UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Plácido Gondim de Sena Neto

ANÁLISES DE DOSAGENS DE CONCRETO ASFÁLTICO DO TIPO PRÉ MISTURADO A FRIO (PMF) UTILIZANDO RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD)

Natal - RN

2018

Plácido Gondim de Sena Neto

ANÁLISES DE DOSAGENS DE CONCRETO ASFÁLTICO DO TIPO PRÉ MISTURADO A FRIO (PMF) UTILIZANDO RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Co-orientadora: Prof.ª Dr.ª Maria del Pilar Durante Ingunza

Natal - RN
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Sena Neto, Plácido Gondim de.
Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) utilizando Resíduos da Construção e Demolição de obras (RCD) / Plácido Gondim de Sena Neto. - 2018.
100f.: il.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), Natal, 2018.
Orientador: Dr. Enio Fernandes Amorim.
Coorientadora: Dr.ª Maria del Pilar Durante Ingunza.

1. Agregados reciclados - Dissertação. 2. Resíduos de construções - Dissertação. 3. Pavimentações asfálticas - Dissertação. I. Amorim, Enio Fernandes. II. Ingunza, Maria del Pilar Durante. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 622.337

PLÁCIDO GONDIM DE SENA NETO

"ANÁLISES DE DOSAGENS DE CONCRETO ASFÁLTICO DO TIPO PRÉ MISTURADO A FRIO (PMF) UTILIZANDO RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD)."

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Enio Fernandes Amorim

Prof. Dr. ENIO FERNANDES AMORIM – Orientador
(IFRN)

Liliana Pilar Durante

Profa. Dra. MARIA DEL PILAR DURANTE INGUNZA – Coorientadora
(UFRN)

Fagner Alexandre N. de França.

Prof. Dr. FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA – Examinador Interno
(UFRN)

Valtencir Lúcio de Lima Gomes

Prof. Dr. VALTENCIR LÚCIO DE LIMA GOMES – Examinador Externo à Instituição
(IFRN)

Natal/RN, 16 de março de 2018

ANÁLISES DE DOSAGENS DE CONCRETO ASFÁLTICO DO TIPO PRÉ MISTURADO A FRIO (PMF) UTILIZANDO RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD)

Plácido Gondim de Sena Neto

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Co-orientadora: Prof.ª Dr.ª Maria del Pilar Durante Ingunza

RESUMO

Tendo em vista o grande crescimento do setor da construção civil no Brasil até os anos de 2013/2014, algumas empresas, e a economia em geral, ganharam destaque pelo alto índice de desenvolvimento urbano. Tais acontecimentos foram responsáveis diretos pelo desenvolvimento mercadológico que estimularam diversos setores da economia, sendo um desses o setor da construção civil. Com esses acontecimentos, como consequência, alguns aspectos negativos ocorrem de forma danosa e irreparável. Em exemplo, pesquisadores afirmam que o concreto utilizando o cimento Portland hoje é o segundo produto mais consumido do mundo, tendo uma perspectiva de aumento do seu consumo ao longo dos próximos anos. Com base nesses aspectos, este trabalho aborda pontos relacionados ao reaproveitamento de Resíduos da Construção e Demolição de Obras (RCD), em que se norteia a temática deste trabalho, frisando a importância e benefícios de algumas ações sustentáveis para o meio ambiente e a sociedade. Em um contexto regional, no estado do Rio Grande do Norte existem quatro usinas de reciclagem do RCD as quais mantem produções significativas e são responsáveis por coletar, processar e comercializar todo o material residual de obras. Essas empresas geram renda para a população local e contribui para a redução da extração mineral (matéria-prima esgotável). Diante desses fatos, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica dos resíduos provenientes da construção civil, utilizando-os como agregados, após beneficiamento na usina, na composição de

concretos asfálticos em substituição parcial ou total dos materiais naturais. O método de trabalho empregado encontra-se baseado na realização de ensaios de caracterização, tanto com os agregados quanto com a Emulsão Asfáltica de Petróleo; em ensaios de caracterização mineralógica (MEV, EDS, DRX e FRX) com o material pulverulento do RCD; e na aplicação da metodologia Marshall de dosagens do tipo pré-misturado à frio as quais variam em teores de emulsão asfáltica entre 6%, 7%, 8% e 9% em cada quatro combinações de misturas dos agregados. A título de investigação, e para uma melhor análise de viabilidade técnica dos agregados, utilizou-se nas quatro combinações de misturas dos agregados: materiais integralmente naturais, RCD's e RCD-Naturais, sendo confeccionado três corpos de prova para cada teor de ligante. Foram aplicados quatro teores de ligante asfáltico, pré-determinados, em cada concepção de mistura dos agregados totalizando-se a confecção de quarenta e oito corpos de prova. Quanto aos resultados obtidos foi possível comparar, por meio de parâmetros de análises Marshall e de ensaios de caracterizações física e mineralógica do material utilizado, o expressivo potencial de uso dos agregados RCD na composição de concretos asfálticos à frio. Após as análises das interações dos parâmetros Marshall (Vv, RBV, Gmb, Estabilidade e Fluência), os teores de ligante ótimos (% EAP) para as dosagens D1 – BNAN, D2 – BNAR, D3 – BRAR e D4 – BRAN foram, respectivamente, 7,75%, 7,25%, 7,75% e 7,50%. Logo, foram evidenciadas as viabilidades técnica e ambiental do uso do RCD quando utilizados em determinados pavimentos rodoviários.

Palavras-chave Agregados reciclados. Resíduos de Construções. Pavimentação asfáltica.

ANALYSIS OF DOSINGS OF ASPHALT CONCRETE OF THE PRE-MIXED COLD (PMF) TYPE USING WASTE FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION OF WORKS (RCD)

Plácido Gondim de Sena Neto

Adviser: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Co-adviser: Prof.ª Drª. Maria del Pilar Durante Ingunza

ABSTRACT

Considering the great growth of the civil construction sector in Brazil until 2013/2014, some companies, and the economy in general, were highlighted by the high rate of urban development. Such events were directly responsible for the market development that stimulated various sectors of the economy, one of which is the construction sector. With these events, as a consequence, some negative aspects occur in a damaging and irreparable way. For example, researchers say that concrete using Portland cement today is the second most-consumed product in the world, with a prospect of increasing its consumption over the next few years. Based on these aspects, this work addresses points related to the reuse of Construction and Demolition Waste (RCD), which guides the theme of this work, stressing the importance and benefits of some sustainable actions for the environment and society. In a regional context, in the state of Rio Grande do Norte, there are four RCD recycling plants which maintain significant production and are responsible for collecting, processing and marketing all waste material. These companies generate income for the local population and contributes to the reduction of the mineral extraction (raw material exhaustible). In view of these facts, the present study evaluated the technical feasibility of waste from civil construction, using them as aggregates, after beneficiation at the plant, in the

composition of asphaltic concretes in partial or total replacement of natural materials. The work method employed is based on the characterization tests, both with the aggregates and with the Asphalt Emulsion of Petroleum; in mineralogical characterization tests (SEM, EDS, XRD and FRX) with the RCD powdery material; and in the application of the Marshall method of cold premixed dosages which vary in asphalt emulsion contents between 6%, 7%, 8% and 9% in every four combinations of mixtures of the aggregates. As a research, and for a better analysis of technical feasibility of the aggregates, the four combinations of mixtures of the aggregates were used: fully natural materials, RCD's and RCD-Naturais, and three specimens were prepared for each binder content. Four pre-determined asphalt binder contents were applied to each mixing design of the aggregates, totalizing forty-eight specimens. As for the results obtained, it was possible to compare, through Marshall analysis parameters and physical and mineralogical characterization tests of the material used, the expressive potential of use of RCD aggregates in the composition of cold asphalt concretes. After analysis of Marshall parameter interactions (Vv, RBV, Gmb, Stability and Fluency) the optimum binder contents (% EAP) for the D1 - BNAN, D2 - BNAR, D3 - BRAR and D4 - BRAN dosages were respectively 7.75%, 7.25%, 7.75% and 7.50%. Therefore, the technical and environmental feasibility of using RCD when used in certain road pavements was evidenced.

Key-words: Recycled aggregates. Construction Waste. Asphalt paving.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder-me o dom da vida.

Aos meus pais, por acreditarem sempre no meu potencial, pelo apoio e por contribuírem sempre na minha formação pessoal e profissional.

Ao meu Orientador, o professor Enio Amorim. Deixo os meus agradecimentos pelo exemplo profissional, os seus ensinamentos e a confiança depositada em mim.

A minha Co-orientadora, Prof.ª Maria Del Pilar, pela parceria e confiança depositada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela oportunidade do Mestrado.

Ao professor coordenador do programa de pós-graduação, Professor Fagner Alexandre, por todo o apoio e incentivo.

Aos companheiros de pesquisa Douglas, Rayssa, Adrian, Chaiany, Janaína e Djalma por todo apoio e conhecimento compartilhado.

A usina DUARTE, por fornecer todo o material reciclado utilizado nesta pesquisa.

A empresa TECPAV, que doou parte do material da pesquisa.

A equipe da Diretoria Acadêmica de Construção Civil - DIACON, do IFRN - Campus Natal-Central, por todo o apoio e disponibilidade em proporcionar o seu espaço para a realização da maioria dos ensaios.

A equipe de técnicos laboratoristas e ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por ceder o espaço e serviços na realização de alguns ensaios específicos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção e Pavimentação do IFRN – Campus Natal-Central, Ricardo, Gian e os seus bolsistas, pelo apoio dado na realização dos ensaios.

Aos meus colegas de mestrado, Hugo, Rísia e Ruan, pela colaboração nas disciplinas e nas pesquisas laboratoriais.

Ao professor Marcos Alyssandro, por compartilhar seus conhecimentos e pelo suporte nas análises laboratoriais de DRX, FRX e MEV.

A minha família e amigos, por todo incentivo.

Por fim, agradeço a todos que deram sua contribuição de alguma forma, até mesmo os que contribuíram de forma silenciosa, transmitindo algo positivo e torcendo pelo sucesso desse trabalho. Obrigado!!

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que pareciam impossíveis”.

(Charles Chaplin)

SUMÁRIO

Lista de figuras
Lista de tabelas
Lista de siglas e abreviaturas
CAPÍTULO 1 19
Introdução 19
1.1 Justificativa 22
1.2 Objetivos 23
1.3 Estrutura da dissertação 23
CAPÍTULO 2 24
Fundamentação teórica 24
2.1 A importância da construção civil no Brasil 24
2.1.1 O setor da construção civil no Nordeste 26
2.1.2 Impactos ambientais 27
2.1.3 Empresas recicladores de RCD 28
2.2 Pavimentação asfáltica 30
2.2.1 Tipos de revestimentos asfálticos 31
2.2.2 Propriedades do concreto asfáltico 31
2.3 Estudos nacionais e internacionais 32
CAPÍTULO 3 41
Materiais e métodos 41
3.1 Infraestrutura para a realização do estudo 41
3.1.1 Coleta do material 42
3.1.2 Experimentos de caracterização do material 43
3.1.3 Caracterização do RCD e agregados naturais 44
3.1.4 Ensaio de caracterização mineralógica 48
3.1.5 Caracterização do ligante asfáltico 51
3.2 Definição das dosagens de pré-misturado a frio (PMF) 54
CAPÍTULO 4 59
Resultados e discussões 59
4.1 Resultados da caracterização física das frações dos agregados 59

4.1.1 Análise granulométrica dos agregados naturais e RCD 59
4.1.2 Análise do módulo de finura 63
4.1.3 Ensaios de índice de forma e abrasão Los Angeles 64
4.1.4 Ensaios de massa específica, absorção e densidade aparente 64
4.2 Resultados da caracterização mineralógica dos agregados 65
4.2.1 Ensaio de MEV 65
4.2.2 EDS 68
4.2.3 Análises mineralógica por DRX 69
4.2.4 Análise química por FRX 71
4.3 Resultados da dosagem Marshall 72
4.3.1 Análise da Estabilidade *versus* % EAP 72
4.3.2 Análise do Volume de Vazios *versus* % EAP 73
4.3.3 Análise da Relação Betume-Vazios *versus* % EAP 75
4.3.4 Análise da Densidade Aparente (Gmb) *versus* % EAP 76
4.3.5 Análise da Fluência *versus* % EAP 77
4.3.6 Análise da Estabilidade *versus* Volume de Vazios 78
4.3.6 Análise da Estabilidade *versus* Relação Betume-Vazios (RBV) 79
4.3.7 Análise da Estabilidade *versus* Fluência 80
4.3.8 Análise da Estabilidade *versus* Densidade Aparente (Gmb) 81
4.3.9 Análise da Relação Betume-Vazios (RBV) *versus* Volume de Vazios (Vv) 83
4.3.10 Análise dos valores máximos de Estabilidade *versus* % EAP 83
4.3.11 Análise dos valores máximos de Estabilidade *versus* RBV 85
4.3.12 Análise dos valores máximos de Estabilidade *Versus* Volume de Vazios 85
4.3.13 Traços otimizados para trecho experimental 86
CAPÍTULO 5 88
Conclusões 88
5.2 Sugestões para estudos futuros 89
Referências 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de RCD coletado no Brasil e por região do Brasil. 20

Figura 2 – Demolição do estádio Machadão em Natal - RN.....21

Figura 3 – Principais depósitos minerais do Brasil. 25

Figura 4 - PIB Brasil X PIB construção civil (Variação %) – 2004/2015. 26

Figura 5 – Procedimentos de produção de tampas de concreto com RCD (a – Britador de mandíbulas desfragmentando os agregados RCD e b – Moldagem de tampas de concreto com o RCD). 28

Figura 6 – Processo de britagem do RCD na Usina Duarte (a – Britagem dos agregados e b – Separação dos agregados por dimensões granulares). 29

Figura 7 - Espalhamento de massa asfáltica do trecho experimental MM. 37

Figura 8 – Concreto asfáltico usinado (a – Misturador mecânico e b - Compactador giratório). 38

Figura 9 - Foto do ensaio de mancha de areia. 39

Figura 10 – Britagem e coleta dos agregados RCD (a - Britador de mandíbulas e b - coleta do material na pilha). 42

Figura 11 - Material RCD da pesquisa (a - Brita 0, b - Brita 1, c - areia e d – fíler). ..43

Figura 12 - Resumo das etapas da pesquisa. 44

Figura 13 - Procedimento de seleção manual dos resíduos.....45

Figura 14 - Sequência de amostras após seleção manual. 46

Figura 15 - Agregados de RCD separados por dimensões após granulometria. 47

Figura 16 - Agregados naturais separados por dimensões após granulometria. 48

Figura 17 – Equipamentos para ensaios mineralógicos (a - MEV, b – EDS acoplado ao MEV e c - amostra sobre a fita de carbono). 49

Figura 18 – Ensaios de MEV e EDS (a - Medidas granulométricas e b - identificação de compostos químicos). 50

Figura 19 - Ensaio de determinação da carga da partícula. 51

Figura 20 - Ensaio de determinação da densidade e massa específica. 52

Figura 21 – Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol (a - Viscosímetro Saybolt-Furol e b - frasco receptor). 53

Figura 22 - Ensaio de resíduo por evaporação. 54

Figura 23 - Modelo de alternância dos agregados nas combinações dos traços. 55

Figura 24 - Moldagem de corpos de prova. 56

Figura 25 - Pesagem de material por cada CP (a – Composição de agregados naturais para CP I, II e III e b – adição de ligante a mistura de agregados). 57

Figura 26 - Prensa Marshall verificando estabilidade e fluência. 58

Figura 27 - Curva granulométrica dos agregados naturais. 61

Figura 28 - Curva granulométrica dos agregados de RCD. 62

Figura 29 - Resumo de curvas granulométricas dos agregados naturais e RCD. 63

Figura 30 - Varredura de grãos cristalinos com aproximação 1200X. 67

Figura 31 – Varredura de grãos cristalinos com aproximação 1000X. 67

Figura 32 - EDS identificando os possíveis compostos no grão cristalino. 69

Figura 33 - Difratograma da fração do fíler RCD da areia. 70

Figura 34 - Estabilidade *versus* % EAP. 73

Figura 35 - Volume de Vazios (Vv) *versus* % EAP. 74

Figura 36 - Relação Betume-Vazios (RBV) *versus* % EAP. 76

Figura 37 - Densidade Aparente (Gmb) *versus* % EAP. 77

Figura 38 - Fluência *versus* % EAP. 78

Figura 39 - Estabilidade *versus* Volume de Vazios (Vv). 79

Figura 40 - Estabilidade *versus* Relação Betume-Vazios (RBV). 80

Figura 41 - Estabilidade *versus* Fluência. 81

Figura 42 - Estabilidade *versus* Densidade Aparente (Gmb). 82

Figura 43 - Relação Betume Vazios (RBV) *versus* Volume de vazios (Vv). 83

Figura 44 – Pontos máximos de Estabilidade *versus* % EAP. 84

Figura 45 - Pontos máximos de Estabilidade *versus* RBV. 85

Figura 46 - Pontos máximos de Estabilidade *versus* Vv. 86

Figura 47 - Esquema para execução do trecho experimental com o PMF. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentuais por tipo de material em características físicas.....36

Tabela 2 - Características do trecho experimental. 40

Tabela 3 - Ensaios normatizados de caracterização física para os agregados. 45

Tabela 4 - Quantitativos de amostra para análise granulométrica. 47

Tabela 5 - Ensaios normatizados para a caracterização do ligante asfáltico. 51

Tabela 6 - Listagem dos ensaios normatizados com o concreto asfáltico. 54

Tabela 7 - Descrição dos traços utilizados. 56

Tabela 8 - Limites para composição granulométrica de agregados miúdos. 59

Tabela 9 - Limites granulométricos de agregados graúdos. 60

Tabela 10 - Principais resultados da caracterização física dos agregados. 65

Tabela 11 - Análise de EDS do fíler RCD. 69

Tabela 12 - Análises por FRX do fíler RCD. 71

Tabela 13 - Valores de Estabilidade e Vv para a concepção de agregados naturais. 78

Tabela 14 - Valores de Estabilidade e GMB da dosagem D3 - BRAR. 81

Tabela 15 - Dosagens otimizadas para trecho experimental. 87

Tabela 16 - Dosagem 1 aplicada ao trecho 1. 90

Tabela 17 - Dosagem 2 aplicada ao trecho 2. 90

Tabela 18 – Dosagem 3 aplicada ao trecho 3. 91

Tabela 19 – Dosagem 4 aplicada ao trecho 4. 91

Tabela 20 - Total de materiais aplicado aos trechos. 91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Públicas e Resíduos Especiais

B0 – Brita zero

B1 – Brita um

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CBUQ – Cimento Betuminoso Usinado a Quente

COOPPTEC – Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

CP – Corpo de Prova

CRM – *Coold Recycled Mixes*

D1 – BNAN – Dosagem 1 Brita Natural / Areia Natural

D2 – BNAR – Dosagem 2 Brita Natural / Areia Reciclada

D3 – BRAR – Dosagem 3 Brita Reciclada / Areia Reciclada

D4 – BRAN – Dosagem 4 Brita Reciclada / Areia Natural

DEMAT – Departamento de Engenharia dos Materiais

DIACON – Diretoria Acadêmica de Construção Civil

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DRX – Difração de Raios X

DSR – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

EAP – Emulsão Asfáltica de Petróleo

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X

FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Gmb – Densidade Aparente

HAM – *Hot Asphalt Mix*

Hz – Hertz

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IFRN – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

kg – Quilograma

kgf – Quilo grama força

kPa - kilopascal

kV – QuiloVolts

LTDA – Limitada

mA – MiliÁmper

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MF – Módulo de finura

mm – Milímetro

MM – Misturas Mornas

MME – Misturas de Módulo Elevado

NBR – Norma Brasileira

PIB – Produto Interno Bruto

PMF – Pré-Misturado a Frio

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PVC – Policloreto de Vinila

RBV – Relação Betume-Vazios

RCD – Resíduo da Construção e Demolição

RL – Ruptura Lenta

RPU – Reunião de Pavimentação Urbana

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SEDEC – Secretaria de Desenvolvimento Econômico

TECPAV – Tecnologia em Construção e Pavimentação

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

USP – Universidade de São Paulo

VA – VoltÁmper

Vv – Volume de Vazios

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em análise ao acelerado crescimento demográfico mundial nas últimas décadas, tais fatores trazem consigo consequências em termos de aspectos positivos e negativos. Nesse seguimento, como impacto negativo, tem-se as atividades provenientes das ações humanas, responsáveis pelas transformações ambientais resultantes, principalmente, dos processos de industrialização e produção de bens de consumo (SOARES; SALGUEIRO e GAZINEU, 2007). Visando exemplificar uma problemática socioambiental em função do desenvolvimento humano, dados representativos referentes a produção de resíduos sólidos urbanos, em escala mundial, apontam um total de 1,3 bilhões de toneladas por ano ou 1,2 kg per capita por dia no espaço urbano (RODRIGUES; MAGALHÃES FILHO & PEREIRA, 2015).

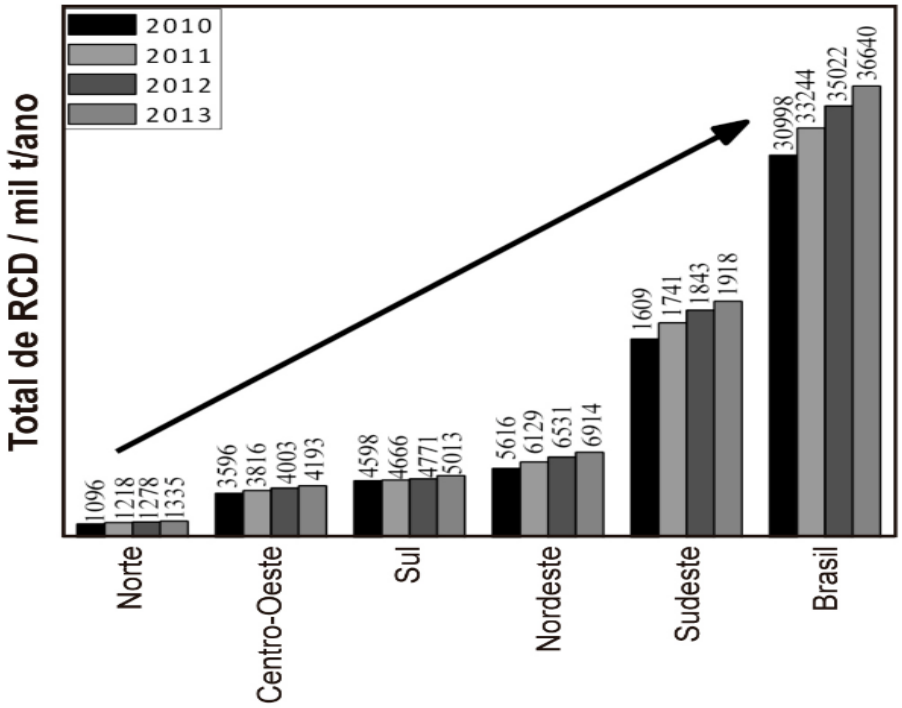
Diante desses fatos, medidas em prol do equilíbrio ambiental, tais como legislações ambientais, plano de gerenciamento de resíduos urbanos (reutilização e reciclagem de resíduos) e políticas de conscientização ambiental, são criadas para garantir a manutenção dos ecossistemas (SENA NETO & ALCÂNTARA, 2015). Embora sejam criados estes planos bem elaborados como medidas sustentáveis, estudos e dados estatísticos revelam que é possível aplicar de forma eficiente um método sustentável para gerenciamento de resíduos, existindo a viabilidade econômica e ambiental para as atividades envolvidas. Tais acontecimentos já acontecem no Brasil por planos de contribuições de pesquisas; modelos de planos internacionais; governamentais e até mesmo social, porém com necessidade de evolução no tocante a sustentabilidade (MANNARINO *et al.*, 2016).

Entrando em um contexto mais voltado para o mercado da construção civil, em vista da grande disposição de resíduos oriundos da construção e demolição de obras (RCD), é de fundamental importância o desenvolvimento tecnológico para reciclagem de determinados resíduos a fim de que possam ser reaproveitados e comercializados. Em exemplo, Andrade *et al*. (2016) reportam que, através de estudos, como

substituição parcial do cimento Portland, a utilização da cinza da madeira; lodo proveniente de estações de tratamento de água; e resíduos oriundos da produção da cal podem adquirir melhores rendimentos nas propriedades física do material estudado, gerando economia e favorecendo a sustentabilidade ambiental.

A Associação Brasileira das Empresas de Limpezas Públicas e Resíduos Especiais - ABRELPE - (2013 *apud*. Brasileiro & Matos, 2015, p. 03) revela que, entre os anos de 2010 e 2013, foram registrados um aumento significativo de 10,4% pela demanda de coleta realizada por empresas públicas do RCD em meio aos resíduos sólidos urbanos (Figura 1), totalizando o valor aproximado de 37 milhões de toneladas de RCD em todo país.

Figura 1 - Total de RCD coletado no Brasil e por região do Brasil.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2013) e Brasileiro e Matos (2015).

Como forma de apresentar a necessidade de reutilização do RCD, em um contexto mais recente, as obras de mobilidade urbana em paralelo com as obras para renovação de alguns estádios, que ocorreram por todo país, geraram uma quantidade excessiva de resíduos proveniente da demolição de estruturas, principalmente nas demolições compostas por concretos, alvenarias e estruturas metálicas (Figura 2).

Figura 2 – Demolição do estádio Machadão em Natal - RN.

Fonte: Tribuna do Norte (2011).

Sena Neto e Alcântara (2015) reportam que as medidas de ações sustentáveis devem ocorrer nos canteiros de obras por eficientes gestões e planejamentos, de modo que se mantenha a qualidade do produto em questão, satisfazendo as necessidades demandada, e, promovendo simultaneamente o equilíbrio ambiental.

De uma maneira geral, o RCD poderá obter diversas aplicações na construção civil. Algumas destas aplicações está diretamente ligada ao aproveitamento desses resíduos como material utilizado em camadas de base, sub-base, e revestimentos em pavimentos. Pode ser utilizado também como agregado do concreto utilizando o cimento Portland como ligante (material reciclado condicionado a conformidades com normas técnicas), e agregado do concreto asfáltico em camadas de revestimento de determinados pavimentos, dentre outras utilizações.

Amorim (2013) verificou a partir de um trecho experimental utilizando RCD em camadas de pavimentação asfáltica que esses materiais possuem um potencial elevado de uso em obras viárias, quando tratados e caracterizados de maneira correta. No estudo realizado por Amorim (2013) tornou-se possível observar que parâmetros geotécnicos usuais na área de pavimentação foram satisfatórios para o RCD empregado.

Tomando-se como base as concepções citadas anteriormente, foi objeto da pesquisa científica desse trabalho realizar, inicialmente, uma coleta em quantidades pré-determinada de resíduos de construção e demolição de obras, os quais foram previamente submetidos a etapas de processamento e triagem, para serem utilizados como material alternativo em obras viárias. Após estudos experimentais, estes resíduos foram incorporados a traços previamente definidos de dosagens de concretos à frio como forma de avaliar a sua empregabilidade em obras viárias.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em virtude do acelerado desenvolvimento do país até o ano de 2014, as demandas mercadológicas e econômicas passaram por intensos processos de ascensão social. Esses acontecimentos tiveram como fator incentivador os investimentos e/ou aplicações por parte dos órgãos federais, oportunizando a ampliação em larga escala do mercado da construção civil. Apesar de atualmente esse ser um mercado que se encontra em intensa crise econômica, até meados de 2014 as obras concederam a população um aumento no desenvolvimento urbano e imobiliário, além de outros benefícios. Porém, em contrapartida, a construção civil é a principal responsável pela geração de resíduos sólidos os quais são dispostos inadequadamente, capaz de gerar um duplo impacto, dado o potencial de poluir o meio ambiente e culminar pelo agravo de explorações em jazidas de materiais naturais. Também pode-se elencar que o processamento industrial de novos materiais gera altos custos de produção, tanto quanto podem ser nocivos ao meio ambiente.

Diante do exposto, como solução a alguns fatores impactantes e que ameaçam a sustentabilidade ambiental, este trabalho oportuniza o desenvolvimento de atividades baseadas em pesquisas experimentais, fazendo o uso de material alternativo, tal como os resíduos da construção e demolição de obras. É válido destacar que a utilização do material reciclado como agregado na mistura de composição de concretos asfálticos revela uma proposta em que o produto final deste trabalho possibilite soluções ambientais, mercadológicas, e em ação simultânea, promova o desenvolvimento sustentável.

1.2 OBJETIVOS

Nas atividades de pesquisa deste trabalho, o objetivo geral foi avaliar a viabilidade técnica do emprego de RCD em dosagens asfálticas a frio, baseadas em análises de dosagens pré-estabelecidas. Desse modo, em conformidade com a metodologia Marshall, padronizada por meio de Norma Técnica do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), foram realizadas diferentes combinações de traços de concreto asfáltico à frio, a fim de verificar a influência do material reciclado no que concerne ao seu emprego no meio viário.

Além das análises das dosagens de concreto asfáltico à frio, pré-estabelecidas nesse estudo, foram realizadas investigações das propriedades físicas, químicas e microscópicas dos agregados reciclados de RCD, através de ensaios de caracterização laboratoriais dos quais serão explicitados com maiores detalhes ao longo deste trabalho.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1, tem-se a introdução sobre a problemática envolvendo a produção de resíduos de construção e demolição de obras, a justificativa da pesquisa e os objetivos. No capítulo *2*, apresenta-se uma fundamentação teórica sobre os resíduos de construção e demolição de obras no que diz respeito à sua produção, gestão e aplicações. Na ocasião, também são apresentados estudos e aplicações de RCD na área de pavimentação asfáltica, bem como, algumas aplicações similares a esta pesquisa já concretizadas por outros autores. Capítulo 3, trata-se do programa experimental adotado para a pesquisa, descrevendo os materiais utilizados, os ensaios realizados na caracterização e a definição dos traços analisados a partir de dosagens experimentais propostas. Capítulo 4, reporta-se os resultados obtidos na pesquisa e as suas análises utilizando como parâmetro outras pesquisas disponíveis no meio acadêmico-científico. E por fim, no Capítulo 5 é realizada as conclusões da pesquisa e sugere temas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

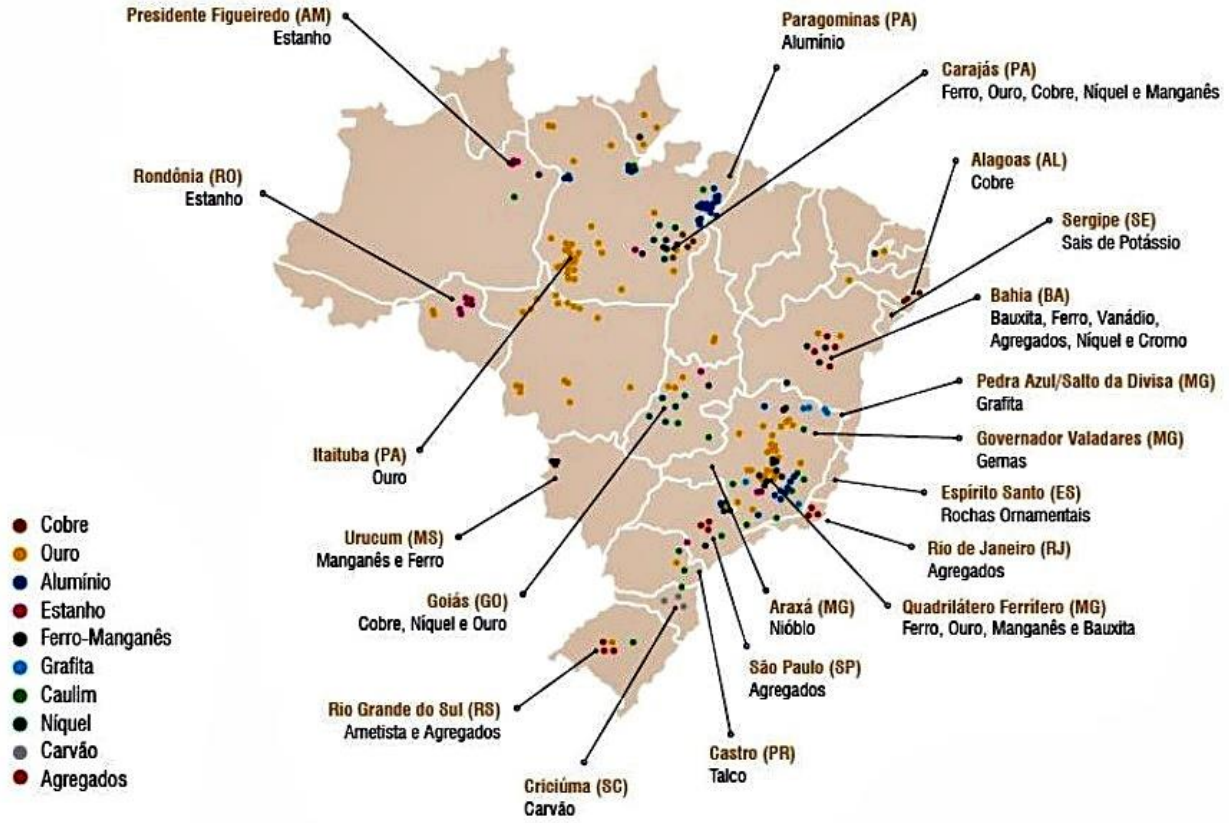
2.1 A importância da construção civil no Brasil

Desde algumas décadas, o mercado da construção civil no Brasil sofreu intensas transformações, principalmente pelo incentivo do desenvolvimento no setor industrial marcado fortemente nas décadas de 1930 e 1940. Nesse período, surgiram no Brasil as empresas siderúrgicas; a companhia Vale do Rio Doce (atuante na área de mineração); fábrica de motores; entre outras. Teve-se como consequência de tais acontecimentos o aumento da oferta de empregos; melhores condições de trabalho; maior eficiência de produção operacional; diminuição de importação; menor custo de produtos manufaturados, entre outros fatores.

De acordo com Araújo, Oliveri e Fernandes (2014), das principais atividades que estão diretamente ligadas à construção civil no Brasil, a mineração é uma destas atividades que ocorrem de forma significativa e em uma grande porção do território nacional. O Brasil é considerado um país que possui uma grande reserva mineral, e um dos maiores produtores e exportadores de minério do mundo, sendo o minério de ferro líder na produção em um percentual representante de 60%, e o ouro apresenta sua produção em 5%.

Com o surgimento das máquinas industriais e as tecnologias derivadas, logo a construção civil se transformou em um grande produto de mercado buscando sempre o aperfeiçoamento, tal como a sua mão de obra especializada. O Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2015) reporta que, para as atividades de mineração, apesar da maioria dos produtores de minério ser predominantemente formados por micro e pequenas empresas, estas atividades no Brasil abrange cerca de 72 tipos de substâncias minerais dispostos por diversas jazidas (Figura 3).

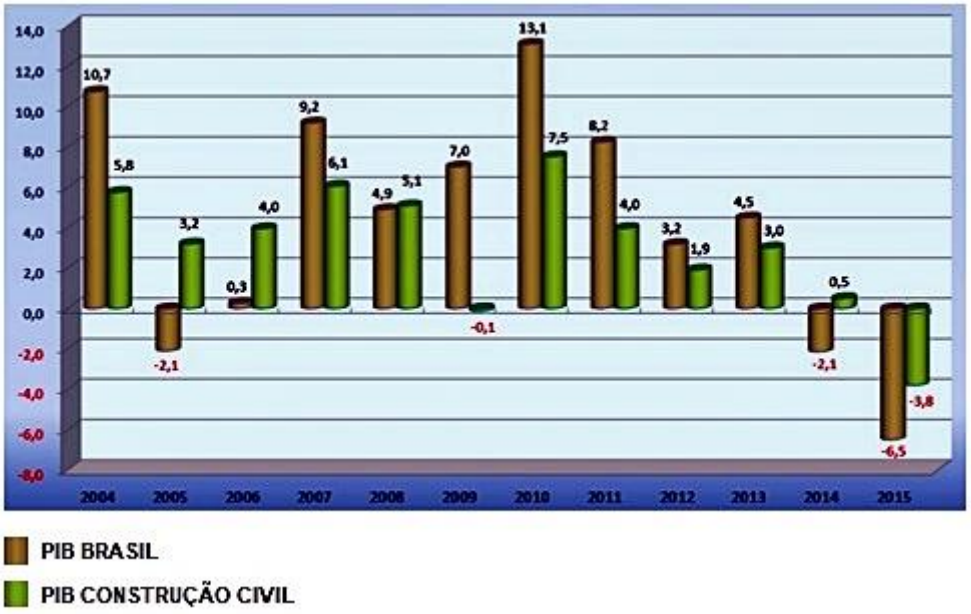
Figura 3 – Principais depósitos minerais do Brasil.



FONTE: Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2015).

Avaliando o mercado da construção Civil em uma época recente, a área foi concebida como a que mais tem capacidade de elevar a taxa de emprego, produto e renda, seja a curto ou médio prazo, pois sua competência de absorver mão de obra é muito grande. Com isso, diminui-se significativamente as taxas de desemprego nos momentos em que a economia se encontrava em crise. Conforme alguns dados obtidos pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2017), demonstra-se um grande nível de significância nas totalidades do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil quando comparado ao da construção civil, isoladamente, nos últimos anos (Figura 4).

Figura 4 - PIB Brasil X PIB construção civil (Variação %) – 2004/2015.



FONTE: Banco de dados – CBIC (2017).

2.1.1 O setor da construção civil no Nordeste

De acordo com a Secretaria do Desenvolvimento Econômico - SEDEC (2016), no Nordeste a indústria da construção civil tem gerado destaque com o seu envolvimento direto nas atividades econômicas no setor. Tanto o desenvolvimento do mercado imobiliário como recentes e modernas obras são produto das atividades de incorporadoras, construtoras e indústria dos materiais de construção.

Em outra vertente, uma atividade que é predominante da região Nordeste e que tem ligação direta com a construção civil são as atividades de extração de minérios. De acordo com Souza *et al.* (2014), o Nordeste é detentor de algumas grandes jazidas de minérios as quais entre elas encontram-se as 200 (duzentas) jazidas maiores do Brasil. São elas: de ouro, em Jacobina (BA), de urânio, em Caetité (BA), de potássio, em Rosário do Catete (SE), de talco, em Brumado (BA), e de cobre, em Jaguarari (BA) (MINÉRIOS & MINERALES, 2012 *apud.* SOUZA *et al*., 2014, p. 117).

Com a crise agravada nos diversos setores da economia recentemente, em notícia veiculada no meio eletrônico virtual em reportagem de Vasconcelos (2015), dados indicam que o setor da construção civil no estado do Rio Grande do Norte fechou em média cerca de 500 postos de trabalho por mês no ano de 2015, com base de pesquisas do Ministério do Trabalho. Com o mercado desaquecido, as construtoras também recuaram suas atividades. No entanto, o Centro de Estratégias e Recursos Naturais e Energia (2016) reporta que, o Rio Grande do Norte é detentor de uma grande quantidade de parques eólicos em operação, construção e em contratação para instalação com a maior quantidade de capacidade energética entre os estados contratados. Estes acontecimentos têm gerado grandes expectativas no que diz respeito a empregabilidade na construção destes parques, como também a efetivação de uso da energia sustentável em um futuro próximo.

2.1.2 Impactos ambientais

De acordo com Brasileiro e Matos (2015), direcionado aos grandes produtores de resíduos na construção civil, a estes se enquadram legislações que normatizam padrões de gerenciamento de resíduos, tal como a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituindo algumas regras de reaproveitamento destes materiais. Com a reciclagem dos materiais, apesar de ser uma atividade benéfica para a sociedade, se existe ainda o grande desafio da aceitabilidade do material reciclado por parte dos construtores, seja por uma questão cultural ou mesmo por não existir total credibilidade de desempenho técnico e pela heterogeneidade do material.

Brasileiro e Matos (2015) reportam que a produção dos resíduos de construção e demolição de obras no Brasil além de ser um dos principais agentes poluidores responsáveis pela disposição inadequada em espaços urbanos, acabam por ocupar volumes significativos de materiais, causando diversos tipos de impacto ambiental. Diante do exposto, as legislações ambientais tornaram-se mais efetivas fazendo com que os construtores e produtores de RCD sejam responsáveis diretos por adoção de medidas de reciclagem e algumas outras medidas que favoreçam os requisitos sustentáveis.

A Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Públicas e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013) diz que os resíduos provenientes da construção e demolição representaram uma quantidade equivalente a 48% do recolhimento total referente aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados por empresas públicas em todo território nacional. É grande a dificuldade para quantificar a produção e disposição de resíduos RCD por motivo das principais fontes geradoras serem informais.

Norteados por esta questão, é possível analisar que as atividades da construção civil apesar de serem benéficas, geram impactos significativos na produção de resíduos. Todavia, de acordo com bases de pesquisas, tem-se visto que nas últimas décadas existem inúmeros trabalhos voltados para o reaproveitamento de resíduos oriundos da construção civil.

2.1.3 Empresas recicladores de RCD

Em diversas obras de grande porte, dentre as quais as que são executadas com materiais de excelentes qualidades e métodos construtivos, observa-se que a maioria dos canteiros de obras mantêm presente um sistema de triagem interno para reciclagem dos resíduos gerados e aplicação de produtos derivados desses materiais tido como alternativos (Figura 5).

Figura 5 – Procedimentos de produção de tampas de concreto com RCD (a – Britador de mandíbulas desfragmentando os agregados RCD e b – Moldagem de tampas de concreto com o RCD).

Fonte: Autoria própria.

No estado do Rio Grande do Norte existem empresas e organizações que realizam atividades de coleta e reciclagem de resíduos para posteriores triagem e processamento dos diversos tipos de resíduos sólidos produzidos em meios urbanos. No entanto, em um contexto mais voltado para o setor da construção civil, existem as empresas Duarte Ltda e a Ecobrit Ltda, as quais atuam na coleta de resíduos da construção e demolição na cidade de Natal e região metropolitana realizando o beneficiamento dos agregados reciclados para o mercado da construção civil.

Como forma inicial as etapas do processo de reciclagem, a usina coleta todo o material residual proveniente da construção e demolição de obras quando postos em recipientes (caçambas). Este é um serviço fornecido pela usina para as empresas construtoras da cidade de Natal e região metropolitana. Estas caçambas são previamente intituladas pelo tipo de resíduo (ex.: material cerâmico) a que se destinam. É cobrado uma taxa simbólica as construtoras por este tipo de serviço. Coletado os resíduos, estes são encaminhados para triagem, desfragmentação, separação por tipo de material (tamanho e forma), e preparação para comercialização do produto final (Figura 6).

Figura 6 – Processo de britagem do RCD na Usina Duarte (a – Britagem dos agregados e b – Separação dos agregados por dimensões granulares).

Fonte: Autoria própria.

Para os materiais coletados nos canteiros de obras, estes possuem diversas aplicabilidades. É comum na arquitetura fazer o uso ecológico deste tipo de material quando implementado a alguns projetos. Os resíduos quando submetidos a processos de triagem, são identificados por meio dos seguintes materiais: cerâmicos, poliméricos, cimentícios, betuminosos, metálicos e entre outros que, em posse do conhecimento do seu comportamento físico-químico, se torna possível o seu uso em desenvolvimento de novos materiais. Leite *et al.* (2011) reportam, com base em

pesquisas experimentais, que existe a viabilidade do uso dos agregados reciclados em misturas asfálticas para camadas grossas, além da aplicação em camadas de base e sub-base nos pavimentos asfálticos. As técnicas de reaproveitamento de RCD são alternativas que contribuem para minimização da extração de matérias-primas, e, de forma simultânea, estimula as atividades da indústria da construção civil em fornecer um diagnóstico e proposição correta aos resíduos gerados pelo setor.

2.2 Pavimentação asfáltica

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), pavimento é uma estrutura composta por várias camadas construída sobre uma superfície de terraplanagem e capaz de resistir a esforços de tráfegos de veículos, variações de temperatura, tanto quanto propiciar condições confortáveis de tráfegos e segurança aos usuários. Presente em uma das camadas de pavimentação asfáltica, o concreto asfáltico tem possibilidade de ser produzido à quente (Cimento Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ) e a temperatura ambiente (Pré Misturado a Frio – PMF), em conformidade com as normas regulamentadoras.

De acordo com a norma ES 317 (DNER, 1997), o pré misturado à frio pode ser realizado para a camada do pavimento flexível com os seguintes elementos:

- Agregado mineral graduado;
- Fíler (material de enchimento);
- Emulsão asfáltica (espalhada e comprimida à frio).

Por conseguinte, com a mistura a temperatura ambiente dos materiais citados anteriormente, os materiais devem satisfazer as tolerâncias de enquadramento de faixas e teores de concentração para agregados e emulsão asfáltica. Leite *et al.* (2011) reportam que, para a caracterização dos agregados são possíveis a realização de um programa laboratorial com ensaios de absorção de água, distribuição de grãos, ensaio de cargas triaxiais, dentre outros mais específicos, como o emprego de separador magnético de materiais indesejáveis, de modo a melhorar as condições de uso do material reciclado.

2.2.1 Tipos de revestimentos asfálticos

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT (Brasil, 2006) classifica os pavimentos existentes em 3 categorias. São eles:

- Flexíveis: são aqueles que sofrem deformações elásticas sob o carregamento aplicado transferindo, uniformemente, a carga recebida para as demais camadas constituintes do pavimento.
- Semi-Rígido: pavimento constituído por uma base cimentada e outra camada constituída por revestimento asfáltico.
- Rígido: pavimento que possui revestimento de elevada rigidez e absorve praticamente todas as tenções aplicadas.

Bernucci *et al.* (2006) reportam que existem alguns tipos usuais de revestimentos asfálticos que podem ser aplicados como uma das camadas do pavimento. São os revestimentos com misturas usinadas à quente, usinadas à frio, *in situ* em usinas móveis e recicladas por meio de tratamentos especiais. Com ênfase nas misturas à frio, o Pré-misturado à frio (PMF) consiste nas misturas de agregados (graúdos, miúdos e de enchimento) em conjunto com emulsão asfáltica. Bernucci *et al.* (2006) destaca que o uso de emulsões de ruptura lenta em misturas densas propicia resistências eficientes em camadas de revestimento.

De acordo com a norma ME 107 (DNER, 1994), com as definições de dosagens dos traços pré-determinadas, é possível realizar o preparo dos corpos de prova para que sejam submetidos ao ensaio por compressão diametral sendo verificada sua perda de estabilidade e fluência do corpo flexível. O aparelho Marshall é o indicador destes parâmetros em que são aferidos de forma simultânea.

2.2.2 Propriedades do concreto asfáltico

Leite *et al.* (2011) diz que, para efeitos de análise característica do RCD, existe um decréscimo com relação a capacidade de suporte de carga aferida por ensaios de caracterização geotécnica do material. Algumas propriedades mais específicas no concreto asfáltico que podem ser avaliadas para eventuais comparativos com

materiais nobres são: absorção de água no material, rugosidade superficial, estabilidade por capacidade de aplicação de cargas, entre outros específicos (BERNUCCI *et al.,* 2006).

Fatemi, Saeed *et al.* (2016) reportam que, em seus estudos de pesquisa, a utilização do RCD em uma das camadas do pavimento, em determinadas proporções, melhora algumas propriedades do material estudado, e que podem ser detectadas por análises realizadas por meio de trilhas de rodas. No entanto, de uma maneira geral, a utilização do RCD como material agregado em substituição parcial ou total do material nobre, seja para uso em misturas do concreto utilizando o cimento Portland, ou até mesmo nas composições de concretos asfálticos, dependendo de alguns fatores (ex. dimensões do agregado, lamelaridade, composição química, finalidade de aplicação do material, etc.), acarretando em uma diminuição em termos de eficiência quando comparada a composições utilizando agregados naturais.

2.3 Estudos nacionais e internacionais

Sangiorgi *et al.* (2017) reportam que uma possível alternativa de aplicação de materiais reciclados no pavimento é com a reciclagem de concreto asfáltico. Dessa forma, quando utilizado o procedimento de misturas asfáltica à frio (Coold Recycled Mixes – CRM), algumas vantagens são obtidas quando comparadas com o procedimento de misturas à quente (Hot Asphalt Mix - HAM). Tais vantagens são: redução do consumo de energia; redução de emissões durante o processo de produção da mistura e a possibilidade de obter camadas de pavimentos mais duráveis. Além disso, o CRM não mostra diferenças significativas em termos de propriedades mecânica quando comparado com o HAM em camadas de base, pois, mesmo com desempenho mecânico inferior, os resultados são condizentes com as especificações de normas técnicas italianas para misturas asfálticas à frio.

Dondi *et al.* (2014) reportam que uma técnica alternativa para recuperação de pavimentos rodoviários reutilizados pode ser realizada de maneira eficiente com a reciclagem aplicada a misturas asfálticas à frio. Logo, com a ausência de calor na mistura é garantido a criação de camadas de base de melhor qualidade fazendo uso da borracha, do asfalto 100% reciclado, do betume e do cimento. Na pesquisa foram

utilizados dois tipos de borrachas, uma proveniente do processo de produção ambiental e outra produzida com o processo criogênico, a fim de avaliar as propriedades física e mecânica do material.

Conforme Moon *et al.* (2017), em asfaltos reutilizados de rodovias, o aglutinante envelhecido pode afetar negativamente no desempenho de pavimentos quando submetidos a misturas de asfalto à frio. Por isso, para avaliar o desempenho mecânico do material em estudo realizou-se testes de rejeição de feixe de curvatura, tanto quanto a modelagem reológica. Logo, quatorze misturas de asfalto contendo amostras de pavimentos de asfalto reutilizados foram realizadas para que fosse avaliada a rigidez térmica. Ao final da pesquisa, concluiu-se que: com a adição de dois tipos de determinados resíduos asfálticos em misturas com proporções de 15% e 3%, respectivamente, são alteradas as propriedades a baixas temperaturas da mistura. Dessa forma, recomenda-se que a utilização de aglutinante novo e antigo ocorra de forma parcial na mistura.

Behl *et al.* (2014) reportam que a queima do PVC é um agente de grande potencial poluidor, como também é liberador da dioxina em incineradores. No entanto, um estudo foi desenvolvido de modo que fosse possível utilizar um modificador químico sobre o PVC, possibilitando a mistura homogênea com o betume em temperaturas mais elevadas. Por conseguinte, foi possível realizar uma comparação do protótipo com a mistura betuminosa convencional, encontrando-se resultados satisfatórios provenientes da adição entre 3% a 5% de material de PVC, tais como: aumento da resistência, da estabilidade, bem como o aumento da resistência à deformação permanente.

Modarres *et al.* (2015) realizaram estudos sobre os efeitos do uso do pó proveniente do resíduo de carvão aplicado em mistura de asfalto à quente e comparando-a com materiais de enchimento convencional. Com a utilização de resíduos provenientes da cinza de carvão, foi proposta avaliar a estabilidade Marshall, a resistência à tração indireta, a sensibilidade a umidade e testes de fadiga com vistas a obtenção de melhores desempenhos mecânicos do material em estudo. Logo, os resultados foram satisfatórios indicando melhores rendimentos quando comparado aos materiais de enchimento calcário e zeólito. Além disso, o uso da cinza do carvão

proporcionou propriedades mecânicas do produto final da mistura semelhantes ao do cimento Portland quando utilizado como material de enchimento na mistura.

Zhou *et al.* (2015) avaliou através de estudos a produção de emulsões asfálticas utilizando a borracha de pneus como agente modificador e, posteriormente, aplicou em mistura com óleo de pasta decantado. O óleo de pasta foi refinado para formar um aglutinante de asfalto emulsionável. Nesse processo, 3% do teor de óleo de pasta foi suficiente para a emulsificação através da adição de água e um agente emulsionante. Por conseguinte, os efeitos da borracha em mistura com o óleo de pasta foram avaliados com testes de rotina e por medições do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), resultando em melhores desempenho do pavimento quando expostos a altas temperatura.

De acordo com Silva *et al.* (2012), agentes rejuvenescedores provenientes de produtos comerciais e óleo de motor melhoram as propriedades dos aglutinantes envelhecidos em aplicações de misturas asfálticas à quente. Várias amostras de aglutinantes foram preparadas com os agentes rejuvenescedores e caracterizadas por viscosidade dinâmica. Concluiu-se com o estudo que ocorreu a diminuição da temperatura envolvida no processo e, consequentemente, oportunizou melhores desempenhos mecânicos do pavimento.

Em avaliações da capacidade térmica nas misturas de concreto asfálticos realizadas na China por Jamshidi *et al.* (2017), com a substituição dos agregados de alta capacidade térmica específica por materiais agregados de baixa capacidade térmica, proporciona-se uma diminuição linear de consumo energético durante o processo da mistura. Portanto, nesse procedimento estatisticamente há uma economia significativa de energia capaz de abastecer milhares de famílias no país.

Consoante com os estudos de Anthonissen *et al.* (2015), na Bélgica, a construção de pavimentos rodoviários tem como principal componente os materiais betuminosos. Em detrimento desse fato, realizou-se estudos com a incorporação de aditivos à mistura a fim de que possibilitasse a redução energética envolvida no procedimento à quente, bem como avaliar o risco ambiental potencial resultante. Logo, com a utilização de aditivos como: zeólito sintético e a cera orgânica (Fischer-Tropsh) identificou-se a inviabilidade tanto no viés ambiental quanto energético na produção do betume. Entretanto, em relação a durabilidade dos materiais, conforme Gímenez

(2011) é apontado que alguns agregados reciclados devem ser avaliados de maneira criteriosa, pois materiais resistentes são passíveis de sofrer desintegração química quando expostos a condições ambientais desfavoráveis no pavimento.

Radevic *et al.* (2017) comentam que em seus estudos de viabilidade do uso de agregados reciclados na composição do concreto asfáltico em substituição parcial, o uso do material reciclado não teve influências significativas em deformações plásticas, bem como o módulo de rigidez das misturas de concreto asfáltico com agregados reciclados foi menor quando comparado com o traço referência.

Ossa *et al.* (2016) apresentaram estudos experimentais realizados com concreto asfáltico usinado à quente para aplicação em estradas urbanas, onde foram avaliadas como propriedades de absorção de água e deformação plástica. Esses autores realizaram misturas em quatro percentuais diferentes de agregados reciclados variando entre 10% e 40% em relação a massa total. Os resultados dos estudos indicaram que até as proporções de 20% de substituição tem-se propriedades satisfatórias para as estradas urbanas.

Bernuci *et al.* (2006) reportam que um ensaio o qual possibilita mensurar a desintegração química dos agregados pode ser realizada pelo ataque ao agregado com solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio. Dessa forma, através de “ciclos de imersão” na substância, a amostra analisada é exposta à degradação e posteriormente colocadas em estufa medindo-se o seu peso final e comparando-o com o peso inicial seco.

Com ênfase em estudos de aplicação dos agregados reciclados em pavimentos nas camadas de base e sub-base, Leite *et al.* (2011) reportam alguns aspectos físicos dos materiais que proporcionam condições desfavoráveis ao pavimento. Com isso, é visto que existem maiores absorções de água nos resíduos reciclados, em detrimento da significativa presença de material poroso, quando comparando-os com agregados naturais. No entanto, Leite *et al.* (2011) diz que na análise de forma dos grãos é identificada uma grande predominância de grãos cúbicos em materiais cimentícios e rochas desfragmentadas, identificando materiais de maiores resistências ao cisalhamento. Os materiais cerâmicos apresentaram forma plana (originados de pedaços de telhas) contribuindo para quebra durante a compactação (Tabela 1).

Tabela 1 - Percentuais por tipo de material em características físicas

Material do grupo	Ocorrência por peso (%)	Absorção de água (%)	Forma do grão		
			Cúbico (%)	Plano (%)	Alongada (%)
Cimentícios	55,0	11,5	83,5	14,1	2,4
Mat. cerâmicos altamente porosos	16,0	20,7	37,0	50,0	13,0
Mat. Cerâmicos menos porosos	14,0	11,1	2,40	92,8	4,8
Pedras esmagadas	12	3,8	82,1	14,3	3,6
Mat. Indesejáveis	3				

Fonte: Adaptado de Leite *et al.* (2011).

Cosme *et al.* (2016) em seu programa experimental fizeram uso de resíduos finos provenientes da indústria de pedras ornamentais e resíduos de escória de aço como material de enchimento no concreto asfáltico usinado à quente. O material reciclado em processos de caracterização física e mineralógica, resultou predominantemente na forma lamelar e, quanto a sua composição química, foi identificada concentrações consideráveis de SiO_2, constatando a possibilidade de prejudicar a aderência agregado-ligante. Em resumo, os resultados apresentaram melhoria no comportamento reológico do ligante puro quando utilizado o resíduo da escória de aço proporcionando melhor rigidez ao material.

Segundo Gómez-meijide *et al.* (2016), o concreto asfáltico usinado à frio possui algumas vantagens relacionada à economia e ao ambiente. No entanto, esse tipo de mistura necessita de determinado tempo para rompimento do ligante. Em seu programa experimental, os autores avaliaram as propriedades do pré-misturado à frio com agregados do tipo RCD, como também verificaram que ocorreram ganhos de rigidez e perda de água quando comparados com misturas utilizando-se agregados naturais.

De acordo com Fatemi *et al.* (2016), em misturas de concreto asfáltico com a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado em proporções de 10%, 20%, 30% e 40%, testes de rastreamento de rodas e módulo de resiliência de tensão direta apontaram um melhor desempenho de resistência ao enrugamento da camada de revestimento asfáltico quando usada, principalmente, a substituição parcial do agregado em proporções de 30%.

Motta *et al.* (2010), através da Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (COOPPETEC), realizaram a avaliação de três trechos experimentais de revestimentos asfálticos, sendo dois dosados pelo método SUPERPAVE e sob a ação de tráfego na rodovia BR/40 (Trecho da Companhia de Concessão Rodoviária de Juiz de Fora). Logo, o projeto de pesquisa consistiu em executar dois trechos experimentais de duzentos metros, aproximadamente, utilizando misturas asfálticas do tipo morna (MM): misturas executadas em temperaturas intermediária (Figura 7); e misturas asfálticas de módulo elevado (MME): misturas executadas com ligantes duros e agregados densos e granulometria contínua. O terceiro trecho executou-se com uma mistura convencional de referência (CAP 50/70).

Figura 7 - Espalhamento de massa asfáltica do trecho experimental MM.

Fonte: Motta *et al.* (2010).

Para tanto, Motta *et al.* (2010) explanam que o método SUPERPAVE atendem aos critérios de dosagens para rodovias de tráfego pesado. O que os autores desejaram obter com esses estudos foi reduzir o consumo de energia, como também reduzir a emissão de gases e obter melhores propriedades mecânicas no pavimento utilizando um método de dosagem mais eficiente. No processo de mistura MM e MME o ligante foi adicionado a massa de agregados e a mistura usinada em um misturador mecânico e compactada com a aplicação de 100 giros e pressão de 600kPa. A Figura 8 ilustra detalhes do misturador e compactador giratório.

Figura 8 – Concreto asfáltico usinado (a – Misturador mecânico e b - Compactador giratório).

Fonte: Motta *et al.* (2010).

Como parâmetros de avaliação, foram realizados ensaios de cargas repetidas e deformação permanente em laboratórios, e demais ensaios realizados em campo tais como: mancha de areia (Figura 9), levantamento visual e rastreamento de rodas. O acompanhamento do desempenho se deu com a medição de deflexão, atrito, levantamento de defeitos e retirada de corpos de prova.

Figura 9 - Foto do ensaio de mancha de areia.

Fonte: Motta *et al.* (2010).

Após a conclusão da pesquisa, por interesse da COPPTEC, as avaliações periódicas continuaram durante o período de cinco anos para acompanhamentos dos segmentos sob o tráfego. Em outros estudos de desempenho mecânico do concreto asfáltico, Ceratti *et al.* (2006) desenvolveram um novo tipo de recapeamento asfáltico com a adição de borracha vulcanizada, e em ação simultânea, desenvolveram outra cama de recape com concreto asfáltico convencional. O trecho possuiu dimensões de 3,20 x 16,20 metros, e os recapeamentos foram aplicados sobre um antigo pavimento experimental. Foram realizados estudos prévios laboratoriais obedecendo o método Marshall de dosagem, sendo a curva granulométrica dos agregados enquadrada na faixa B por especificações de normas técnicas. Durante a execução do trecho, foram realizados alguns ensaios para verificação característica da camada de recapeamento confeccionando alguns corpos de provas, identificando em laboratório determinando módulos de resiliência e resistência a tração por compressão diametral.

Pinheiro e Soares (2005) realizaram estudos referentes a execução de dois trechos experimentais (Tabela 2) os quais utilizou-se ligante asfalto-borracha visando, principalmente, minimizar deformações permanentes e trincamento por fadiga. Para tanto, foram realizados controles durante a usinagem e compactação, bem como o acompanhamento dos trechos através de medidas de deflexão e de algumas propriedades mecânicas do revestimento antes e após a execução.

Tabela 2 - Características do trecho experimental.

Características	Abolição	CE – 350
Localização	Av. Abolição, entre Av. Desembargador Moreira e Rua Joaquim Nabuco, sentido Leste-Oeste	CE – 350 entre os municípios de Itaitinga e Pacatuba (estaca 595 a 603)
Tráfego	Intenso com carros, ônibus e caminhões	Intenso, caminhões carreta
Tipo	Via urbana	Estrada estadual
Largura	9m (3 faixas)	8m (6m de faixa e 2m de acostamento)
Base ou revestimento antigo	Até 3 revestimentos diferentes (12 cm de CBUQ e base de paralelepípedo)	Solo-brita
Extensão	300 m	200m
Espessura nova*	3,23 cm	5,50 cm

Fonte: Adaptado de Pinheiro e Soares (2005).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Infraestrutura para a realização do estudo

As atividades pertinentes a pesquisa foram realizadas em três etapas: A primeira, relacionada as fases de caracterização física, química e mineralógica dos agregados naturais e reciclados; a segunda, constituindo a caracterização física do ligante asfáltico (Emulsão asfáltica do tipo RL 1C); e, a terceira as análises de dosagens com o método Marshall realizadas para as misturas de pré-misturado à frio propostas neste trabalho, conforme detalhes adiante.

Com relação as parcerias firmadas, foi possível desenvolver a pesquisa do mestrado com a cooperação e apoio técnico de algumas pessoas, instituições e empresas privadas. Quanto ao beneficiamento e coleta dos agregados reciclados, esse material foi adquirido por meio de doação da usina de reciclagem DUARTE (localizada em São José do Mipibú – RN). Para a execução da pesquisa, foi possível contar com a parceria de um projeto de iniciação científica da turma de estradas (IFRN – Campus Natal), com linha de pesquisa semelhante à dissertação no que diz respeito ao emprego de RCD voltados para obras viárias.

É válido destacar ainda as demais parcerias que proporcionaram as condições de infraestrutura laboratorial, fornecimento dos agregados naturais para a execução das atividades, mormente algumas equipes de cooperações técnicas. São elas: A Diretoria Acadêmica de Construção Civil (DIACON) – IFRN; o Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a equipe de pesquisa da turma de estradas (IFRN) a qual foi possível desenvolver trabalhos científicos em parceria.

Após o término das atividades laboratoriais, como forma de avaliação e reconhecimento de parte da pesquisa desenvolvida, foi possível publicar os dados obtidos nas dosagens do concreto asfáltico na Reunião Anual de Pavimentação

Urbana – RPU que ocorreu no segundo semestre de 2017. E de maneira complementar, após uma análise minuciosa de todos os resultados finais da pesquisa, almeja-se a publicação dessa dissertação na revista Transportes da USP.

3.1.1 Coleta do material

O material reciclado foi coletado nas dependências da usina de reciclagem DUARTE LTDA em São José do Mipibú – RN. Ao longo de um dia de funcionamento da empresa, diversos caminhões caçambas adentram carregados de entulhos provenientes de obras e pré-intitulados por classificações de resíduos sólidos. Esses caminhões passam por uma balança, seguem para o despejo do material e finalmente ocorre a triagem. Feito isso, os resíduos oriundos de restos do concreto, gesso, cerâmica, dentre outros, são encaminhados para um britador de mandíbulas os quais são desfragmentados e divididos conforme tamanho. Em nomenclaturas comerciais, os agregados do beneficiamento são divididos entre areia, brita zero e brita 1.

Com ênfase na coleta do material, para a fração grossa dos agregados de RCD, fez-se a abertura de uma cavidade com diâmetro médio de 30 centímetros, no meio topo e base de uma pilha recém-formada (Figura 10) para que fosse possível remover o material superficialmente. Por fim, os agregados reciclados (Brita zero, brita 1 e areia) foram acondicionados em sacos de nylon e encaminhados para estudo no laboratório de materiais de construção do IFRN.

Figura 10 – Britagem e coleta dos agregados RCD (a - Britador de mandíbulas e b - coleta do material na pilha).

Fonte: Autoria própria.

O material RCD utilizado na pesquisa foram as britas zero, brita 1 e areia. Vale destacar que os materiais finos (passante na peneira 200mm) presentes no lote coletado da usina Duarte LTDA mantiveram quantidades suficientes em termos percentuais, quando identificados no ensaio de granulometria, não necessitando a adição de materiais de mesma natureza para complementação dos traços. A Figura 11 ilustra detalhes das frações de materiais reciclados que foram utilizados na pesquisa. Porém, para a obtenção do material natural, foram fornecidas todas as frações de brita 1, brita 0, areia e cimento (material fino natural), pelo laboratório de materiais de construção do IFRN - Campus Natal Central.

Figura 11 - Material RCD da pesquisa (a - Brita 0, b - Brita 1, c - areia e d – fíler).

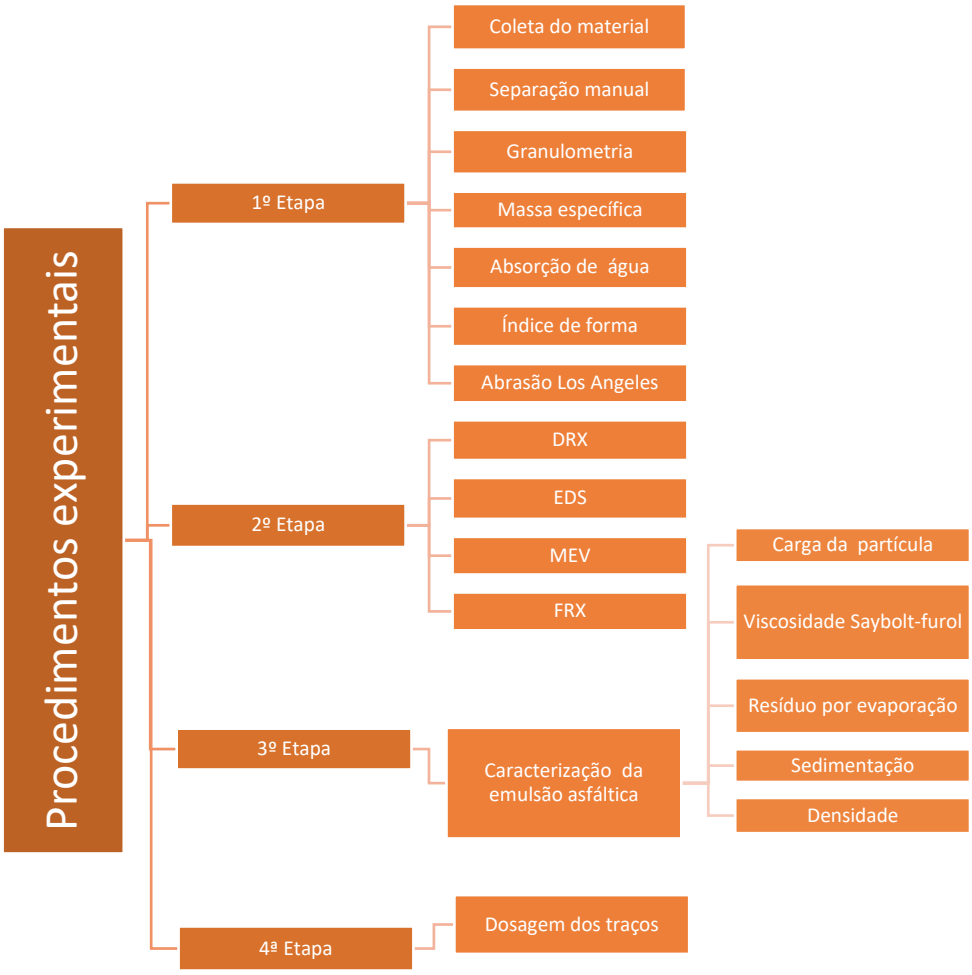
Fonte: Pederneiras (2017)

3.1.2 Experimentos de caracterização do material

A metodologia do trabalho baseou-se em fases experimentais de ensaios de caracterizações física dos agregados; ensaios de caracterização mineralógica do fíler do RCD; ensaios de caracterização da Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) do tipo RL - 1C; estudos de dosagens para concretos asfálticos do tipo pré-misturados à frio, a serem utilizados em camadas de revestimentos de pavimentos.

A Figura 12 apresenta um fluxograma ilustrativo das etapas da pesquisa:

Figura 12 - Resumo das etapas da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Caracterização do RCD e agregados naturais

Os ensaios de caracterização do RCD e agregados naturais (análises de granulometria, massa específica, absorção de água, abrasão Los Angeles e índice de forma pelo método do crivo) foram realizados de acordo com as referências normativas apresentadas na Tabela 3.

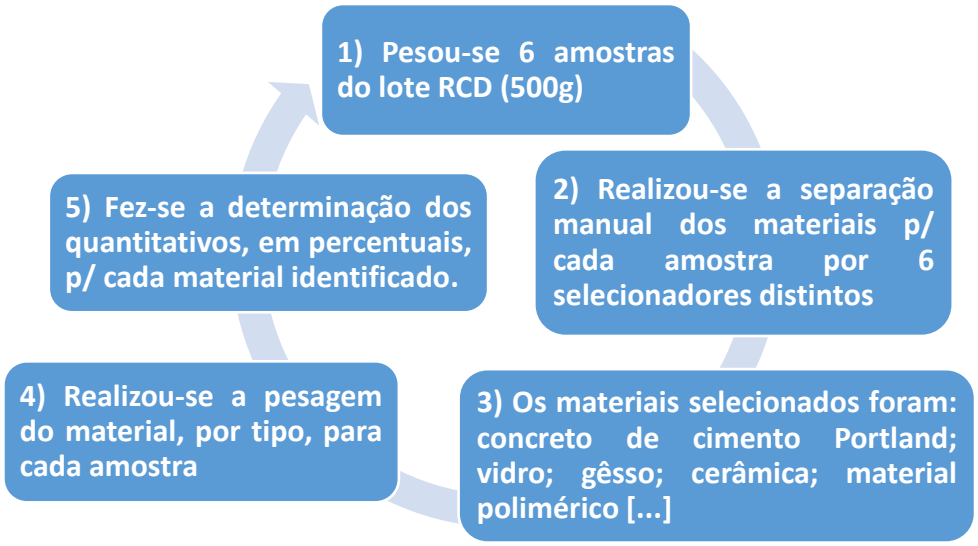
Tabela 3 - Ensaios normatizados de caracterização física para os agregados.

Ensaios	Normas
Preparação de amostras	NBR 6457/86
Análise granulométrica	DNER-ME 083/98
Determinação do índice de forma – Agregado graúdo	DNER-ME 086/94
M. Específica do material pulverulento – Le Chatelier	DNER-ME 085/94
M. Específica do agregado miúdo – Chapman	DNER-ME 194/98
Absorção e densidade – Agregado graúdo	DNER-ME 081/98
Abrasão “Los Angeles” – Agregado graúdo	DNER-ME 035/98

Tendo em vista a diversidade dos tipos de materiais presentes nos agregados dos RCD’s, na fase inicial da caracterização do material foi conveniente realizar uma seleção manual dos resíduos reciclados em procedimento informal como forma de identificar e quantificar os materiais indesejáveis (Figura 13). Outro motivo de conveniência desse procedimento foi discutir as influências dos agregados quando aplicados no concreto asfáltico possibilitando, também, obter maiores parâmetros na avaliação dos resultados finais.

O procedimento de seleção manual ocorreu conforme a sequência ilustrativa apresentada pela Figura 13:

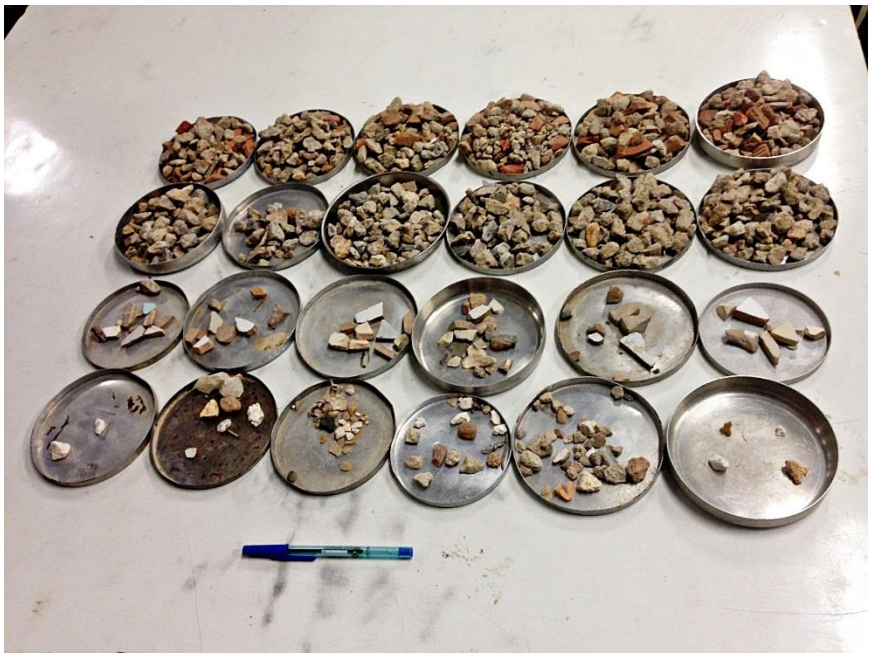
Figura 13 - Procedimento de seleção manual dos resíduos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 14 representa as seis amostras separadas por quatro tipos de materiais distintos identificados visualmente.

Figura 14 - Sequência de amostras após seleção manual.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência das atividades laboratoriais, para o ensaio de granulometria realizou-se previamente a preparação de amostras conforme a NBR 6457.

A preparação ocorreu nos procedimentos a seguir:

- ✓ Desmanchou-se torrões dos agregados, evitando a quebra de grãos;
- ✓ Realizou-se o quarteamento reduzindo a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidades suficientes para a realização do ensaio.

Inicialmente, os agregados que foram passados em uma peneira de 76mm, dividiu-se da seguinte forma:

Tabela 4 - Quantitativos de amostra para análise granulométrica.

Dimensões dos grãos maiores contidos na amostra determinadas por observação visual (mm)	**Quantidades adotadas (Kg)**
< 5	1
5 a 25	4
> 25	8

Com referência ao ensaio de granulometria, a norma que norteou a execução do ensaio foi a norma rodoviária DNER – ME 083/98. O equipamento utilizado neste ensaio foi um jogo de peneira da série normal. Todavia, quanto aos movimentos de agitação das peneiras, por conveniência, foram realizados de forma manual; como parâmetros de resultados obtidos com a análise granulométrica, foi possível determinar o módulo de finura do agregado, a dimensão máxima característica do agregado e o percentual de materiais pulverulentos.

Para o módulo de finura, se fez a soma dos percentuais retidos nas peneiras (considerando os valores em massa). Para a dimensão máxima do agregado, verificou-se a peneira que reteve os agregados com valores iguais ou imediatamente inferiores a 5%. E por fim, para os materiais pulverulentos, nesta classificação foram consideradas as partículas passantes na peneira 0,075mm. As Figuras 15 e 16 ilustram detalhes dos materiais retidos nas respectivas peneiras prontos para pesagem após o ensaio.

Figura 15 - Agregados de RCD separados por dimensões após granulometria.

Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Agregados naturais separados por dimensões após granulometria.

Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Ensaio de caracterização mineralógica

Para que houvesse um conhecimento mais aprofundado do material reciclado, foram realizados ensaios de caracterização mineralógica com a finalidade de identificar a composição química e estrutural dos grãos, bem como buscar compatibilidade com os resultados obtidos por meio de outras pesquisas correlatas. Os ensaios realizados foram: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS); Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

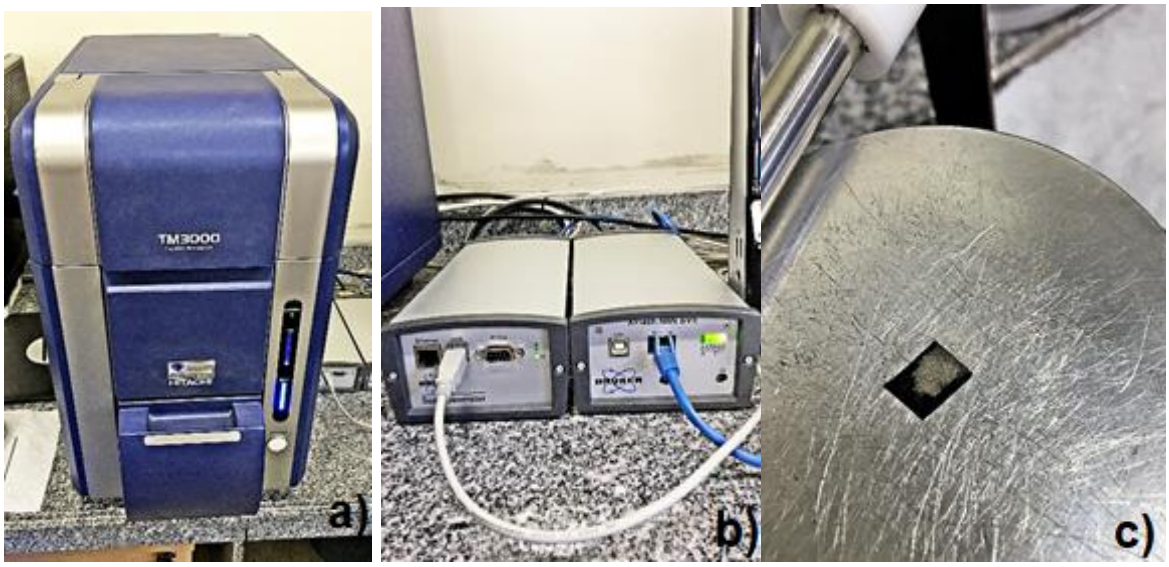
No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizou-se o equipamento microscópio de mesa do fabricante *Hitachi* (modelo TM-3000). Conforme as especificações do fabricante, o aparelho operou com as seguintes características:

- ✓ Tensão de aceleração variando entre 5 kV a 15 kV;
- ✓ Autonomia de aproximação ótica variando entre 15x a 30000x (Zoom digital: 2x e 4x);
- ✓ Imagens fotográficas com alta capacidade na profundidade de foco;
- ✓ Autonomia de captura de imagens com resolução de até (1280x960 *Pixels*)
- ✓ Frequência de 50/60 HZ;
- ✓ Fonte de alimentação da unidade principal (100 – 240 V, 500VA)

No ensaio de EDS fez-se uso do equipamento *Swift* ED3000 do fabricante *Oxford instruments* no qual funciona acoplado ao microscópio *Hitachi* TM-3000 possibilitando a varredura de uma única amostra.

No procedimento de preparação da amostra, com o auxílio da peneira de abertura 75 Micrômetros, separou-se uma pequena amostra representativa de fíler proveniente do agregado RCD contendo a quantidade suficiente para o ensaio. Para tanto, o fíler RCD previamente armazenado em um porta amostra foi coletado em uma pequena fração e disposto sobre uma fita de carbono, (Figura 17), a fim de que um canhão interno com feixes de elétrons fosse atraído. Por fim, foi obtido um gráfico com picos correspondentes ao ângulo de incidência dos feixes de elétrons que, possivelmente, identificou quais os elementos químicos compõem o grão cristalino.

Figura 17 – Equipamentos para ensaios mineralógicos (a - MEV, b – EDS acoplado ao MEV e c - amostra sobre a fita de carbono).

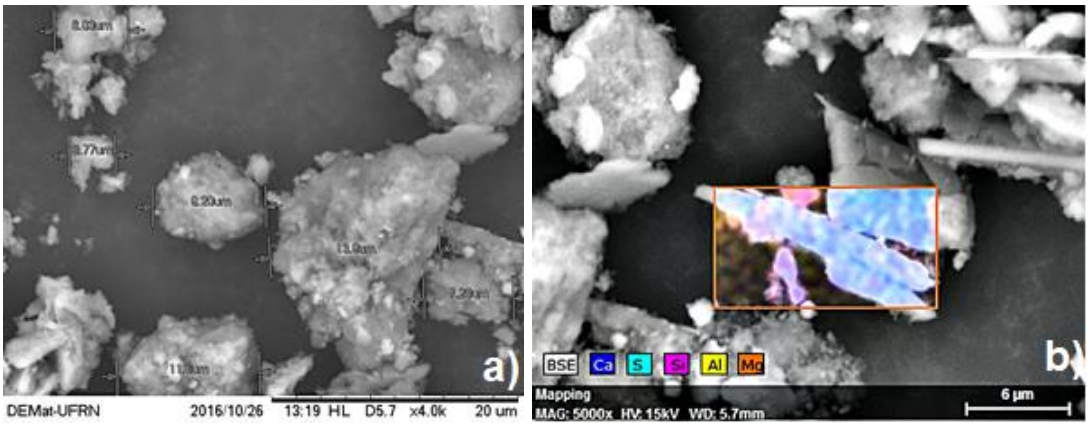


Fonte: Autoria própria.

Com o equipamento do MEV foi possível visualizar, por meio de imagens ampliadas em escala microscópica, a forma geométrica dos grãos medindo-os em uma variação entre 3,77 µm a 13,9 µm (Figura 18). O equipamento de EDS, atuando de maneira suplementar ao Microscópio, quando uma imagem ampliada dos grãos se formava na tela por interface gráfica, foi possível delimitar uma área para identificação de componentes químicos (Figura 18). Logo, com o auxílio de um software computacional, o equipamento EDS informou quais os possíveis componentes químicos presentes nos grãos conforme identificação dos compostos por cores

(Figura 19). Vale salientar que o ensaio do MEV não é normatizado seguindo-se recomendações do fabricante.

Figura 18 – Ensaios de MEV e EDS (a - Medidas granulométricas e b - identificação de compostos químicos).



Fonte: Autoria própria.

No ensaio de caracterização mineralógica de Difração de Raios – X (DRX) foi utilizado um equipamento Shimadzu DRX 7000 localizado no Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais - UFRN. A amostra foi submetida a condições de análises a radiação Ka de um ânodo de cobre, com tensão acelerada de 40 kV, corrente contínua de 30 mA, com varredura de (2theta) de 5º a 70º e passo angular de 0,02º. A amostra utilizada neste ensaio foi colocada sobre um centro de um porta amostras acrílico e, posteriormente, levada ao equipamento para varredura e incidência de Raio-X. Feito isso, foram identificadas as fases cristalinas dos difratogramas por meio de um banco de dados e literaturas científicas contidas em um software computacional.

No ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX), utilizou-se o equipamento do fabricante Shimadzu (modelo EDX – 720/800HS) através do método semiquantitativo e sob uma atmosfera à vácuo. Na realização deste ensaio, a amostra é inserida em um porta amostras com quantidades capaz de preencher todo o recipiente e, logo após, cobre-se a amostra com um papel filme de polipropileno para que se evite perdas durante a execução do ensaio. Por fim, o material preparado para ensaio é levado ao equipamento onde será feita a leitura dos óxidos constituintes.

3.1.5 Caracterização do ligante asfáltico

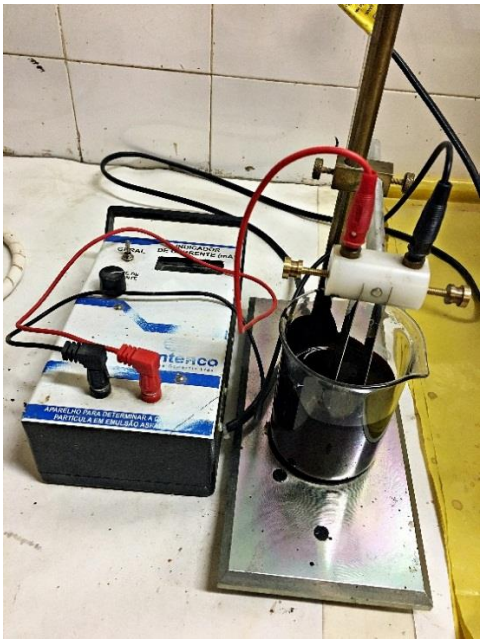
Na caracterização do ligante asfáltico (Emulsão Asfáltica de Petróleo – EAP, do tipo Ruptura Lenta - RL 1C), os ensaios foram realizados em conformidade com as normas presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios normatizados para a caracterização do ligante asfáltico.

Ensaios	Normas
Determinação da carga da partícula - Emulsão	DNIT 156/2011-ME
Determinação da densidade e massa específica	DNER-ME 193/96
Determinação da viscosidade Saybolt-Furol	DNER-ME 004/94
Determinação do resíduo asfáltico por evaporação	NBR 14376 04/07

Conforme a norma do DNIT 156/2011, o ensaio de determinação de carga da partícula resumiu-se na identificação da carga da partícula de emulsões (catiônica ou aniônica). Utilizou-se como aparelhagem um béquer de vidro com capacidade para 150 ml, duas placas inoxidáveis com dimensões de 10cm X 2,5cm, e corrente contínua de 12v com um miliamperímetro ligado ao sistema (Figura 19).

Figura 19 - Ensaio de determinação da carga da partícula.



Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de densidade e massa específica (Figura 20), de acordo com a norma do DNER-ME 193/96 o procedimento engloba materiais betuminosos líquidos e semissólidos a temperatura de 22/25 º C ou 15/15,6 º C, pelo uso do picnômetro. A densidade dos materiais é dada pela relação de um dado volume de material para um igual volume de água.

Figura 20 - Ensaio de determinação da densidade e massa específica.

Fonte: Autoria própria.

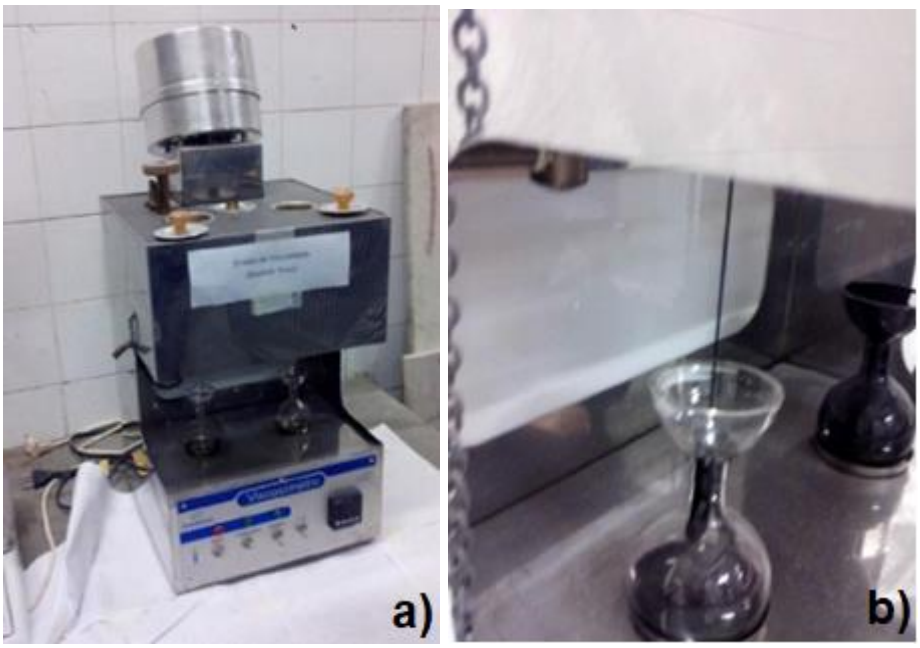
No ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, foi utilizada a norma DNER-ME 004/94 que instrumentaliza os procedimentos para determinar a viscosidade de materiais betuminosos a determinadas temperaturas. A temperatura do ligante durante o ensaio permaneceu em variações próximas de 60ºC, e o procedimento baseou-se na medição do tempo em segundos em que 60 ml de amostra betuminosa escoa, através de um orifício “Saybolt-Furol”, à temperatura pré-estipulada conforme a referida norma (Figura 21).

Os aparelhos necessários ao ensaio foram os seguintes:

- Aparelho viscosímetro para medir a resistência do fluido;
- Tubo de viscosidade de metal anticorrosivo;
- Frasco receptor de vidro com capacidade para 60ml e marca no gargalo;

- Recipiente de banho para aquecimento do tubo de viscosidade;
- Termômetro para aferir temperatura de banho;
- Anel de descolamento de metal anticorrosivo para suporte do tudo de viscosidade;
- Tampa;
- Placa de aquecimento elétrico;
- Cronômetro.

Figura 21 – Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol (a - Viscosímetro Saybolt-Furol e b - frasco receptor).



Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de resíduo por evaporação, o procedimento consistiu pelo aquecimento de uma amostra de EAP até atingir a temperatura de 170ºC aferida com o auxílio de um termômetro (Figura 22). Posteriormente, pesou-se o material antes aquecido para que fosse possível identificar o novo percentual da amostra.

Figura 22 - Ensaio de resíduo por evaporação.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Definição das dosagens de pré-misturado a frio (PMF)

As definições das proporções dos traços ocorreram através de análises realizadas em virtude do enquadramento de faixas requisitados pelas normas brasileiras vigentes para as dosagens de pré-misturados à frio. Para esses estudos foram empregadas as normas detalhadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Listagem dos ensaios normatizados com o concreto asfáltico.

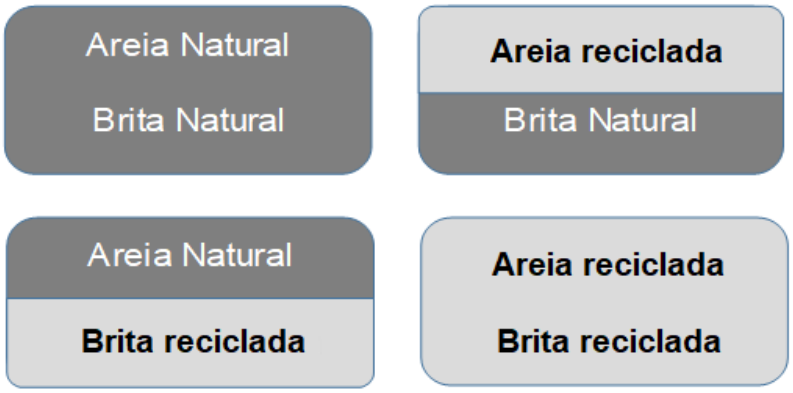
Ensaios	Normas
Pavimentos flexíveis – Pré misturado a frio	DNER-ES 317/97
Mistura betuminosa a frio – Ensaio Marshall	DNER-ME 107/94

Com fins de investigação para definir a melhor dosagem e para obtenção de melhores resultados, foi estabelecido um traço padrão contendo todos os agregados na condição natural, e, alternando os tipos dos materiais nos demais traços. Logo, para efeito de análises foram realizadas quatro concepções de misturas dos agregados nas dosagens (variando o teor de ligante - EAP em 6%, 7%, 8% e 9% para cada dosagem) conforme descrições a seguir:

- 4 dosagens utilizando-se todas as frações de agregados naturais;
- 4 dosagens utlizando-se a fração de areia RCD e a fração de agregado graúdo natural;
- 4 dosagens utlizando-se a fração de areia (natural) e a fração de agregado graúdo (RCD);
- E por fim, 4 dosagens utilizando-se todas as frações de agregados RCD;

A Figura 23 apresenta de maneira detalhada um resumo das concepções adotadas na pesquisa.

Figura 23 - Modelo de alternância dos agregados nas combinações dos traços.



Fonte: Autoria própria.

No modelo das quatro misturas dos agregados, as que tiveram britas e areia naturais o traço da dosagem foi denominado D1 – BNAN; no traço que teve como composição britas naturais e areia reciclada, esse foi chamado de D2 – BNAR; no traço que teve britas recicladas e areia recicladas, D3 – BRAR; e o traço que teve a brita reciclada e areia natural foi denominado D4 – BRAN (Tabela 7). É válido destacar que, por conveniência, não foi inserido o fíler natural (cimento) nas misturas que mantinham areia RCD, pois já existia quantidades consideráveis de finos.

Tabela 7 - Descrição dos traços utilizados.

Descrição	Combinações de agregados	Condição dos agregados
D1 - BNAN	Brita + Areia (naturais)	Seco
D2 - BNAR	Brita Natural + Areia Reciclada	Seco
D3 - BRAR	Brita Reciclada + Areia Reciclada	Seco
D4 - BRAN	Brita Reciclada + Areia Natural	Seco

Confome a norma DNER-ME 107/94 que determina a fluência e a estabilidade de misturas betuminosas usinadas à frio, os ensaios foram executados com corpos de prova previamente confecionados, fazendo uso da emulsão asfáltica catiônica e equipamentos Marshall. Para a verificação dos enquadramentos da faixa C descrita pela norma 031/06 do DNIT e definição de percentuais de emulsão, foram calculados os valores (em massa) para composição de cada corpo de prova. Por medida preventiva e posterior análises de desvios do resultados, conforme a norma foram moldados três corpos de prova para cada dosagem (Figura 24).

Figura 24 - Moldagem de corpos de prova.

Fonte: Autoria própria.

Conhecido os percentuais (em massa) do material utilizados, foi calculada a quantidade de cada material para cada corpo de prova pesando cerca de 1200g e com altura de 64,8mm. Logo, seguindo-se os procedimentos normativos, de forma preliminar foram separados os materiais referente a cada Corpo de Prova (CP) em sacos plásticos, facilitando assim a posteior mistura. A fração de cada material para cada corpo de prova foi pesada (Figura 25) confome estimativas por percentuais de cada material.

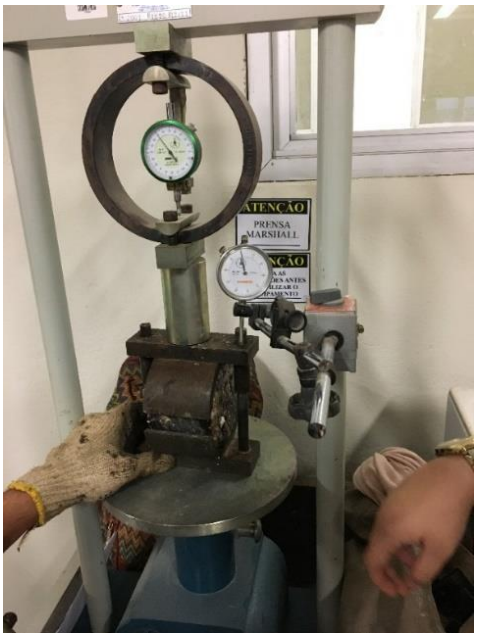
Figura 25 - Pesagem de material por cada CP (a – Composição de agregados naturais para CP I, II e III e b – adição de ligante a mistura de agregados).

Fonte: Autoria própria.

Conforme as quatro concepções estipuladas para as dosagens, os percentuais de cada material por corpo de prova foram determinados com base em estimativas. Para cada concepção de misturas de agregados, realizou-se quatro dosagens variando em teores de ligante (EAP) em 6%, 7%, 8% e 9%. No entanto, para cada dosagem, confeccionou-se 3 corpos de prova. Logo, totalizaram-se a confecção de 48 corpos de prova.

De acordo com a norma DNER-ME 107/94, após a moldagem e secagem dos corpos de prova, encaminhou-se os mesmos para uma estufa com temperatura média de 40ºC a fim de que simulasse uma situação de exposição a intempérie de forma real. Após uma hora, retirou-se o corpo de prova da estufa levando até a prensa Marshall no tempo máximo de 30 segundos (Figura 26).

Figura 26 - Prensa Marshall verificando estabilidade e fluência.



Fonte: Autoria própria.

Após regulagem da prensa, o corpo de prova foi submetido a uma carga constante conforme um braço de alavanca era girado indicando em um relógio o valor da estabilidade, e em outro a fluência. Quando o ponteiro do relógio da estabilidade encontrou-se em posição constante anotava-se os valores dos dois relógios, pois o CP já teria sido rompido.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da caracterização física das frações dos agregados

De forma preliminar aos estudos das dosagens do concreto asfáltico, alguns ensaios possibilitaram a realização de análises tanto quantitativa quanto qualitativa, permitindo também aferir e comparar as propriedades física e química dos materiais utilizados.

4.1.1 Análise granulométrica dos agregados naturais e RCD

Com base nos resultados obtidos por meio dos experimentos de caracterização física dos agregados foi possível realizar análises quantitativas e qualitativas do material natural e RCD. Em conformidade com as normas DNER 037/97 e DNER 038/97, a aceitação ou rejeição do lote de agregados para misturas de concretos asfálticos (parâmetros similares para o concreto de cimento) após os ensaios de caracterização física devem obedecerem aos intervalos percentuais em análises granulométricas mencionados pelas Tabelas 8 e 9, a seguir:

Tabela 8 - Limites para composição granulométrica de agregados miúdos.

Peneiras (Aberturas em mm)	Passando (%)
9,5	100
4,8 (nº 4)	95 – 100
2,4 (nº 8)	80 – 100
1,2 (nº 16)	50 – 85
0,60 mm (nº30)	25 – 60
0,30 mm (nº50)	10 – 30
0,15 mm (nº100)	2 – 10

Fonte: Adaptado de DNER 038/97.

Tabela 9 - Limites granulométricos de agregados graúdos.

Graduação	Porcentagem retida acumulada nas peneiras de abertura em mm					
	25	**19**	**12,5**	**9,5**	**4,8**	**2,4**
0	-	-	0	0-10	80-100	95-100
1	0	0-10	-	80-100	95-100	-
2	0-25	75-100	90-100	95-100	-	-
3	87-100	95-100	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-

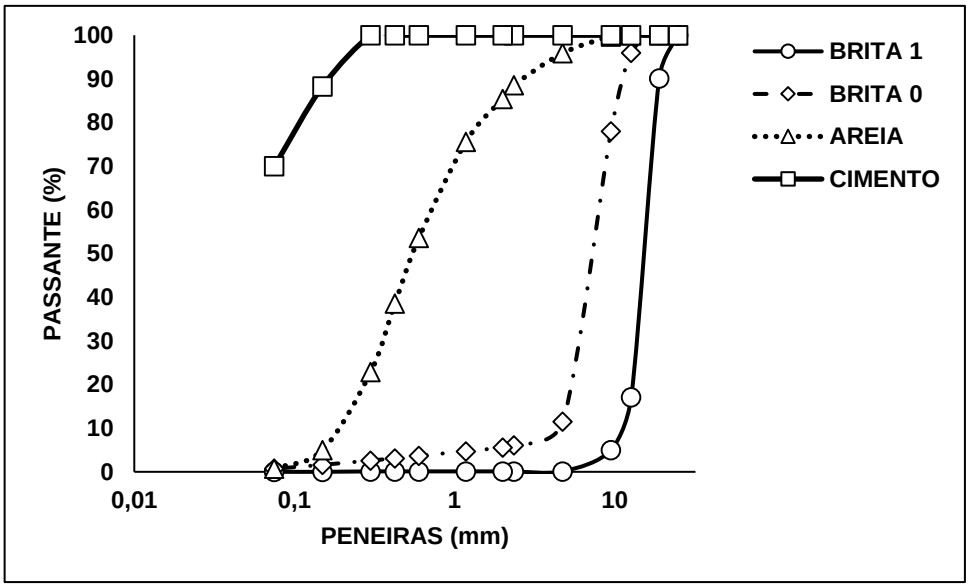
Fonte: Adaptado de DNER 037/97.

Utilizando os dados da Tabela 8 como referência para aprovar qualitativamente o lote de agregados miúdos naturais, na análise granulométrica da areia natural, em peneiras de 0,15mm e 0,3mm, os percentuais passantes foram de 5% e 22,9%, respectivamente. Nas peneiras 1,18mm, 2,36mm, 4,75mm e 9,5mm os percentuais passantes foram de 75,6%, 88,6%, 95,9% e 99,7%, respectivamente. Com isso, pode-se constatar que esses percentuais se encontram dentro dos respectivos intervalos que constam na norma DNER 038/97 expostos na Tabela 8.

Baseando-se nos dados da norma DNER 037/97 (Tabela 9), para a brita zero natural, na peneira 4,75mm, obteve-se um percentual passante de 11,5%; na 9,5mm, 99,7% e nas peneiras 12,7mm, 19mm e 25mm o material passante foi de valores percentuais próximos da totalidade do material. Logo, pode-se inferir que os resultados demonstrados na Figura 28 se assemelham com os intervalos de materiais retidos/acumulados referenciados na Tabela 9.

De acordo com a norma DNER 037/97, para a brita 1 natural, na peneira 4,75mm, o percentual de material passante foi de 0,1%. Na peneira 9,5mm obteve-se um percentual passante de 5% e nas peneiras 12,7mm, 19mm e 25mm o material passante foi de 17,1%, 90,1% e 100%, respectivamente. Diante desses valores, pode-se observar que os dados ilustrados na Figura 27, para a brita 1, encontram-se compatíveis com os valores normativo de materiais retidos/acumulados referenciados na Tabela 9.

Figura 27 - Curva granulométrica dos agregados naturais.



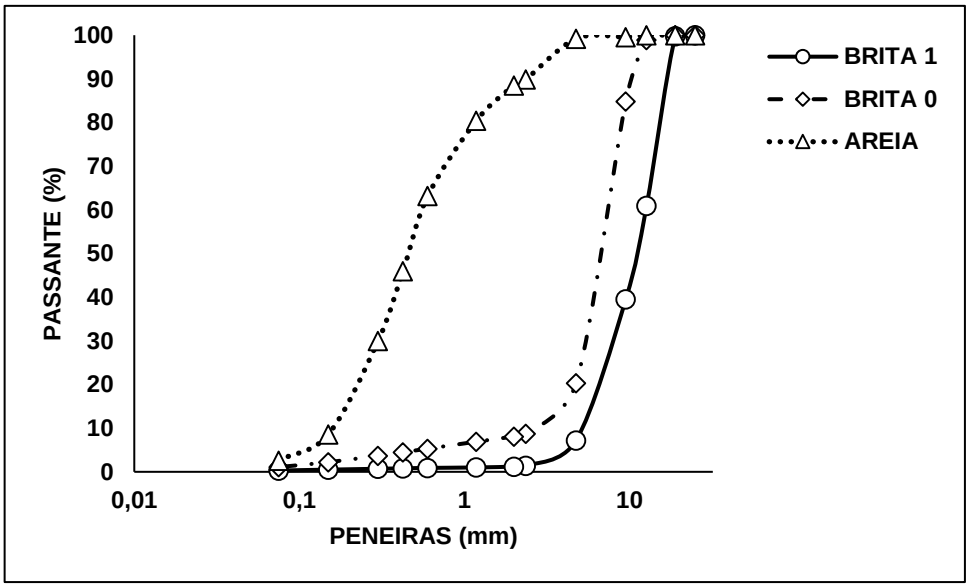
Fonte: Autoria própria.

Na análise granulométrica do material reciclado, para a areia RCD nas peneiras 0,075mm, 0,15mm e 0,3mm os percentuais passantes foram de 2,6%, 8,6% e 30%, respectivamente. Nas peneiras 1,18mm, 2,36mm, 4,75mm e 9,5mm os percentuais passantes foram de 80,4%, 89,9%, 99,2% e 99,6%, respectivamente. Nas demais peneiras da série normal o percentual passante foi da totalidade restante da amostra. Portanto, com base nos dados indicados na Figura 28, comparados aos valores normativos indicados na Tabela 8, a areia possui percentuais de materiais passantes semelhantes aos que são exigidos pela norma DNER 038/97.

Para a brita zero RCD, na peneira 4,75mm obteve-se um percentual passante de 20,3%; na 9,5mm, 84,8%, na peneira 12,7mm, 99,8% e nas peneiras 19mm e 25mm o material passante foi de percentuais restantes da amostra. Dessa maneira, os valores retidos/acumulados conforme a interpretação da Figura 28 estão condizentes com os percentuais normativos indicados na Tabela 9.

Para a brita 1 RCD, na peneira 2,36 o percentual de material passante foi de 1,4%; na peneira 4,75mm, 5,2% e nas peneiras 12,7mm, 19mm e 25mm o material passante foi de 60,9%, 99,8% e 100%, respectivamente. Assim sendo, os valores acumulados/retidos nas peneiras que são interpretados pela Figura 28 estão de acordo com os percentuais normativos da Tabela 9.

Figura 28 - Curva granulométrica dos agregados de RCD.

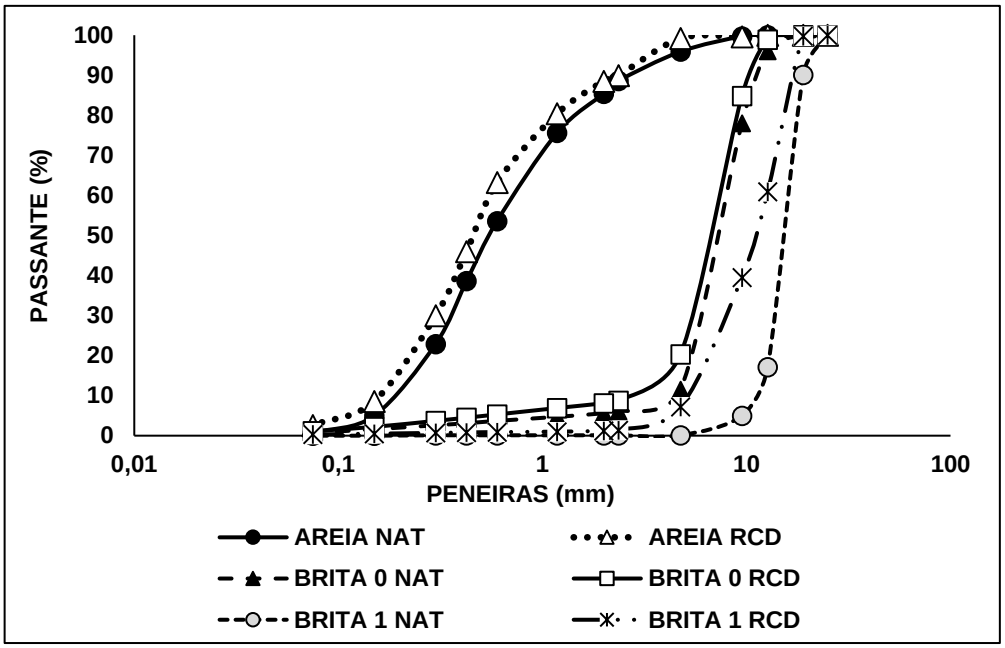


Fonte: Autoria própria.

Com a representação de curvas granulométricas representadas em um único gráfico (Figura 29), tornou-se possível realizar um comparativo com relação a granulometria dos agregados conforme classificação de tamanho dos grãos. Para tanto, conforme é demonstrado na Figura 29, a areia, brita zero e brita 1 do RCD têm maiores percentuais passantes quando comparado com a areia, brita zero e brita 1 natural. Tal ocorrência deve-se ao motivo de que os agregados do RCD têm maiores facilidades de desfragmentação durante o transporte ou aplicação de cargas, possuindo resistências inferiores quando comparados aos agregados naturais, e proporcionando uma maior quantidade de materiais finos no lote de agregados.

Outra possível interferência que torna possível uma maior quantidade passante de materiais RCD nas peneiras é o fato de que quando se agita o conjunto de peneiras (principalmente manualmente) é provável que ocorra a quebra de grãos nesse processo, sendo os grãos de RCD mais susceptíveis ao desgaste. Essa justificativa pode ser referenciada com o ensaio de abrasão Los Angeles, o qual indica maiores percentuais de desgaste dos agregados RCD quando comparados com os naturais.

Figura 29 - Resumo de curvas granulométricas dos agregados naturais e RCD.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Análise do módulo de finura

Com ênfase na análise do Módulo de Finura dos agregados naturais, o ensaio apresentou resultados de 3,66; 6,94 e 8,17 para a areia, brita zero e brita 1, respectivamente. No entanto, para os agregados de RCD, os resultados do Módulo de Finura foram 3,39; 6,77 e 7,20, respectivamente. Diante desses resultados, Carneiro (2009) reporta que a areia pode ser classificada em fina (MF < 2,0), média (3,0 ≥ MF ≥ 2,0) e grossa (MF > 3). Desse modo, pela definição de Carneiro (2009), a areia natural e a reciclada se enquadram como areia grossa.

Com relação a dimensão máxima dos agregados, os naturais resultaram em 12,75mm e 25mm com as britas zero e 1, podendo ser a brita 1 enquadrada como brita 2 pelo fato da dimensão máxima do agregado possuir dimensões relativamente grandes. Entretanto, a areia natural manteve dimensão máxima do agregado o valor de 4,75 e os agregados de RCD apresentaram diâmetro máximo menor quando comparado aos agregados naturais, possuindo diâmetros de 19mm para as britas zero e 4,75mm para a areia.

4.1.3 Ensaios de índice de forma e abrasão Los Angeles

No ensaio de índice de forma com os agregados naturais, a brita que manteve graduação enquadrada na faixa C do DNIT foi a brita 1, com material passante por crivos redutores resultando em um índice de forma de 0,752. Para a brita zero, que se enquadrou na faixa D, obteve-se um índice de forma de 0,380. Da mesma forma, na amostra de agregados reciclados, a brita que manteve graduação enquadrada na faixa C do DNIT também foi a brita 1, com material passante por crivos redutores e índice de forma de 0,844, e 0,825 para a brita zero faixa D. Diante dos resultados obtidos pode-se inferir que ambas as britas 1 e a brita zero do RCD apresentaram valores satisfatórios, uma vez que todos os valores superaram os limites de 0,5. No entanto, a brita zero natural apresentou um valor inferior a 0,5 e esse material do ponto de vista qualitativo apresenta um elevado potencial de quebra para uso em obras de pavimentação.

Com a finalidade de investigar o desgaste do material agregado quando expostos as intempéries ou ação de algum agente físico externo foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles. O ensaio apresentou resultados de desgastes dos agregados reciclados em percentuais de 37% para a brita zero e de 49% para a brita 1. Contudo, para os resultados de abrasão Los Angeles dos agregados naturais a brita zero indicou um desgaste de 69% e a brita 1 22%. É oportuno destacar que a brita zero natural apresentou um valor superior ao recomendado por norma (50%) o que faz ligação direta com a fragilidade dada em função do formato de suas partículas, conforme visto nas análises do índice de forma.

4.1.4 Ensaios de massa específica, absorção e densidade aparente

Nos ensaios de massa específica utilizou-se os frascos de Le Chatelier e Chapman para identificar a massa específica do fíler (natural e RCD) e da areia (natural e RCD), respectivamente. A média de duas amostras da massa específica real do fíler natural foi de 2,82 g/cm³ e da massa específica da areia natural foi de 2,63 g/cm³. Todavia, as médias de duas amostras analisadas da massa específica real do fíler RCD foi de 2,99 g/cm³ e da massa específica da areia RCD foi de 2,54 g/cm³.

Com a realização dos ensaios de absorção e densidade aparente, para o material natural a brita zero indicou valor de densidade igual a 2,67 e absorção de 0,14%. A brita 1 indicou densidade de 2,66 e absorção de 0%. Com relação aos materiais de RCD, a densidade e absorção da brita zero foram, respectivamente, 2,10 e 8%, e a densidade e absorção da brita 1 foram 2,36 e 2%. Diante desses resultados, percebe-se que quando comparado os agregados reciclados, com o natural, existe uma maior absorção de água e, consequentemente, menor densidade por parte do material reciclado. Essas análises justificam-se pela existência de uma matriz dos agregados reciclados menos densa, com maior índice de poros e propensa a desfragmentação dos grãos estando essas afirmações em conformidade com as análises dos ensaios microscópico dos grãos de fíler RCD.

Como forma de sintetizar os resultados obtidos para a caracterização dos agregados empregados nesse estudo a Tabela 10 apresenta um quadro resumo.

Tabela 10 - Principais resultados da caracterização física dos agregados.

Material	Índice de forma	Massa específica	Absorção	Densidade	Abrasão Los Angeles
Fíler NAT.	-	2,82	-	-	-
Areia NAT.	-	2,63	-	-	-
Brita 0 NAT.	0,380	-	0,14%	2,67	26%
Brita 1 NAT.	0,752	-	0%	2,66	22%
Fíler RCD	-	2,99	-	-	-
Areia RCD	-	2,54	-	-	-
Brita 0 RCD	0,825	-	8%	2,10	37%
Brita 1 RCD	0,844	-	2%	2,36	49%

4.2 Resultados da caracterização mineralógica dos agregados

4.2.1 Ensaio de MEV

Para uma melhor investigação de parâmetros que interferem diretamente nas propriedades do concreto asfáltico, foi realizada uma análise ao formato dos grãos cristalinos de uma pequena amostra de fíler RCD com o auxílio do ensaio de MEV

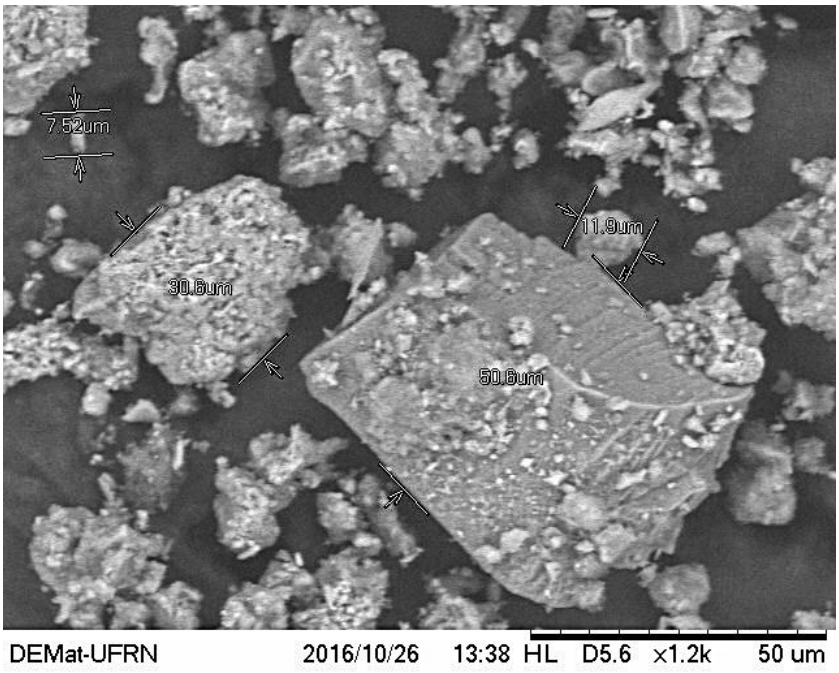
observando as seguintes características: pouca uniformidade no tamanho dos grãos (medidas em micrômetros na Figura 30); grãos com formatos e angulações arredondadas, bem como achatadas e pouco alongadas (Figura 31); rugosidade na superfície do grãos e material aparentemente poroso.

Tais análises encontram-se em conformidade com os estudos de Costa Filho (2017), pois, na sua pesquisa, foi utilizado material agregado de natureza semelhante ao utilizado nessa pesquisa apresentando superfície áspera e porosa. Já nas análises do ensaio de MEV de Ferreira (2017), o qual utilizou material de mesma natureza (RCD), é possível justificar a alta absorção pelos agregados por consequência da alta porosidade do material pulverulento conforme micrografia dos seus ensaios.

Para tanto, essa porosidade dos materiais finos também interfere em uma projeção de uma matriz de grãos cristalinos com alto índice de porosidade e tipo de material de baixa resistência. Com isso, possivelmente gera-se uma maior fragilidade de rompimento dos grãos e maior absorção quando comparados aos agregados naturais.

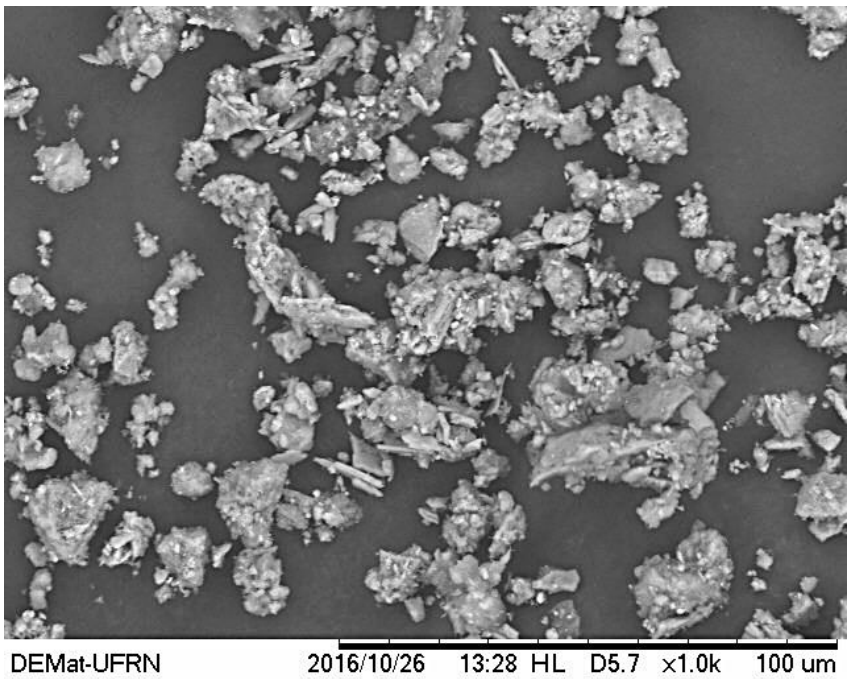
Em conformidade com as análises de MEV de Pederneiras (2017) para o material RCD semelhante, percebe-se que a variação de tamanho, formatos irregulares e superfície rugosa dos grãos proporciona-se menores rolamentos quando aplicada determinada carga sobre o material, o que justifica um melhor arranjo estrutural granulométrico e, consequentemente, maior autonomia de aderência superficial.

Figura 30 - Varredura de grãos cristalinos com aproximação 1200X.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Varredura de grãos cristalinos com aproximação 1000X.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 EDS

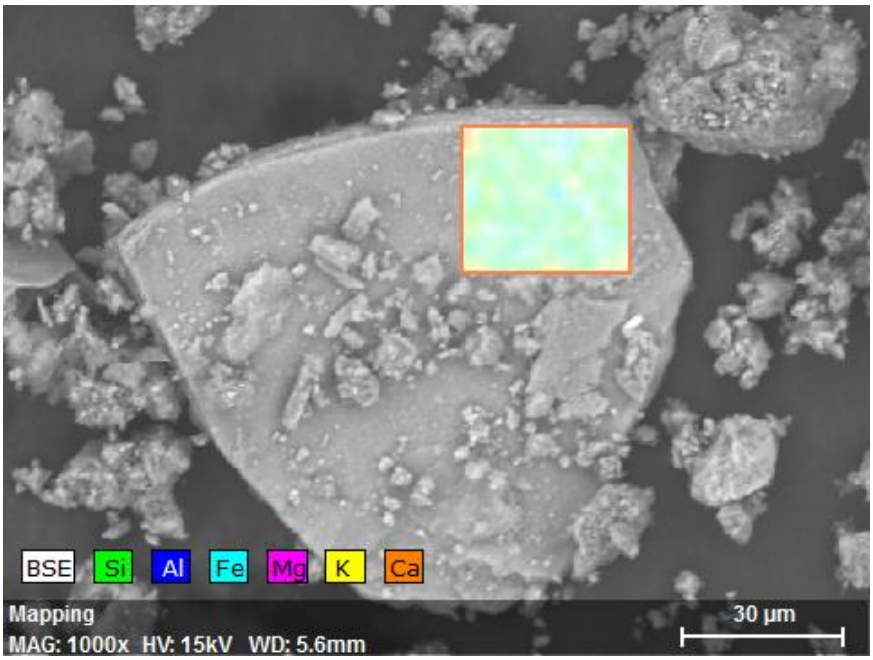
Conforme procedimentos de análise do equipamento EDS acoplado junto ao MEV, alguns elementos químicos que podem estar presentes na amostra de fíler RCD foram identificados (Figura 32). Na Tabela 11 encontram-se indicados quais os possíveis elementos químicos presentes e os seus respectivos percentuais em massa. Para tanto, foi possível constatar que os dados informados pelo equipamento EDS corroboram em valores semelhantes com os compostos identificados no ensaio de FRX, tanto quanto em valores semelhantes dos percentuais em massa de cada composto químico (Tabela 11).

Percebe-se com os ensaios de EDS e FRX maiores percentuais de ferro e alumínio na amostra caracterizando-se, por predominância, origens de restos de materiais cerâmicos no lote de agregados. Em posse dessa informação, justifica-se, possivelmente, o alto desgaste do material RCD quando realizado o ensaio de abrasão Los Angeles na fase de caracterização dos agregados. Pois, os materiais cerâmicos oferecem baixa resistência quando sofrem solicitações de esforços.

Ferreira (2017) realizou análises por FRX em materiais de mesma origem e mesma natureza (RCD) identificando em suas amostras compostos químicos semelhantes e valores percentuais em massa semelhantes. Essa proposição possibilita identificar que materiais de origem cerâmica são de grande predominância em lotes de agregados RCD na localidade a qual o lote utilizado nessa pesquisa foi coletado.

Costa Filho (2017) com estudos semelhantes e por meio de equipamento EDS realizou análises em amostras originadas do beneficiamento de Scheelita (material proveniente de extração natural). Em seus resultados constatou-se grande presença de cálcio e silício, predominantemente, como também a presença do metal de transição tungstênio (material facilmente encontrado nas localidades onde foi extraído). A mineralogia desses materiais, possivelmente, pode ser oriunda de rochas metamórficas, oferecendo resistência elevadas às ações de agentes físicos externos, como também podem ser utilizados na fabricação de blocos ou outros tipos de materiais facilmente utilizados em obras de construção civil.

Figura 32 - EDS identificando os possíveis compostos no grão cristalino.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Análise de EDS do fíler RCD.

ELEMENTOS	% EM MASSA
Alumínio	17,86%
Cálcio	2,25%
Magnésio	11,63%
Silício	31,41%
Titânio	3,63%
Potássio	9,89%
Ferro	23,32%
TOTAL	**100%**

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Análises mineralógica por DRX

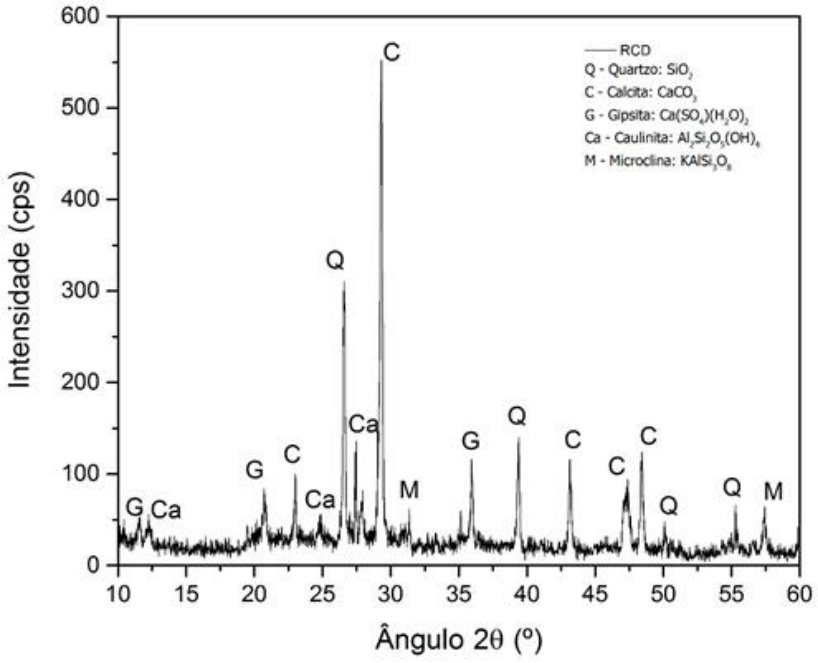
No ensaio que identificou as características mineralógicas do material do RCD analisou-se por meio do DRX a incidência de raios com angulação 2θ variando entre 10º e 60º (Figura 33). Os resultados do ensaio de DRX são condizentes com os de

FRX e EDS, os quais identificam predominantemente a presença dos compostos químicos de sílica, alumínio e cálcio caracterizando possivelmente materiais de origem cerâmica e pastas de cimento hidratada e rochas desfragmentadas, como por exemplo o quartzo.

A análise da composição mineralógica do RCD se torna complexa pelo fato da grande variedade das fases cristalinas dos seus componentes. De acordo com Ângulo (2005), a microcline é um mineral normalmente encontrado em feldspato proveniente de rochas naturais, a indicação de caulinita no difratograma (Figura 33) pode ser induzida pela presença de materiais cerâmicos (argila). Entretanto, Pederneiras (2017) reporta que materiais agregados de origem natural possivelmente mantém em sua composição quartzo e albita.

Em estudos de Costa Filho (2017) com análises semelhantes em materiais agregados de origem natural (Scheelita), picos de alta intensidade com compostos semelhantes foram os de calcita e quartzo, pois a calcita está presente no calcário cristalino que pode ser encontrado facilmente em jazidas bem como o quartzo.

Figura 33 - Difratograma da fração do fíler RCD da areia.



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Análise química por FRX

As análises químicas do fíler RCD por meio do ensaio de Fluorescência de Raios X, com base na tabela 12, apresentaram óxidos com teores (em massa) mais elevados nos compostos de Dióxido de Silício (SiO_2), Óxido de Ferro (Fe_2O_3) e Óxido de Alumínio (Al_2O_3). O ensaio de FRX está condizente com o ensaio de EDS por identificar percentuais (em massa) elevados de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3 quando comparado aos demais óxidos (tabela 12). Portanto, o alto teor de ferro, alumínio e sílica reforça a hipótese de que existe material de origem predominantemente cerâmica na amostra analisada.

Tabela 12 - Análises por FRX do fíler RCD.

FINOS	% DE ÓXIDOS (EM MASSA)									
	SiO_2	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**K_2O**	**TiO_2**	**CaO**	**MgO**	**ZrO_2**	**SrO**	**MnO**
	39,3%	29,7%	20%	3,7%	2,1%	1,4%	1,31%	1,14%	0,7%	0,2%

De acordo com Ferreira (2017), em realização de ensaio e uso de material semelhante, os percentuais de óxidos de ferro, alumínio e sílica foram em termos de proporções maiores dos que os demais, de forma que os resultados se tornam semelhantes aos apresentados na Tabela 12. Logo, pode-se elencar que as amostras podem ser caracterizadas como sílico-aluminosas por meio de uma análise química. Outra informação importante é que o alto teor de sílica presente no material indica tendências de natureza quartzosa a qual é facilmente encontrada nas reservas naturais. Outros estudos realizados com materiais semelhantes foi o de Pederneiras (2017), onde em seus resultados de ensaio por FRX os óxidos indicaram percentuais similares de sílica, ferro e alumínio quando comparado com o da Tabela 12 em termos de proporção. É percebido ainda que a presença de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3, além de justificar-se por presença de materiais cerâmicos entre os agregados, esses compostos podem ser também originados em partículas de pasta de cimento endurecida, agregados naturais, rochas naturais e a cerâmica vermelha, segundo Ângulo (2005).

Costa Filho (2017) também realizou análises semelhantes com materiais de origem integralmente natural (resíduo proveniente do beneficiamento de Scheelita). Em seus ensaios de FRX os maiores percentuais de óxidos foram os de cálcio (chegando a quase cinquenta por cento da amostra analisada), bem como grande presença de sílica, indicando possíveis presença de quartzo.

4.3 Resultados da dosagem Marshall

Em conformidade com a norma de dosagem Marshall, foram confeccionados 48 corpos de provas, com diferentes concepções de misturas dos agregados (naturais e reciclados), e 4 dosagens compondo em cada delas quatro teores de ligantes. Feito esse procedimento e com a realização de alguns ensaios laboratoriais, obteve-se os teores de ligante ótimo em cada dosagem de acordo com os seguintes parâmetros:

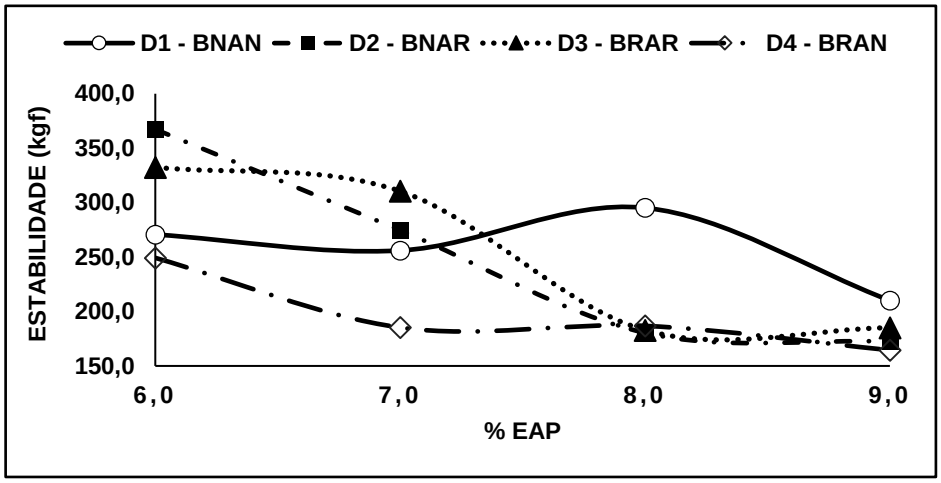
4.3.1 Análise da Estabilidade *versus* % EAP

Para os parâmetros estabelecidos de Estabilidade *versus* % EAP (Figura 34), foi possível identificar maiores estabilidades dos CP's nas misturas D2 – BNAR, a qual representa a mistura de agregados entre brita natural e areia reciclada, utilizando a dosagem com teor de EAP em 6% do total de material da mistura.

Por meio da obtenção do gráfico constatou-se também que, na maioria das dosagens, quando é aumentado o teor de ligante na mistura, percebe-se uma diminuição da estabilidade. Pode-se considerar exceção a da dosagem D1 – BNAN (agregados naturais) que em teores de 8% resultou em uma estabilidade alta quando comparada as demais dosagens.

Comparando a estabilidade do CP de concreto asfáltico utilizando o PMF com a do CP que faz uso de CAP como ligante asfáltico e agregados integralmente naturais é identificada grandes discrepâncias nos resultados de estabilidade Marshall. De acordo com estudos de Costa Filho (2017), em teores de CAP variando entre 5% e 5,5% a estabilidade do CP chega à faixa de 600 a 800 kgf, o que torna mais resistente o pavimento rodoviário quando sujeito a ações de agentes físicos externos (altas temperaturas, cargas elevadas, entre outros fatores).

Figura 34 - Estabilidade *versus* % EAP.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Análise do Volume de Vazios *versus* % EAP

Outro fator importante para a análise de resultados de misturas betuminosas é a identificação de volume de vazios (Vv) na mistura com maiores ou menores teores de ligante asfáltico. Dessa forma, nas misturas beutminosas do tipo Pré-Misturado à Frio torna-se possível prever o quanto o teor de emulsão na mistura interfere na estabilidade e fluência mecânica da camada de revestimento do pavimento, observando, como consequência, o aumento ou diminuição do volume de vazios.

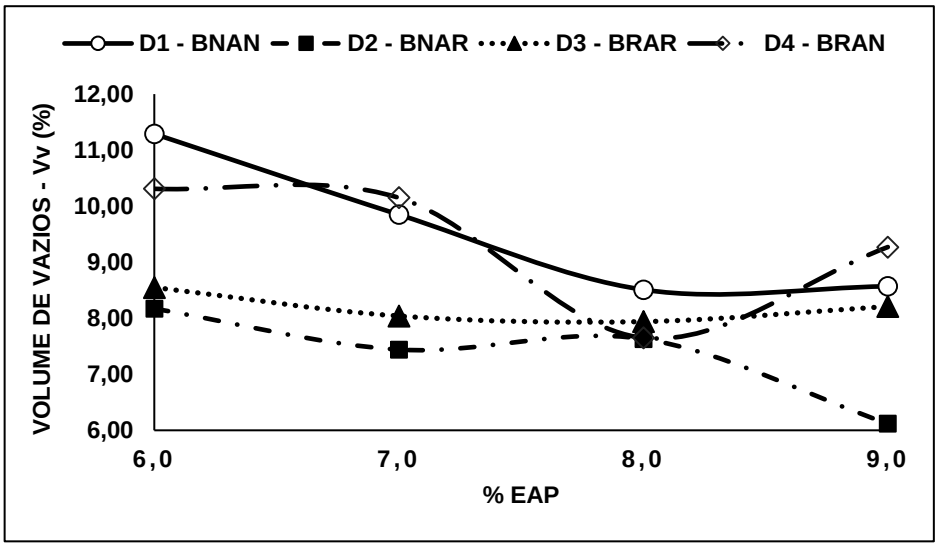
Na Figura 35, pode-se constatar por meio das curvas representativas que nas misturas que tiveram as concepções de agregados integralmente naturais, com o aumento do teor de emulsão asfáltica, gerou-se uma diminuição do índice de volume de vazios. Esse fato pode ser evidenciado pelo fato da emulsão, em seu estado fluído, preencher vazios internos à mistura com maior facilidade durante a compactação do material. Com base nesses possíveis comportamentos, fazendo um comparativo com a curva que representa a análise com os agregados integralmente naturais com os integralmente reciclados, para os reciclados percebe-se uma constância do Vv com o aumento do teor de EAP, pois presume-se que esse fato ocorre por motivo do agregado reciclado ser altamente poroso, e, consequentemente, ocorrer maiores absorções de emulsão por parte dos agregados gerando um maior consumo do ligante.

Vale salientar ainda que esses comportamentos encontram-se associados as análises do ensaio de caracterização física de densidade e absorção de água dos agregados. Pois, conforme apresentado na Tabela 10, os resultados de absorção dos agregados RCDs representam valores inferiores quando comparados aos agregados naturais; bem como os agregados RCD aprensentam menor densidade do que os naturais, implicando em uma matriz granular menos densa e com superfície porosa capaz de absorver líquidos fluídos conforme demonstra as imagens do ensaio de MEV.

Em estudos semelhantes, Costa Filho (2017) avaliou o mesmo comportamento da relação Vv *versus* % EAP, utilizando o CAP na mistura betuminosa. Apesar do concreto asfáltico nessa ocasião ter sido usinado à quente e oportunizar um menor índice de vazios devido as melhores resistências à esforços, os comportamentos das curvas gráficas foram semelhantes ao constatar que aumentando-se o teor de ligante asfáltico tem-se uma diminuição do volume de vazios.

Ainda em Costa Filho (2017), o autor reporta que é conveniente a existência de determinado percentual de Vv na mistura. Sendo assim, existirá a possiblidade de quando o pavimento for solicitado por cargas externas, esses vazios venham proporcionar um maior suporte a trabalhabilidade do pavimento asfáltico aliviando as tensões e preservando a sua durabilidade, uma vez que o mesmo tem comportamento flexível.

Figura 35 - Volume de Vazios (Vv) *versus* % EAP.



Fonte: Autoria própria.

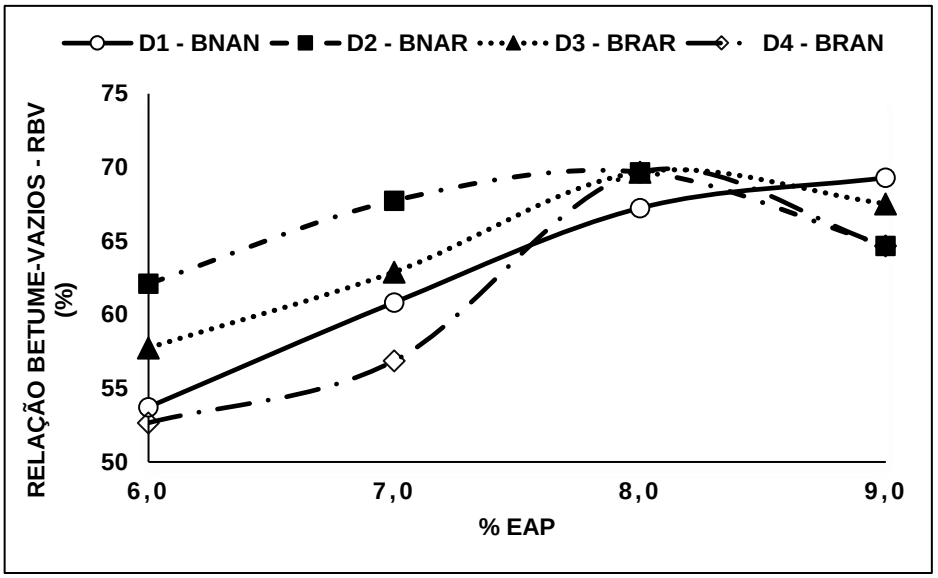
4.3.3 Análise da Relação Betume-Vazios *versus* % EAP

A partir da análise da Figura 36 foi possível interpretar que com o aumento do teor de EAP ocorreu com o aumento da relação betume-vazios (RBV). Pode-se considerar exceção na faixa de % de EAP entre 8% e 9% para as dosagens D2 – BNAR, D3 – BRAR e D4 – BRAN, pois houve uma leve diminuição do RBV com o aumento do teor de ligante presumindo-se uma compactação dos corpos de prova menos eficiente, como também a presença de partículas de agregados com tamanhos e angulações desfavoráveis.

Em análise a Figura 36, percebe-se também que os valores menores de RBV ocorreram em teores baixos de % EAP e os maiores valores de RBV se deram em teores mais elevados de % EAP. Em posse dessas informações e com base na análise dos resultados, pode-se inferir que nas condições de misturas investigadas com o PMF o valor de RBV ótimo deve manter-se com percentuais de EAP nem excessivamente baixos, nem excessivamente altos. Essa conclusão pode ser relacionada com os ensaios de estabilidade realizados, pois com altos teores de EAP na dosagem o pavimento poderá sofrer deformações permanentes causando perda de estabilidade (BERNUCI *et al.* 2006).

De acordo com Costa Filho, outro fator impactante com a baixa relação betume vazios é a facilidade de infiltração de água na camada de revestimento do pavimento. Nesse caso, o concreto asfáltico fica susceptível a desfragmentação pela influência da presença de água prejudicando, dessa forma, a durabilidade do pavimento asfáltico.

Figura 36 - Relação Betume-Vazios (RBV) *versus* % EAP.



Fonte: Autoria própria.

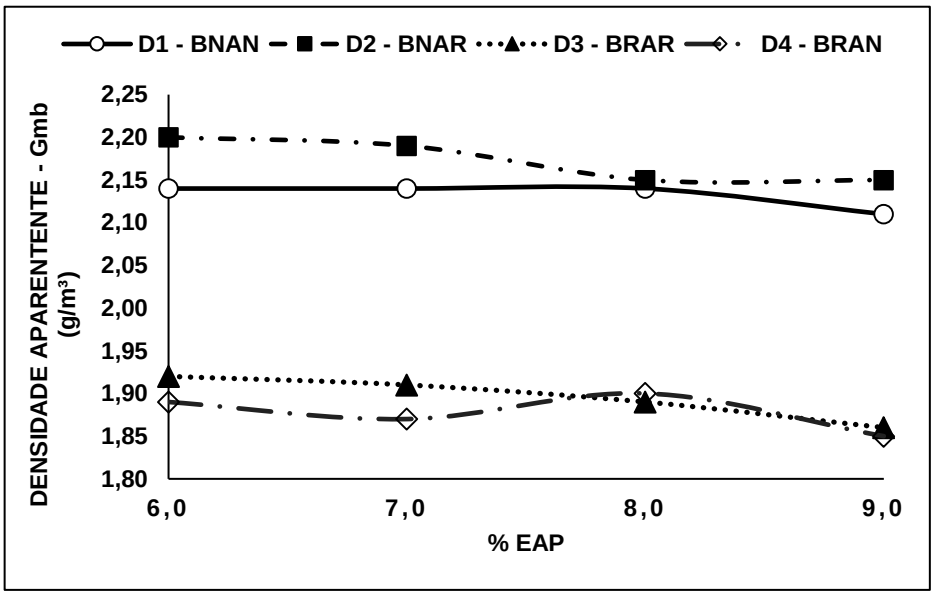
4.3.4 Análise da Densidade Aparente (Gmb) *versus* % EAP

Para a análise da Figura 37, tendo em vista os valores aproximados para a densidade aparente, foi possível constatar que com o aumento dos teores de % EAP os valores da densidade se mantiveram constantes com uma tendência a leves diminuições. De acordo com Costa Filho (2017), apesar dos valores serem aproximados, com o aumento de EAP na dosagem espera-se que a tendência das curvas do gráfico Gmb *versus* % EAP tenha tendências ao aumento da densidade com a elevação do ligante, o que pode ser justificado pelo gráfico RBV *versus* %EAP, pois nesse gráfico interpretou-se que o aumento de emulsão provoca um menor volume de vazios, o que consequentemente provocaria um concreto asfáltico com estrutura interna densa e compacta estruturalmente.

Outro fator que vale ser explanado é que em posse dos ensaios de caracterização dos agregados nos ensaios de densidade e absorção, tanto quanto no MEV, percebe-se que os agregados naturais possuem maior densidade e menor absorção, o que influencia em um concreto com Gmb mais elevado.

Pelo viés da angularidade dos agregados e compactação, as forma irregulares, pouco arredondadas e esparsas dos agregados são fatores cruciais para uma melhor compactação, bem como melhores resistências do concreto quando aplicado ao pavimento.

Figura 37 - Densidade Aparente (Gmb) *versus* % EAP.

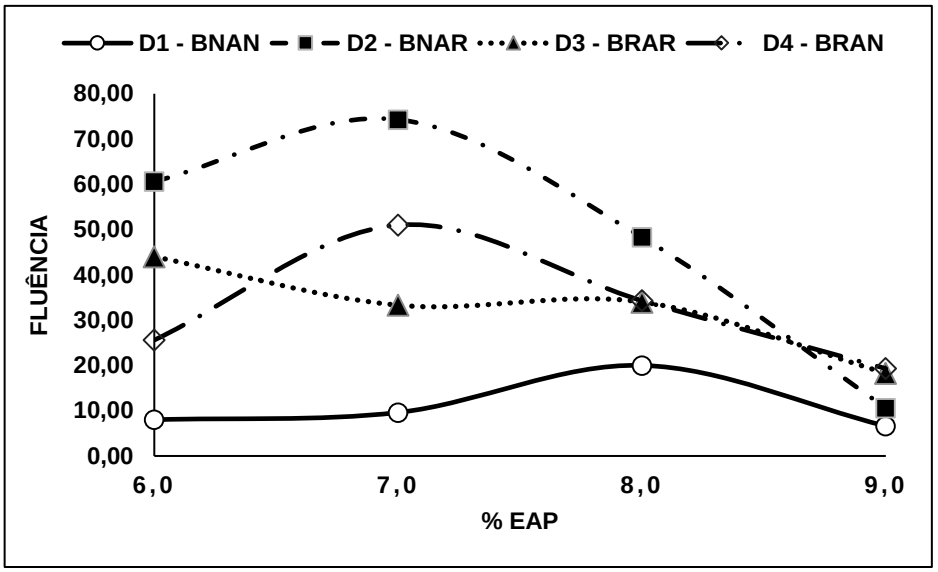


Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Análise da Fluência *versus* % EAP

Conforme é apresentado na Figura 38, os valores da fluência mantiveram-se menores quando o percentual de EAP foi de 9%. Para os valores mais elevados da fluência, constatou-se que nas % de EAP intermediárias, a fluência manteve-se em valores mais altos. Com isso, é possível interpretar que, de forma tendenciosa, diminui-se a fluência quando aumenta-se a % de EAP, obtendo, como consequência, um concreto asfáltico com maiores possibilidades de sofrer deformações permanentes.

Figura 38 - Fluência *versus* % EAP.



Fonte: Autoria própria.

4.3.6 Análise da Estabilidade *versus* Volume de Vazios

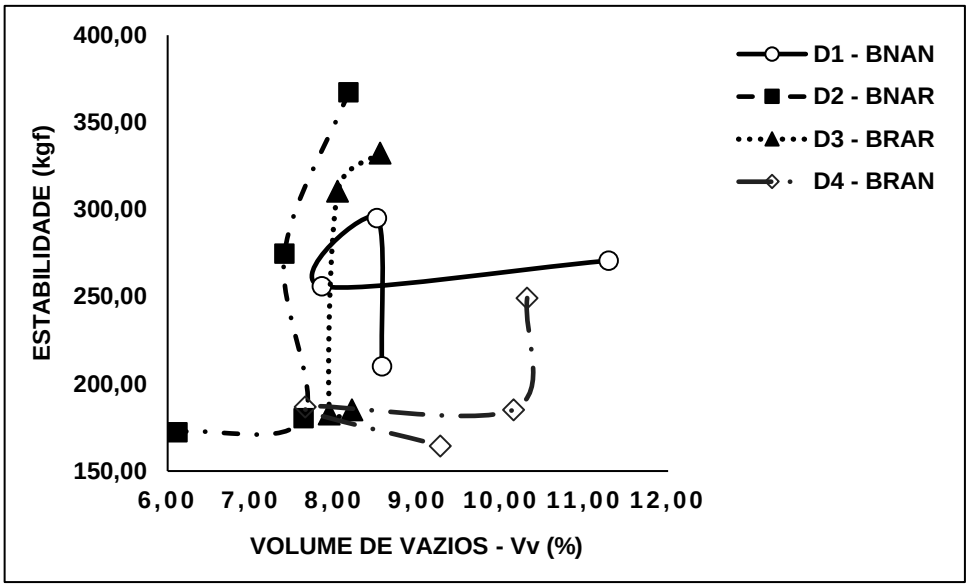
Analisando os parâmetros de índices de vazios com a estabilidade medida foi possível observar a diminuição da estabilidade (com semelhanças de comportamento tanto na concepção de misturas de agregados naturais tanto quanto nas misturas e RCD) quando tem-se a diminuição do volume de vazios. Essa análise justifica-se por meio da Figura 34 (Estabilidade *versus* % de EAP) que com o aumento do teor de emulsão na mistura obtem-se a diminuição da estabilidade do CP (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores de Estabilidade e Vv para a concepção de agregados naturais.

	D1 – BNAN			
% EAP	**6,0**	**7,0**	**8,0**	**9,0**
Vv (%)	11,29	7,85	8,51	8,57
ESTABILIDADE (kgf)	270,70	256,00	295,20	210,10

Logo, em posse dos resultados que apontaram a diminuição do volume de vazios (Vv) com a diminuição da estabilidade (Figura 39), esse fato pode está diretamente relacionado ao aumento do teor de emulsão na mistura, pois sendo esse um líquido fluído e viscoso, torna-se possível uma melhor compactação com um maior envolvimento dos agregados, diminuindo, consequentemente, o volume de vazios.

Figura 39 - Estabilidade *versus* Volume de Vazios (Vv).



Fonte: Autoria própria.

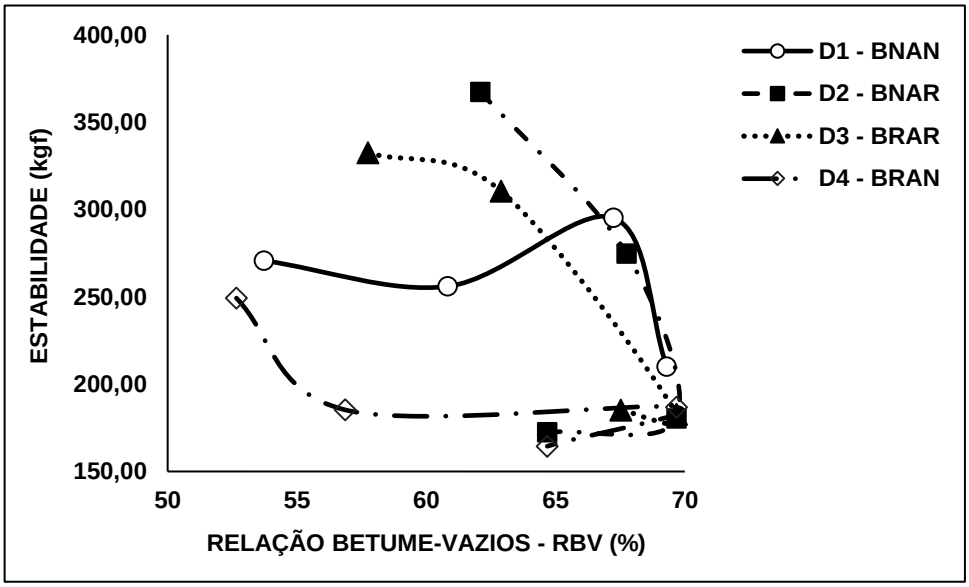
4.3.6 Análise da Estabilidade *versus* Relação Betume-Vazios (RBV)

Em outra análise comparativa de parâmetros volumétricos, tornou-se importante analisar o grau de influência entre a estabilidade do concreto asfáltico e a Relação Betume-Vazios (RBV). Conforme interpretação ilustrada por meio da Figura 40, nota-se que com aumento do percentual de RBV, ocorre a diminuição da estabilidade. Vale destacar ainda que entre as quatro concepções de mistura os comportamentos gráfico são semelhantes difenrindo-se, siginificatimente, na faixa de valores dos resultados de estabilidade, pois, conforme ensaios de caracterização física e mineralógica, os CPs que mantiveram presente os agregados graúdos naturais tiveram estabilidade superior quando comparado aos agregados graúdos com RCD.

Logo, para os resultados da interação estabilidade *versus* RBV, conforme foi explicitado em análises do gráfico Estabilidade *versus* Vv (Figura 39), é importante estimar previamente um teor de ligante ótimo para compor a mistura entre os agregados. Dentro desse contexto, quantidades excessivas de emulsão na mistura, mesmo reduzindo o índice de vazios, pode ocasionar deformações permanentes no concreto com maiores facilidades; no entanto, baixos teores de emulsão aumentam o índice de vazios e podem diminuir a durabilidade do pavimento com o

enfraquecimento da mistura e interferência direta nas propriedades de desempenho mecânico.

Figura 40 - Estabilidade *versus* Relação Betume-Vazios (RBV).

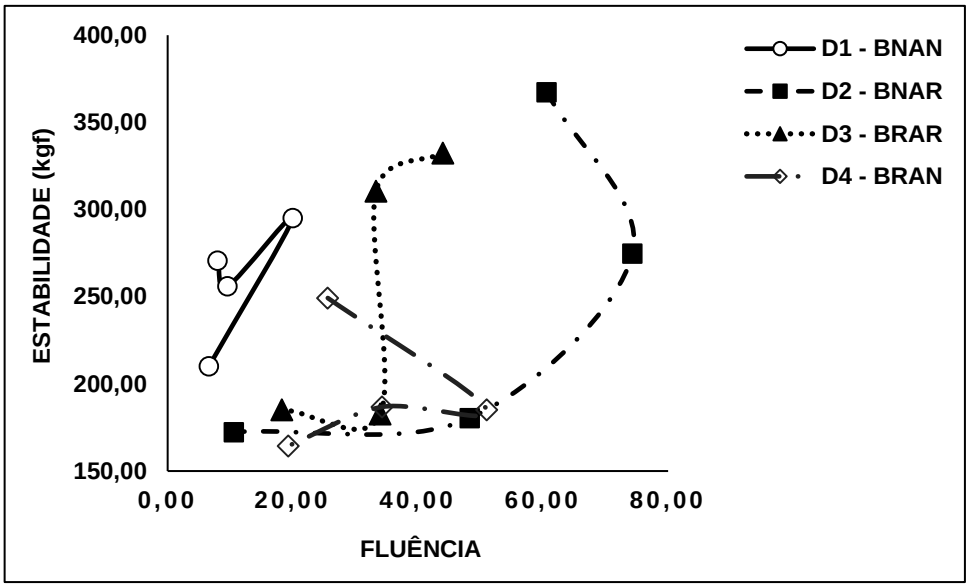


Fonte: Autoria própria.

4.3.7 Análise da Estabilidade *versus* Fluência

Realizando um comparativo entre a influência das propriedades de estabilidade e fluência, a Figura 41 apresenta os resultados referentes as quatro concepções dos agregados de modo que: quando aumenta-se os valores da estabilidade os valores da fluência também aumentam. Com isso, pode-se constatar que um concreto asfáltico com maior autonomia de resistência aos esforços solicitados terá maior capacidade de deformação sem perder a sua estabilidade ou chegar a romper.

Figura 41 - Estabilidade *versus* Fluência.



Fonte: Autoria própria.

4.3.8 Análise da Estabilidade *versus* Densidade Aparente (Gmb)

Com relação às análises de densidade aparente da mistura compactada com agregados naturais e RCD, observou-se variações próximas quando comparadas as quatro concepções de agregados e sem tedências a diminuição em dosangens altas de EAP (Tabela 14).

Tabela 14 - Valores de Estabilidade e GMB da dosagem D3 - BRAR.

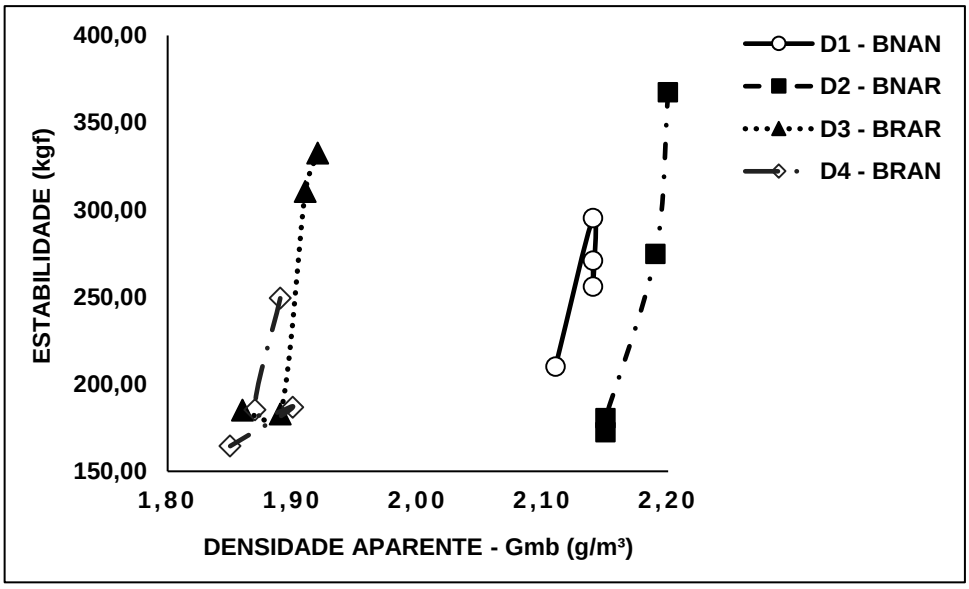
%EAP	D3 – BRAR			
	6,0	7,0	8,0	9,0
Gmb (g/m³)	1,92	1,91	1,89	1,86
ESTABILIDADE (kgf)	332,46	310,54	182,80	185,10

De forma tendenciosa, as curvas da Figura 42 demonstram o aumento da estabilidade com o aumento do Gmb. Essa análise pode ser corroborada com o fato de que um concreto asfáltico de matriz densa, com baixo volume de vazios e agregados de perfeita formação estrutural influi positivamente na resistência mecânica, e consequentemente na sua durabilidade.

Conforme os ensaios de caracterização física, os agregados oriundos do RCD quando comparados aos agregados naturais possuem absorção de água e desgaste com diferenças não discrepantes, indicando uma qualidade positiva do material. Para tanto, nos ensaios de caracterização mineralógica, apesar das imagens do MEV demonstrar superfícicies porosas do lote de agregados do RCD, os ensaios de EDS e FRX identicaram teores significativos de ferro e alumina em uma amostra, sendo esses dois compostos de alta densidade conforme indicação da tabela periódica dos elementos químicos.

Em resumo, tanto em uma análise de caracterização física quanto em uma análise mineralógica, os compostos que proporcionem menor volume de vazios; os agregados que possuam formas irregulares e granulometria adequada; e as misturas que sejam melhor compactadas, proporcionarão maiores densidade aparente e consequentemente maior estabilidade com comportamentos semelhantes ao da Figura 42.

Figura 42 - Estabilidade *versus* Densidade Aparente (Gmb).

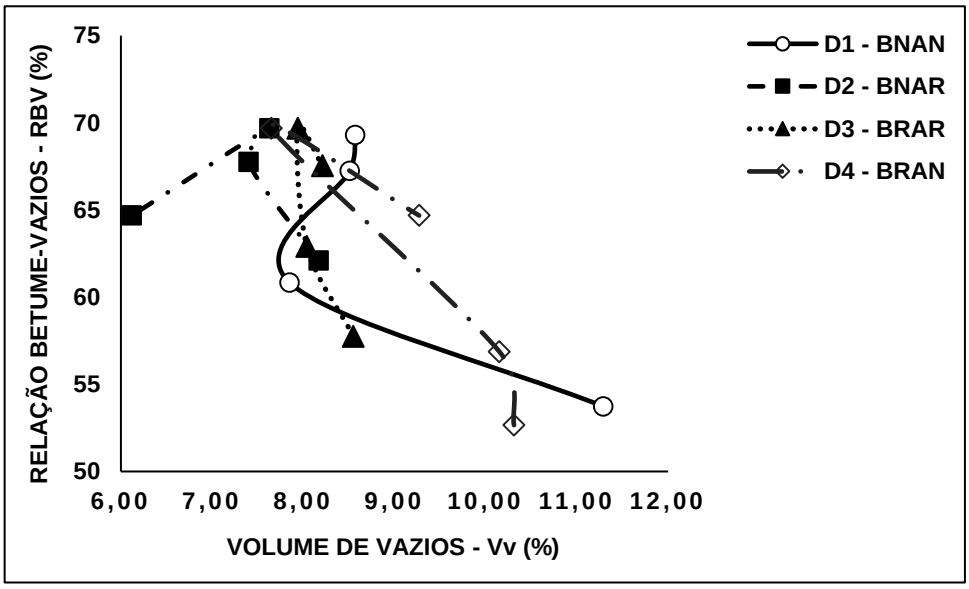


Fonte: Autoria própria.

4.3.9 Análise da Relação Betume-Vazios (RBV) *versus* Volume de Vazios (Vv)

Na Figura 43 tem-se a reprensentação da interação dos resultados entre RBV com o Vv. Para tanto, a Figura demonstra um comportamento da seguinte forma: diminuindo-se a relação betume-vazios, aumenta-se o volume de vazios. Esse acontecimento é justifcado conforme os gráficos de Vv *versus* % EAP (Figura 35). Com referência a Figura 35, uma maior quantidade de ligante na mistura provoca um menor volume de vazios, o que nem sempre oportunizará uma boa estabilidade (Figura 40 - Estabilidade *versus* RBV). Para que se obtenha altas estabilidades do concreto asfáltico é necessário que seja feita uma dosagem de teor de emulsão ideal para não comprometer as propriedades físicas do pavimento.

Figura 43 - Relação Betume Vazios (RBV) *versus* Volume de vazios (Vv).



Fonte: Autoria própria.

4.3.10 Análise dos valores máximos de Estabilidade *versus* % EAP

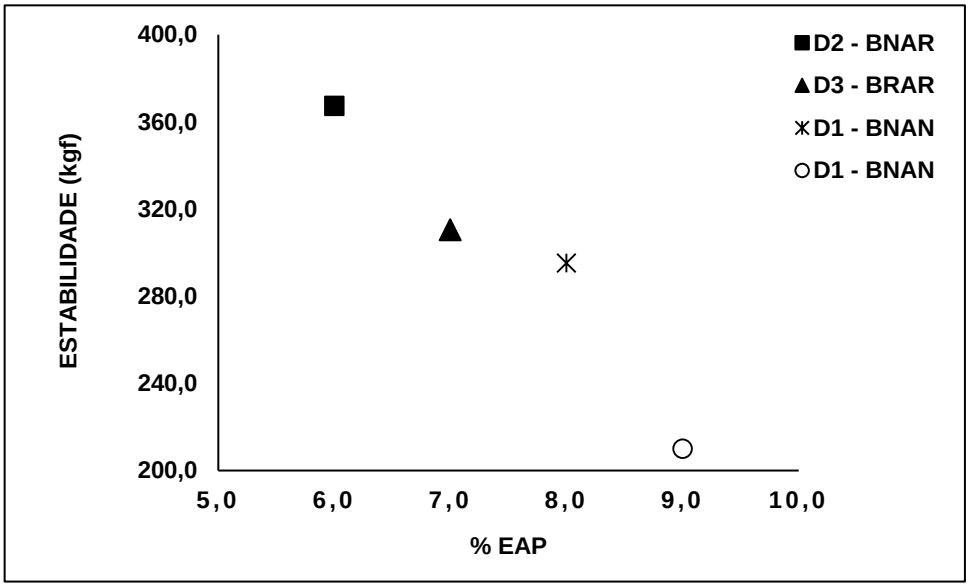
Com o propósito de identificar os maiores valores de Estabilidade *versus* % de EAP, a Figura 44 indica os maiores valores de estabilidade entre as quatro concepções de dosagens. Vale destacar que as dosagens que mantiveram os agregados integralmente naturais tiveram maiores valores de estabilidade com os

percentuais de EAP entre 8% e 9%. Entretanto, o maior valor de estabilidade foi com o teor de emulsão em 6% e com a dosagem D2 - BNAR (Britra natural e areia reciclada). E, por fim da análise, a dosagem que manteve na mistura os agregados integralmente de RCD obteve um valor máximo de estabilidade com teor de EAP em torno de 7%.

Diante desses resultados pode-se concluir que a brita natural tem destaque no parâmetro estabilidade em maiores teores de ligante pelo motivo de ser um agregado de matriz granulométrica densa, com menor porosidade e maior resistência ao desgaste físico. Essas jutificativas são confirmadas por alguns ensaios de caracterização física e mineralógica.

Outra análise importante diante desses resultados gráficos é que na dosagem D3 - BRAR (agregados reciclados) a estabilidade em teor de 7% de ligante foi máxima. Uma possível causa desse acontecimento é que durante a compactação do corpo de prova os materiais tiveram um melhor arranjo de empacotamento dos grãos, e também uma quantidade de ligante ideal pode contribuir para esses fatores descritos.

Figura 44 – Pontos máximos de Estabilidade *versus* % EAP.

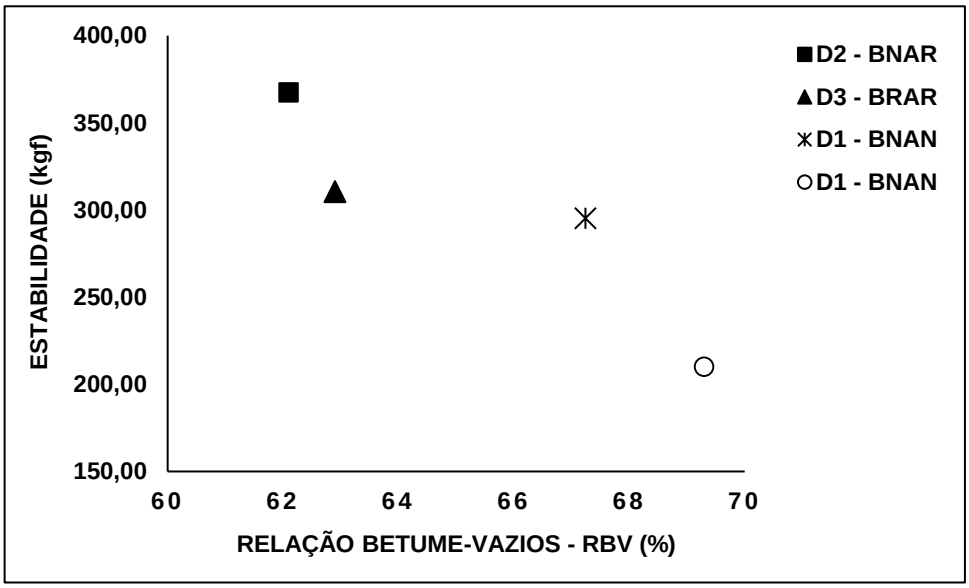


Fonte: Autoria própria.

4.3.11 Análise dos valores máximos de Estabilidade *versus* RBV

Com o gráfico de pontos máximos da estabilidade *versus* RBV (Figura 45) foi possível constatar as seguintes análises: com o aumento da relação betume-vazios tem-se a diminuição da estabilidade e a diminuição do volume de vazios. Porém, dando ênfase as concepções de agregados das dosagens, as misturas que mantiveram presente a brita natural obteveram-se os maiores valores de estabilidade diferindo-se apenas a dosagem D3 - BRAR. A dosagem que manteve agregados integralmentes reciclados, e, em prováveis condições favoráveis de compactação quando comparado com os demais CPs confeccionados, a D3 - BRAR, atingiu o maior valor de estabilidade.

Figura 45 - Pontos máximos de Estabilidade *versus* RBV.



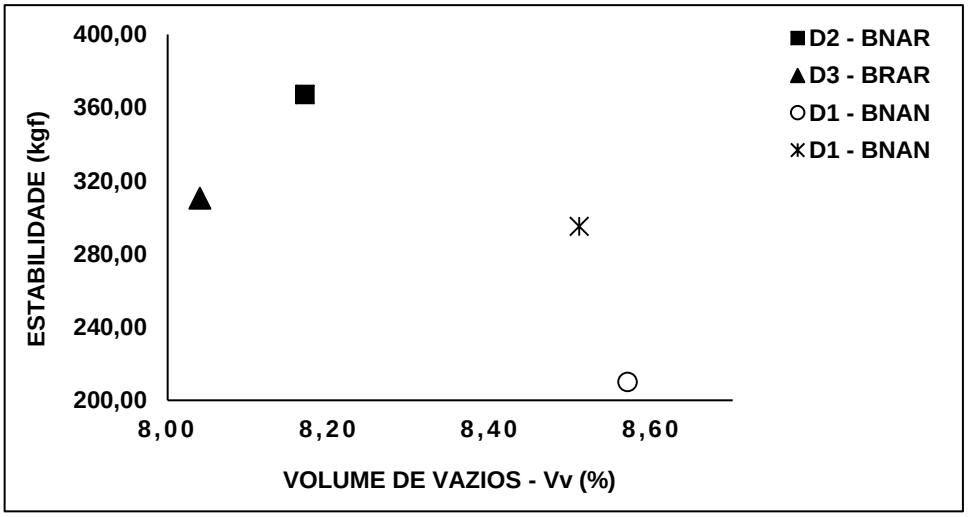
Fonte: Autoria própria.

4.3.12 Análise dos valores máximos de Estabilidade *Versus* Volume de Vazios

Nos pontos de valores máximos de Estabilidade *versus* Vv indicados nos gráficos da Figura 46, é possível inferir que com aumento do volume de vazios tem-se a diminuição da estabilidade. Logo, é possível afirmar que nos quatro diferentes teores de EAP analisados os agregados naturais predominantemente obtiveram os

maiores valores de estabilidade, com excessão da dosagem D3 - BRAR que de forma excepcional atingiu o maior valor de estabilidade com o teor de 7%. Tomando-se como referência as análises gráficas anteriores, esse acontecimento deve-se aos procedimentos de confecção de corpos de prova de maneira mais favorável em relaçao aos demais, ou mesmo por ser uma quantidade de teor de ligante ótimo.

Figura 46 - Pontos máximos de Estabilidade *versus* Vv.



Fonte: Autoria própria.

4.3.13 Traços otimizados para trecho experimental

Viabilizando a possibilidade de uma futura análise em escala de campo e a execução de um trecho experimental para a continuidade desta pesquisa, os resultados dos gráficos que avaliaram a influência com parâmetros Marshall apontaram os melhores traços (otimizados) das dosagens, para a produção de concreto asfáltico com o PMF, constam na tabela 15 a seguir.

Tabela 15 - Dosagens otimizadas para trecho experimental.

	Dosagem 1 – BNAN	**Dosagem 2 – BNAR**	**Dosagem 3 - BRAR**	**Dosagem 4 - BRAN**
% Emulsão	7,75%	7,25%	7,75%	7,50%
% B1	33,21%	33,39%	33,21%	33,30%
% B0	41,51%	41,73%	41,51%	41,62%
% Areia	16,60%	16,69%	16,60%	16,65%
% Cimento	0,92%	0,92%	0,92%	0,92%
Total	100%	100%	100%	100%

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Esta pesquisa oportunizou, por meio de um programa experimental, a realização de análises dos resultados dos ensaios com as respectivas discussões referentes aos estudos semelhantes já concretizados. Logo, foi possível obter as seguintes conclusões:

Com a caracterização física dos agregados e do ligante asfáltico tornou-se possível fazer análises tanto quantitativa como qualitativa do material. Nos ensaios, os agregados oriundos do RCD's quando comparados com os naturais obtiveram resistência inferior tanto quanto maior desgaste. Em outra vertente, a absorção dos materiais reciclados se deu de forma consideravelmente maior quando comparado aos materiais naturais. Nos demais ensaios de caracterização física dos agregados e do ligante asfáltico, foi possível avaliar qualitativamente o material obtendo-se a aceitação tanto dos agregados (naturais e RCD) como do ligante.

Verificou-se que grande parte das características físicas identificadas com o MEV tendem a favorecer numa melhor estabilidade e aderência superficial no concreto asfáltico avaliado, o que culmina num produto de potencial elevado para uso em camadas de revestimentos de pavimentos viários.

Com o ensaio de EDS e FRX foi possível identificar grandes percentuais de ferro e alumínio, o que caracteriza os agregados oriundos do RCD como um material que contém grandes percentuais de frações cerâmicas presente no lote. Logo, a utilização dos agregados contendo o RCD em análise se tornaria viável em camadas de revestimentos em rodovias de baixo tráfego e de veículos leves, de preferência.

No ensaio de DRX, com a identificação de picos de calcita, quartzo e caulinita, evidencia-se com similaridade aos demais ensaios a presença predominante de sílica, alumínio, ferro e cálcio, os quais caracterizam o material de origem cerâmica, rochosa e que contém a presença de pastas de cimento hidratadas.

Conforme à obtenção de vários gráficos nos estudos das dosagens e tomando-se como base as comparações realizadas entre duas ou mais variáveis pode-se inferir

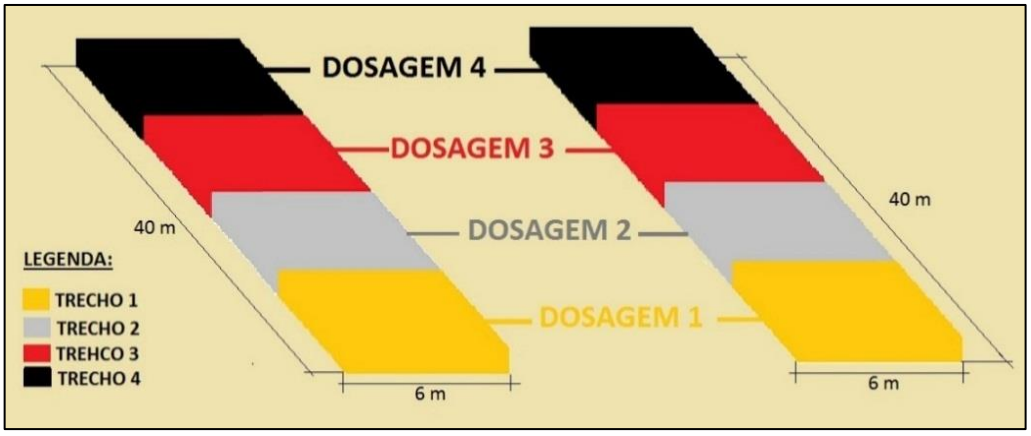
que os teores de ligante ótimos encontrados para as dosagens D1 - BNAN, D2 - BNAR, D3 - BRAR e D4 - BRAR foram, respectivamente, 7,75%, 7,25%, 7,75 e 7,5%.

Finalmente, com todas as etapas da pesquisa concretizadas e com a realização futura de um trecho experimental como análise de campo, espera-se que se obtenha uma proposição ambientalmente correta para os resíduos da construção e demolição de obras semelhantes, de modo a se ter uma solução renovável para aplicação nas obras de pavimentação como um todo.

5.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como forma de consolidar todo o trabalho realizado em laboratório, é proposta deste trabalho de dissertação, consolidar a pesquisa com a execução de um trecho experimental a fim de expor o material produzido em laboratório à ação de agentes físicos externos, quando utilizado como camada de revestimento no pavimento. Para tanto, tendo como base as vias urbanas da cidade de Natal/RN, o modelo sugerido encontra-se ilustrado na Figura 47.

Figura 47 - Esquema para execução do trecho experimental com o PMF.



Fonte: Autoria própria.

Como solução para a execução de um trecho experimental, o mesmo poderá possuir dimensões de duzentos e quarenta metros quadrados (240m²), e a sua execução dividindo-se em quatro fases:

- ✓ Trecho 1 (Medindo 6x10x0,05m);
- ✓ Trecho 2 (Medindo 6x10x0,05m);
- ✓ Trecho 3 (Medindo 6x10x0,05m);
- ✓ Trecho 4 (Medindo 6x10x0,05m).

Para cada proposta de trecho (trecho 1, 2, 3 e 4) poderá ser aplicado sobre o pavimento o concreto asfáltico do tipo PMF como camada de revestimento utilizando os traços representativos que melhor correspondeu nos ensaios laboratoriais (Tabelas 16, 17, 18, 19 e 20).

Tabela 16 - Dosagem 1 aplicada ao trecho 1.

DOSAGEM 1 (TRECHO 1) **Material Natural**			
MATERIAIS	**%**	**VOLUME (m³)**	**MASSA (kg)**
EMULSÃO	7,75	0,279	273,42
B1 NAT	33,21	1,19556	3180,1896
B0 NAT	41,512	1,494432	3990,13344
AREIA NAT	16,605	0,59778	1572,1614
CIMENTO	0,923	0,033228	93,70296
TOTAL	100	3,6	9109,6074

Tabela 17 - Dosagem 2 aplicada ao trecho 2.

DOSAGEM 2 (TRECHO 2) **Britas Naturais e Areia RCD**			
MATERIAIS	**%**	**VOLUME (m³)**	**MASSA (kg)**
EMULSÃO	7,25	0,261	255,78
B1 NAT	33,39	1,20204	3197,4264
B0 NAT	41,737	1,502532	4011,76044
AREIA RCD	16,696	0,601056	1580,77728
CIMENTO	0,927	0,033372	94,10904
TOTAL	100	3,6	9139,85316

Tabela 18 – Dosagem 3 aplicada ao trecho 3.

DOSAGEM 3 (TRECHO 3) Material RCD			
MATERIAIS	**%**	**VOLUME (m³)**	**MASSA (kg)**
EMULSÃO	7,75	0,279	273,42
B1 RCD	33,21	1,19556	3180,1896
B0 RCD	41,512	1,494432	3990,13344
AREIA RCD	16,605	0,59778	1572,1614
CIMENTO	0,923	0,033228	93,70296
TOTAL	100	3,6	9109,6074

Tabela 19 – Dosagem 4 aplicada ao trecho 4.

DOSAGEM 4 (TRECHO 4) Britas RCD e Areia Natural			
MATERIAIS	**%**	**VOLUME (m³)**	**MASSA (kg)**
EMULSÃO	7,5	0,27	264,6
B1 RCD	33,3	1,1988	3188,808
B0 RCD	41,625	1,4985	4000,995
AREIA NAT	16,65	0,5994	1576,422
CIMENTO	0,925	0,0333	93,906
TOTAL	100	3,6	9124,731

Tabela 20 - Total de materiais aplicado aos trechos.

TOTAL DE MATERIAIS P/ O TRECHO		
MATERIAIS	**VOLUME (m³)**	**MASSA (kg)**
EMULSÃO	1,089	1067,22
B1 NAT	2,3976	6377,616
B0 NAT	2,996964	8001,89388
AREIA NAT	1,19718	3148,5834
AREIA RCD	1,198836	3152,93868
B1 RCD	2,39436	6368,9976
B0 RCD	2,992932	7991,12844
CIMENTO	0,133128	375,42096
TOTAL	**14,4**	**36483,79896**

O valor referente ao volume de cada trecho deverá ser de 6x10x0,05m, considerando também o volume de vazios na mistura e adicionado a este um valor percentual de perda do material de 20%.

Como forma de avaliação geotécnica do trecho experimental, deverão ser realizados testes de rugosidade superficial, estabilidade por capacidade de aplicação de cargas, absorção de água e alguns outros dependendo da conformidade da demanda por resultados.

REFERÊNCIAS

AMORIM, E. F. Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde – MT. Universidade de Brasília. Tese de doutorado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Publicação G.TD-090/13, Brasília, DF, 151p. (2013).

ÂNGULO, S. C. (2005) Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 167 p.

ANTHONISSEN, J *et al.* Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context. Transportation Research Part D: Transport and Environment, [s.l.], v. 41, p.306-317, dez. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.011.

ANDRADE, C *et al.* Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais. Matéria (rio J.), [s.l.], v. 21, n. 2, p.321-329, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160002.0031. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762016000200321&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 04 nov. 2016.

ARAUJO, E. R; OLIVIERI, R. D; FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: LIS, Fernando A. Freitas. *Recursos minerais e comunidade:* impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 1-12

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, "Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013", disponível em: http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf, acesso em: 18 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostra de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Brasil, 1986. 09 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14376: Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação – Método Expedito. Brasil, 2007. 08 p.

BEHL, A. *et al.* A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphalting of roads. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 54, p.113-117, mar. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.050.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica:* formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. Cerâmica, [s.l.], v. 61, n. 358, p.178-189, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000200178>. Acesso em: 18 nov. 2016.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Org.). Gráfico - PIB Brasil x PIB Construção civil var. percentual 2004 - 2015. 2017. Banco de dados - CBIC. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/home/>. Acesso em: 09 jan. 2016.

CARNEIRO, A. M. P. Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

CENTRO DE ESTRATÉGIAS E RECURSOS NATURAIS E ENERGIA. Continua a escalada ascendente das eólicas no RN. Cerne. Natal, p. 1-1. jan. 2016. Disponível em: <http://cerne.org.br/2016-continua-a-escalada-ascendente-das-eolicas-no-rn/>. Accesso em: 29 jan. 2017.

COSME, R. L. *et al.* Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 122, p.556-566, set. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.126. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816310649?np=y&npKey=1caaa39570334f2f2593faf80dc89baba647ceffd1b7b18d14eef9b7b43d48e4>. Acesso em: 28 jan. 2017.

COSTA FILHO, F. C. Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de Scheelita na composição de concretos asfálticos. 2017. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Materiais e Processos Construtivos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Cap. 4.

DEMOLIÇÃO AVANÇA NO MACHADÃO. Natal, 26 out. 2011. Disponível em: <http://www.tribunadonorte.com.br/copa2014/demolicao-avanca-no-machadao/200550>. Acesso em: 22 nov. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 107/94: Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio marshall. Rio de Janeiro, 1994. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER - ES 317/97: Pavimentos flexíveis – Pré-misturado a frio – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1997. 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT156/2011-ME: Emulsão asfáltica – Determinação da carga da partícula -Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011. 07 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. *Manual de* pavimentação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade. Rio de Janeiro, 1996. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 004/94: Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt Furol a alta temperatura método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994. 02 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 035/98: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 081/98: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998. 06 p

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 083/98: Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 05 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 086/94: Agregados - Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994. 05 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 194/98: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 085/94: Material finamente pulverizados - Determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 037/97: Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 038/97: Agregado miúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997. 05 p.

DONDI, G. *et al.* Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: Comparison between Traditional Crumb Rubber and Cryogenic Crumb Rubber. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 68, p.370-375, out. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.093.

FATEMI, S. *et al.* Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 120, p.450-456, set. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.117. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816308534>. Acesso em: 22 nov. 2016.

FERREIRA, R. L. S. Efeitos da incorporação de areia reciclada de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em argamassas mista de revestimentos. 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Materiais e Processos Construtivos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Cap. 4.

GIMÉNEZ, A. M. G. ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasilia, Brasilia, 2011.

GÓMEZ-MEIJIDE, B. *et al.* Recycled construction and demolition waste in Cold Asphalt Mixtures: evolutionary properties. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 112, p.588-598, jan. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.038. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615011282>. Acesso em: 28 jan. 2017.

JAMSHIDI, A. *et al.* Characterization of effects of thermal property of aggregate on the carbon footprint of asphalt industries in China. Journal Of Traffic And Transportation Engineering (english Edition), [s.l.], v. 4, n. 2, p.118-130, abr. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2017.02.001.

LEITE, F. C. *et al.* Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2972-2979, jun. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810006367>. Acesso em: 06 Nov. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. *Informações sobre a economia mineral brasileira 2015*. Brasília, 2015.

MANNARINO, C. F. *et al.* Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Europeia. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 21, n. 2, p.379-385, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016146475. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/2016nahead/1809-4457-esa-S1413_41522016146475.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2016.

MINÉRIO E MINERALES. 200 Maiores minas brasileiras: ranking por substância. 2014

MODARRES, A. *et al.* Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 91, p.262-268, mar. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.078.

MODELO de execução de trecho para pavimentação asfáltica. Produção de Djalma Emereciano Neto. São Gonçalo do Amarante, 2016. 1, color.

MOON, K. H. *et al.* Low temperature rheological properties of asphalt mixtures containing different recycled asphalt materials. International Journal Of Pavement Research And Technology, [s.l.], v. 10, n. 1, p.84-97, jan. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.11.007.

OSSA, A. *et al.* Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 135, p.379-386, nov. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261630765X>. Acesso em: 28 jan. 2017.

PEDERNEIRAS, C. M. Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal RN. 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Materiais e Processos Construtivos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Cap. 4.

PINHEIRO, J. H. M; SOARES, J. B. Realização e acompanhamento de dois trechos experimentais com asfalto-borracha no estado do Ceará. Transportes, Fortaleza, v. 13, n. 1, p.57-66, jun. 2005. Anual. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/92/81>. Acesso em: 02 dez. 2017.

RADEVIC, A. *et al.* Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 136, p.386-393, abr. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.043. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817300570>. Acesso em: 28 jan. 2017.

RODRIGUES, W; MAGALHÃES FILHO, L. N. L; PEREIRA, R. S. Análise dos Determinantes dos custos de resíduos sólidos urbanos nas capitais estaduais brasileiras. Urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana, [s.l.], v. 8, n. 1, p.130-141, abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.008.001.ao02. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2175-33692016000100130&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 04 nov. 2016.

VASCONCELOS, S. (Natal RN). Tribuna do Norte. Construção civil do RN tem quase 500 demissões por mês. 2015. Disponível em: <http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/construa-a-o-civil-do-rn-tem-quase-500-demissa-es-por-ma-s/329628>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SANGIORGI, C. *et al.* A laboratory and filed evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 138, p.232-239, maio 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMETO ECONÔMICO. *Construção civil*. 2016. Disponível em < http://www.sde.ba.gov.br/pagina.aspx?pagina=construcao>. Último Acesso: Dez. 2016.

SENA NETO, P. G; ALCÂNTARA, R. L. Ferramentas de Sustentabilidade em Edificações. REGET/UFSM: Revista Eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental, Santa Maria, v. 19, n. 3, p.505-528, dez. 2015.

SILVA, H. M. *et al.* Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? Resources, Conservation And Recycling, [s.l.], v. 60, p.38-48, mar. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013.

SOARES, L.G.C.; SALGUEIRO, A.A.; GAZINEU, M.H.P. Educação ambiental aplicada aos resíduos sólidos na cidade de Olinda, Pernambuco – um estudo de caso. Revista Ciência & Tecnologia, Piracicaba, n.1, p.1-9, jul. a dez. 2007.

SOUZA, K. V; VERDE, R. B. R. V; ALAMINO, R. C. J; FERNANDES, F. R. C. Mineração na Região Nordeste do Brasil: quadro atual e perspectivas. In: LIS, Fernando A. Freitas. *Recursos minerais e comunidade:* impactos humanos, socioambientais e econômicos. Francisco Rego Chaves Fernandes, Renata de Carvalho Jimenez Alamino, Eliane Araujo (Eds.). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 117-123.

STEINER, J. E. A origem do universo. Estudos Avançados, [s.l.], v. 20, n. 58, p.231-248, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142006000300022. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142006000300022&lang=pt>. Acesso em: 21 nov. 2016.

ZHOU, X. *et al.* Usage of slurry oil for the preparation of crumb-rubber-modified asphalt emulsions. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 76, p.279-285, fev. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.064.