a mistura reciclada.

Isoladamente quando se analisa os valores de RT para cada um dos conjuntos dos materiais (A), (B) e (C), é notório que ao se acrescentar 0,5% de CAP ocorre um ligeiro aumento na resistência à tração e ao acrescentar 1,0% de CAP este valor decresce. Conforme ANTT (2014), que avaliou os métodos de dosagem de misturas asfálticas com suas propriedades mecânicas, ao se acrescentar ligante em uma mistura padrão, seus valores de RT tendem a ser menores, pois maiores teores de ligante novo tendem a diminuir o Módulo de resiliência da mistura e conseqüentemente sua resistência à tração, ficando sujeita a maiores deformações com a aplicação de carga. Em uma análise da influência do percentual de finos, Falcão e Soares (2002) ao realizarem ensaios em misturas asfálticas com AAUQ (Areia asfalto usinado a quente) com 9% de teor ótimo de ligante, enquadrada na faixa A do DNER (1997), e compararem com misturas de CBUQ padrão, faixa “C” do DNER (1997) e teor ótimo de ligante em 7% observou que a mistura de AAUQ, que possui maior teor de finos, apresentou resistência à tração muito inferior à de CBUQ, sendo assim, verifica-se coerência nos resultados apresentados pelos corpos de prova moldados com o material (C), os quais apresentam teor de finos mais elevado.

4.3.3 Resistência à compressão

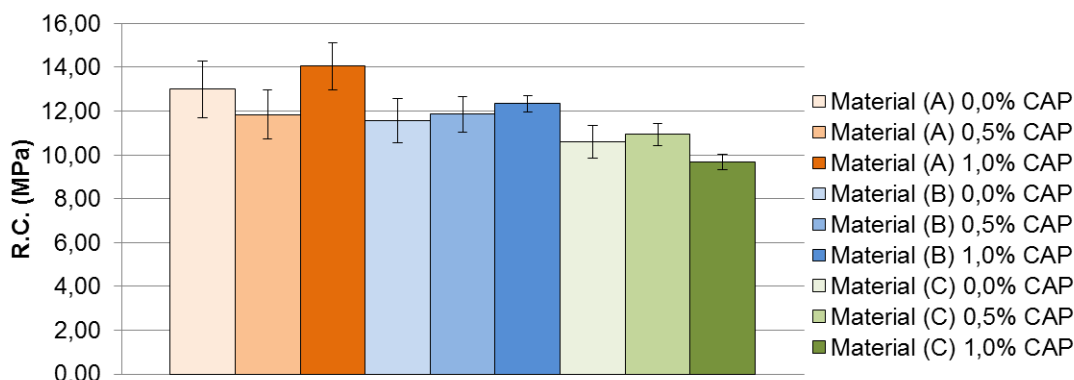
Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova das amostras estão representados abaixo conforme tabela 28 e figura 43.

Tabela 28 - Resistência à compressão Materiais (A), (B) e (C)

%CAP	R.C. (MPa)					
	Material (A)	Desv.Padrão	Material (B)	Desv.Padrão	Material (C)	Desv.Padrão
0,0%	12,99	1,308	11,56	1,005	10,60	0,755
0,5%	11,84	1,119	11,85	0,810	10,93	0,524
1,0%	14,06	1,076	12,34	0,361	9,66	0,357

Fonte: Próprio autor

Figura 43 - Resistência à Compressão Materiais (A), (B) e (C)



Fonte: Próprio autor

O ensaio de resistência à compressão simples não é um ensaio corriqueiro para pavimentação asfáltica, sendo as determinações para a garantia de qualidade da camada de rolamento destes pavimentos lastreadas por ensaios específicos de seus constituintes, agregado, ligante e ensaios mecânicos para caracterização das misturas, que no caso de concretos asfálticos convencionais visam maior interação no conjunto agregado ligante.

Em função de se estar propondo uma nova aplicação para a mistura asfáltica, com a utilização do material reciclado para a confecção de elementos para pavimentação intertravada, optou-se pela verificação da resistência a compressão, por esta característica ser uma das referências de norma para a definição da qualidade e durabilidade dos elementos que compõem a pavimentação intertravada convencional, que utiliza elementos pré-moldados executados em concreto, cuja composição básica é formada por cimento Portland e agregados.

As resistências alcançadas pelos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall, quando comparadas com a norma de referência para elementos de concreto NBR 9781/2013, são bem inferiores, com valores variando entre 9,66 MPa e 14,06 MPa, valores que correspondem respectivamente a 27,60% e 40,18% da resistência mínima exigida pela norma brasileira. Entretanto, esta norma não possui faixa de utilização exclusiva para pisos com tráfego de pedestres e bicicletas, e se aplica tanto para locais de baixa solicitação de cargas, como de alta, exigindo que a resistência atenda ao que for mais restritivo, que neste caso, o mínimo é um valor de

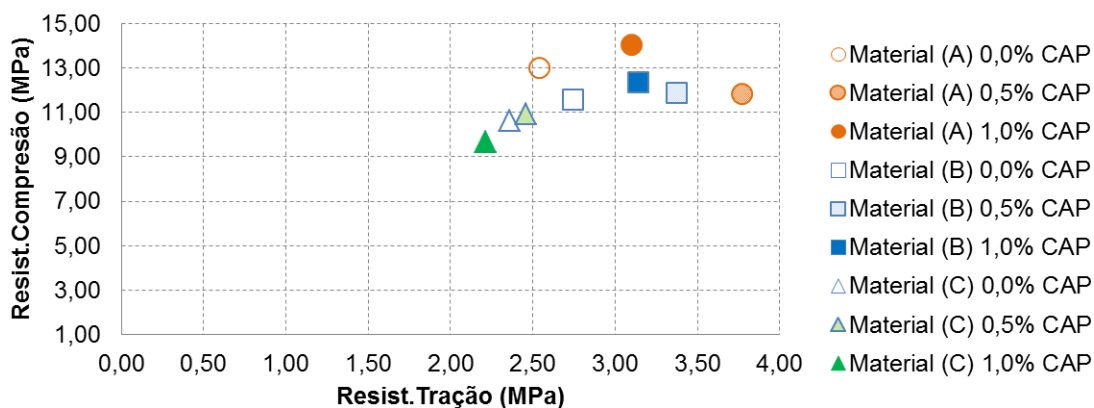
resistência de 35,0 MPa. Os elementos moldados com CAF não conseguem por esta característica mecânica, analisada isoladamente, atender aos requisitos mínimos da NBR 9781/2013.

Pela análise dos dados apresentados pelas misturas recicladas, observa-se que o acréscimo de 0,5% de CAP para o material (A), levou a uma redução de 8,85% na resistência do CP e ao se acrescentar 1,0% de CAP ocorreu aumento de 8,23%. O material (A) foi o que apresentou maior média de resistência à compressão em comparação com os demais materiais e esta resistência foi conseguida quando à mistura foi acrescentado 1,0% de CAP novo e desta forma atingindo o valor de 14,06 MPa. Para o material (B) ao se acrescentar 0,5% de CAP ocorreu um acréscimo de 2,5% em sua resistência e com adição de 1,0% de CAP este valor subiu para 6,74%, atingindo 12,34 MPa. Entretanto, para o material (C) o aumento de resistência só foi observado quando se adicionou 0,5% de CAP, o qual elevou a resistência em 3,11%, sendo que ao se adicionar 1,0% de CAP na mistura foi observada uma redução de 8,86% em sua resistência, a qual chegou a 9,66 MPa, desta maneira caracterizando-a como a de menor valor. Os materiais (A) e (B) apresentaram maior valor de resistência à compressão quando acrescido 1,0% de CAP, entretanto somente o material (B) mostrou tendência de aumento de resistência com a adição de CAP.

Contudo, quando se compara estes valores com referências da norma (SANS 1058-2012), da África do Sul, país em que os estudos sobre pavimentação intertravada está bem mais evoluído que no Brasil, verifica-se que a exigência mínima requerida nesta nação é de apenas 25 MPa para locais com tráfego leve, apresentando elementos com qualidade comprovada e durabilidade já atestada. Partindo deste pressuposto, há margem para novas discussões sobre a possibilidade de aceite de resistências ainda menores, principalmente se estiver trabalhando com elementos pré-moldados que apresentem valores excelentes em outras propriedades, as quais estão desvinculadas do fator resistência mecânica, entretanto, que estão ligadas diretamente à qualidade e durabilidade do conjunto piso/elemento intertravado. Dentre estas propriedades, podem ser citadas baixa absorção de água, boa resistência a abrasão e à tração. Ao se analisar a correlação entre resistência a compressão e à tração alcançadas pelos corpos de prova, constata-se que dentre os

materiais testados, não há uma relação direta entre estas propriedades com a adição de ligante, conforme mostrado na figura 44. Na figura 45 estão apresentados os corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência a compressão.

Figura 44 - Resistência à Compressão x Resistência à Tração



Fonte: Próprio autor

Figura 45 - Corpos de prova ensaiados a compressão Materiais (A), (B) e (C)



Fonte: Próprio autor

4.3.4 Abrasão profunda

Os resultados do ensaio de abrasão profunda estão representados abaixo, conforme tabela 29. Pela ABNT NBR 9781/13 – o ensaio de resistência à abrasão é facultativo, porém quando utilizado segundo esta norma, determina a utilização de dispositivo de abrasão com disco na vertical, que avalia a perda de material em volume. Entretanto, optou-se por realizar o ensaio com abrasômetro com roda de borracha, que avalia a perda de massa ao longo do tempo de forma a se comparar o desempenho ao desgaste dos elementos com os resultados encontrados por

(SANT'ANA FILHO, 2013). O citado autor utilizou o mesmo equipamento para definição da resistência a abrasão em elementos de pavimentação intertravada executados com agregados, cimento e resíduos das barragens de minério de ferro, os quais apresentaram resistência a compressão acima de 50MPa. Esta comparação permitiu avaliar o desempenho de elementos bem distintos do ponto de vista da resistência à compressão, de maneira a demonstrar que misturas asfálticas compactadas, mesmo apresentando valor inferior para a resistência, podem apresentar desempenho satisfatório em relação ao desgaste abrasivo.

Tabela 29 - Resistência a Abrasão Profunda Materiais (A), (B) e (C)

Amostra A	Resultados do ensaio de abrasão leituras							
0,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	3,18	2,85	2,95	3,01	2,83	2,82	2,94
0,5% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	3,07	3,05	2,69	2,73	2,60	2,45	2,77
1,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,93	2,70	2,62	2,63	2,62	2,58	2,68
Amostra B	Resultados do ensaio de abrasão leituras							
0,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,50	2,48	2,50	2,31	2,35	2,35	2,42
0,5% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,57	2,29	2,11	2,09	2,19	2,15	2,24
1,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,00	2,00	1,83	1,81	1,67	1,53	1,81
Amostra C	Resultados do ensaio de abrasão leituras							
0,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,68	2,73	2,70	2,65	2,50	2,30	2,59
0,5% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,89	2,78	2,76	2,24	2,21	2,19	2,51
1,0% Cap	Tempo em minutos							Média (g)
	0	20	40	60	80	100	120	
Perda massa	0,00	2,39	2,37	2,31	2,58	2,45	2,43	2,42

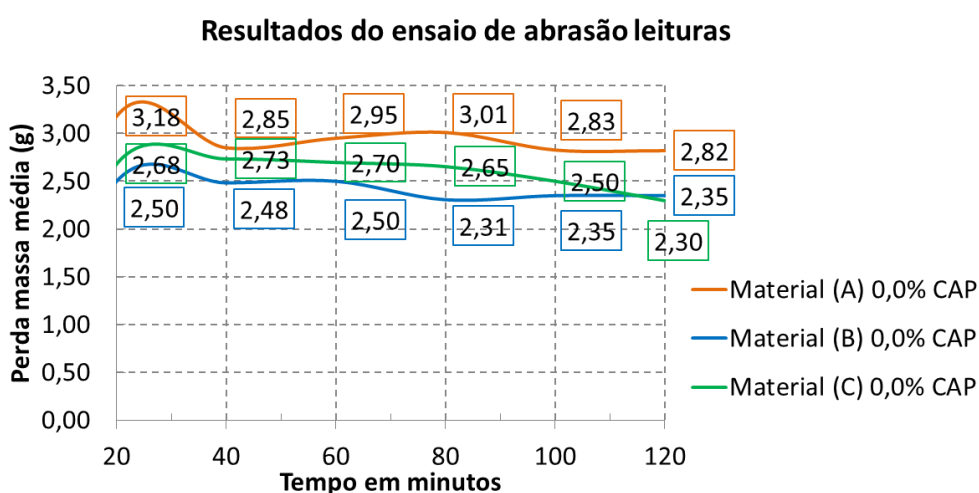
Fonte: Próprio autor

Os resultados observados nos experimentos de Sant'ana Filho, (2013) demonstram uma tendência à estabilização da perda por abrasão com o passar do tempo, após

estágios de acomodação das asperezas superficiais, apresentando valores médios de desgaste em gramas da ordem de 1,225g de perda de material após 2 horas de ensaio. Os resultados apresentados pelas misturas asfálticas mostraram valores variando de 1,81g a 2,94g dependendo da origem e teor de CAP adicional. Quando se analisa os valores de resistência dos dois tipos de elementos, concreto e mistura asfáltica, observa-se que a diminuição da resistência ao desgaste foi proporcionalmente muito inferior à diminuição da resistência a compressão dos elementos. Enquanto um elemento de concreto com 48,69MPa apresentou desgaste acumulado de 7,35g em duas horas de ensaio, um elemento moldado com mistura asfáltica com resistência de 12,34MPa, apresentou desgaste de apenas 10,84g em ensaio que considera as mesmas condições de contorno.

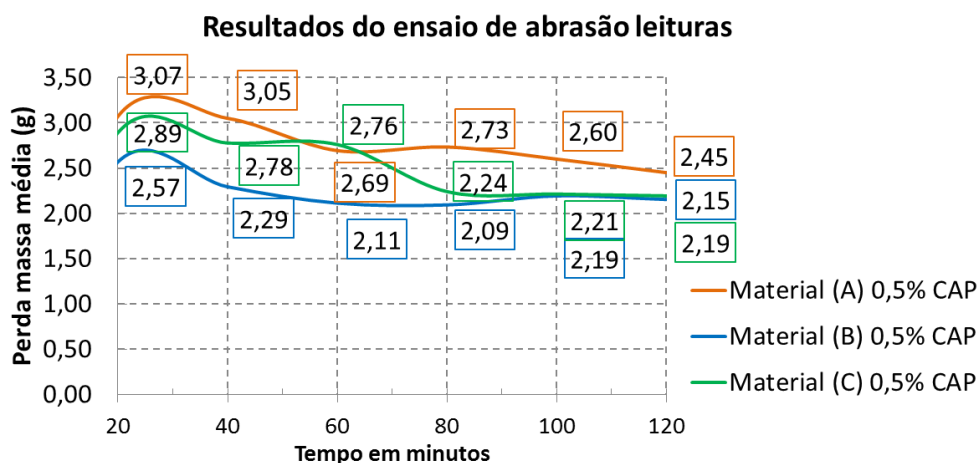
As figuras 46, 47 e 48 ilustram a comparação entre as três origens, quando se utiliza o mesmo percentual de adição de CAP por material. Pode ser observado que todos os materiais apresentaram a mesma tendência quando se adiciona CAP nas misturas, a redução da perda de material por abrasão, possivelmente pela propriedade do ligante em promover maior interação entre os agregados.

Figura 46 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 0,0%CAP



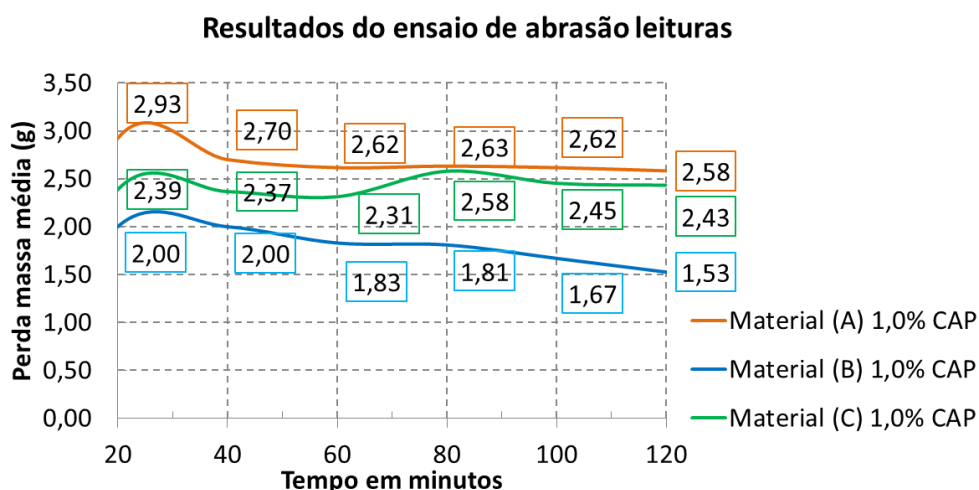
Fonte: Próprio autor

Figura 47 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 0,5%CAP



Fonte: Próprio autor

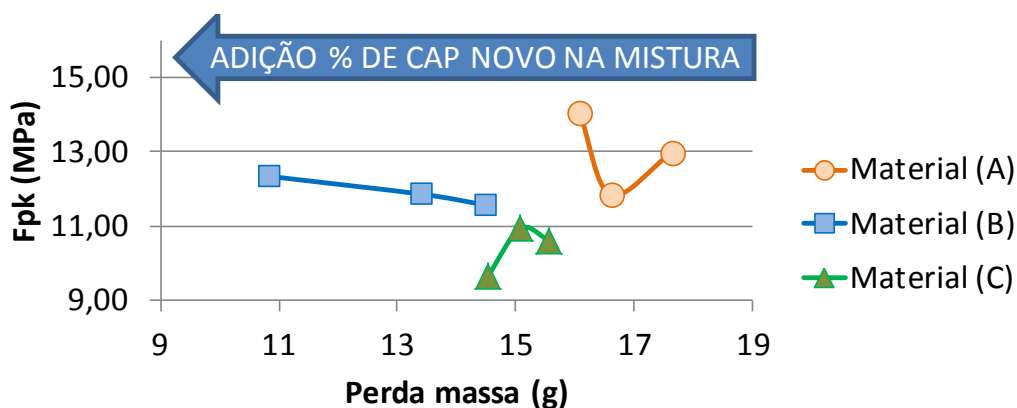
Figura 48 - Comparativo entre os Materiais (A), (B) e (C) 1,0%CAP



Fonte: Próprio autor

Pela figura 49 verifica-se que a resistência à compressão não é o fator predominante para a resistência ao desgaste por abrasão, visto que o material (A) apresentou os maiores valores de resistência à compressão e também as maiores perdas de material, sendo a variação no percentual de CAP novo o responsável pela redução da perda de material por abrasão. Santos, (2014) avaliando o desgaste por abrasão utilizando disco vertical concluiu que as peças de concreto que obtiveram as melhores resistências à abrasão profunda foram as que apresentaram resistências à compressão axial mais altas. Isto demonstra a necessidade de estudos mais aprofundados para avaliar a necessidade de resistência mais elevada quando se utiliza elementos moldados com mistura asfáltica.

Figura 49 - % de CAP x perda de material x Resistência à compressão



Fonte: Próprio autor

4.3.5 Ensaio cântabro

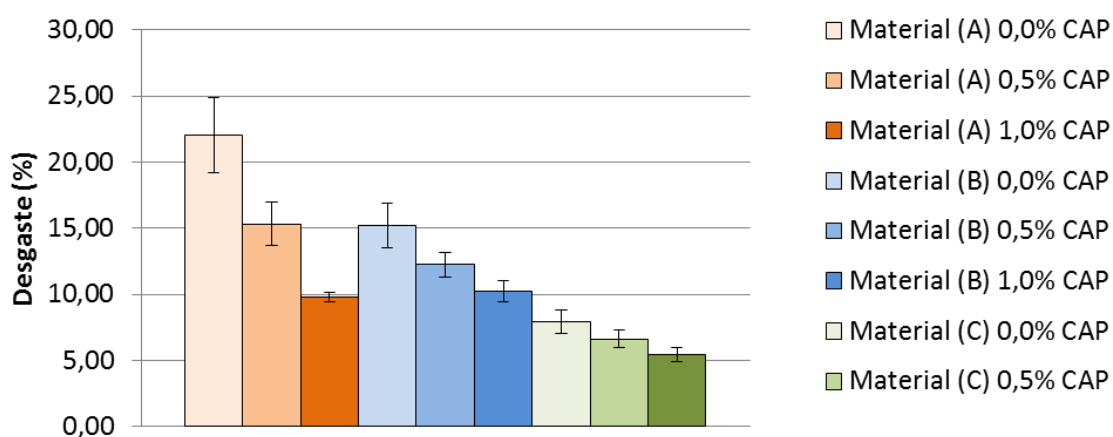
Este ensaio não é padronizado para elementos pré-moldados de concreto, sendo utilizado com o objetivo de definir o desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero, entretanto, de acordo com a ABNT-NBR 15140/2004, este ensaio, mesmo estando relacionado a pavimentos drenantes, pode ser estendido para outros tipos de misturas asfálticas. Como é um ensaio que determina a perda de material com o impacto ou atrito, justifica-se sua realização neste tipo de elemento por se tratar de peças que serão estocadas, manuseadas e executadas através de serviços manuais, estando sujeitas a variadas formas de desgaste mesmo antes de sua aplicação no piso. Para a realização do ensaio foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de abrasão profunda. A orientação pelo procedimento é justificada pela forma de realização do ensaio de abrasão profunda, na qual é mantida a integridade estrutural do elemento, ocorrendo apenas seu desgaste superficial, sendo que a perda de massa resultada por este desgaste representou valor inferior a 1,5% da massa total dos corpos de prova, provendo desta maneira condições mais uniformes de comparação entre os dois ensaios. Justifica-se também a utilização dos mesmos corpos de prova baseado na metodologia de execução do ensaio Cântabro, na qual avalia a perda de massa com base em referência de pesagem inicial.

De acordo com o NCHRP (2011) o teste de abrasão cântabro é utilizado para avaliação do desgaste, durabilidade e teor ótimo de asfalto em uma mistura padrão.

Segundo o manual, o percentual de perda de material tende a diminuir com a adição de ligante à mistura. Para que uma mistura compactada atenda aos requisitos do manual ela deve apresentar perda percentual de massa menor que 15%, contudo as referências normativas brasileiras indicam que este valor não deve ultrapassar 25%. De acordo com Bernucci *et al.* (2008) quanto menor a perda de massa, melhor será a resistência à desagregação do elemento pré-moldado.

Os resultados do ensaio Cântabro estão indicados abaixo conforme figura 50 e tabela 30. O ensaio foi realizado segundo a norma DNER-ME 383/99-Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro. Segundo esta referência normativa não pode haver variação superior a 20% entre os corpos de provas individuais testados. Através deste ensaio foi possível observar que as misturas que apresentam maior teor de finos tiveram um desempenho melhor que as demais. Observou-se também, que o acréscimo de ligante nas misturas contribuiu de forma significativa na redução da perda de massa.

Figura 50 - Resultados do ensaio cântabro Materiais (A), (B) e (C)



Fonte: Próprio autor

Tabela 30 - Ensaio cântabro Materiais (A), (B) e (C)

%CAP	Desgaste percentual (%)					
	Material (A)	Desv.Padrão	Material (B)	Desv.Padrão	Material (C)	Desv.Padrão
0,0%	22,08	2,84	15,20	1,65	7,95	0,88
0,5%	15,33	1,62	12,24	0,92	6,61	0,68
1,0%	9,82	0,35	10,21	0,78	5,43	0,51

Fonte: Próprio autor

Ao se comparar o ensaio cântabro e o ensaio de abrasão profunda, o comportamento em relação à resistência ao desgaste foi o mesmo. Conforme evidenciado, ocorreu uma melhora significativa da resistência ao desgaste quando foram adicionados 0,5% e 1,0% de CAP novo nas misturas recicladas, e quando comparadas as três origens de fresado também se constata que a mistura com maior teor de finos, no caso, os corpos de prova moldados com o material (C) apresentaram os menores valores de perda de massa e também exibiram menor variação percentual quando comparados CP's de mesma origem. Pela figura 51 é possível verificar o aspecto final dos corpos de prova após as 300 revoluções no equipamento de abrasão Los Angeles, sem a carga de esferas.

Figura 51 - Foto dos CP's após o ensaio cântabro

Fonte: Próprio autor

4.3.6 Módulo de resiliência das misturas recicladas

O ensaio para determinação do módulo de resiliência foi realizado no laboratório da SoloCap/BH conforme os procedimentos da norma DNIT 135. Para o ensaio de MR foram realizadas 10 determinações ou ciclos de carregamento, sendo considerados 3 (três) corpos de prova por material (A), (B) e (C). Todo o ensaio foi realizado a

temperatura de 25°C, conforme tabela 31. Os valores apresentados foram superiores as médias encontradas para misturas asfálticas convencionais utilizando ligante novo, as quais variam entre 20.000 a 80.000 kgf/Cm². Partindo desta referência e comparando com os valores mínimos e máximos apresentados por cada grupo de corpos de prova, foi constatado o alto grau de rigidez das misturas com 100% de fresado.

Tabela 31 - Módulo de resiliência dos Materiais (A), (B) e (C)

MR- Módulo de resiliência (kgf/Cm²)									
Determinações	Material (A)			Material (B)			Material (C)		
	CP-A1	CP-A2	CP-A3	CP-B1	CP-B2	CP-B3	CP-C1	CP-C2	CP-C3
1	122.026	155.728	228.005	281.948	492.354	177.234	62.890	65.796	89.709
2	117.965	157.623	175.448	239.089	342.802	179.729	60.932	62.550	87.641
3	112.074	146.121	208.782	254.333	308.334	166.371	59.366	65.270	89.641
4	129.089	140.525	215.921	256.100	431.101	144.617	60.984	62.899	85.527
5	110.169	149.625	182.902	246.677	346.509	171.248	58.097	67.584	92.456
6	111.749	125.413	214.836	266.746	401.780	182.700	59.515	65.748	86.175
7	113.855	149.560	206.237	254.499	420.609	171.625	57.730	66.722	89.364
8	113.379	146.947	163.616	218.002	416.069	162.113	62.483	67.596	93.360
9	123.498	121.106	219.703	241.733	405.977	147.992	60.313	69.896	87.574
10	132.478	128.877	230.764	276.028	433.284	181.979	60.249	69.557	88.154
MR Mínima	110.169	121.106	163.616	218.002	308.334	144.617	57.730	62.550	85.527
MR Máximo	132.478	157.623	230.764	281.948	492.354	182.700	62.890	69.896	93.360
Dados do ensaio									
Nº ciclo de condicionamento	10								
Tensão média de ensaio (kgf)	212,66	207,63	213,24	245,46	244,26	249,52	196,42	199,93	198,02
Deformação Específ. (mm)	0,003	0,0007	0,00005	0,0005	0,0004	0,0008	0,0017	0,0015	0,0011
Temperatura °C	25								

Fonte: Próprio autor

Os resultados apresentaram alta dispersão em seus valores, sendo assim, de forma a se ter um valor para o módulo de resiliência representativo para cada material, foi adotada a média dos 30 valores com um nível de confiança de 95%. Para tanto, foi calculada a média e o desvio padrão dos trinta valores encontrados para o módulo de resiliência para cada material. Utilizando significância (0,05) e o desvio padrão (s), calculou-se o intervalo de confiança. Com este valor foi encontrado o intervalo de confiança em que os valores do módulo de resiliência deverão estar inseridos; Média \pm intervalo de confiança. Todos os valores individuais fora deste range foram descartados e com o remanescente obtido a média, conforme dados da tabela 32.

Tabela 32 - Módulo de resiliência dos Materiais (A), (B) e (C)

	Material (A)	Material (B)	Material (C)
MR Médio dos CP's (kgf/Cm²)	152.746	262.549	68.658
RT(kgf/Cm²) *	25,90	27,94	24,07
MR/RT	5897	9397	2853

* Conforme item 4.3.2

Fonte: Próprio autor

Apenas pela análise do Módulo de resiliência constata-se que o material de origem (B) é o que apresenta maior grau de rigidez, seguido dos materiais (A) e (C), entretanto, todos os três materiais apresentam módulo de resiliência elevado, e consequentemente tendem a apresentar alta resistência à deformação permanente e uma menor vida de fadiga. Como relatado por Bernucci *et al.* (2008), as alterações no módulo de resiliência das misturas podem ocorrer em função do tipo de ligante utilizado, propriedades volumétricas, energia e temperatura de compactação, temperatura do ensaio, faixa granulométrica.

5 CONCLUSÕES

Baseado no teor de asfalto e adições realizadas, observou-se que o acréscimo dos percentuais propostos levou a melhorias nas propriedades de resistência à abrasão e desgaste cântabro, propriedades estas que estão ligadas diretamente a qualidade e durabilidade das peças que compõem pisos intertravados. Como os valores apresentados pelos três materiais estão abaixo das referências máximas para o ensaio cântabro que é 25% de perda de material em massa, e no quesito resistência à abrasão profunda a redução ocorrida no desgaste em função da adição de CAP em termos absolutos foi pequena, e entendendo-se que em um processo de reciclagem é esperado que a técnica envolvesse o menor custo possível, desta forma, acredita-se que pelos resultados apresentados nos ensaios de desgaste não se justifica as adições propostas de CAP, face às melhorias conseguidas.

O acréscimo de ligante contribuiu para a redução da absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova moldados com os materiais (A) e (B), entretanto, é demonstrado que para a mistura reciclada moldada com o material (C), a adição de CAP nas variações propostas não provocou alterações significativas destas propriedades. O percentual de CAP e o grau de oxidação do ligante interferem de forma significativa na aglutinação da mistura e no grau de fechamento dos poros, contudo, como os índices apresentados pelas misturas dos três materiais estão bem abaixo dos valores máximos para pavimentos intertravados executados em concreto com cimento, do ponto de vista destas propriedades, considera-se também desnecessária a adição de CAP às misturas.

Em relação à resistência à compressão simples, como foi apresentada tendência diferenciada para as três amostras em função das adições de CAP novo à mistura, não foi possível definir de forma clara o real comportamento com o acréscimo de ligante. Quando se compara os materiais sem adição de CAP, as origens (A) e (B) que apresentaram granulometria semelhante, diferindo no teor e grau de oxidação do asfalto, o material (A) com percentual menor de ligante, mostrou-se mais rígido e conseqüentemente com maior valor de resistência. Ao se cruzar os valores de resistência com as informações obtidas no ensaio cântabro conclui-se também ser o

material (A) o que apresenta comportamento mais frágil. Os CPs do material (C) com resistências menores comparadas aos demais, apesar de possuírem granulometria com maior teor de finos mostraram comportamento menos frágil ao se relacionar com a perda de material pelo ensaio cântabro, fato que pode estar vinculado à menor degradação do ligante, quando se compara aos demais fresados em estudo.

Os valores obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral indicaram leve tendência de melhora na resistência com a adição de 0,5% de CAP, entretanto, valores inferiores nesta propriedade ao se adicionar 1,0% de ligante à mistura. Esta tendência mostra a influência de adições de CAP novo em misturas que apresentam ligantes oxidados, fato ligado possivelmente à redução da viscosidade do CAP presente no fresado, acarretando em redução do módulo de resiliência e da Resistência à tração.

Ao se fazer uma analogia entre Módulo de resiliência versus o ensaio TGA foi observada a mesma tendência para o processo oxidativo e de envelhecimento dos materiais, onde foi identificado em ordem de maior para menor processo de degradação o material (B), seguido do material (A) e (C).

Em relação aos constituintes do CAF, como são materiais já testados e consagrados na composição das misturas asfálticas convencionais, são materiais que dispensam outros ensaios específicos, fazendo com que a avaliação do material nos depósitos de armazenamento seja realizada de forma expedita, e com equipamentos compactos, possibilite a reciclagem no próprio local da coleta, dispensando o transporte do material para grandes centrais.

Pelos ensaios de caracterização do fresado e corpos de prova, estima-se ser possível a utilização de fresado independente de sua origem, entretanto, após inspeção visual que permita identificação de possíveis traços de contaminação. Desta forma, os resultados obtidos no presente estudo indicam que a utilização de 100% de CAF como matéria prima para confecção de elementos para execução de pisos intertravados para locais de baixa solicitação de cargas pode ser tecnicamente viável.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho sugere como propostas para trabalhos futuros:

- Avaliação das misturas recicladas com fresados retirados de um mesmo sitio, variando-se a quantidade de finos e mantendo o teor de asfalto oxidado, de forma a verificar a influência do teor de finos no comportamento mecânico da mistura, bem como na volumetria, índice de vazios e absorção, de maneira a sugerir um pré peneiramento do fresado antes da mistura e compactação para utilização como elemento de piso intertravado;
- Incluir a caracterização do ligante, determinando sua viscosidade, de forma a permitir adição de CAP que mantenham os fresados de origens diferentes com a mesma referência de ligante, de forma a se avaliar o comportamento das misturas em função das curvas granulométricas originais dos fresados.
- Avaliação do desempenho dos elementos pré-moldados de mistura asfáltica em pisos, produzidos em simulação experimental com carregamento em condição de utilização em locais com tráfego de bicicletas, pedestres, passeios, simulando tráfego intenso e moderado em pista de rodagem em escala reduzida;
- Execução e avaliação de piso intertravado de elementos executados com mistura asfáltica reciclada com 100% de CAF em local público, ciclovias e pistas de caminhada, para verificação da durabilidade sobre as condições reais de utilização;
- Experimentação para avaliação da carga necessária para prensagem das misturas a quente, de maneira a se obter o mesmo grau de compactação e volumetria da metodologia Marshall, desta forma, facilitando a confecção dos elementos e produção em escala maior.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, Capítulo XX do Edital 03, Lote 07, item 10 do PER Rodovias BR 116/376 PR e BR 101 Trecho Curitiba – Florianópolis. PROJETO 02 SGP/ALS_02 REV.00. p.210. 2014.

AL-QADI, I.L., ELSEIFI, M.A., and CARPENTER, S.H. **Reclaimed asphalt pavement: a literature review**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Report Number FHWA-ICT-07-001.2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C936C936M: Standard specification for solid concrete interlocking paving units**. Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2013.

_____. **C140 / C140M-14b: Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units**. West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **C902-14: Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick**. West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **D4123-82: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures**. USA, 1982.

ANDERSON, M.; D'ANGELO, J.; HUBER, G. **Forensic investigation of early cracking on I-25 in Denver, Colorado**. CDOT-DTD-R-2001-10. Colorado Department of Transportation, Colorado, USA. 2001.

AIREY, G.D. e BROWN, S.F. **Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists**. AAPT. 1998, v. 67, p. 66-87.

ARAÚJO, M. F. A. S. **Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente**. 87f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2007.

ARAÚJO, M. F. A. S. **Efeito da radiação solar no envelhecimento de ligantes asfálticos modificados**. 121f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Manual, series, Nº 20 (MS-20), Second Edition. Lexington, KY, USA. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15140**: misturas asfálticas: determinação do desgaste por abrasão Cântabro. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, Dezembro, 1984.

_____. **NBR NM26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão: índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007** - amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

_____. **NM ISO 7500-1**: materiais metálicos: calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro, 2004.

BAHIENSE, Alexandre Vianna. **Pavimentos intertravados de matriz cimentícea incorporados com lama do beneficiamento de rochas ornamentais**. 2011. 139 f. Tese (doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2011.

BALBO, José Tadeu; BODI, Janos. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: aternativa para bases de elevado módulo de elasticidade**. In: XVIII AMPET CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2004. São Paulo. São Paulo, 2004. p.174-185.

BARDINI, V.S.S; KLINSKY, L.M.G.; FERNANDES JR.; J.L. **A importância do fíler para o bom Desempenho de misturas asfálticas**. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 2009.

BERNUCCI, LiediBariani *et al.* **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3 ed. 504 p. Reimp. Rio de janeiro: Abeda, 2008.

BIANCHI, F.R; BRITO, I.R.T; CASTRO, V.A.B. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, 08 st. 2008. Disponível em:<http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/ISIS_RAQUEL.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2014.

CASTRO, Pery C. G. **Reciclagem de misturas asfálticas a quente em usina central**. Rio Grande do Sul. 2009. Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/professores/perly/Reciclagem_de_Misturas_Asfalticas_a_Quente_em_Usina_Central/03_RECICLAGEM_DE_MISTURAS_ASFALTICAS_A_QUENTE_EM_USINA_CENTRAL_Parte_III.pdf>. Acesso em: 15 maio. 2014.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. Ed. São Paulo: Exceção, 2007.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Atlas do Transporte**. Brasília: CNT, 2006. Disponível em: <http://www.sistemacnt.org.br/informacoes/pesquisas/atlas/2006/index.htm>. Acesso em: 11 nov. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de Transporte e Logística 2014**. Brasília: CNT, 2014. Disponível em: https://www.google.com.br/url?sa=terct=jeq=eesrc=sesource=webecd=1ecad=rjaeua ct=8eved=0CBwQFjAAahUKEwiA6LChionJAhUBk5AKHWg_BH4eurl=http%3A%2F%2Fwww.cnt.org.br%2FImagens%2520CNT%2FPDFs%2520CNT%2FPlano%2520CNT%2520de%2520Log%25C3%25ADstica%2FPlano_CNT_Logistica_2014_8_7_2014_WEB.FINAL.pdf&usq=AFQjCNEbQffS7xmMel5-IQ2UXI-fvPc7bgesig2=fcD2V7VF_O1z84ODeNHnYgebvm=bv.107406026,d.Y2I. Acesso em: 11 nov. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte em Transformação XVII: trabalhos vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica 2013. Confederação Nacional do Transporte. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Brasília: Positiva, 2014b. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Transporte-em-Transforma%C3%A7%C3%A3o.aspx>. Acesso em: 11 nov. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Revista CNT**. Brasília: CNT, 2015. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/revista-cnt-transporte-atual>. Acesso em: 16/ Jul. 2016.

CRUZ, Luiz Otávio Maia. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 281f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

DAVID, Daniela de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 128f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS - MG. Azevedo, André Luiz Cairo et al. **Manual de fiscalização de obras em vias rurais**. 2008. 1ªed. 145 f.

DENARI, G.B.; CAVALHEIRO, E.T. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: IQSC, 2012. 40 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – ES **031/2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **95/2006 EM: Cimentos asfálticos de petróleo: Especificação de Material**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **95/2006 EM: Cimentos asfálticos de petróleo: Especificação de Material**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **136/2010 ME: Pavimentação asfáltica: Misturas asfálticas. Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **ME 43: Misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 053: Misturas betuminosas: percentagem de betume.** Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 083: Agregados: análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

_____ **ME 084: Agregados miúdo determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1995.

_____ **PRO 120 - Coleta de amostras de agregados.** Rio de Janeiro, 1997.

_____ **PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro, 1996.

_____ **ME 213: Solos: determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 117: Mistura Betuminosa: Determinação da Densidade Aparente.** Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero: ensaio Cântabro.** Rio de Janeiro, 1999.

DIAS, João Paulo Trabuco. **Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas.** 2009. 89f. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa-ISEL, Lisboa, 2009.

FALCÃO, M.F.B. e SOARES, J.B. **Considerações Sobre o Ensaio de Compressão Diametral no Estudo de Materiais de Pavimentação.** XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal. 2002.

FIORITI, C.F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 202f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIORITI, Cesar Fabiano; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge Luís. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus**. Associação Nacional de tecnologia do ambiente construído. 2007. 54f. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3753/2106>. Acesso em: 21 abr. 2015.

FREIRE, Carolina Braccini. **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados**. 2012. 189 f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática de Engenharia de Materiais, 2012.

FHWA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments - FHWA-98-042**. ADMINISTRATION, F. H. Washington 1997.

GODINHO, Dalter Pacheco. **Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009, 158f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2009.

GONÇALVES, Bruno César Silva et al. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante e granulometria de misturas asfálticas com agregados de baixa absorção a partir do rotarex**. 44ª RAPV e 18º ENACOR. Foz do iguaçu, PR, p. 17. 2015.

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

HARMELINK, D. P. E.; Shuler, S.; Aschembrener, P. E. **Top-down cracking in asphalt pavements, causes, effects and cures**. 2008. Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers, Vol. 134, Nº 1, pp. 1-6.

HARRIS, B. M.; STUART, K. D. **Analysis of mineral fillers and mastic used in stone matrix asphalt**. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT**, Portland, Oregon, EUA, v. 64, p. 54-95, 1995.

HVEEM, F.N. **Pavement deflection and fatigue failures**. *Bulletim* 114, p.43-87, 1955.

IA (2002). **Manual do Asfalto**. Instituto do Asfalto. Rio de Janeiro, 2002. 599f.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE. **Edge restrains for Interlocking Concrete Pavements**. Herndon, USA, 2011a.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

KANDHAL, P. **Recycling of Asphalt Pavements-an Overview**. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT, USA, v.66, 1997.

KNAPTON, J. (1996). **Romans and their roads – The original small element pavement technologists**. In: INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5, 1996, Tel-Aviv, Israel, June. *Anais...* Tel-Aviv, Israel, p.17-52.

LEITE, Leni F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**.1999. Tese (Doutorado), IMA/Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

LIMA, André Theóphilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Fortaleza. 2003. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LIMA, Cristian Kelly Morais de. **Estudo da incorporação de resíduo industrial polimérico ao CAP**. 2008. 88fl. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio grande do Norte, Natal, RN, 2008.

LIRA, Belarmino B. **Materiais de construção civil I**. 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAYGAAF/asfalto>>. Acesso em: 20 maio. 2014.

LYRA, Mario. **Blocos intertravados de concreto com resíduos de copolímero de etileno-acetato de vinila – Eva – para pavimentação de calçadas e passeios públicos**. 2007. 118f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em engenharia urbana. 2007.

MARQUES, G. L. O. **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico. Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora, 2002. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2012/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>. Acesso em: 01 maio. 2016.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica**. Seminário de qualificação ao doutoramento – Coordenação 156 Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros dos Programas de Pós-graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

McGENNIS, R. B.; ANDERSON, T. M.; KENNEDY, T. W.; SOLAIMANIAN, M. **Background of Superpave asphalt mixture design and analysis**. Asphalt Institute Report FHWA-SA-95-003, 1994.

MERCADO, E. A.; MARTIN, A. E.; PARK, E. S.; SPIEGELMAN; Glover, C. J. (2005). **Factors affecting binder properties between production and construction.** Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 17, Nº 1, p. 89-98.

MORILHA JUNIOR, Armando. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 185f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2004.

MOREIRA, Cristiano Costa. **O conceito e a prática do teor ótimo de asfalto.** In: 14ª ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Belo Horizonte, Minas Gerais, p.15. 2009.

MOTHÉ, C. G. e AZEVEDO, A. D. **Análise Térmica de Materiais.** I-editora, São Paulo, SP, 300f. 2002.

MOTHÉ, Michelle Gonçalves. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica.** 204f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/EQ, 2009.

MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. M. **Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas.** In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, p.11, 2000, Gramado, p. 1007-1017. *Anais...* Gramado, 1998.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias. **Estudo do comportamento mecânico de misturas Asfálticas recicladas.** 2011. 123f. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2011.

NCHRP Report 673: **A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary.** Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.

PELLINEN, T.; XIÃO, S.; SHAH, A. **The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt**. International Society for Asphalt Pavements Symposium, 18-20th August, Zurich, Switzerland, 2008.

PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS LIMITED. **Study of Hot Mix Recycling of Asphalt Pavements, Roads and Transportation Association of Canada (RTAC)**, Ottawa, Ontario, January, 1983.

PAVEMENT RECYCLING GUIDELINES FOR LOCAL GOVERNMENTS - **Reference Manual**, Report No.FHWA-TS-87-230, FHA, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 1987.

Proven Guidelines for Hot-Mix Recycling, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Annapolis, MD, 1986.

ROBERTS, F. L.; Kandhal, P. S. e Brown, E. R.; Lee D. Y. e Kennedy T. W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 2ª edição. NCAT. USA, 1996.

ROSSATO, F. P et al. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas a partir do Rotarex**. 43º RAPv e 17º ENACOR. Maceió, AL, p.12. 2014.

RPF, (2012) NEW DEVELOPMENTS WITH SANS 1058: ROAD PAVEMENTS FORUM 8 MAY 2012 Presented by John Cairns

SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery. **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados**. 2013. 130f. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG. Belo Horizonte/MG. 2013.

SANTOS, Alexandre Rosa dos. **APOSTILA DE CLIMATOLOGIA**. 2002. Disponível em: <<http://www.mundogeomatica.com.br/CL/ApostilaTeoricaCL/Capitulo13-ClimasBrasil.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

SANTOS, Joana Micaela Rodrigues. **Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários**. 2010. 131f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Aveiro. 2010.

SANTOS, Vânia Regina Ferreira. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção Civil – RCC e fibras de aço**. 2014. 117f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. 2014.

SHACKEL, B. Design and construction of interlocking concrete block pavements. First edition. Elsevier, New York and London, 1990.

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London, UK. 2003.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011a. 145f. Tese (Doutorado). Publicação G.TD-067/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

SILVA, Amanda Helena Marcandalida. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. 2011b. 164f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP.

SILVA, Fabiana Maria da. **Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto**. 2014. 129f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Limeira, SP. 2014.

SILVA, Mateus Justino da. **Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria**. 2011c. 130f. Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG. Belo Horizonte/MG. 2011c.

SILVA, João Paulo Souza; FARIAS, Márcio Muniz de; ABRAHIM, Isabela Araújo. **Avaliação do efeito do calor e do ar no envelhecimento de ligantes asfálticos utilizando o Modelo de Arrhenius**. 2011. Disponível em: <<http://cbrcbrasvias.com.br/palestras/arquivos/TC0037-1.PDF>>. Acesso em: 23 Abr. 2016.

SIMIELI, Daniel et al. **Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Artigo (mestrado). 2007. 241 f. Disponível em: <http://www.uninove.br/PDFs/Publicacoes/exacta/exactav5n2/exactav5n2_3b48.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2015.

SISWOSOEBROTHO, B. I.; GINTING, K.; SOEDIRDJO, T. L. **Workability and resilient modulus of asphalt concrete containing flaky aggregates shape**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6: 1302 – 1312. 2005.

SMITH, D. R. **Grand Entrances**. Interlocking Concrete Pavement Magazine. v. 10, n.2, 2003.

SOARES, J. B et al. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Preparadas com Vários Ligantes e Granulometrias**. In: 15º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, Dezembro. 2000.

TONIAL, I. A. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ. 2001.

TONIAL, I. A et al. **Envelhecimento de Ligantes Asfálticos Observado em Trechos Experimentais Comparado a Modelo de Previsão**. XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, v. 2, p. 269-278. 2001.

TRAN, N.H., TAYLOR, A., and WILLIS, R. **Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number 12-05.2012.

VASCONCELOS, K.L; SOARES, J.B. **Influência do percentual de fresado e do envelhecimento de curto prazo na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente**. ANPET XVIII. Florianópolis, SC, 2004.

WHITEOAK, D. SHELL Bitumen Handbook. SHELL. Inglaterra. 1990.

ZAUMANIS, M.; MALLICK R.B. **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant produced pavements: state of the art**. International Journal of Pavement Engineering, 2014.

ZAUMANIS M. **100% recycled hot mix asphalt and the use of rejuvenators**. 2014. Tese (doutorado). Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute. United States 2014.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R.B.; FRANK, R. **100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis**. Worcester Polytechnic Institute (WPI), 100 Institute Road, Kaven Hall, Worcester, MA, United States. 2014.