



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

Manoel Lindolfo Queiroz Neto

**APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO A QUENTE UTILIZANDO
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD) EM VIA
URBANA NA CIDADE DE NATAL/RN**

**Natal - RN
2019**

Manoel Lindolfo Queiroz Neto

**APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO A QUENTE UTILIZANDO
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD) EM VIA
URBANA NA CIDADE DE NATAL/RN**

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

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Co-orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Natal - RN
2019

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

Queiroz Neto, Manoel Lindolfo.

Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN / Manoel Lindolfo Queiroz Neto. - 2019.

87 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim.

Coorientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

1. RCD - Dissertação. 2. Agregado reciclado - Dissertação. 3. Pavimentação - Dissertação. 4. Sustentabilidade - Dissertação. I. Amorim, Enio Fernandes. II. França, Fagner Alexandre Nunes de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.337

MANOEL LINDOLFO QUEIROZ NETO

**“APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO À
QUENTE UTILIZANDO RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD) EM
VIA URBANA NA CIDADE DE NATAL/RN.”**

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)

Fagner A. N. Franca

Prof. Dr. FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANCA – Coorientador (UFRN)

Moacir Guilhermino da Silva

Prof. Dr. MOACIR GUILHERMINO DA SILVA – Examinador Externo ao Programa (UFRN)

Wilson Conciati

Prof. Dr. WILSON CONCIANI – Examinador Externo (IFB)

Natal/RN, 25 de março de 2019

APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO A QUENTE UTILIZANDO RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS (RCD) EM VIA URBANA NA CIDADE DE NATAL/RN

Manoel Lindolfo Queiroz Neto

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Co-orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável pela alta geração de resíduos sólidos que são descartados na natureza, contribuindo para a degradação do meio ambiente. Por outro lado, o setor da construção é um dos principais componentes da economia brasileira e sua cadeia produtiva reúne um conjunto de atividades que mobilizam mais de 12 milhões de pessoas, o qual cerca de 13% representa a força de trabalho no país (FIESP, 2017). Em nível mundial, espera-se que a indústria de materiais de construção cresça duas vezes e meia entre 2010 e 2050 (UNEP, 2002). No Brasil, a expectativa é que o setor da construção dobre de tamanho até o ano de 2022 (CEBEDS, 2009). Nota-se que é crucial tomar medidas que visem a gestão de resíduos sólidos através de mudanças culturais e tecnológicas, objetivando atender as necessidades de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente. Este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de resíduos de construção e demolição de obras (RCD) como agregados reciclados na fabricação de revestimento asfáltico, como uma alternativa para o aproveitamento destes materiais. O método de trabalho empregado consistiu na coleta de material residual na empresa TcPav, realização de ensaios de caracterização em conformidade com as normas padronizadas na área de pavimentação no âmbito nacional, além de DRX, FRX e dosagem pelo método Marshall. Em seguida, realizou-se um trecho experimental fazendo-se uso de um traço de mercado, adaptado para o uso com RCD. Nesse traço foi utilizado agregado reciclado contendo brita 1 e areia em substituição ao mesmo agregado do tipo natural na camada de revestimento. A partir do programa experimental proposto observou-se que os agregados residuais desempenharam um bom

potencial de sua utilização em revestimentos asfálticos à quente baseado nas análises dos corpos de prova sob os parâmetros volumétricos, pela dosagem Marshall e do trecho experimental. Quanto ao trecho experimental, observou-se que logo nos meses iniciais de monitoramento aconteceu um destacamento dos agregados cerâmicos presentes em sua superfície. No entanto, esse destacamento não foi comprometedor a ponto de danificar o revestimento, de modo que o pavimento asfáltico continua desempenhando de forma satisfatória a funcionalidade para os veículos que por ele trafegam.

Palavras-chave: RCD. Agregado reciclado. Pavimentação. Sustentabilidade.

**APPLICATION OF HOT ASPHALT CONCRETE USING WASTE OF
CONSTRUCTION AND DEMOLITION OF WORKS (RCD) IN ROAD IN CITY
OF NATAL / RN**

Manoel Lindolfo Queiroz Neto

Adviser: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Co-adviser: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

ABSTRACT

The construction industry is responsible for the high generation of solid waste that is discarded in nature, contributing to the degradation of the environment. On the other hand, the construction sector is one of the main components of the Brazilian economy and its productive chain brings together a set of activities that mobilize more than 12 million people, about 13% representing the workforce in the country (FIESP, 2017). At the global level, the building materials industry is expected to grow by two and a half times between 2010 and 2050 (UNEP, 2002). In Brazil, the construction sector is expected to double in size until the year 2022 (CEBEDS, 2009). It is noteworthy that it is crucial to take measures aimed at the management of solid waste through cultural and technological changes, aiming to meet the needs of a society increasingly enlightened and demanding in relation to the preservation of the environment. This work presents a proposal for the application of construction and demolition waste (RCD) as recycled aggregates in the manufacture of asphalt coating, as an alternative to the use of these materials. The work method employed consisted of the collection of residual material in the company TcPav, carrying out characterization tests in accordance with the standard standards in the area of paving in the national scope, besides DRX, FRX and dosage by the Marshall method. Then an experimental section was made using a market trace, adapted for use with RCD. In this trait was used recycled aggregate containing gravel 1 and sand replacing the same aggregate of the natural type in the coating layer. From the proposed experimental program it was observed that the residual aggregates had a good potential of their use in hot asphaltic coatings based on the analysis of the specimens under the volumetric parameters, the Marshall dosage and the experimental section. As for the experimental section, it was observed that in the initial months of monitoring a detachment of the ceramic aggregates

present on its surface was observed. However, such detachment has not compromised to the point of damaging the coating, so that the asphalt pavement continues to perform satisfactorily the functionality for the vehicles which travel therethrough.

Key-words: CDW. Recycled Aggregate. Paving. Sustainability

Ao meu avô Manoel Lindolfo de Queiroz pelo qual herdo o nome com muito orgulho e responsabilidade e que foi o meu primeiro incentivador nos estudos quando ainda criança.

Dedico aos meus pais que sempre me mostraram o real valor do estudo e conhecimento, despertando em mim um desejo incontrolável pelo saber.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer ao Deus todo poderoso que a todo tempo me ajudou na labuta do dia a dia sempre me mostrando que tudo é possível, basta querer, mesmo nos momentos em que pensei em desistir ele nunca me desamparou.

A minha noiva Milany Kárcia que, sem dúvida alguma, foi uma peça essencial para que eu conseguisse chegar até aqui nessa dissertação de mestrado. Milany quero deixar registrado neste documento a minha gratidão a sua pessoa por tudo que vc fez até este momento. O mínimo que posso fazer é dedicar esse título a você. Saiba que independente de qualquer coisa sou eternamente grato por você sempre, sempre, sempre ter acreditado em mim.

As minhas famílias Queiroz e Basílio que sempre me apoiaram com palavras amigas e de incentivo. Principalmente, a família Basílio que sempre investiu em meus estudos desde criança.

A Luiz Inácio Lula da Silva, meu eterno presidente! O meu amor e gratidão a este homem que, sem sombra de dúvidas, foi o maior presidente que este país já teve até o momento.

A meu excelente professor Orientador Enio Amorim que além de ser uma pessoa humana ímpar foi um dos 3 melhores professores que tive até este momento, um cara com uma didática incrível! Enio quero deixar registrado aqui o meu enorme agradecimento a sua pessoa que sempre se mostrou disponível para que eu conseguisse escrever esta dissertação de mestrado. Sou muito grato a você!

Ao Professor Co-orientador Fagner França e aos demais professores que contribuíram para que eu conseguisse chegar até aqui.

Aos professores Wilson Conciani e Moacir Guilhermino por fazerem parte integrante de minha banca.

A Dr. Jarbas Cavalcanti, Jarbas filho (Jarbinhas), Alexandre por toda a parceria estabelecida durante a pesquisa, o meu muito obrigado.

A Carlos, Hudson, Lucas e Jullian pelo apoio dado durante a pesquisa me auxiliando nos ensaios laboratoriais.

A meu tio Robson Basílio que é um segundo pai para mim. Muitas coisas que eu consegui viver quando criança foi por sua causa. Também foi um grande incentivador nos meus estudos.

A meus amigos de mestrado e apartamento Paulo Leite e Italo que também foram fundamentais em todo o processo.

“ Para quem tem o pensamento forte, o impossível é só questão de opinião. ”

(Chorão)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xviii
CAPÍTULO 1	19
Introdução.....	19
1.1 Justificativa.....	22
1.2 Objetivos da Pesquisa	24
1.2.1 Objetivo Geral.....	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
CAPÍTULO 2.....	25
Revisão Bibliográfica.....	25
2.1 Resíduo de construção e demolição.....	25
2.2 Produção e gerenciamento de RCD.....	26
2.3 Pesquisas sobre aplicação de RCD na construção civil	30
2.4 Pesquisas sobre aplicação de RCD em pavimentação	32
2.5 Pavimento de concreto asfáltico.....	35
2.6 Pesquisas sobre aplicação de RCD em concretos asfálticos.....	36
CAPÍTULO 3	40
Materiais e Métodos	40
3.1 Materiais.....	40
3.2 Infraestrutura e logística para a realização do estudo	42
3.3 Método de trabalho	42
3.3.1 Caracterização física do RCD e agregados naturais	43
3.3.2 Ensaio de caracterização química e mineralógica	45
3.3.3 Caracterização do ligante asfáltico.....	46

3.3.4 Dosagens de misturas asfálticas a quente	49
3.3.5 Execução do trecho experimental	53
CAPÍTULO 4	57
Resultados.....	57
4.1 Resultados da caracterização dos agregados	57
4.1.1 Análise do agregado graúdo por tipo de material (fases)	57
4.1.2 Análise granulométrica dos agregados naturais e RCD	58
4.1.3 Módulo de finura e dimensão máxima característica	59
4.1.4 Absorção	59
4.1.5 Desgaste por abrasão Los Angeles	60
4.1.6 Índice de forma	61
4.1.7 Massa específica.....	61
4.2 Resultados da caracterização do material asfáltico	62
4.3 Análise mineralógica por DRX	62
4.4 Análise química por FRX.....	64
4.5 Resultados da dosagem Marshall	65
4.5.1 Análise da Estabilidade e da massa específica aparente (Gmb) <i>versus</i> % CAP.....	66
4.5.2 Análise do volume de vazios e relação betume-vazios <i>versus</i> % CAP.....	67
4.5.3 Análise da estabilidade <i>versus</i> RBV e Vv (%).....	69
4.5.4 Análise comparativa entre pesquisas	70
4.6 Resultados do trecho experimental.....	75
CAPÍTULO 5	78
Conclusões.....	78
5.1 Conclusões e considerações finais.....	78
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	79
Referências	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia produtiva da construção civil	19
Figura 2 - Geração de RCD no Brasil – Gestão de resíduos de construção civil	21
Figura 3 - Erosão de talude provocado por descarte irregular de RCD em São Paulo	21
Figura 4 - Municípios com manejo de resíduos sólidos segundo as unidades da federação - 2008	29
Figura 5 - Estrutura de pavimento asfáltico	35
Figura 6 - Coleta dos agregados RCD em pilhas: (a) Agregado reciclado brita 1; (b) Agregado reciclado areia	41
Figura 7 - Agregados reciclados: (a) Agregado reciclado brita 1; (b) Agregado reciclado areia	41
Figura 8 - Resumo das etapas da pesquisa.....	43
Figura 9 - Procedimento de seleção manual dos resíduos.....	44
Figura 10 - Procedimento de seleção manual dos resíduos: (a) Três amostras de 500 g coletadas em pontos distintos da pilha; (b) Amostra após seleção manual	44
Figura 11 - Caracterização do Agregado brita 1 de RCD: a) Análise granulométrica; b) Índice de forma; c) Abrasão Los Angeles; d) Absorção e densidade	45
Figura 12 - Ensaio de ponto de fulgor e de combustão: a) Execução do ensaio; b) Acompanhamento da temperatura do ensaio	47
Figura 13 - Ensaio de determinação do ponto de amolecimento: a) Enchimento dos anéis; b) Execução do ensaio	47
Figura 14 - Ensaio de penetração: a) Preparação das amostras; b) Execução do ensaio ...	48
Figura 15 - Ensaio de determinação da densidade e massa específica: a) Enchimento dos picnômetros com CAP; b) Enchimento do picnômetro com água	48
Figura 16 - Ensaio de determinação da viscosidade Saybolt-Furol: a) Estufa com o CAP; b) Execução do ensaio	49

Figura 17 - Materiais para execução de corpos de prova de CAUQ: (a) Separação das fases constituintes; (b) Cápsulas com material em estufa (c) Agregados com temperatura superior ao ligante asfáltico; (d) Mistura betuminosa a quente	50
Figura 18 - Preparação e confecção do corpo de prova: (a) Detalhe do papel filtro; (b) Compactação do corpo de prova; (c) Corpo de prova finalizado	51
Figura 19 - Aferição das massas dos protótipos: (a) Massa seca; (b) Massa hidrostática .	52
Figura 20 - Definição da estabilidade e fluência: (a) Corpos de prova de CAUQ em banho maria a 60 °C; (b) Rompimento do corpo de prova na prensa Marshall	52
Figura 21 - Localização da Rua José Miranda da Silva.....	53
Figura 22 - Carregamento e descarregamento do material asfáltico: (a) Carregamento do asfalto na usina; (b) Descarregamento do asfalto na pavimentadora para aplicação no trecho experimental.....	54
Figura 23 - Nivelamento do pavimento asfáltico: (a) Nivelamento mecânico realizado com a pavimentadora; (b) Nivelamento manual para correção de imperfeições	55
Figura 24 - Execução de compactação com rolos: (a) Rolo pneumático; (b) Rolo liso.....	55
Figura 25 - Trecho experimental final: a) Revestimento asfáltico compactado com agregados reciclados; b) Espessura do revestimento de aproximadamente 0,05 m.	56
Figura 26 - Composição gravimétrica da brita 1 residual	58
Figura 27 - Curvas granulométricas dos agregados	58
Figura 28 - Ensaio de DRX da brita 1 (RCD)	63
Figura 29 - Ensaio de DRX da areia (RCD)	63
Figura 30 - Estabilidade e massa específica aparente <i>versus</i> % CAP	67
Figura 31 - Volume de vazios e relação betume-vazios <i>versus</i> % CAP.....	68
Figura 32 - Estabilidade <i>versus</i> RBV e V_v	70
Figura 33 - Comparação entre as estabilidades	71
Figura 34 - Comparação entre os volumes de vazios - V_v	72
Figura 35 - Comparação entre as relações betumes-vazios - RBV.....	73

Figura 36 - Comparação entre densidades aparentes - Gmb	74
Figura 37 - Revestimentos asfálticos: (a) Revestimento asfáltico logo após sua concretagem; (b) Visual do revestimento sem reciclado	75
Figura 38 - Revestimento asfáltico reciclado após um e dois meses: (a) Comportamento visual e funcional no primeiro mês; (b) Comportamento visual e funcional no segundo mês	76
Figura 39 - Revestimento asfáltico reciclado após três e quatro meses: (a) Comportamento visual e funcional no terceiro mês; (b) Comportamento visual e funcional no quarto mês	77
Figura 40 - Tráfegos realizados entre outubro de 2018 e janeiro de 2019	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos residuais e possibilidades de utilização	36
Tabela 2 - Ensaio normatizados de caracterização física para os agregados	43
Tabela 3 - Ensaio normatizados para a caracterização do ligante asfáltico	46
Tabela 4 - Ensaio normatizados com o concreto asfáltico e sua especificação	49
Tabela 5 - Composição do traço com CAUQ	50
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados	57
Tabela 7 - Absorção	60
Tabela 8 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo	62
Tabela 9 - Composição química (% em massa) por FRX dos agregados	64
Tabela 10 - Parâmetros da dosagem Marshall.....	65
Tabela 11 - Percentual dos agregados utilizados em cada teor da dosagem Marshall	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

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

CAUQ - Cimento Betuminoso Usinado a Quente

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

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

EDS - Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X

EUA - Estados Unidos da América

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

FRX - Espectrometria de Fluorescência de Raios X

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFRN - Instituto Federal do Rio Grande do Norte

ISC - Índice de Suporte Califórnia

LTDA - Limitada

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR - Norma Brasileira

PAF - Pavimentos de asfalto à frio

PIB - Produto interno bruto (PIB)

PMF - Pré-Misturado a Frio

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

TCPAV - Tecnologia em Construção e Pavimentação

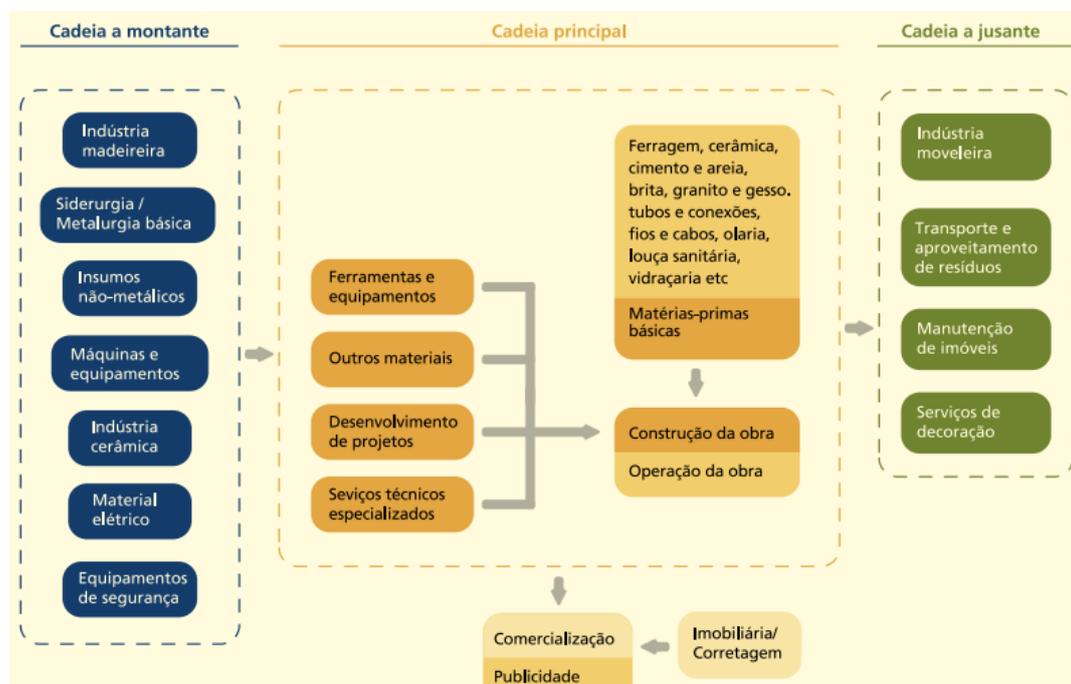
UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1

Introdução

A indústria da construção civil é uma arte da engenharia com suas belas construções, dentre elas, edifícios, barragens, pontes e rodovias. Ela cria *habitats*, estabelece padrões de arquitetura e dá maior mobilidade as pessoas. Dessa maneira, o setor da construção civil promove a qualidade de vida das pessoas e incentiva o mercado movimentando sua economia. De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - Fiesp (2017), a construção civil é um dos principais componentes da economia brasileira e sua cadeia produtiva (Figura 1) reúne um conjunto de atividades que somam mais de 12 milhões de pessoas, o qual cerca de 13% representa a força de trabalho no país, de modo que os investimentos no setor de construção equivalem em torno de 10% do PIB.

Figura 1 - Cadeia produtiva da construção civil



Fonte: Sebrae (2008)

As atividades desenvolvidas na construção civil solicitam uma boa quantidade de materiais inertes, como britas e areias. A extração da areia, por exemplo, altera o perfil dos rios e também o seu equilíbrio, além de modificar sua estrutura hidrogeológica, acarretando em problemas ambientais (CABRAL *et al.*, 2009).

Atrelado a isso, em escala mundial, espera-se que a indústria de materiais de construção cresça duas vezes e meia entre 2010 e 2050 (UNEP, 2002). No Brasil, a expectativa é que o setor da construção dobre de tamanho até o ano de 2022 (CEBEDS, 2009), acarretando no aumento da geração de resíduos. Nota-se que é crucial tomar medidas que visem a gestão de resíduos sólidos através de mudanças culturais e tecnológicas, objetivando atender as necessidades de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente.

Em nível mundial, 60% das matérias-primas extraídas da litosfera são utilizadas no setor da construção civil (BRIBIÁN *et al.*, 2011). Essa porcentagem constata que o uso de recursos naturais finitos é extenso e há necessidade de dispor de métodos que sejam capazes de reutiliza-los ou reciclá-los, quando dispostos no meio ambiente após o seu uso. Outra problemática socioambiental indicada em dados representativos referente a produção de resíduos sólidos urbanos, em escala mundial, apontam o total de 1,3 bilhões de toneladas por ano ou 1,2 kg per capita por dia em espaço urbano (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Os países europeus geram, aproximadamente, 25% dos resíduos de construção e demolição (RCD) do mundo que estão estimados em 531 milhões de toneladas por ano. Dentre esses países, alguns reciclam mais que outros, como por exemplo, a Holanda e a Dinamarca, que reciclam 98% e 94% de seus resíduos, respectivamente (European Commission - EU, 2011). O que esses países têm em comum é a política fiscal. Ela incentiva a reciclagem com a imposição de taxas sobre o material residual destinado ao aterro.

Na América do Norte, o resíduo de construção e demolição representa em torno de 25% a 45%, o qual estima-se que 25% dessa quantidade é reciclada. Conjectura-se que cerca de 100 milhões de toneladas de concreto são recicladas anualmente na América do Norte. Esse produto é usado em sua grande parte como material de base em estradas (TABSH *et al.*, 2009).

A diferença entre os grandes tipos de obras da construção civil faz com que o resíduo seja de grande variabilidade. No Brasil, os RCDs correspondem a 61% do total de

resíduos gerados (ACKER, 2009). De maneira semelhante, Silva *et al.* (2012) afirmam que o RCD corresponde a 60% do montante de resíduos sólidos urbanos. Cabral *et al.* (2009) estabelece uma porcentagem de 50% de RCD. A Figura 2 ilustra a geração de RCD no Brasil e mostra que mais da metade é originado de reformas.

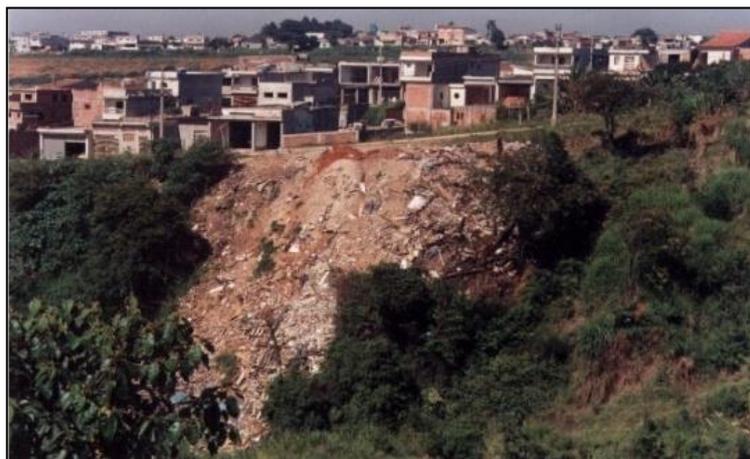
Figura 2 - Geração de RCD no Brasil – Gestão de resíduos de construção civil



Fonte: Acker (2009)

Medidas que evitem a disposição de resíduos em aterros, em rios e córregos se tornam fundamentais para que diversos problemas não venham a ocorrer como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Erosão de talude provocado por descarte irregular de RCD em São Paulo



Fonte: Schneider (2003)

Um dos setores de engenharia que pode promover o uso de agregados reciclados (AR) que requerem menos investimento são os pavimentos urbanos e rodoviários (REZENDE *et al.*, 2016). De fato, a aplicação de RCD como material de base rodoviária

ou sub-base se configura num método eficiente para mitigar os seus efeitos sobre o meio ambiente e, conseqüentemente, consumir muito mais resíduo de demolição a fim de evitar sua disposição em aterros sanitários. Contudo, as propriedades físicas e composição dos agregados reciclados de construção e demolição variam de acordo com sua localização. Essa variação implicará na qualidade do material residual, no qual certamente influenciará em suas propriedades mecânicas.

O uso do RCD em pavimentos é algo estudado há cerca de 20 anos em vários países, dentre eles o Brasil. Sua aplicação é, geralmente, direcionada à sub-base (GRUBBA *et al.*, 2010; MORAFA *et al.*, 2017; BASSO *et al.*, 2017) e bases (COSTA *et al.*, 2010; LEITE *et al.*, 2011; GARCÊS *et al.*, 2014). A viabilidade de seu uso pelo setor de construção civil está pautada na sua própria geração de resíduo que é considerada uma atividade insustentável que causa deterioração ao meio ambiente. Logo, ações que visem sua inserção num processo produtivo e que se obtenham produtos com resultados compatíveis com as propriedades inerentes mínimas desejadas, se tornam uma vontade de todos aqueles que desejam promover o desenvolvimento sustentável da construção civil.

Consubstanciado nestes aspectos, este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de resíduos de construção e demolição de obras como agregados reciclados na fabricação de revestimento asfáltico, como uma alternativa para o aproveitamento destes materiais, no qual o setor da pavimentação é responsável por 18,37% do consumo de rocha britada no país (DNPM, 2009). Foram realizados estudos experimentais como a caracterização dos agregados naturais, reciclados e ligante asfáltico. Em seguida sucedeu-se a dosagem asfáltica pelo método Marshall, no qual foram relacionados vários parâmetros como a porcentagem de material betuminoso pela estabilidade, volume de vazios, relação betume/vazios, dentre outros. Um trecho experimental com traço semelhante ao traço feito em laboratório foi construído para se poder examinar na prática seu comportamento funcional. Vale ressaltar que foram produzidos dois tipos de pavimento, sendo um contendo materiais residuais e outro natural.

1.1 Justificativa

Atualmente, a disponibilidade de agregados naturais de qualidade próxima aos centros urbanos tem sido afetada pela sua crescente demanda e uso em diversas obras de construção civil afligindo, principalmente, o custo da obra devido a distância de transporte

(COSTA et al., 2010). O mercado mundial de agregados de construção deverá progredir para um consumo maior do que 51 bilhões de toneladas até o ano de 2019 (YANIK, 2016). As extrações desses recursos naturais finitos, como rochas e areias, ameaçam a sustentabilidade porque além de alterar os habitats dos seres vivos de uma forma geral, quando retornam ao meio ambiente, comumente é em forma de entulhos, intensificando os problemas decorrentes de procedimentos de administração inadequados, como a disposição caótica em aterros, particularmente nas grandes cidades.

De acordo com Kumar (2017), existem três maneiras de se alcançar a sustentabilidade: diminuir a mineração de recursos naturais, reciclagem de subprodutos industriais adequados ou materiais pós-consumo, incluindo os resíduos de construção e demolição que, inclusive, estão presentes em todos os lugares. Arelado a reciclagem e a sustentabilidade da aplicação do RCD estão as condições ruins das rodovias brasileiras, na qual 61,8% receberam a classificação quanto ao seu estado de uso como regular, ruim ou péssimo (CNT, 2017). Segundo Bernucci *et al.* (2006) mais de 95% das estradas pavimentadas, no Brasil, são de revestimentos asfálticos. Dessa forma, o uso de RCD em pavimentos rodoviários asfálticos pode contribuir para atenuar esses altos índices.

Uma vez que o agregado compõe a maior parte das misturas asfálticas (HUANG *et al.*, 2007), cerca de 90%, em peso, torna-se interessante investigar seu reuso. A fração fina, geralmente, contém grandes quantidades de cimento hidratado e gesso, não sendo adequado para fazer misturas de concreto fresco na maioria dos casos. A fração graúda, embora revestida com pasta de cimento tem sido utilizada com sucesso em várias investigações laboratoriais e estudos de campo (DELONGUI *et al.*, 2010; PROENÇA *et al.*, 2012; TAVIRA *et al.*, 2018). Dentre as vantagens da reciclagem do agregado graúdo, tem-se: menor poluição ambiental, redução de espaço em aterro e economia do agregado natural, já escasso em alguns lugares.

Diante deste cenário, como forma de amenizar esses índices alarmantes que ameaçam a sustentabilidade ambiental é que este trabalho oportuniza o desenvolvimento de atividades baseadas em pesquisas experimentais em laboratório e em campo com a realização de um trecho experimental, fazendo-se uso de agregados reciclados.

1.2 Objetivos da Pesquisa

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa objetiva analisar a influência do agregado reciclado nas frações enquadradas como brita 1 e areia provenientes dos resíduos de construção e demolição de obras, quanto aos aspectos ligados as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas quando aplicados em revestimento asfáltico a quente. Diante dessas propriedades o estudo visa avaliar a viabilidade técnica do emprego do RCD em dosagens asfálticas à quente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do agregado RCD em estudo;
- Verificar influências dos agregados reciclados (brita 1 e areia) nos resultados das propriedades e desempenho mecânico do produto final;
- Avaliar o desgaste superficial do pavimento executado em campo;
- Propor uma destinação ambientalmente adequada aos resíduos gerados pela construção civil.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduo de construção e demolição

Segundo a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 (2002):

“Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétricas, dentre outros, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (CONAMA nº 307, 2002, p. 1).

A ABNT NBR 15116 (2004) classifica os resíduos em Classes A, B, C e D que estão em consonância com a resolução do CONAMA nº 307. Sobretudo, aqueles resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados estão enquadrados na Classe A, tais como: demolição, reformas, reparos, argamassa, concreto, material cerâmico, dentre outros. A distinção desses resíduos em classes se torna essencial para que o estudo de sua utilização em novos materiais seja materializado de forma que atenda as reais necessidades da pesquisa a ser realizada. Um resíduo classificado como de classe B (papel, papelão, plástico), talvez não seja interessante inseri-lo em concretos asfálticos para obter melhor módulo de rigidez, diferentemente de um resíduo de classe A, na qual a possibilidade de melhoria dessa propriedade é bem mais real quando adicionado com outros elementos.

Nas economias desenvolvidas, iniciativas de reciclagem de resíduos tiveram início na década de 1980. Com sede em Berlim, a Alemanha estabeleceu a Associação Federal de Qualidade para Materiais de Construção Reciclados em 1984 que tinha como principal função unir as maiores empresas de reciclagem. A tendência é de que comunidades e empresas visem a eliminação do desperdício dos materiais de forma a garantir seu reuso ou reciclagem. Ações que permeiam essa ideia surgiram especialmente nos países da Austrália e Nova Zelândia. Arelado ao escasso conhecimento na área, economias em

desenvolvimento têm estruturas regulatórias insuficientes para que uma maior parte de material residual e reprocessado possa ser aplicado como material de construção em substituição ao material natural. Portanto, a reciclagem de RCD nos últimos 20 anos emergiu como prioridade socioeconômica nos países desenvolvidos e nos últimos 10 anos nos países em desenvolvimento que estão aderindo a essa nova maneira de ver e aplicar o material residual (TAM *et al.*, 2018). A exemplo desses países em desenvolvimento, pode-se citar o Brasil, onde em Curitiba o decreto de nº 852 de 2007 dispõe sobre a obrigatoriedade de utilização de agregados reciclados, classe A, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas.

2.2 Produção e gerenciamento de RCD

De maneira geral, os RCDs são gerados em 3 fases distintas: construção, manutenção e demolição. Verifica-se que, a depender do método construtivo adotado, a geração de resíduo ocorre de forma relativamente contínua e intensa. Sua composição dependerá de alguns fatores, como o tipo de construção. No entanto, os materiais básicos constituintes são: agregados graúdos e miúdos, materiais cimentícios, madeira, gesso, plástico, dentre outros.

Durante as últimas duas décadas, diversos estudos foram feitos para investigar o uso do agregado reciclado de concreto em camadas de pavimentos rodoviários, de forma a substituir o agregado graúdo natural, visando, principalmente, a sustentabilidade do setor da construção civil. Os testes mais frequentes realizados em tais estudos são os de graduação das partículas, compactação, absorção de água, flakiness, Los Angeles, solidez, equivalente de areia e Índice de Suporte Califórnia (ISC) (MORAFA *et al.*, 2017). Esses estudos surgiram porque o setor da construção é considerado um dos maiores consumidores de recursos naturais, inclusive, finitos.

Mesmo que a reciclagem seja mais desenvolvida nos países europeus em grande parte por causa da escassez provocada pela segunda guerra mundial, no Brasil o uso de RCD ainda se torna incipiente. A exemplo tem-se as obras de reforma que pela falta de cultura de reutilização dos resíduos acabam gerando grandes entulhos pelo próprio processo de demolição (ABRECON, 2018). Nessa perspectiva, na produção e destinação correta dos resíduos oriundos de construção e demolição deve-se passar por uma criteriosa

análise sobre sua origem e disposição final, visando o desenvolvimento sustentável por meio da otimização do processo construtivo, redução de desperdícios e aumento da qualidade do produto.

No Brasil são coletados cerca de 70 milhões de toneladas de resíduos sólidos todos os anos, onde 42% ainda têm como destino lixões, considerado ambientalmente inadequado, e aterros controlados. De acordo com Medeiros Jr. *et al.* (2010) e Delongui *et al.* (2010), a geração de RCD é estimada em 300 - 500 kg/hab/ano e 230 – 760 kg/hab/ano, respectivamente. De acordo com o último relatório da Abrecon de 2017 (2018), as usinas Brasileiras produzem mensalmente, em média, 431.500 m³ de agregados reciclados, sendo que sua capacidade máxima instalada é de 958.000 m³ por mês. Do volume produzido estimou-se que a porcentagem de RCD reciclada entre os anos de 2013 e 2015 foi o equivalente a 6%. O fato é que o Brasil investe pouco em infra-estrutura, em torno de 2,2 % do PIB ao ano. Considerando as metas previstas na Política e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o Brasil precisa investir R\$ 11,6 bilhões até 2031 na infraestrutura para universalizar a destinação final adequada dos resíduos sólidos (ABRELPE, 2017). O desenvolvimento de métodos que visem reutilizar o RCD é crucial e já vem sendo estudado há anos. A venda se configura num bom método para sua reutilização, porém, existem alguns entraves para que ela se concretize. De acordo com o último relatório da Abrecon de 2017 (2018) as principais causas são a inexistência de legislação (31%), elevada carga tributária (26%) e a falta de conhecimento do mercado (26%) (ABRECON, 2017).

Aplicações do material RCD em camadas de base, sub-base e revestimento rodoviário são uma ótima alternativa para que seja consumido os resíduos de construção e demolição de modo a evitar exorbitantes aterros sanitários. No que diz respeito às implicações ecológicas e financeiras, os RCDs podem ser utilizados substituindo em 100% os agregados graúdos naturais (GOMEZ-MEIJIDE *et al.*, 2016).

Rezende *et al.* (2016) realizaram um estudo de campo visando avaliar a estrutura de um pavimento asfáltico construído com agregado reciclado. Durante um período de 8 anos foram efetuados os ensaios de frasco de areia, speedy test, teste de densidade nuclear, panda tests, teste de carga em placa e benkelman beam test. Os autores concluíram que o agregado de reciclagem pode apresentar parâmetros com o mesmo nível de materiais granulares naturais tradicionalmente utilizados.

Porém, Ossa *et al.* (2016), avaliaram a viabilidade do uso do agregado reciclado de construção e demolição em substituição parcial do agregado natural criando misturas de

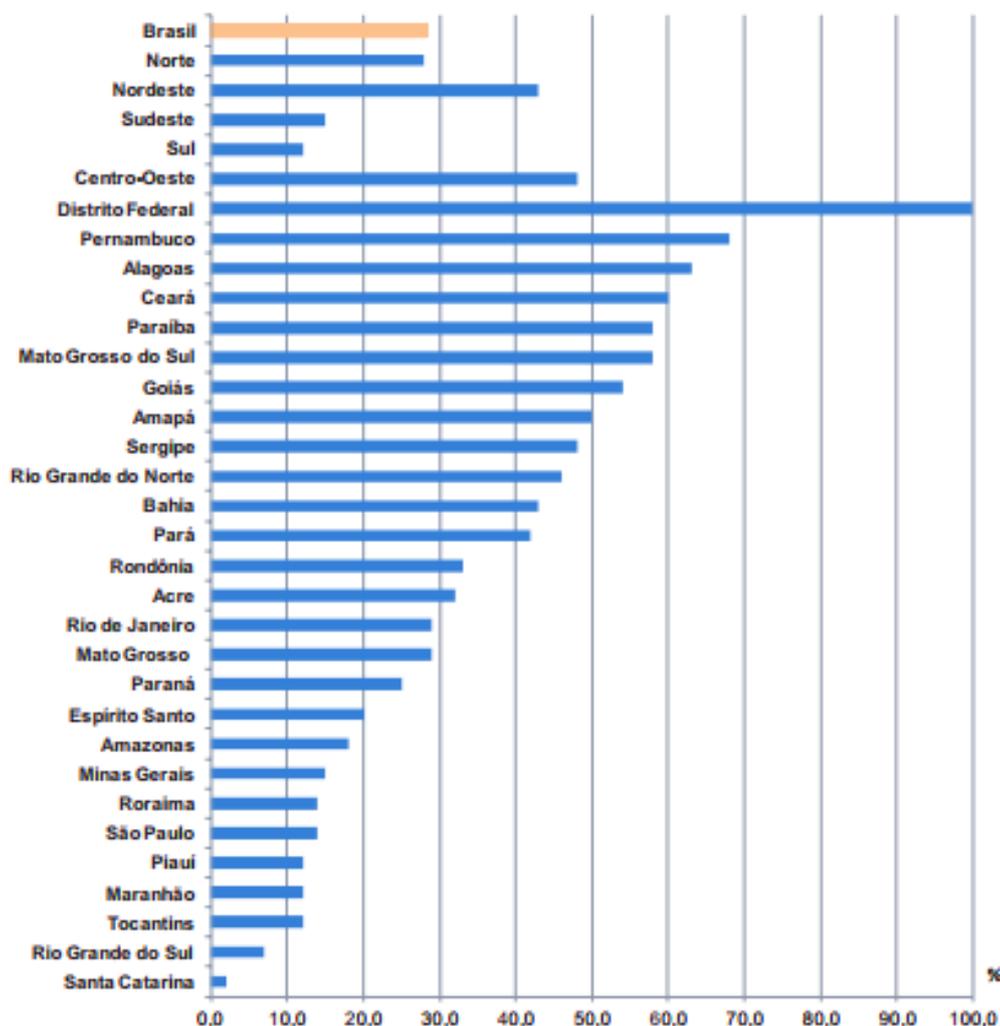
asfalto a quente. A substituição foi realizada em até 40% do agregado natural pelo agregado reciclado. As misturas foram submetidas a ensaios de umidade e deformação plástica. Os resultados mostraram que os concretos asfálticos compostos com 10% ou 20% de agregado reciclado poderão ser utilizados para pavimentação de estradas urbanas, devido os demais apresentarem susceptibilidade à umidade e deformação plástica. Todavia, os autores sugerem a inserção de agregados reciclados em pavimentos urbanos de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Comparando os estudos citados, percebe-se que o reaproveitamento de resíduos não ocorre de forma simples, rápida e de qualquer maneira. Muito embora o RCD venha sendo estudado há vários anos, nota-se que cada caso é singular. Contudo, as medidas de padronização para sua viabilidade em qualquer obra de engenharia devem passar por vários critérios para tornar válida a sua utilização.

A triagem do RCD é uma ótima estratégia de padronização que separa os diversos tipos de materiais para que o desempenho do produto final atenda aos requisitos estabelecidos em normas. Através destas, leis, códigos de obra, planos diretores e políticas públicas chegar-se-á a um processo mais sustentável. Seguindo outra linha de raciocínio, Costa *et al.* (2010) considera que a separação de resíduos é praticamente impossível porque há uma dificuldade para a segregação, além de aumento de custo. Dessa forma, os autores orientam o uso de misturas de agregados reciclados.

De maneira geral, o Brasil é um país deficiente no manejo de seus resíduos sólidos. Ações que objetivam enfrentar este problema tiveram início apenas no começo do século XXI, em 2002, com a resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, muito embora atitudes na Europa tenham sido tomadas desde o final da década de 1980 (BRASILEIRO *et al.*, 2015). A Figura 4 ilustra a porcentagem de municípios brasileiros que manejam seus resíduos. Os municípios da região sul do país se apresentam como os piores classificados.

Figura 4 - Municípios com manejo de resíduos sólidos segundo as unidades da federação - 2008



Fonte: IBGE (2008)

Somando forças a resolução n° 307 do CONAMA, a legislação brasileira, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n° 12.305 de 2010, estabelece princípios, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos, indicando as responsabilidades dos geradores, do poder público e dos consumidores. A gestão integrada é entendida como uma união dos responsáveis pela geração dos resíduos em busca de soluções mitigatórias quanto ao desenvolvimento sustentável, englobando dimensões políticas, ambientais, econômicas, culturais e sociais. Contudo, objetivando evitar o despejo inadequado de resíduos no meio ambiente, sua segregação deveria ser imputada aos construtores que são os próprios geradores. O estímulo a reciclagem precisaria ser posto com mais contundência através das normas, decretos e especificações.

2.3 Pesquisas sobre aplicação de RCD na construção civil

Segundo Brasileiro *et al.* (2015) o RCD pode ser usado como agregado desempenhando ótima qualidade em uma variedade de processos construtivos, como em tijolos, blocos pré-moldados, calçadas, meio-fio, camadas de pavimentos e etc. Não obstante, vários estudos vêm sendo realizados a respeito da inserção de agregado extraído de RCD na composição de diversos produtos, como: pavimentação rodoviária, obras de terra, blocos intertravados, concretos.

Numa tentativa de realizar uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos voltados para o RCD, Yuan *et al.* (2011) fizeram um levantamento em 8 revistas acadêmicas sobre o tema entre os anos de 2000 e 2009. Dentre os resultados, tem-se que a maior parte das publicações está voltada para o gerenciamento de resíduos em geral e sua reciclagem, correspondendo a 37,93 % e 26,44 %, respectivamente. Quanto ao país que mais contribuiu com publicações em gerenciamento de resíduos destaca-se a região administrativa especial da República Chinesa, Hong Kong, e Austrália com 23 e 11 artigos científicos, respectivamente. Neste cenário, o Brasil encontra-se empatado com a China e Malásia, ocupando a 7º posição com 4 artigos científicos. Nesta pesquisa, mostra, dentre outros fatos que o Brasil, país continental e grande gerador de resíduo ainda caminha a passos curtos nos primeiros dez anos do século XXI quanto a pesquisa sobre o assunto.

Tabsh *et al.* (2009) investigaram a qualidade do agregado graúdo extraído do RCD através de fatores que influenciam a resistência à compressão e à tração do concreto. Foram produzidos dois concretos, um de baixa e outro de moderada resistência. Baseando-se em normas americanas, os autores obtiveram como resultado que a resistência à compressão e à tração é mais significativa em concreto de baixa resistência.

Sabai *et al.* (2013) observando que os RCDs não eram reciclados na Tanzânia, estudaram sua inserção em blocos de concreto. Os autores coletaram 8 amostras diferentes e constataram que 85 % delas atenderam ao requisito de resistência à compressão daquele país. Este resultado indica que existe a possibilidade de reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Xuan *et al.* (2014) estudou a influência da qualidade e variação dos agregados reciclados de alvenaria em sua falha e resistência à tração indireta, utilizando-se de testes laboratoriais e modelagem de rede para analisar o processo de fratura. Os resultados

indicam que o conteúdo de alvenaria é um fator importante para determinar as propriedades mecânicas da mistura. Os autores concluem informando que a falha do agregado de alvenaria é originada na camada de ligação entre agregados e matriz ou através das partículas de alvenaria de baixa resistência.

Delongui *et al.* (2010) identificou, caracterizou e classificou os resíduos da construção civil na cidade de Santa Maria - RS com intuito de utilização nas camadas de base, sub-base e como revestimento primário de pavimentos. O resíduo continha em sua grande maioria (97%) materiais classificados como de classe A e, destes, 95% são derivados de cerâmica ou concreto. As composições granulométricas obedeceram às normas do DNIT. Muito embora os autores não tenham definidas as porcentagens de tipos de materiais constituintes do resíduo, constatou-se um índice de absorção alto e não apresentaram grande expansividade. Os autores concluíram que a variedade de materiais, contaminantes e dimensão do agregado influenciou na resistência do conjunto, porém, o reaproveitamento de resíduos é uma alternativa para a sustentabilidade na construção civil.

Ganjian *et al.* (2015) investigaram possíveis materiais alternativos na fabricação de blocos de pavimentação através de uma mistura com resíduos para reduzir a porcentagem de cimento portland. Os resíduos utilizados foram o gesso acartonado, vidro, agregado reciclado, tijolos reciclados, fibra de PVA, escória, dentre outros. Os autores concluíram que apesar dos blocos de pavimentação que continham o gesso acartonado não atender ao requisito mínimo de 3,6 Mpa, mostrou-se resistente ao deslizamento e ao teste de congelamento e descongelamento. Nos blocos que continham vidro reciclado e tijolos também reciclado em substituição de agregados de 6 e 4 mm cumpriram os requisitos mínimos do padrão britânico quando nessas misturas continham 1,5 % de fibra de aço.

Soutsos *et al.* (2012) estudaram os níveis de substituição de agregados de RCD por agregados naturais em blocos pré-fabricados de concreto. Os autores analisaram, de forma separada, o comportamento mecânico do bloco com resíduo de concreto e de alvenaria. Através de testes de resistência à flexão e absorção de água, os autores concluíram que com a substituição do agregado graúdo ou miúdo de concreto reciclado em 60% e 40%, respectivamente, obtiveram bons resultados. A substituição dos agregados graúdo ou miúdo de alvenaria reciclada em 70% e 30%, respectivamente, obtiveram também bons resultados.

Özalp *et al.* (2016) conceberam vários produtos de concreto com RCD, como concreto pré-misturado, tubo de concreto, pedras para pavimentação, pré-fabricados. As

propriedades físicas, durabilidade e permeabilidade foram determinadas. Diferentes taxas de substituições foram definidas, testadas e as propriedades mecânicas e de durabilidade dos produtos testados ficaram dentro dos limites exigidos. Não obstante, os autores sugerem que sejam aplicadas taxas de substituições mais baixas para melhor garantir propriedades mecânicas solicitadas.

2.4 Pesquisas sobre aplicação de RCD em pavimentação

Grubba *et al.* (2010) avaliaram a influência do tempo de cura sobre o comportamento mecânico do agregado reciclado de concreto (ARC) inserido nas camadas de base e sub-base de pavimentos. Ensaio de compressão simples e triaxiais cíclicos foram realizados em corpos de prova compactados nas energias intermediária e modificada. Os resultados mostraram que existe uma melhoria do comportamento mecânico do ARC ao longo do tempo de cura para ambas as energias pesquisadas, no qual é atribuída a própria cimentação do material. Não obstante, a energia de compactação modificada apresenta melhores propriedades mecânicas apenas no concreto ensaiado sem cura. Os autores concluem que o ARC é uma alternativa para ser utilizada em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Leite *et al.* (2011), estudaram o uso do agregado reciclado em pavimentos como material para base e sub-base em estradas de baixo volume. O material reciclado foi caracterizado e analisado por testes triaxiais de cargas repetidas. Além disso, o efeito do esforço de compactação sobre suas propriedades físicas e mecânicas foi analisado. Os seguintes testes foram executados: absorção de água, distribuição de tamanho de grão, forma de grão, Índice de Suporte Califórnia (ISC), módulo resiliente e deformação permanente. Os resultados mostraram que a composição e o esforço de compactação são fatores importantes no comportamento físico e mecânico dos agregados reciclados e seu uso é recomendado para a construção de estradas.

Costa *et al.* (2010) avaliaram estruturalmente um pavimento flexível contendo agregados reciclados nas camadas de base e sub-base na cidade de Goiânia – GO durante 4 anos de funcionamento. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com outros trabalhos anteriormente realizados. Os autores concluíram que o pavimento apresentou

bom comportamento funcional no qual mostrou baixo nível de deslocamento e boa resistência das camadas.

De acordo com Freitas *et al.* (2017) o uso de material fresado de pavimento é utilizado em misturas desde a década de 1980. Embora, inicialmente, fosse inserido apenas nas camadas de base e sub-base, com o avanço da tecnologia o pavimento fresado pode ser utilizado em todas as camadas.

Muller *et al.* (2014) avaliaram as resistências à compressão diametral de misturas compostas por material fresado de pavimento flexível, agregado natural (10%) e adição de cimento em diferentes porcentagens. Corpos de prova foram moldados no compactador Marshall automático e foram submetidos à cura. A mistura com maior teor de cimento (7%) apresentou melhor resistência à tração após os 28 dias de cura.

Ferreira *et al.* (2017) avaliaram a resistência de uma mistura composta por material fresado de pavimento asfáltico adicionado de nata de cimento objetivando obter o teor ideal de cimento a ser utilizado. Foram realizadas a caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova para verificação da resistência à compressão simples para cada consumo de cimento estabelecido e a definição do teor ideal de cimento a ser usado na confecção da nata a ser adicionada ao material reciclado. Os autores concluem que a adição do cimento favorece ao crescimento da resistência à compressão simples, porém, não de forma linear e o teor ideal de cimento encontra-se na faixa entre 3,10 e 3,49%.

Garcês *et al.* (2014) analisaram misturas contendo solo laterítico local (Goiás-GO) e material obtido através de fresagem de revestimentos betuminosos visando a melhoria do solo quanto a sua resistência para aplicação em base e sub-base de pavimentos. O trabalho foi sequenciado pela concepção do traço, tipo de energia de compactação, ensaio de índice de Suporte Califórnia (ISC) e a construção de um trecho experimental. Os resultados mostraram que com adição de 30% de material fresado somados aos 70% de solo local, o ISC atendeu aos requisitos para aplicação em sub-base. Os autores concluem que, todas as considerações de misturas e energia de compactação mostraram bons resultados melhorando a resistência do solo local.

Kumar (2017) investigou a resistência a abrasão do pavimento de concreto incorporando agregado de concreto reciclado derivado do resíduo de construção e demolição gerado em Nova Deli, Índia. O autor realizou misturas com 100% de agregado natural, 100% de agregado reciclado e agregado natural apenas nos agregados de tamanho entre 10 e 20 mm, na qual todas as misturas foram realizadas com os seguintes fatores

água/cimento: 0,44 e 0,38. As misturas foram submetidas aos ensaios de densidade, resistências à abrasão, compressão e flexão. Os resultados mostraram que as propriedades físicas, densidade e resistências à abrasão, compressão e flexão apresentaram valores inferiores aos convencionais, principalmente quando a substituição do agregado natural pelo agregado de concreto reciclado é feito em sua totalidade. Contudo, os autores indicam que o agregado reciclado pode substituir o agregado natural de pavimento de concreto sem prejudicar suas características de resistência à abrasão.

Morafa *et al.* (2017) fizeram um experimento para viabilidade do uso de agregados reciclados contaminados com óleo provenientes da indústria do petróleo em camadas de pavimentos. Os autores caracterizaram o agregado e fizeram testes mecânicos. Portanto, concluíram que, muito embora a resistência à compressão das amostras tenha diminuído à medida que aumenta a contaminação pelo óleo, a percentagem de fratura, abrasão Los Angeles e absorção de água tenham aumentado, os agregados contaminados são apropriados para camadas de sub-base.

Tavira *et al.* (2018) avaliaram as propriedades mecânicas em laboratório e in situ de agregados reciclados mistos não selecionados a partir de resíduos de construção e demolição utilizados como materiais de base e sub-base em pavimento na Espanha. Solo obtido de escavações foi misturado ao agregado reciclado e uma pista de teste rodoviária foi executada e analisada durante 7 anos. O desempenho mecânico e os valores de rugosidade da superfície foram obtidos a partir da estrada experimental e segundo os autores mostraram um comportamento aceitável.

Proença *et al.* (2012) analisaram em laboratório as características físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduo da construção civil em Recife-PE, objetivando seu uso em camadas de base e sub-base em vias de baixo volume de tráfego. Através dos ensaios de composição gravimétrica, massa específica das partículas, absorção, granulometria, formas dos grãos, compactação e índice de suporte califórnia, os autores obtiveram como resultado que o resíduo apresentou maior quantidade de material cerâmico (34%) implicando em maior taxa de absorção e maior quantidade de grãos cúbicos após a implementação da energia modificada na compactação. Enfim, recomenda-se para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego.

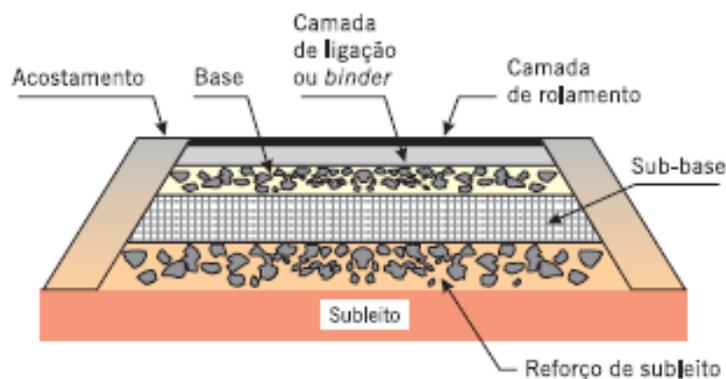
Basso *et al.* (2017) verificaram a viabilidade técnica e econômica do uso de RCD em camadas de pavimentos durante seu ciclo de vida. Foram realizadas quatro composições distintas e o dimensionamento foi efetuado através do software SisPavBr.

Constatou-se que quando o RCD é utilizado na camada de sub-base em vias de baixo e médio tráfego, o pavimento possui desempenho técnico e de custo satisfatório quando comparado ao uso de RCD em camada de base.

2.5 Pavimento de concreto asfáltico

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), pavimento é uma estrutura composta por várias camadas construídas sobre uma superfície de terraplanagem (subleito), capaz de resistir a esforços de tráfegos de veículos, variações de temperatura, além de propiciar condições confortáveis de tráfegos e segurança aos usuários (Figura 5).

Figura 5 - Estrutura de pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Dentre os tipos de pavimentos, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT (Brasil, 2006) classifica os pavimentos existentes em 3 categorias:

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

Os pavimentos flexíveis se caracterizam por conter o revestimento flexível (concreto asfáltico), que por sua vez, absorve os esforços de tração e uma pequena parcela do esforço de compressão. Segundo a Norma DNIT 031/2006 – ES que especifica os serviços de pavimentos flexíveis define-se o concreto asfáltico como:

“Mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíller) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente.”

2.6 Pesquisas sobre aplicação de RCD em concretos asfálticos

Balzan *et al.* (2003) relata que um dos primeiros artigos a ser publicado em evento nacional sobre o uso de RCD em pavimentação foi o artigo intitulado “Utilização de entulho da construção civil reciclado na pavimentação urbana” publicado na Reunião Anual de Pavimentação ocorrida em Cuiabá/MT na década de 1990, em 1995. Nesta mesma década registram as primeiras atividades de reciclagem por meio de uma usina de britagem na cidade de São Paulo, em 1991 (Souza *et al.*, 2012).

Dentre algumas formas de reaproveitamento de resíduos, a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - Abrecon (2018) recomenda o uso de vários tipos de produtos residuais que visam a sustentabilidade, conforme a Tabela 1. Observa-se o uso de agregados reciclados em obras de pavimentação.

Tabela 1 - Produtos residuais e possibilidades de utilização

Produto	Uso recomendado
Areia reciclada	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco reciclado	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
Brita reciclada	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
Bica corrida	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço de subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
Rachão	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

Fonte: Abrecon (2011) – Adaptado

Todavia, mostrando-se como um vilão do ambiente urbano quando descartados sem os devidos cuidados, o RCD é um vetor de doenças como a dengue, febre amarela, além de

ser um atrativo para insetos. De acordo com Silva *et al.* (2014) embora a reciclagem seja frequentemente citada como a melhor maneira de gerenciar o RCD, ainda existem vários obstáculos para o uso de agregados reciclados em construção:

- A falta de confiança dos clientes e prestadores de serviços;
- A incerteza quanto aos seus benefícios ambientais;
- A falta de normas e especificações que os produtores de concreto podem levar em conta;
- A baixa qualidade do produto final devido à falta de conhecimento e/ou interesse dos proprietários em reciclar RCD;
- Distância entre os locais de construção de demolição e reciclagem;
- A falta de um fornecimento constante de resíduo de qualidade para satisfazer a demanda existente.

Ainda de acordo com os autores citados anteriormente, espera-se que até 2020 novas estruturas de construção incluam pelo menos 5% de materiais reciclados. Apesar de estar próximo, a taxa de aproveitamento pode se representar como baixa tendo em vista a possibilidade de aplicações como em pavimentos, calçadas, muros e etc. Mesmo após a publicação de diversas pesquisas durante as últimas duas décadas, a falta de confiança dos clientes ainda é o fator principal para que a reciclagem seja deficiente. Porém, medidas que visem seu reaproveitamento não se limita apenas ao simples desejo de reutilização visando principalmente a redução de custos, mas a ampla necessidade de tornar as construções mais sustentáveis.

Chen *et al.* (2011) investigaram o potencial da utilização de pó extraído do beneficiamento de agregado reciclado em misturas asfálticas. Realizou-se ensaios laboratoriais a fim de averiguar o comportamento da mistura frente a resistência à tração, fluência dinâmica, sensibilidade à água, fadiga, além de ensaios de caracterização como o DRX, FRX e MEV pelo qual foram comparadas a uma mistura convencional que usou pedra calcária como agregado. Composto principalmente por quartzo e calcita, o pó de agregado reciclado contido na mistura asfáltica proporcionou melhores propriedades quanto a sensibilidade à água e fadiga, muito embora tenha havido redução de desempenho à baixas temperaturas. Os autores recomendam o uso do pó especialmente em regiões quentes.

Souza *et al.* (2012) avaliaram o uso do RCD como agregado reciclado para confecção de misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)

para uso em camadas de revestimento rodoviário. Comparando corpos de prova composto de agregado de resíduo e outro com agregado natural de calcário convencional constatou-se que aquele apresentou maior resistência à tração por compressão diametral e menor rigidez quando comparado a este. De forma geral, o agregado reciclado de RCD atendeu as especificações das normas para a utilização de agregado em misturas asfálticas, sendo considerada a possibilidade de uso para vias de baixo a médio volume de tráfego.

Lourenço *et al.* (2015) analisaram a viabilidade técnica do RCD em substituição ao agregado convencional usado em misturas asfálticas usinadas a quente visando aplicar em camadas de rolamento de rodovias. Através da dosagem Marshall foi encontrado o teor ótimo de ligante asfáltico CAP 50/70. Ensaio como fluência e dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, desgaste cântabro foram realizados. Dentre alguns resultados, constatou-se que a estabilidade Marshall resultou em 1.468,7 kgf e desgaste cântabro igual a 2%. Logo, concluíram que o uso de agregados reciclados em camadas de revestimento para rolamento tem potencial para ser utilizado com tal fim.

Amorim *et al.* (2017) identificando que há poucos estudos sobre a utilização de RCD em revestimentos asfálticos aplicados a frio pesquisaram seu uso em diversas dosagens, no qual adotaram como material residual a brita 1 (19 mm), brita 0 (12,5 mm), areia e fíller. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados e do ligante asfáltico, além da dosagem pelo método Marshall. Os materiais obtidos através do processo de reciclagem apresentaram curva granulométrica semelhante à dos naturais e a maioria deles mostrou parâmetros que atendem aos requisitos normativos da ABNT e DNIT.

Freitas *et al.* (2017) investigaram o uso do pavimento reciclado em rodovias Brasileiras (BRs 116 e 381) no qual foram analisados seus relatórios, além de trabalhos científicos presentes nas bases Scopus e Scielo. A utilização de material fresado nas camadas de base e sub-base garante a resistência e uma impermeabilidade adequada e, na camada de revestimento, o material reciclado aumenta o módulo de resiliência, a resistência à penetração da água, além de diminuir o uso de ligantes. Os autores relatam que se bem dimensionada, rodovias que utilizam material reciclado em suas camadas obtém ganhos econômicos, técnicos e ambientais.

Fernandes *et al.* (2018) utilizaram material residual extraído de rochas ornamentais (mármore) como agregado em misturas asfálticas. Foram comparados dois tipos de

misturas, uma com agregado convencional e a outra com 2% de agregado residual com diâmetro semelhante ao pó de pedra. Ensaios de caracterização dos agregados e do CAP 50/70, resistência à tração e módulo de resiliência dos corpos de prova foram realizados. Observou-se que os corpos de prova com resíduo de marmoraria apresentaram maior resistência à tração (11,69%) e módulo de resiliência (7,89%) quando comparados aos corpos de prova com agregado convencional, embora o teor de ligante ideal tenha aumentado devido o resíduo ser menos denso e dispor de maior porosidade.

Suzuki *et al.* (2018) avaliaram a resistência à tração e o dano por umidade induzida de misturas asfálticas contendo diversos teores de material fresado para uso em camadas de ligação e rolamento de pavimento. As propriedades dos agregados e ligante foram determinadas. A dosagem com o compactador Marshall foi feita objetivando atingir um volume de vazios de 4%. Com a incorporação de material fresado nas misturas em até 50% aumentou-se a resistência à tração quando a amostra não foi submetida ao condicionamento da água. Já condicionada a água, a amostra não apresentou linearidade de crescimento de resistência à tração e obtiveram resistências menores. Os autores creditam essa redução a perda de adesividade entre o filme de ligante asfáltico e os agregados. Por fim, todas as misturas atenderam aos requisitos mínimos do DNIT tanto para a resistência à tração quanto para o dano por umidade.

Gomez-Meijide *et al.* (2016) estudaram a inserção do resíduo de construção e demolição (RCD) em pavimentos de asfalto à frio (PAF). Os autores investigaram o módulo de rigidez de tração indireta dessas misturas asfálticas contendo o RCD a fim de determinar se esses agregados afetam o PAF de forma prejudicial ou se podem ser considerados como uma alternativa viável. Os resultados mostraram que a mistura asfáltica com agregado RCD apresentou maior rigidez quando comparada a mistura com agregado natural.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Para efeito da dosagem asfáltica objeto deste estudo, os agregados utilizados nesta pesquisa foram a brita 1, brita 0, pó de pedra e areia. A brita 0 e o pó de pedra foram obtidos junto ao laboratório de materiais de construção do IFRN - Campus Natal-Central, tratando-se de agregados naturais de origem granítica. Quanto a brita 1 e a areia, essas composições foram oriundas de RCD obtidos através da empresa Duarte Ltda, localizada no município de São José de Mipibu-RN, onde verificou-se que a sua composição era constituída, principalmente, por material cimentício e cerâmico. É oportuno destacar, que durante a produção do RCD é realizada uma triagem para a eliminação de materiais indesejáveis, como o plástico, metais, dentre outros. Como material de enchimento (fíler) utilizou-se o cimento Portland do tipo CP IV, fornecido pelo IFRN - Campus Natal-Central. Por fim, para promover a ligação entre os agregados, utilizou-se o ligante asfáltico do tipo CAP 50/70, cuja amostra foi obtida em parceria com a empresa TcPav.

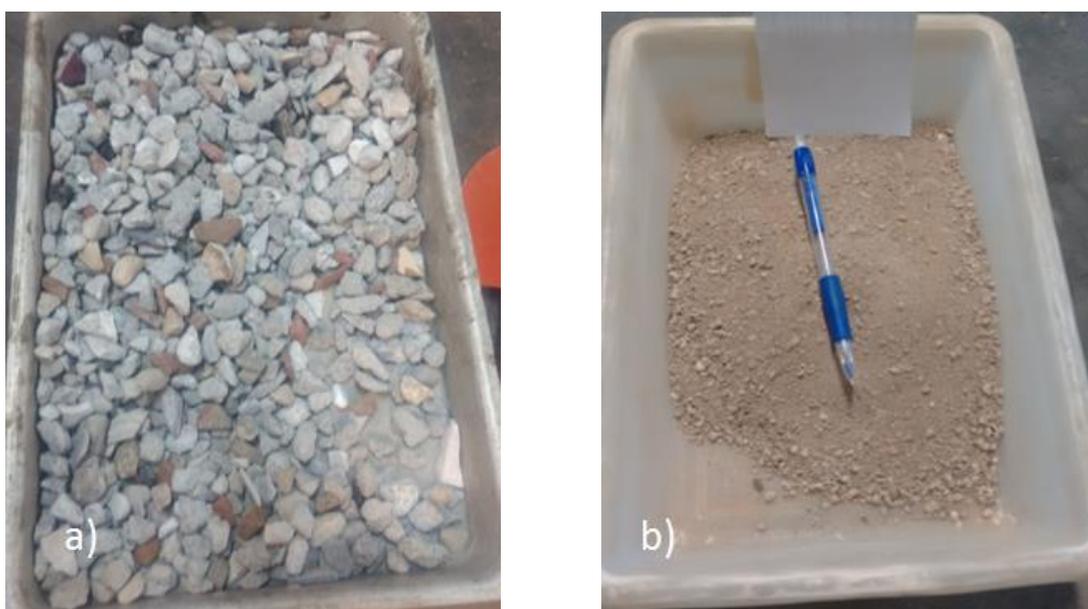
A coleta dos materiais reciclados foi realizada por meio de pontos distintos nas pilhas de brita 1 e areia existentes na usina de produção da Duarte Ltda, conforme detalhes ilustrados pela Figura 6. Convém ressaltar que o procedimento de coleta foi feito em conformidade com o que se preconiza a norma DNER PRO 120 (DNIT, 1997), onde, segundo esta norma, devem ser escolhidos três pontos distintos da pilha para a coleta do material, de modo a se penetrar cerca de 30 cm com relação as superfícies planajedas no topo, na base e no meio.

Figura 6 - Coleta dos agregados RCD em pilhas: (a) Agregado reciclado brita 1; (b) Agregado reciclado areia



Cada um desses materiais foi acondicionado em três sacos de nylon, no qual cada saco continha, aproximadamente, 20 kg de material. Após a etapa de coleta em campo, os materiais reciclados foram cuidadosamente transportados para o IFRN, de modo a se realizar os ensaios programados para esta pesquisa. A Figura 7 ilustra os agregados reciclados usados nesta pesquisa.

Figura 7 - Agregados reciclados: (a) Agregado reciclado brita 1; (b) Agregado reciclado areia



3.2 Infraestrutura e logística para a realização do estudo

As atividades que serão elencadas neste trabalho foram realizadas em quatro partes principais: caracterização dos agregados naturais e reciclados, caracterização do ligante asfáltico, dosagem pelo método Marshall e execução de um trecho experimental de maneira a se ter uma análise prática do estudo. Conforme mencionado anteriormente, a obtenção dos agregados reciclados foi realizada por meio de uma parceria firmada com o grupo Duarte, enquanto que as demais frações de agregados e fíler foram cedidas pelo IFRN.

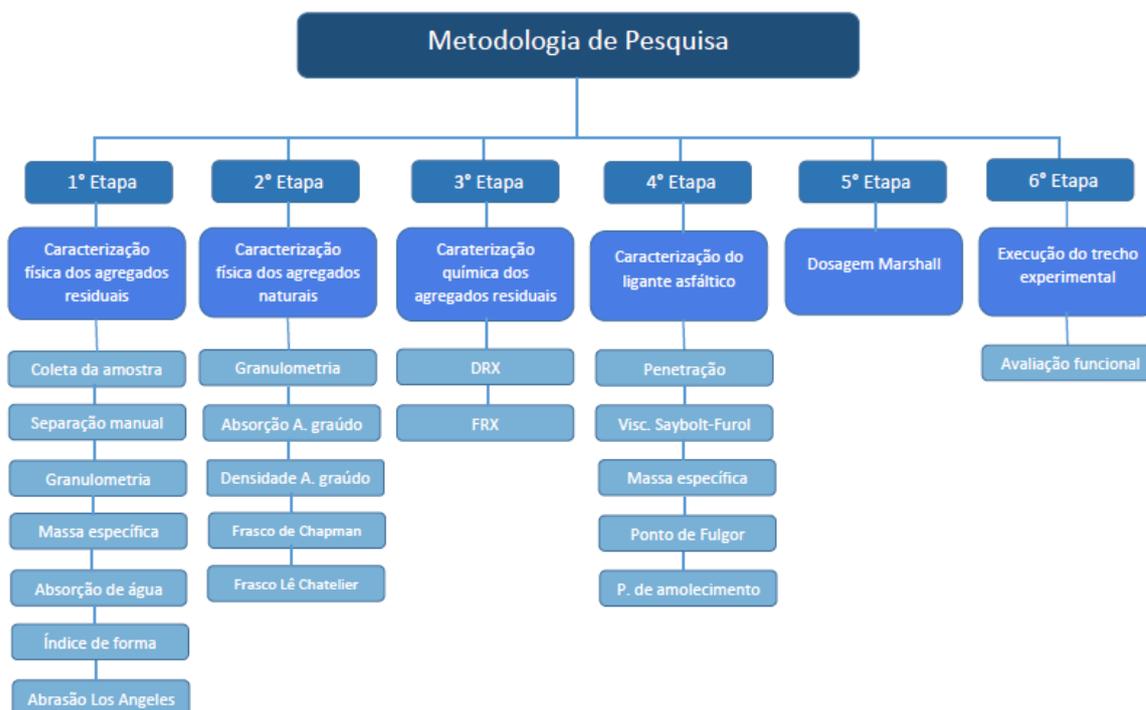
A empresa TcPav auxiliou, inicialmente, na doação do ligante asfáltico que foi caracterizado no laboratório de pavimentação da Diretoria Acadêmica de Construção Civil (DIACON) do IFRN, sendo este local também onde se realizou a caracterização física dos agregados e da dosagem Marshall, proposta para este estudo. Além disso, por meio de uma parceria firmada junto a TcPav, essa empresa realizou um trecho experimental na zona norte da cidade do Natal-RN, na Rua José Miranda da Silva, bairro Novo Brasil.

O laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) executou os ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

3.3 Método de trabalho

As atividades desenvolvidas para este trabalho, em resumo, foram as seguintes: caracterizações física, química e mineralógica dos agregados brita 1 e areia, sendo ambos reciclados; caracterização física dos agregados naturais brita 0 e pó de pedra graníticos e cimento Portland CP IV; caracterização do cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70; estudos de dosagens pelo método Marshall de traços para concretos asfálticos a quente e; execução de um trecho experimental na zona norte da cidade do Natal-RN. A Figura 8 apresenta um fluxograma ilustrativo das principais etapas da pesquisa.

Figura 8 - Resumo das etapas da pesquisa



3.3.1 Caracterização física do RCD e agregados naturais

Os ensaios de caracterização física dos RCDs e agregados naturais foram realizados de acordo com as referências normativas apresentadas na Tabela 2.

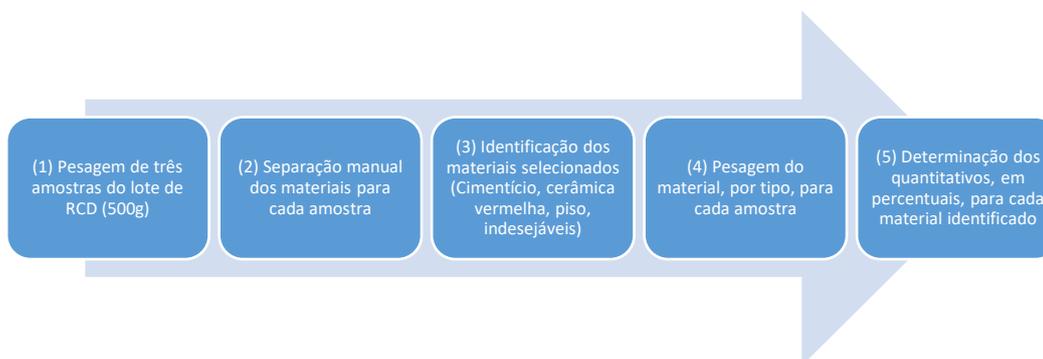
Tabela 2 - Ensaios normatizados de caracterização física para os agregados

Ensaios	Normas
Coleta de amostras de agregados	DNER PRO 120/97
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

O material RCD brita 1 é caracterizado por ser um elemento heterogêneo composto por diversas fases. Por isso, foi necessário realizar, a princípio, uma seleção manual das várias fases presentes no resíduo de forma a identificar a existência ou não de materiais

indesejáveis, além de mostrar qual a fase dominante em quantidade. O procedimento de seleção manual ocorreu da seguinte maneira ilustrada pela Figura 9.

Figura 9 - Procedimento de seleção manual dos resíduos.



As Figuras 10 e 11 ilustram o procedimento de seleção manual dos resíduos e os detalhes de alguns dos ensaios de caracterização, respectivamente.

Figura 10 - Procedimento de seleção manual dos resíduos: (a) Três amostras de 500 g coletadas em pontos distintos da pilha; (b) Amostra após seleção manual



Figura 11 - Caracterização do Agregado brita 1 de RCD: a) Análise granulométrica; b) Índice de forma; c) Abrasão Los Angeles; d) Absorção e densidade



3.3.2 Ensaios de caracterização química e mineralógica

Foram executados os ensaios de Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX) em conformidade com as recomendações dos fabricantes dos equipamentos visando uma melhor análise dos materiais constituintes quando da incorporação nas misturas asfálticas. Todavia, o intuito foi o de identificar a composição química e estrutural dos grãos de maneira a contribuir no entendimento do comportamento dos materiais residuais inseridos na camada de revestimento asfáltico.

De forma a possibilitar a identificação dos compostos cristalizados, incluindo as formas alotrópicas, o ensaio de DRX teve o propósito de reconhecer a composição mineralógica da brita 1 e areia, ambos reciclados. As amostras desses resíduos moídos e peneirados na malha de #0,075 mm foram ensaiadas no Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais – UFRN servindo-se de um equipamento Shimadzu DRX 7000.

As condições da operação foram as seguintes: submeteu-se a amostra a uma tensão de 40 kV com corrente contínua de 30 mA e com radiação Ka de um ânodo de cobre (Cu).

O ensaio foi realizado com varredura de 2 theta de 5° a 80° no qual o passo angular se procedeu a uma taxa de 0,02° e o tempo de contagem de 1,2 segundos por passo. Logo, as fases cristalinas foram identificadas e as interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas comparado-se com um banco de dados contido em um software computacional.

Para o ensaio de Fluorescência de Raios X empregou-se o equipamento do fabricante Shimadzu – modelo EDX 720/800HS, no qual foi aplicado o método semiquantitativo numa atmosfera à vácuo. Neste ensaio a amostra foi inserida em uma porta amostras de maneira a preencher todo o recipiente. Em seguida, cobriu-se a amostra com um papel filme de polipropileno objetivando evitar perdas de material durante o ensaio. Finalmente, o material preparado para o ensaio foi levado ao equipamento onde foi feita a leitura dos óxidos constituintes.

3.3.3 Caracterização do ligante asfáltico

Os ensaios de caracterização do ligante asfáltico são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios normatizados para a caracterização do ligante asfáltico.

Ensaios	Normas
Determinação do ponto de fulgor	VOL. 12 / ME-26/03
Determinação do ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Determinação da penetração	DNIT 155/2010-ME
Determinação da densidade e massa específica	DNER-ME 193/96
Determinação da viscosidade Saybolt-Furol	DNER-ME 004/94

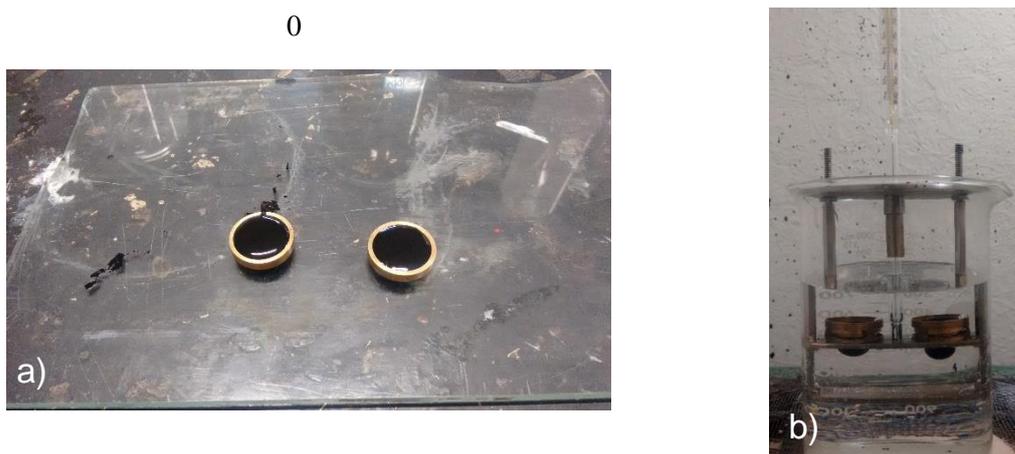
O ponto de fulgor e de combustão do CAP 50/70 foi definido segundo a norma da prefeitura do Recife VOL. 12 / ME-26/03. Esta norma é aplicável a todos os derivados de petróleo com pontos de fulgor entre 79°C e 400°C, excetuando-se os óleos combustíveis. A Figura 12 ilustra detalhes da execução do ensaio e o acompanhamento da obtenção da temperatura com um termômetro, respectivamente.

Figura 12 - Ensaio de ponto de fulgor e de combustão: a) Execução do ensaio; b) Acompanhamento da temperatura do ensaio



O ponto de amolecimento foi executado consoante a norma DNIT 131/2010 – ME. A faixa de temperatura atendida por esta norma está entre 30°C e 157°C, através da qual o procedimento deve ser realizado no tempo máximo de 240 minutos, compreendidos entre o enchimento dos anéis e o final do ensaio. Com aproximação de 0,2 °C, o ponto de amolecimento deve ser a média das temperaturas indicadas pelo termômetro no instante em que o material que envolve a bola tocar a placa inferior. A Figura 13 ilustra o enchimento dos anéis com o CAP e a execução do ensaio, respectivamente.

Figura 13 - Ensaio de determinação do ponto de amolecimento: a) Enchimento dos anéis; b) Execução do ensaio



O ensaio de penetração foi realizado conforme a norma DNIT 155/2010-ME. Foram executadas 3 amostras com 3 furos, cada, onde se distanciou das bordas, no mínimo, 10 mm. A temperatura da água ficou em 25 °C, considerada a temperatura ambiente. O peso do conjunto penetração foi igual a 100 g e a penetração durou por um

período de 5 s. A Figura 14 ilustra a preparação das amostras e a execução do ensaio, respectivamente.

Figura 14 - Ensaio de penetração: a) Preparação das amostras; b) Execução do ensaio



A densidade e massa específica do CAP foram efetuadas de acordo com a norma DNER – ME 193/96. Utilizou-se duas amostras com material semi-sólido à 25 °C, além de picnômetros. A densidade do cimento asfáltico de petróleo é dada por uma relação entre massas do picnômetro, água e CAP. A Figura 15 ilustra o enchimento dos picnômetros com CAP e água, respectivamente.

Figura 15 - Ensaio de determinação da densidade e massa específica: a) Enchimento dos picnômetros com CAP; b) Enchimento do picnômetro com água



A viscosidade Saybolt-Furol foi efetuada conforme a norma DNIT-ME 004/94. Este método fixa as seguintes temperaturas de ensaio: 121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 177°C, 204°C e 232°C. O processo consiste na contagem da medição do tempo em

segundos em que 60 ml de amostra betuminosa escoam através de um orifício. A Figura 16 ilustra a estufa com o CAP e a execução do ensaio, respectivamente.

Figura 16 - Ensaio de determinação da viscosidade Saybolt-Furol: a) Estufa com o CAP; b) Execução do ensaio



3.3.4 Dosagens de misturas asfálticas a quente

Estabeleceu-se que as dosagens seriam realizadas pela faixa C de acordo com a norma DNIT-ES 031/2006, a qual recomenda esta faixa para a camada de rolamento e onde o diâmetro máximo do agregado seja inferior a $2/3$ da espessura da camada. Para esta análise foram empregadas as normas descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaio normatizados com o concreto asfáltico e sua especificação

Ensaio	Normas
Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico - ES	DNER-ES 031/06
Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall	DNER-ME 043/95

De maneira a investigar o estudo, executou-se um traço contendo os agregados reciclados brita 1 e areia. A composição utilizada está apresentada na Tabela 5. Destaca-se que preferiu-se deixar uma porcentagem de agregados graúdos superior a 50% pelo fato deste ser responsável por proporcionar a capacidade de suporte do revestimento asfáltico. Além disso, optou-se em limitar a quantidade de cimento em 2%. O percentual de agregado miúdo obedeceu aos critérios de enquadramento da faixa C da norma 031/2006 do DNIT (2006a) que buscou uma melhor delimitação entre as faixas limites, bem como maior proximidade da curva real, resultando em 45%.

Tabela 5 - Composição do traço com CAUQ

Traço com agregados reciclados	
Materiais	Traço
Brita 1 (reciclada)	13%
Brita 0 (natural)	40%
Pó de pedra (natural)	25%
Areia (reciclada)	20%
Cimento	2%
Total	100%

O processo de dosagem Marshall foi realizado conforme a norma DNER-ME 043/95, tendo início com a separação dos constituintes. Após a separação das fases constituintes colocou-os em estufa por um período de 24 h a uma temperatura de 160,8 °C. Logo depois foram misturados e inseridos no fogão para que a temperatura dos agregados aumentasse em 10 °C acima da temperatura do ligante asfáltico. Sem demora, os agregados foram colocados sobre uma balança e o CAP foi adicionado à mistura de modo que preenchesse toda a sua superfície. Então, a mistura foi homogeneizada a altas temperaturas por cerca de três minutos de modo a envolver o ligante por toda a superfície do agregado. A Figura 17 ilustra os passos seguidos no processo de dosagem

Figura 17 - Materiais para execução de corpos de prova de CAUQ: (a) Separação das fases constituintes; (b) Cápsulas com material em estufa (c) Agregados com temperatura superior ao ligante asfáltico; (d) Mistura betuminosa a quente



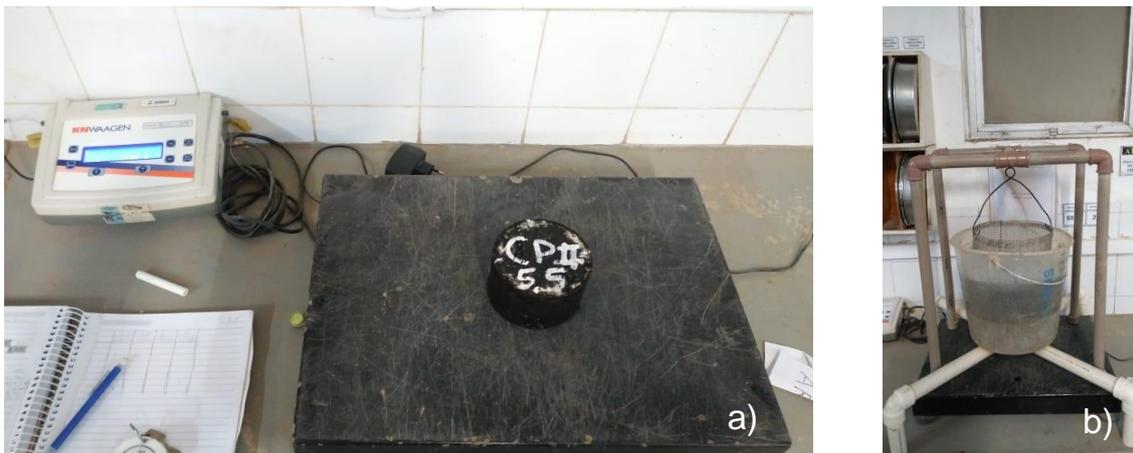


Ao término desta etapa prosseguiu-se a moldagem dos corpos de provas. Para a realização da compactação do material utilizou-se um soquete com peso padronizado, que fora liberado 75 vezes (golpes) em cada face do corpo de prova de concreto asfáltico. Um papel filtro foi usado para evitar o espalhamento do ligante asfáltico e uma possível fixação no suporte de compactação. A Figura 18 demonstra os passos de moldagem, compactação e corpo de prova finalizados. Em seguida, aferiu-se as dimensões de cada corpo de prova e obteve-se suas respectivas massas: (a) corpo de prova seco (b) corpo de prova imerso em água (massa hidrostática) (Figura 19).

Figura 18 - Preparação e confecção do corpo de prova: (a) Detalhe do papel filtro; (b) Compactação do corpo de prova; (c) Corpo de prova finalizado

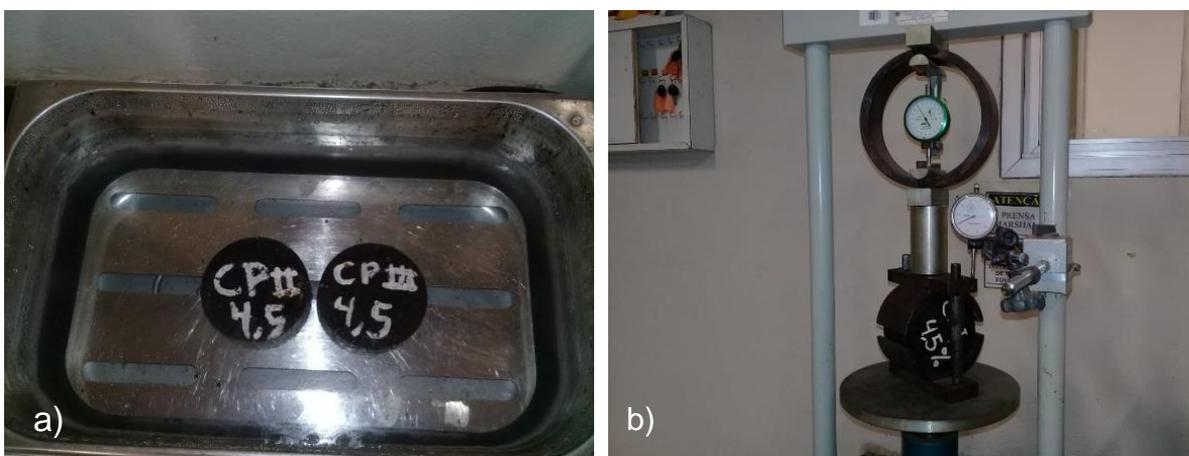


Figura 19 - Aferição das massas dos protótipos: (a) Massa seca; (b) Massa hidrostática



Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall consoante a norma DNER –ME 043/95. Eles foram imersos em banho maria, onde permaneceram por 30 minutos a uma temperatura de aproximadamente 60 °C. Em seguida os corpos de prova foram colocados no molde de compressão onde foram submetidos a uma carga constante até o seu rompimento. A prensa contém dois extensômetros que indicam a estabilidade e a fluência e o ponto de obtenção dos valores consiste na parada instantânea do ponteiro da estabilidade que ocorre quando o corpo de prova é rompido, anotando-se os respectivos valores. A Figura 20 ilustra detalhes do ensaio.

Figura 20 - Definição da estabilidade e fluência: (a) Corpos de prova de CAUQ em banho maria a 60 °C; (b) Rompimento do corpo de prova na prensa Marshall



3.3.5 Execução do trecho experimental

Um trecho experimental foi executado em escala de campo com traço convencional de mercado utilizando agregados naturais e outro com traço semelhante a dosagem da pesquisa usando a composição de agregados reciclados. O trecho foi executado visando-se avaliar o seu desgaste superficial e consequentemente sua funcionalidade no decorrer do tempo, na qual está submetida as intempéries naturais como chuva, insolação, tráfego por diferentes tipos de veículos e com diferentes frequências de carregamento.

O trecho foi a Rua José Miranda da Silva, bairro Novo Brasil, localizada na Zona Norte de Natal/RN (Figura 21). A escolha da referida rua se deu porque ela interliga uma das principais avenidas da capital do estado, a Avenida Moema Tinoco e, por este motivo cogitou-se que seria interessante analisar seu comportamento perante o tráfego. A geometria do trecho experimental contendo agregados residuais possui as dimensões iguais a 46 m de comprimento e 2,80 m de largura, bem como espessura de aproximadamente 0,05 m.

Figura 21 - Localização da Rua José Miranda da Silva



Uma vez que a produção do CAUQ foi realizada em Macaíba/RN, cidade pertencente a região da Grande Natal e que fica distante do local de execução do trecho 40 km, a mistura asfáltica foi transportada até o trecho em dois caminhões basculantes, cada um contendo 11,76 toneladas. e a uma temperatura de 170 °C. Em seguida, o revestimento asfáltico foi aplicado na rua que não cotinha nenhum tipo de pavimentação asfáltica, como por exemplo o paralelepípedo. A Figura 22 ilustra o carregamento do caminhão basculante na usina e o posterior descarrego do revestimento asfáltico na pavimentadora para aplicação no trecho experimental, respectivamente.

Figura 22 - Carregamento e descarregamento do material asfáltico: (a) Carregamento do asfalto na usina; (b) Descarregamento do asfalto na pavimentadora para aplicação no trecho experimental



Descarregada a mistura asfáltica na pavimentadora, em seguida procedeu-se ao nivelamento do pavimento. Durante esse processo pode ocorrer algumas falhas. Essas imperfeições devem ser corrigidas para que o revestimento asfáltico tenha uma boa vida útil e não venha apresentar precocemente defeitos estruturais. O surgimento de poças de água localizadas, por exemplo, poderá contribuir para a diminuição de sua vida útil. Logo, o espalhamento do asfalto de forma corretiva se torna crucial para evitar danos num futuro próximo. A Figura 23 ilustra o nivelamento do pavimento asfáltico.

Figura 23 - Nivelamento do pavimento asfáltico: (a) Nivelamento mecânico realizado com a pavimentadora; (b) Nivelamento manual para correção de imperfeições



Após o nivelamento, os rolos pneumático e liso através do peso próprio e vibração, respectivamente, proporcionaram a compactação e acabamento final. Enquanto o pneumático selou a superfície, o liso contribuiu também para que o asfalto não tivesse marcas de compactação (Figura 24).

Figura 24 - Execução de compactação com rolos: (a) Rolo pneumático; (b) Rolo liso



Por fim, o produto final gerado foi um pavimento asfáltico que contém agregados reciclados em sua composição e teor ótimo de ligante empregado da ordem de 5,4%, na qual foram analisados seus aspectos visuais e funcionais durante um período de quatro meses. A Figura 25 ilustra detalhes do trecho experimental executado.

Figura 25 - Trecho experimental final: a) Revestimento asfáltico compactado com agregados reciclados; b) Espessura do revestimento de aproximadamente 0,05 m.



CAPÍTULO 4

Resultados

4.1 Resultados da caracterização dos agregados

A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados da caracterização dos agregados naturais e reciclados. Nos subitens seguintes são discutidos alguns resultados obtidos.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados

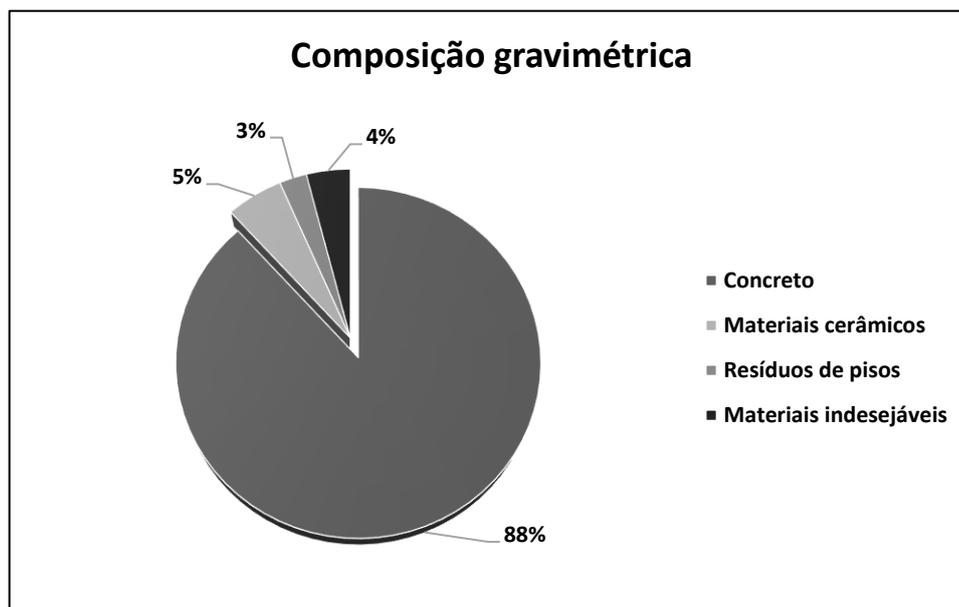
Agregados/ Ensaio	Granulometria (Dim. Máx. Caract.) (mm)	Absorção (%)	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Índice de Forma	Abrasão Los Angeles (%)
Brita 1 (RCD)	19,00	6,17	2,19	0,87	35,0
Brita 0 (Natural)	9,50	1,91	2,56	-	-
Areia (RCD)	4,75	-	2,54	-	-
Pó de pedra (Natural)	2,36	-	2,63	-	-
Cimento (Natural)	-	-	2,86	-	-

4.1.1 Análise do agregado graúdo por tipo de material (fases)

De maneira preliminar, verificou-se quais foram as fases constituintes presentes no agregado graúdo residual brita 1 objetivando identificar a fase predominante do material heterogêneo. A Figura 26 ilustra as proporções das fases obtidas a partir da média de três amostras distintas.

Diante das fases encontradas constatou-se que a fase de concreto predomina entre as demais com 88%. Por conseguinte, o material residual brita 1, quanto a sua composição, pode ser classificado como agregado de resíduo misto (ARM), uma vez que este tipo de agregado é obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (NBR 15116, 2004).

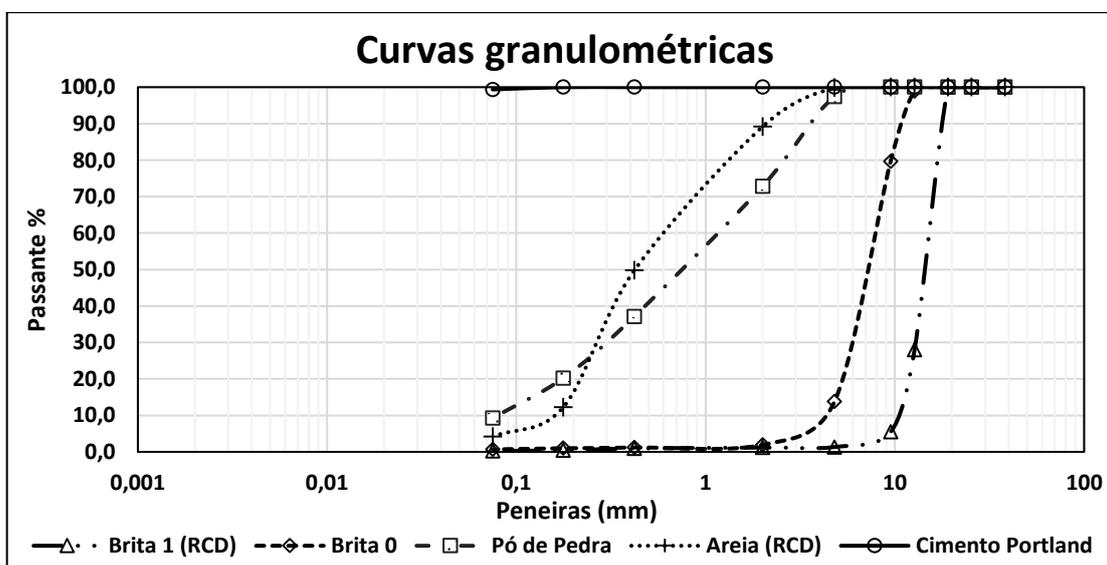
Figura 26 - Composição gravimétrica da brita 1 residual



4.1.2 Análise granulométrica dos agregados naturais e RCD

O ensaio de granulometria obedeceu aos requisitos da norma DNER-ME 083/98, na qual todos os agregados foram submetidos. A massa mínima por amostra de ensaio, segundo esta norma foi atendida, sendo utilizadas as massas iguais a 7.027,5 g, 5.010,9 g, 1.004 g, 1.160 g para a brita 1, brita 0, areia reciclada e pó de pedra, respectivamente. A Figura 27 apresenta a análise granulométrica das frações finas e grossas.

Figura 27 - Curvas granulométricas dos agregados



Analisando-se as curvas granulométricas, observa-se que a brita 1 (RCD) e a brita 0 possuem uma graduação aberta, com pouca quantidade de finos, demonstrando que a qualidade do material apresenta-se satisfatória para aplicação em obras de pavimentação, uma vez que a capacidade de suporte está ligada a fração graúda dos concretos asfálticos. No que diz respeito a areia reciclada e ao pó de pedra, pode-se observar que ambas as frações tenderam a materiais contínuos, o que constitui de um parâmetro importante para o empacotamento dos grãos na composição do concreto asfáltico a ser estudado. Por fim, o cimento Portland enquadrou-se perfeitamente como um fíler, o que é desejável para o fechamento de um traço de qualquer concreto asfáltico.

4.1.3 Módulo de finura e dimensão máxima característica

O Módulo de Finura foi estabelecido para todos os agregados, seja natural ou reciclado. Dessa forma, auferiram-se os seguintes valores para os agregados reciclados brita 1 e areia: 7,85 e 3,82, respectivamente. Para os agregados naturais brita 0 e pó de pedra os valores resultaram, respectivamente, em 5,73 e 3,92. Esses valores encontram-se em conformidade quando comparados aos agregados empregados no cenário nacional.

Quanto às dimensões máximas características dos agregados, os reciclados brita 1 e areia resultaram, respectivamente, nas dimensões iguais a 19 mm e 4,75 mm, enquanto que os agregados naturais brita 0 e pó de pedra apresentaram valores iguais a 9,5 mm e 2,36 mm, respectivamente, estando todas as frações enquadradas como agregados graúdos e miúdos de acordo com a NBR 7211 (2005).

4.1.4 Absorção

O ensaio de absorção foi executado nas frações graúdas de brita 1 (reciclada) e brita 0 (natural), para que fosse possível visualizar se haveria alguma divergência de resultado entre ambos. Constatou-se que o agregado natural granítico brita 0 apresentou menor absorção quando comparado ao agregado reciclado brita 1 que tem como sua maior fase o material cimentício representando cerca de 88,25% de sua composição. Motter (2013) também encontrou resultado semelhante para agregado brita 1 reciclado, na qual obteve-se taxa de absorção de 5,4%. A Tabela 7 apresenta os valores de absorção encontrados para cada uma das frações.

Tabela 7 – Absorção dos agregados

Agregados/Ensaio	Absorção (%)
Brita 1 - RCD	6,17
Brita 0 - Natural	1,91

Por apresentar em sua composição, geralmente, o mineral quartzo, o agregado natural que fora extraído e britado da rocha ígnea apresentou baixa taxa de absorção. Por outro lado, o agregado reciclado caracterizado pela heterogeneidade de fases constituintes retratou o que se esperava, alta taxa de absorção. Souza *et al.* (2012) utilizando de agregados residuais extraídos da demolição do estádio Mané Garrincha encontrou taxa de absorção semelhante, 7,8%. Dessa maneira, os resultados das taxas de absorção encontrados nessa pesquisa evidenciam que o agregado reciclado detém maior porosidade, tornando-o mais permeável e, conseqüentemente, mais susceptível à umidade. Isso mostra que existe uma limitação na aplicação desse tipo de agregado, haja vista a infiltração da água que pode percolar entre seus poros. Proença *et al.* (2012) constatou uma taxa de absorção média igual a 13% em sua pesquisa com agregados reciclados. No entanto, esta continha em sua composição 34% de tijolo que correspondia a maior fase do material heterogêneo, caracterizado por ser um material cerâmico com alta taxa de absorção.

4.1.5 Desgaste por abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi executado consoante a norma DNER-ME 035/98. Embora a interpretação do resultado esteja atrelada a composição mineralógica, estrutura da rocha e a respectiva aplicação do agregado, o agregado utilizado foi o residual brita 1 caracterizado por ser um material heterogêneo constituído por diversas fases. Logo, verificou-se que o agregado reciclado apresentou desgaste a abrasão igual a 35%, atendendo as especificações da norma DNIT 031/2006-ES que admite desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. Este resultado foi o mesmo encontrado por Souza *et al.* (2012), no qual o material residual utilizado se assemelha ao dessa pesquisa que continha em maior quantidade a fase cimentícia. Motter (2013) auferiu um valor de 32% para agregados reciclados originados de concreto com resistência de 20 Mpa. Lourenço *et al.* (2015) também utilizando material reciclado para o mesmo fim, porém com uma maior quantidade de material cerâmico do que o deste estudo, encontrou uma resistência à abrasão Los Angeles de 41,29%. Este tipo de ensaio está diretamente conectado a

durabilidade do agregado e, conseqüentemente, do pavimento asfáltico, demonstrando que o resultado obtido é positivo, apresentando relativo baixo desgaste superficial.

4.1.6 Índice de forma

O ensaio de índice de forma foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 086/94. A importância desse ensaio se dá pelo fato da trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento estarem diretamente relacionadas a forma dos agregados. A brita 1 residual utilizada se enquadrou na faixa C do DNIT com material passante por crivos redutores resultando em um índice de forma de 0,87. Os valores obtidos foram satisfatórios de forma que a relação comprimento/espessura se aproximou bastante de 1, no qual se teria um formato mais aproximado de grão cúbico. Contudo, o quão distante esse valor for de 1 indica que o grão aproxima-se do formato lamelar, que tende a ser quebradiço e acarretaria numa deterioração do asfalto. O resultado também obedeceu a norma DNIT 031/2006-ES onde impõe um índice de forma superior a 0,5. Resultados análogos ao deste trabalho foi encontrado por Souza *et al.* (2012), no qual o índice de forma foi igual a 0,9. Além do trabalho de Lourenço *et al.* (2015) que obteve resultados satisfatórios utilizando materiais residuais.

4.1.7 Massa específica

Realizou-se ensaios de massa específica para todos os materiais naturais e reciclados, através da qual viabilizou-se uma média que foi obtida a partir de duas amostras. Para o agregado graúdo brita 1 reciclada e brita 0 natural efetuou-se o ensaio de massa específica aparente conforme a norma DNER-ME 081/98 obtendo como resultados, respectivamente, 2,19 g/cm³ e 2,56 g/cm³. A massa específica dos agregados miúdos areia reciclada e pó de pedra natural foi alcançada pelo método frasco de Chapman, acordando com a norma DNER-ME 194-98, na qual os resultados foram, respectivamente, 2,54 g/cm³ e 2,63 g/cm³. Quanto ao cimento, por meio do método L^ê Chatelier e consoante a norma DNER-ME 084/94, adquiriu como resultado de massa específica o valor igual a 2,86 g/cm³. É oportuno destacar que esses valores encontram-se com ordem de grandezas dentro da literatura, sendo de fundamentação importância para o cálculo da composição granulométrica em concretos asfálticos.

4.2 Resultados da caracterização do material asfáltico

A Tabela 8 ilustra um resumo dos principais parâmetros analisados para o ligante asfáltico CAP 50/70.

Tabela 8 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

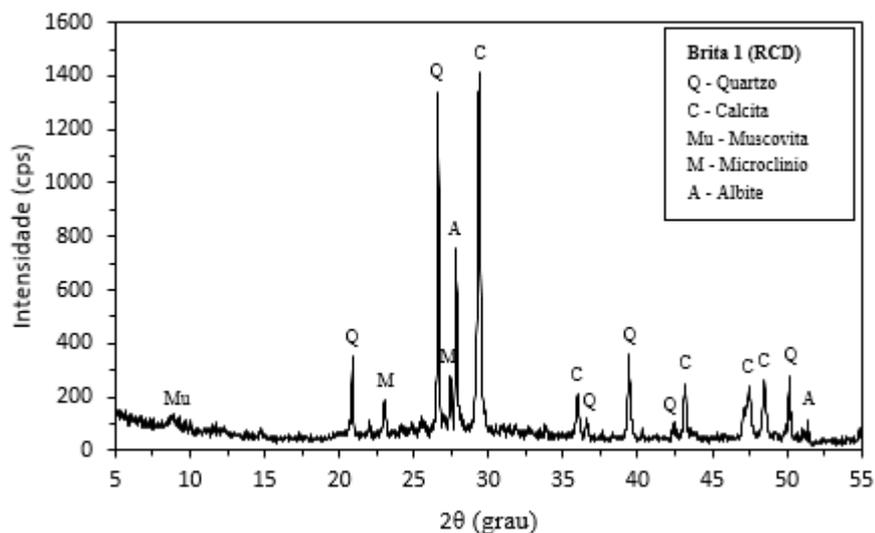
Parâmetros	Resultados		
	135°	150°	177°
Viscosidade	250,5 SSF	131,0 SSF	42,4 SSF
Massa específica	1,013 g/cm ³		
Ponto de fulgor	Interrompido a 235 °C (Aprovado)		
Ponto de amolecimento	44,5 °C		
Penetração	53		

Com base nos valores obtidos, destaca-se que todos os valores encontram-se atendidos consoante o regulamento técnico N° 03/05 da ANP (2005). O ensaio de ponto de fulgor foi interrompido por motivo de segurança quando atingiu a temperatura de 235 °C, limite especificado para a aprovação do produto.

4.3 Análise mineralógica por DRX

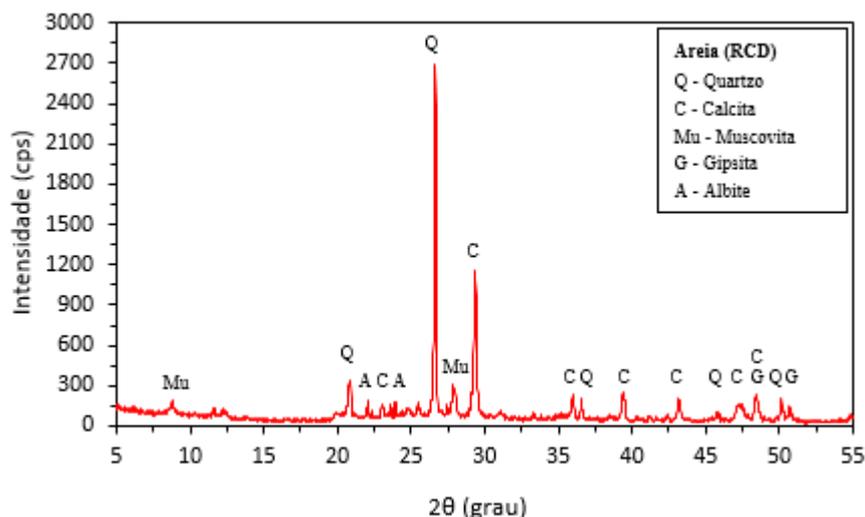
A análise de Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para caracterizar a cristalográfica dos materiais residuais brita 1 e areia. Pode-se observar, nas Figuras 28 e 29, que a composição mineralógica é complexa devido à grande variabilidade cristalina e amorfa de seus componentes (concreto, argamassa e cerâmica). Os principais componentes da brita 1 e areia, sendo ambos RCD, são o quartzo [SiO₂], calcita [CaCO₃], gipsita [Ca(SO₄) (H₂O)₂], Muscovita [K Al₂ (Si₃ Al) O₁₀ (OH)₂], Microclinio [K Al Si₃ O₈] e Albite [Na (Al Si₃ O₈)].

Figura 28 - Ensaio de DRX da brita 1 (RCD)



O quartzo é derivado de rochas naturais, através da qual, pode-se creditar que os materiais residuais contêm areia (CHEN *et al.*, 2011). A calcita é uma das matérias primas necessárias para a fabricação do cimento, aço, vidro e tintas, reforçando a origem do material residual que fora obtido dos resíduos da construção civil. Martínez *et al.* (2016) corrobora este trabalho quando utilizou materiais residuais semelhantes ao desse estudo encontrou presença majoritária do quartzo e calcita.

Figura 29 - Ensaio de DRX da areia (RCD)



A gipsita, muscovita, microclínio e albite estiveram também entre as principais fases mineralógicas encontradas no estudo realizado por Ferreira *et al.* (2019) que avaliou

as propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina do agregado reciclado. Segundo os autores, a origem da muscovita pode estar relacionada a rocha de granito. O microclínio e albite são minerais encontrados em feldspatos, presentes em rochas naturais.

4.4 Análise química por FRX

A Tabela 9 apresenta a composição química por FRX dos agregados reciclados brita 1 e areia, identificando os óxidos em porcentagem. Os resultados apontaram a presença em comum de alguns óxidos com teores semelhantes. Então, tanto para a brita 1 quanto para a areia reciclada o maior teor encontrado foi o óxido de cálcio (CaO), seguidos do dióxido de silício (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de alumínio (Al₂O₃), obtendo resultado semelhante ao de Martínez *et al.* (2016) no qual mais de 70% dos óxidos de RCD correspondem ao óxido de cálcio, dióxido de silício e óxido de alumínio, além de convergir com resultados obtidos no DRX na maioria dos óxidos.

Chen *et al.* (2011) comparou dois tipos de agregados residuais em pó, calcário e cimentício. Logo, obteve como resultados do ensaio de FRX que o material calcário apresentava quase metade de composição química o mineral CaO, representando 46,90% e, para o agregado de concreto reciclado o mineral SiO₂ e CaO. Esses resultados são semelhantes ao encontrado neste trabalho evidenciando que o material residual analisado apresenta vestígios de areia e argamassa.

Fatemi *et al.* (2016) se utilizando de um material composto por 95% de material cimentício e cerâmico, realizou uma análise por FRX que indicou resultados semelhantes aos dessa dissertação, no qual havia a presença de óxido de cálcio e dióxido de silício com 43,2% e 17,51%, respectivamente. Observa-se também que os resultados obtidos através do FRX convergem com os resultados obtidos do DRX. Dessa maneira, as composições químicas das amostras deste trabalho podem ser caracterizadas como sílico-aluminosas.

Tabela 9 - Composição química (% em massa) por FRX dos agregados

Agregados	CaO	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	SO₃	ZrO₂	K₂O	Outros
Brita 1 (RCD)	49,30	24,86	9,65	8,25	2,89	1,05	1,34	2,66
Areia reciclada	37,94	26,55	12,42	11,26	3,49	2,98	1,67	3,69

Os CaO e SiO₂ que compõe esses materiais residuais atribui-se, provavelmente, a presença de compostos cimentícios hidratados (argamassas, concretos). Os óxidos de ferro

e de alumínio, além do óxido de cálcio, podem ser provenientes do material cerâmico (MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

4.5 Resultados da dosagem Marshall

A dosagem Marshall foi realizada consoante a norma DNER-ME 043/95. Após confecção de 12 corpos de provas contendo 4 dosagens distintas buscou-se conhecer o teor de ligante ótimo. A Tabela 10 apresenta a média dos requisitos de dosagem de concreto asfáltico.

Tabela 10 - Parâmetros da dosagem Marshall

Característica e parâmetros da dosagem Marshall	Teor de ligante			
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
Gmb (g/cm ³)	2,240	2,281	2,299	2,311
DMT	2,363	2,346	2,330	2,314
V _v (%)	5,2	2,8	1,3	0,1
VCB (%)	9,9	11,2	12,4	13,6
VAM (%)	15,1	14,0	13,7	13,7
RBV (%)	65,6	80,0	90,4	99,0
Estabilidade (kgf)	543,33	702,66	605,0	568,0
Fluência	0,85	0,98	0,73	0,69

Nota: Gmb – Massa específica aparente; DMT – Densidade Máxima Teórica; V_v – Volume de vazios; VCB – Vazios com betume; VAM – Vazios do agregado mineral; RBV – Relação betume/vazios.

De forma geral, destaca-se na Tabela 10 que com aumento do teor de ligante na mistura asfáltica cresce também a massa específica aparente (Gmb), vazios com betume (VCB) e a relação betume/vazios (RBV). Em contrapartida, o aumento do teor de ligante provoca reduções da densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios e vazios do agregado mineral (VAM).

A Tabela 11 ilustra os percentuais de agregados que foram utilizados no experimento laboratorial e que foi baseado em cada teor de ligante asfáltico, na qual a brita 1 (RCD), brita 0, areia (RCD), pó de pedra e cimento obtiveram, de forma geral, os percentuais variando em 12%, 38%, 23%, 19% e 2%. A seguir serão realizadas análises entre os parâmetros da dosagem Marshall.

Tabela 11 - Percentual dos agregados utilizados em cada teor da dosagem Marshall

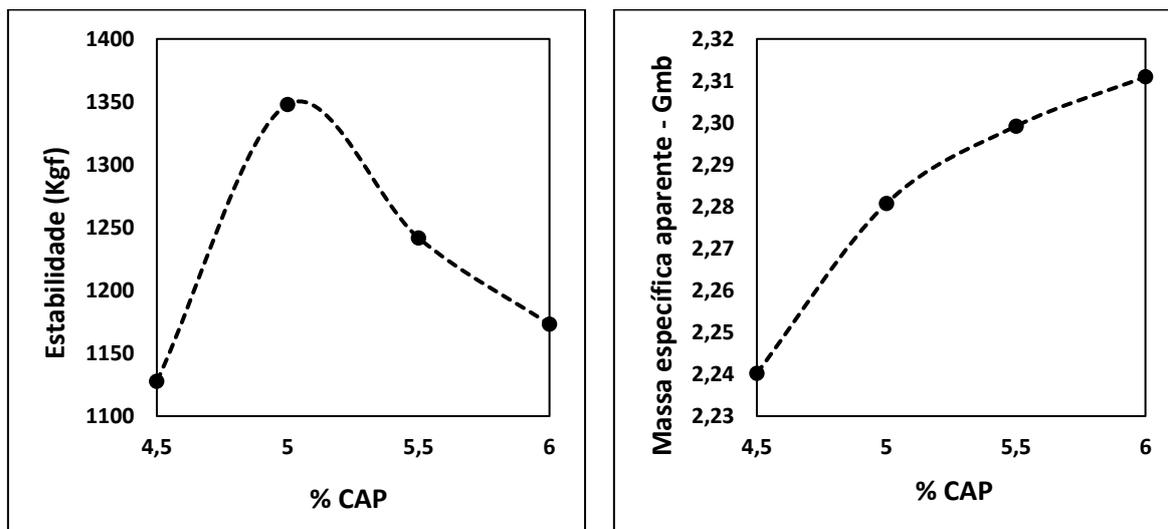
TRAÇO	% BRITA 1 (RCD)	% BRITA 0 (Natural)	% PÓ DE PEDRA (Natural)	% AREIA (RCD)	% CIMENTO	% CAP
1	12,42	38,20	23,88	19,10	1,91	4,50
2	12,35	38,00	23,75	19,00	1,90	5,00
3	12,29	37,80	23,63	18,90	1,89	5,50
4	12,22	37,60	23,50	18,80	1,88	6,00

4.5.1 Análise da Estabilidade e da massa específica aparente (Gmb) versus % CAP

Examinando o gráfico da estabilidade *versus* % CAP (Figura 30 (a)) observa-se que os corpos de prova que obtiveram maior estabilidade foram os que continham 5,0% de ligante. Motter (2013) se deparou com uma maior estabilidade, entre 1.200 e 1.310 kgf, quando aplicado 6% do material betuminoso. Percebe-se, pelo comportamento do gráfico, que existe uma contínua diminuição de estabilidade quando o teor de CAP ultrapassa os 5,0%, ao mesmo tempo que um teor ligeiramente maior (5,05%) proporciona uma maior estabilidade (1.350 kgf). A estabilidade correspondente a 5,0% de CAP equivale a 1.348 kgf. Esta alta estabilidade pode estar relacionada ao empacotamento entre os agregados de RCD. É oportuno destacar que esse valor atende aos requisitos da norma DNIT 031/2006 – ES que estabelece para a camada de rolamento de pavimentos asfálticos estabilidade uma mínima de 500 kgf.

Lourenço *et al.* (2015) utilizando também agregados reciclados em revestimento asfáltico obteve como resultados de estabilidade valores iguais a 1.468,7 kgf. Sinisterra (2014) também encontrou resultados semelhantes que ultrapassaram os 1.400,0 kgf, no qual ambos reforçam os resultados deste trabalho. Costa filho (2017) se utilizando de misturas asfálticas contendo materiais residuais de mineração constatou que teores entre 5,0% e 5,5% atendem aos requisitos mínimos de estabilidade, logrando valores acima de 500 kgf. Dessa maneira, o pavimento se torna mais resistente às ações externas como altas temperaturas e cargas elevadas, por exemplo.

Figura 30 - Estabilidade e massa específica aparente *versus* % CAP



a) Estabilidade *versus* % CAP

b) Gmb *versus* % CAP

No que diz respeito a massa específica aparente (Gmb) constata-se, inicialmente, que ela está ligada diretamente ao volume de vazios, uma vez que são inversamente proporcionais. A Figura 30 (b) ilustra a mistura betuminosa nos diferentes teores, no qual o teor de 4,5% de CAP que tinha exibido o maior V_v (%) perante aos demais, apresentou menor Gmb, além do teor de 6,0% de CAP ter apresentado menor V_v (%) e maior Gmb.

Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho foram descobertos por Costa filho (2017) e Motter (2013). De fato, era de se esperar que com o aumento do teor de CAP houvesse aumento da massa específica aparente, posto que o ligante betuminoso preenche os vazios entre os agregados, aumentando sua massa específica.

4.5.2 Análise do volume de vazios e relação betume-vazios *versus* % CAP

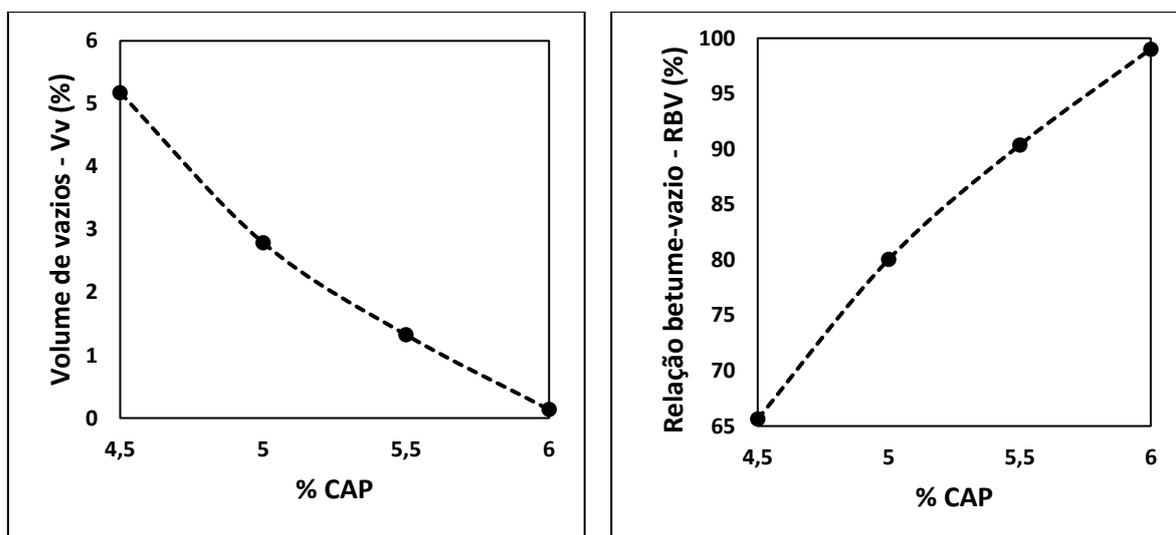
Um parâmetro importante a ser averiguado numa mistura betuminosa é o volume de vazios (V_v), visto que alguns comportamentos pelos quais o pavimento asfáltico estará submetido quando solicitado poderá ser elucidado através da aferição de sua porcentagem. A Figura 31 (a) ilustra o gráfico correspondente a mistura betuminosa realizada com agregados reciclados. Nela pode-se notar que a medida que se aumenta o teor de CAP na mistura asfáltica há uma crescente redução do volume de vazios, acontecimento ocorrido também com Lourenço *et al.* (2015). Isso ocorre, provavelmente, porque o produto betuminoso preenche os vazios existentes dos agregados residuais, como mostrado na

Tabela 7 na qual o agregado brita 1 apresentou taxa de absorção igual a 6,17%. De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES a taxa percentual de vazios para camada de rolamento deve ficar entre 3% e 5%, na qual nesta pesquisa estabeleceu-se uma média que resultou em 4%. A Figura 31 (a) mostra que para atender a este requisito o teor de CAP deve ser de aproximadamente 4,7%.

Nos teores de 5,5% e 6,0% houve uma redução do volume de vazios, sendo prejudicial ao revestimento asfáltico devido a não haver espaço suficiente para se deformar e aliviar as tensões quando solicitado. Costa filho (2017) em uma de suas misturas asfálticas encontrou resultado semelhante e creditou-o a uma maior presença de material com graduação miúda na composição, fazendo com que houvesse maior preenchimento dos vazios.

Por outro lado, o teor de 4,5% de CAP apresentou volume de vazios acima do que preconiza aquela norma. Nessa situação, a mistura betuminosa contém muitos vazios, podendo vir a possibilitar deformações plásticas e ficar susceptível a percolação de água. Contudo, Motter (2013) que analisou as propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto atestou que apenas com teor de ligante superior a 5,5% se pode atender a norma DNIT 031/2006 – ES.

Figura 31 - Volume de vazios e relação betume-vazios *versus* % CAP



(a) Volume de vazios *versus* % CAP

(b) RBV *versus* % CAP

Segundo Bernucci *et al.* (2006), valores altos de CAP prejudicam o revestimento asfáltico, uma vez que altas doses desse material podem acarretar em deformações

permanentes por fluência e/ou exsudação. Por outro lado, baixos valores do teor de ligante numa mistura asfáltica podem produzir o enfraquecimento da mistura e, conseqüentemente, redução de sua resistência vindo a gerar trincas devido a solicitação à tração do revestimento. Dessa maneira, o material asfáltico fica sujeito a diminuição de sua vida útil.

A Figura 31 (b) ilustra a relação RBV x CAP da mistura asfáltica nos diferentes teores propostos pela pesquisa. Observa-se que há um aumento contínuo dessa relação quando se aumenta o teor de CAP, como também encontrado por Costa filho (2017). Esse resultado pode estar ligado a uma compactação pouco eficiente ou ao simples fato do aumento de teor de ligante. Partindo daquela hipótese, uma boa quantidade de vazios foi estabelecida e foram preenchidos com betume, uma vez que na mistura existiam tanto agregados reciclados quanto naturais e angulares como a brita 0. Esta ocorrência pode ser observada com maior incidência na mistura asfáltica com teor de 6,0%.

De outro modo, valores baixos de RBV podem ocasionar em pavimentos a desagregação de materiais e infiltrações causando prejuízo à durabilidade. Com base nisso, observa-se na Figura 31 (b) que o teor de 4,5% apresentou RBV de aproximadamente 66%. Este percentual está abaixo do percentual mínimo exigido pela norma DNIT 031/2006 – ES, que estabelece para a camada de rolamento um RBV mínimo de 75%. Fato semelhante acontece com os teores de 5,5% e 6,0% que ultrapassam o limite superior de 82%. Portanto, o teor de CAP que atende a relação betume-vazios é o de 5% com RBV igual a 80,5%. Motter (2013) precisou de um teor de CAP de 6% para se enquadrar dentro dos limites estabelecidos pela norma. Lourenço *et al.* (2015) alcançou um RBV de 75,2% e 77,2% empregando um teor de CAP de 8,5% e 9,0%, respectivamente, isso pode estar ligado a uma alta composição de material cerâmico.

Diante dos gráficos analisados até o momento foi possível calcular o teor ótimo de ligante fazendo-se uma média aritmética entre os teores correspondentes a máxima estabilidade, máxima densidade aparente, média dos limites das especificações do volume de vazios e relação betume/vazios. Dessa forma, o teor ótimo de CAP resultou em 5,15%.

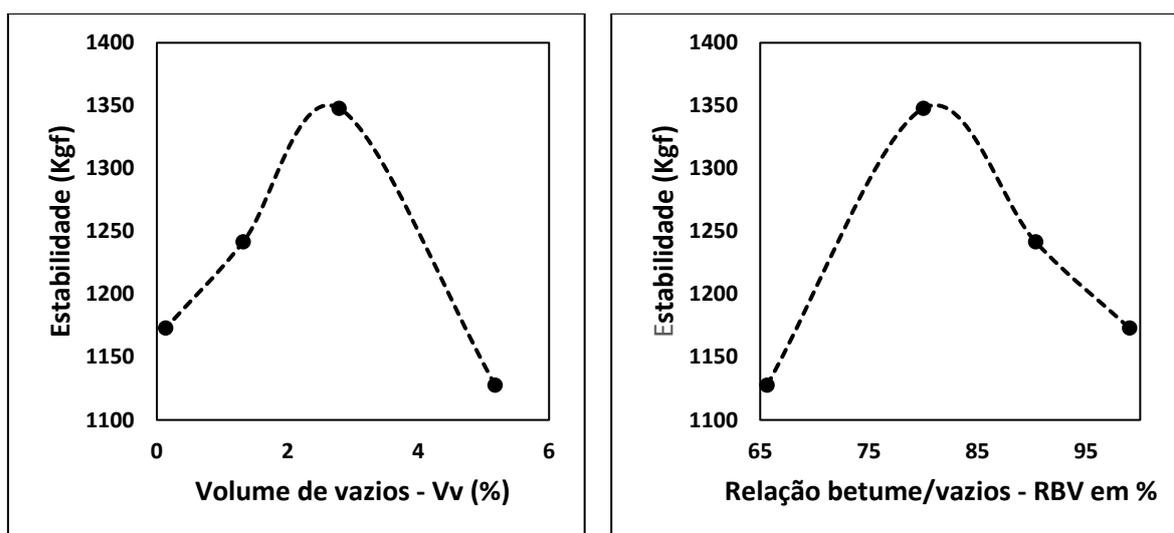
4.5.3 Análise da estabilidade *versus* RBV e V_v (%)

A Figura 32 (a) descreve o comportamento da mistura asfáltica relacionando o volume de vazios com a estabilidade. Percebe-se que há aumento da estabilidade com

aumento do V_v (%) em até, aproximadamente, 2,6% deste. Logo após, ocorre o inverso. Resultados análogos foram descobertos por Costa Filho (2017).

Sob outra perspectiva, vale salientar que parte da composição do material usado na mistura asfáltica é oriunda de RCD que é caracterizado por ser um material heterogêneo composto por diversas fases que pode acarretar em resultados imprevisíveis e a curva mostra que a estabilidade está acima de 500 kgf recomendado por norma, já citada anteriormente. Fazendo uma relação entre o RBV e a estabilidade pode-se visualizar na Figura 32 (b) que houve aumento da estabilidade até um RBV de aproximadamente 82%. Após isso, há perda de estabilidade da mistura asfáltica. Esse resultado condiz com o que preconiza a norma DNIT 031/2006 que estabelece limite superior até 82%. Resultados semelhantes também foram observados por Costa Filho (2017).

Figura 32 - Estabilidade *versus* RBV e V_v



(a) Volume de vazios - V_v (%) *versus* Estabilidade

(b) Relação betume/vazios (RBV) *versus* Estabilidade

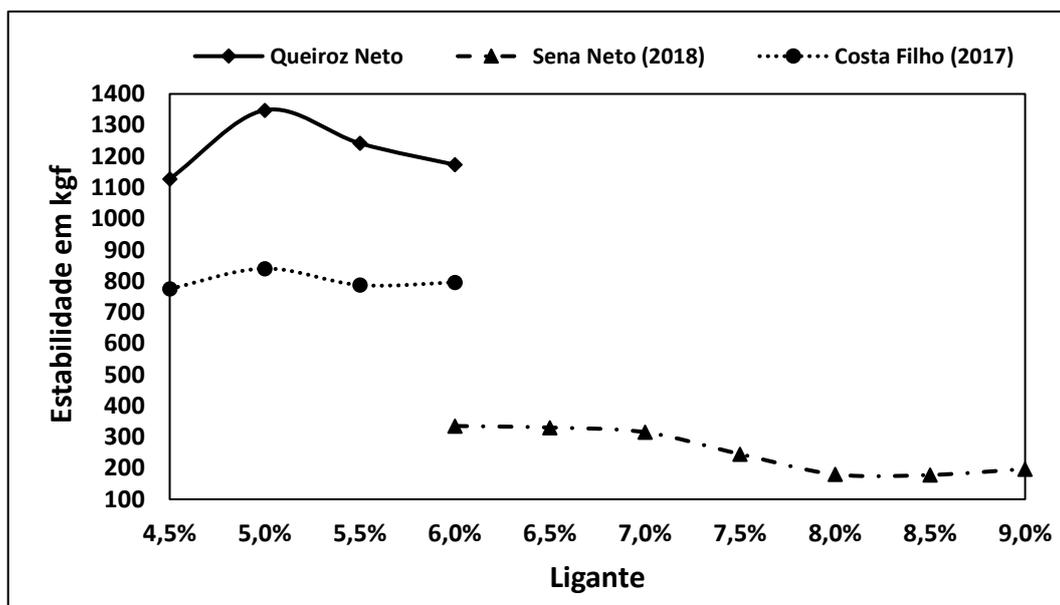
4.5.4 Análise comparativa entre pesquisas

No intuito de avaliar o uso de material reciclado em pavimentação na camada de revestimento foi que se buscou comparar esta pesquisa com outras. Os trabalhos que serviram de comparação também tiveram como principal proposta a utilização de agregados reciclados no revestimento asfáltico. É importante destacar que os traços concebidos foram semelhantes, muito embora Sena Neto (2018) tenha usado um percentual

maior de ligante betuminoso. Costa Filho (2017) avaliou o potencial de aproveitamento do resíduo fino e grosso oriundos do beneficiamento da scheelita na composição de concretos asfálticos a quente. Por sua vez, Sena Neto (2018) avaliou a viabilidade técnica do emprego de RCD, sendo este semelhante ao desta pesquisa, em dosagens asfálticas a frio. Esse tipo de comparação se torna importante devido ao fato de ambas as pesquisas utilizarem o material residual, bem como de se poder visualizar melhor o seu comportamento perante o uso em pré-misturado a frio e a quente. A partir da Figura 33 até a 36 pode-se observar a comparação entre os seguintes parâmetros: estabilidade, volume de vazios, relação betume-vazios e densidade aparente.

Nota-se, na Figura 33, que o uso de RCD de construção civil proporcionou maior estabilidade quando comparado ao resíduo do beneficiamento da scheelita em todos os teores de ligante, embora ambas atendam a norma DNIT 031/2006 – ES. As duas curvas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente têm comportamentos semelhantes e mostram que o teor de ligante que proporciona a maior estabilidade é o equivalente a 5,0%. Observa-se também que em teores maiores do que este, os dois materiais residuais utilizados em CAUQ apresentam um decréscimo na estabilidade.

Figura 33 - Comparação entre as estabilidades

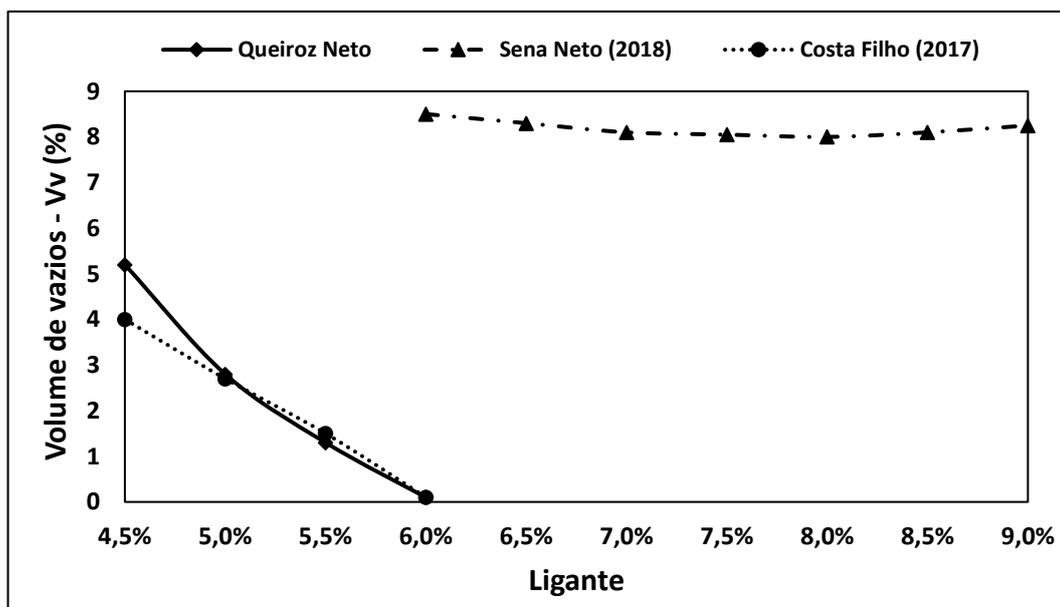


Numa outra ótica, na ocasião do uso do mesmo tipo de agregado reciclado oriundo da construção civil, mas, sendo aplicado em CAUQ e PMF, reparou-se que existe uma

enorme diferença nas estabilidades de ambos. Enquanto o uso de RCD em CAUQ apresentou uma estabilidade máxima de aproximadamente 1340 kgf com teor de 5,0% de ligante, a estabilidade máxima do PMF alcançou o valor de aproximadamente 320 kgf com 6,0% de ligante. Dessa forma, constata-se que o uso de agregado reciclado oriundo de construção civil em Concreto Asfáltico Usinado à Quente obteve o triplo da estabilidade do pré-misturado a frio, além de consumir menor quantidade de ligante proporcionando em menor custo em sua aquisição (Figura 33).

A Figura 34 apresenta o volume de vazios de todos os trabalhos. As misturas betuminosas usinadas a quente com agregados reciclados diferentes exibiram curvas decrescentes similares demonstrando que, neste parâmetro, existe pouca diferença entre ambos. Destaca-se que diferentemente da mistura contendo agregado reciclado de construção civil, o teor de 4,5% de ligante contendo a scheelita em sua composição mostrou um volume de vazios, para a camada de rolamento, que se enquadra entre os limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2006 – ES. Teores iguais ou maiores do que 5,0% de ligante nos dois tipos de mistura asfáltica a quente não atendem aos requisitos mínimos de Vv (3,0%) daquela norma, considerando os intervalos dos teores investigados.

Figura 34 - Comparação entre os volumes de vazios - Vv

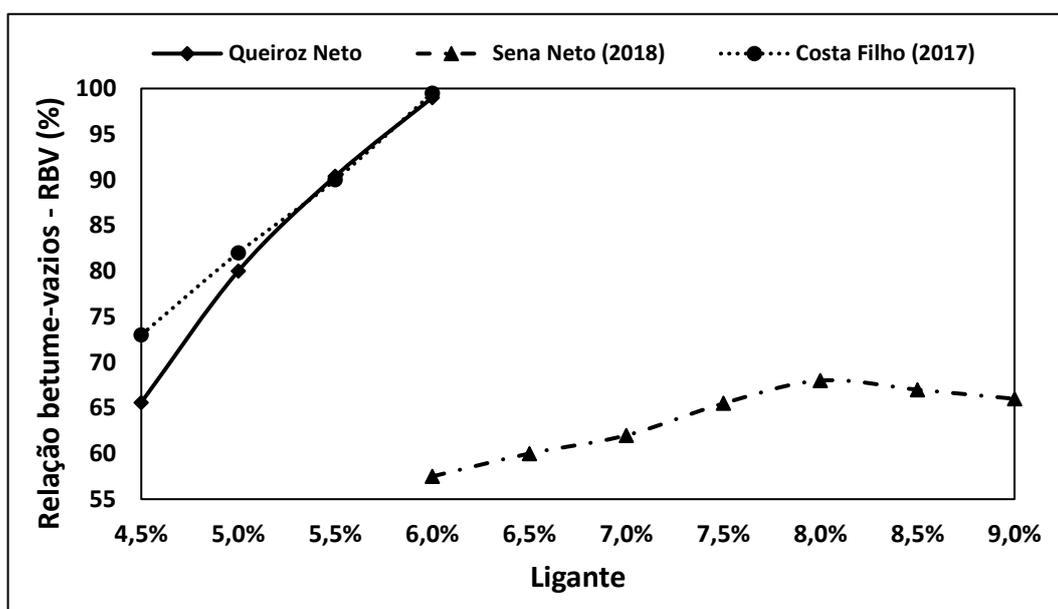


O volume de vazios correspondente a mistura asfáltica contendo o mesmo resíduo usado neste trabalho, porém, com PMF e não com CAUQ, mostrou que este parâmetro está

distante do tipo de revestimento usinado a quente. O PMF apresentou, aproximadamente, Vv de 8,0% nos teores analisados. Nesse modo, comparando o PMF com o trabalho em estudo, constatou-se naquele, um aumento de porosidade considerável, indicando que misturas a quente tendem a ter volume de vazios menores (Figura 34).

Análogo ao anterior, as curvas da vigente pesquisa e a de Costa Filho (2017) se mostram semelhantes, principalmente, nos teores acima de 4,5%. Quanto aos requisitos para a capa de rolamento, observa-se que ambas as pesquisas atendem aos requisitos da norma DNIT 031/2006 – ES no teor de 5,0%, que estabelece como limite máximo de RBV o equivalente a 82 %. De forma geral, percebe-se que não existe diferença significativa entre os usos de RCD e resíduo da scheelita no revestimento no que diz respeito a relação betume-vazios (Figura 35).

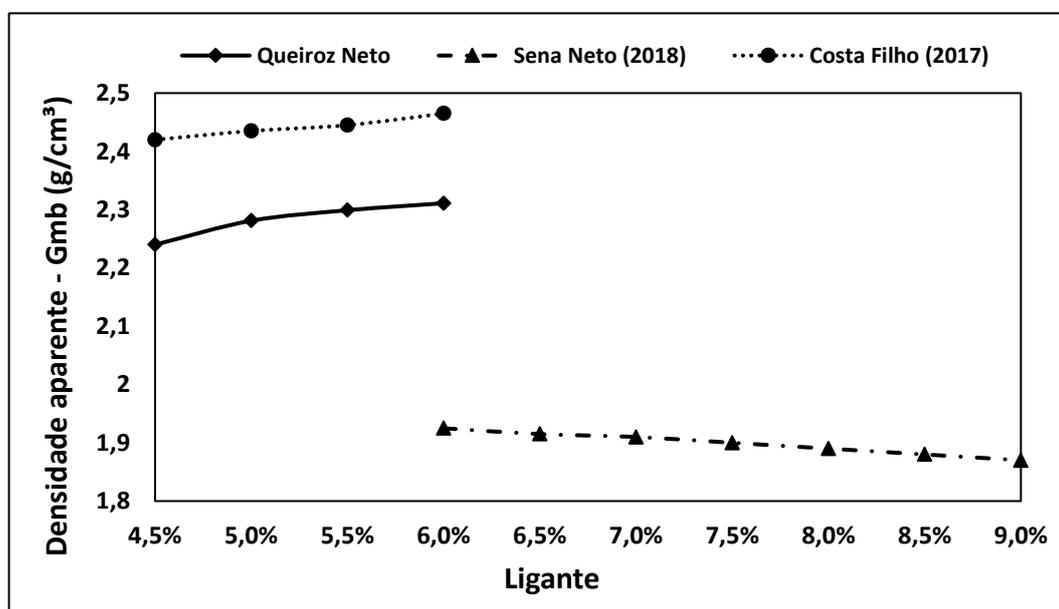
Figura 35 - Comparação entre as relações betumes-vazios - RBV



Sena Neto (2018) encontrou resultados de relação betume-vazios inferiores ao encontrado em pesquisas que utilizam o CAUQ. Descobre-se que sua curva apresenta comportamento divergente destes, sendo parecido com uma parábola e indicando um valor de RBV máximo no teor de ligante igual a 8,0%. Nota-se que a relação betume-vazios tende a obter maiores percentuais em misturas a quente (Figura 35).

A Figura 36 compara as densidades aparentes dos trabalhos analisados. Ao comparar os trabalhos que utilizaram o CAUQ, constata-se que o uso do resíduo da scheelita no revestimento asfáltico promoveu um aumento do Gmb em 5,0% em relação ao RCD. Verifica-se que ambos os gráficos apresentam comportamentos semelhantes, aumentando a densidade aparente conforme se aumenta o teor de ligante. Dessa maneira, para os dois tipos de agregados utilizados tem-se a densidade máxima quando se aplica o teor de ligante equivalente a 6,0%. Quando se emprega o mesmo agregado residual (RCD), porém, diverge o tipo de ligante asfáltico, o comportamento da curva se mostra oposta. Enquanto o aumento do teor de ligante numa mistura betuminosa usinada a quente tende a aumentar a densidade aparente, o aumento do teor de ligante numa PMF tende a diminuí-la. O aumento da densidade aparente quando comparadas CAUQ e PMF é de aproximadamente 22%. Se analisado o custo desembolsado para a obtenção do ligante, percebe-se que as misturas a quente o utilizam em menor quantidade para se ter uma maior densidade aparente (Figura 36).

Figura 36 - Comparação entre densidades aparentes - Gmb



4.6 Resultados do trecho experimental

Os registros fotográficos se deram logo após a concretagem asfáltica e seguiram de forma mensal de modo a observar sua estrutura funcional. Dessa maneira, a Figura 37 (a) apresenta o revestimento asfáltico logo após sua concretagem, na qual percebe-se a existência de vários pontos na cor branca caracterizando os agregados reciclados que não tiveram boa adesão ao ligante, como exemplo, os oriundos de de pisos cerâmicos.

Visualmente é possível destacar a diferença existente entre os revestimentos contendo reciclados (Figura 37 (a)) e os não contendo (Figura 37 (b)). A composição asfáltica que não contém RCD apresenta uma superfície mais escura e uniforme em sua cor.

Figura 37 - Revestimentos asfálticos: (a) Revestimento asfáltico logo após sua concretagem; (b) Visual do revestimento sem reciclado



Após um mês da realização da concretagem testemunhou-se poucas mudanças no que diz respeito ao comportamento funcional e visual de todo o revestimento. Neste período não foram encontradas quaisquer fissuras, nem destacamento de agregados reciclados (Figura 38 (a)). No segundo mês constatou-se que houve destacamento de agregados reciclados situados sobre a superfície, principalmente, na região onde existe tração no pavimento provocado pelo giro das rodas dos automóveis na curva. Os agregados extraídos da superfície foram oriundos de materiais cerâmicos e uma parcela de gesso, como os mostrados na Figura 38 (b). Contudo, ressalta-se que esse destacamento ocorreu de forma pontual, não comprometendo a funcionalidade do revestimento.

Figura 38 - Revestimento asfáltico reciclado após um e dois meses: (a) Comportamento visual e funcional no primeiro mês; (b) Comportamento visual e funcional no segundo mês



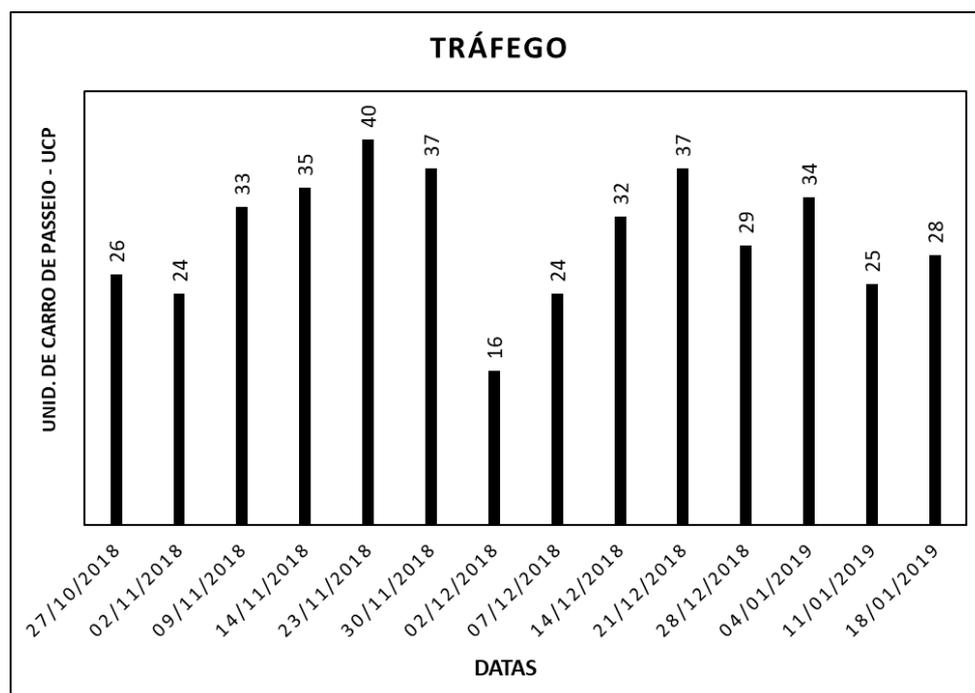
No terceiro mês após a concretagem asfáltica observou-se que o destacamento dos agregados residuais superficiais ganhou maior volume, além dos agregados cerâmicos superficiais apresentarem quebras dando indícios de um futuro destacamento. Muito embora tenha se sucedido a esse aumento, o revestimento continuou a operar satisfatoriamente seu desempenho funcional (Figura 39 (a)). Semelhante ao mês anterior, no quarto mês notou-se que o crescimento do destacamento de agregados, principalmente, oriundos de cerâmica, aumentou (Figura 39 (b)).

Atrelada às análises visual e funcional do pavimento asfáltico foi investigado o seu tráfego, no qual semanalmente diversos tipos de veículos percorriam o trecho experimental. A contagem se deu num intervalo de 1 hora em horário, aparentemente, de maior tráfego que seria entre às 18:00 h e 19:00 h. Optou-se em utilizar o método alemão de determinação de capacidade para transformar um volume de veículos de tráfego misto em unidades de carro de passeio (UCP). Dessa maneira, a Figura 40 ilustra o tráfego de veículos que ocorreu entre os meses de outubro de 2018 e janeiro de 2019, totalizando 14 contagens de tráfego. De forma geral, a referida figura apresenta uma média de 30 UCPs, onde, destes, 40 e 16 representam a maior e menor quantidade de tráfego. Observa-se que existe uma tendência de aumento de tráfego com o passar dos dias em cada mês.

Figura 39 - Revestimento asfáltico reciclado após três e quatro meses: (a) Comportamento visual e funcional no terceiro mês; (b) Comportamento visual e funcional no quarto mês



Figura 40 - Tráfegos realizados entre outubro de 2018 e janeiro de 2019



CAPÍTULO 5

Conclusões

5.1 Conclusões e considerações finais

Esta pesquisa buscou analisar o potencial da utilização de agregados reciclados na composição de revestimento asfáltico usinado à quente, no qual foram realizados ensaios laboratoriais e um trecho experimental. Neste sentido, pode-se concluir que:

A caracterização do agregado permitiu observar que a absorção do agregado reciclado brita 1 (6,17%) é maior que a absorção do agregado natural brita 0 (1,91%). À vista disso, é consenso no meio acadêmico (PROENÇA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2012; MOTTER, 2013; SINISTERRA, 2014) que a absorção de agregados reciclados é superior ao agregado natural. Uma das principais razões para isso está nos materiais cerâmicos e cimentícios que compõem o material residual heterogêneo, dado que são capazes de absorver grande quantidade de fluido devido a sua natureza porosa.

Arelado ao resultado de maior absorção e porosidade, o agregado reciclado brita 1 apresentou menor massa específica aparente, como esperado, quando comparado ao agregado natural brita 0 com 2,56 g/cm³ e 2,19 g/cm³, respectivamente. Quanto as massas específicas da areia reciclada, pó de pedra e filler obteve-se um valor igual a 2,54 g/cm³, 2,63 g/cm³ e 2,86 g/cm³ (SINISTERRA, 2014).

Averiguou-se um desgaste por abrasão Los Angeles igual a 35% no agregado reciclado (SOUZA *et al.*, 2012; MOTTER, 2013). Este resultado se enquadra dentro dos limites de desgaste de norma e atesta que nesse parâmetro que é vinculado a durabilidade, o agregado residual se mostra eficaz.

O índice de forma foi outro parâmetro avaliado no agregado reciclado brita 1, no qual o resultado alcançado foi 0,87 (SINISTERRA, 2014). Este valor atende a norma permitindo seu uso em revestimentos asfálticos. No que se refere as formas das partículas cogita-se que o agregado reciclado em estudo se aproxima de um formato mais cúbico, uma vez que nenhuma das dimensões prevalece sobre as outras e, dessa maneira, o agregado tende a suportar maior quantidade de carga, conferindo-lhe maior resistência.

Caso contrário, o agregado apresentaria forma tendendo a lamelar e isso poderia contribuir para a fratura do grão quando submetido às cargas e, conseqüentemente, na redução da vida útil do pavimento asfáltico.

A caracterização química e mineralógica (FRX e DRX) dos agregados residuais foi realizada e se mostraram com resultados semelhantes, tendo como principais componentes o óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃). O CaO e SiO₂ são provenientes das argamassas e concretos. O Fe₂O₃ e Al₂O₃ são, provavelmente, provenientes do material cerâmico presente na composição (MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

A dosagem asfáltica apresentou porcentagem ótima de ligante de 5,15%. O estudo ainda mostrou que quanto maior a porcentagem de CAP menor o volume de vazios, no qual acredita-se que isso ocorreu devido a um preenchimento deste pelo ligante asfáltico. Como esperado, quanto maior a porcentagem de CAP também maior a densidade da mistura, ratificando o resultado anterior. Em análise da fluência observou-se que há aumento desta quando a estabilidade cresce e, portanto, a mistura asfáltica tende a ter maior capacidade de se deformar aliviando suas tensões.

O trecho experimental utilizando agregados reciclados foi executado de modo a obter resultados em escala real. Num intervalo de 5 meses foi verificado o tráfego existente, bem como os aspectos de funcionalidade. Muito embora o período de análise tenha sido pequeno, pode-se destacar que visualmente é notório a diferença entre um pavimento contendo agregados naturais e outro contendo agregados reciclados. Percebeu-se que logo nos meses iniciais aconteceu um destacamento dos agregados cerâmicos e de uma pequena parcela de gesso presentes em sua superfície. No entanto, esse destacamento não foi comprometedor a ponto de danificar o revestimento. Portanto, apesar disso, o pavimento asfáltico continua desempenhando de forma muito satisfatória bom rolamento aos veículos que por ele trafegam.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- I. Continuar no monitoramento ao longo do tempo do trecho experimental realizado de modo que se obtenha mais informações sobre sua funcionalidade e identificar o momento no qual o pavimento asfáltico apresenta perda de sua função como um todo;

- II. Diminuir a variação do teor de ligante para intervalos menores de forma que se tenha maior precisão em seu teor ótimo;
- III. Avaliar o emprego do RCD de outras regiões e com características diferentes com fins voltados para obras viárias;
- IV. Realizar o estudo agregado RCD em outras faixas granulométricas e outros tipos de misturas.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS – ANP. **Cimentos asfálticos de petróleo: Resolução N° 19 de 11 de julho de 2005 da ANP.** Regulamento Técnico ANP N° 03/2005. 2005.

ABRECON - **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição** (2018) Mercado. Disponível em: < <https://abrecon.org.br/entulho/mercado/>> Acesso em: 04 Nov 2018.

ABRECON - **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição** (2018) Pesquisa setorial abrecon 2017. Disponível em: < https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/> Acesso em: 04 Nov 2018.

ABRECON - <https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/>

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza pública e resíduos especiais (2017) **Estimativa dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil.** Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/estudo_apresentacao.cfm> Acesso em: 30 Out 2017.

Amorim, E. F.; Ingunza, M. D. P. D.; Sena Neto, P. G.; Pereira, A. L. L.; Santos, C. B.; E. Neto, D.; Azevedo, G.; Batista, R. C. A. (2017) **Estudo de dosagens de pré-misturado a frio utilizando resíduos de construção e demolição obras (RCD)** 20ª Reunião de Pavimentação Urbana (20ª RPU) – Florianópolis/SC, pp. 1-12.

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 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil–Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Brasil, 2004. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Brasil, 2005. 11 p.

Balzan, D. C.; Galletti, F. V.; Melo, V. L.; Pires, L. M. (2003) **Utilização de agregado reciclado de obras de construção civil em pavimentos urbanos: especificação e obras no município de São Paulo.** 12.ª Reunião Anual de Pavimentação (12.ª RAPv) – Aracajú/SE.

Basso, L. C. G.; Rosa, F. D. (2017) **Análise de custo do ciclo de vida de pavimentos utilizando RCD como base e sub-base.** 20º Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) – Florianópolis/SC, pp. 1-10.

Bernucci, Liedi Bariani; Motta, Laura Maria Goretti da; Ceratti, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

Brasileiro, L. L.; Matos, J. M. E. (2015) **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica, vol 61, no 358, São Paulo.

Bribián, I. Z.; Capilla, A. V.; Usón, A. A. (2011) **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential**. Building and Environment, vol. 46, p. 1133 – 1140.

Cabral, A. E. B.; Schalch, V.; Dal Molin, D. C. C.; Ribeiro, J. L. D.; Ravindrarajah, R. S. (2009) **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. Cerâmica, vol. 55, p. 448 – 460.

CEBEDS, A. **Água: fatos e tendências**. Brasília: ANA/Cebes, 2009.

Chen, M.; Lin, J.; Wu, S. (2011) **Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture**. Construction and building materials, vol. 25, p. 3909 – 3914.

CNT – **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017. 403 p.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente**, Governo Federal, Brasil. (2002). Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Brasília – DF.

Costa Filho, F. C. (2017) **Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de Scheelita na composição de concretos asfálticos**. 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.

Costa, L. C. S.; Castro, A. P. D.; Rezende, L. R. (2010) **Avaliação do desempenho de um pavimento executado com RCD após quatro anos de funcionamento**. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Gramado/RS, pp. 1-10.

Decreto nº 852. (2007). **Prefeitura Municipal de Curitiba**.

Delongui, L.; Pinheiro, R. J. B.; Pereira, D. S.; Piovezan, G. T. A. (2010) **Caracterização dos resíduos da construção civil em Santa Maria (RS) e sua aplicação em pavimentação**. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Gramado/RS, pp. 1-7.

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 148/94**: Material betuminoso - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão. Rio de Janeiro, 1994. 02 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 120/97**: Coletas de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997. 05 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT-ME 155/10**: Material asfáltico - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010. 07 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT-ME 131/10**: Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT-ME043/95**: Misturas betuminosas a quente– Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT-ES031/06**: Pavimentos flexíveis– Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. (2009). **Economia mineral no Brasil**. Coordenação. Antônio Fernando da Silva Rodrigues – Brasília – DF, 764 p.

European Commission (DG ENV), **Final Report Task 2Service Contract On Management of Construction and Demolition Waste**, 2011 (ENV.G.4/FRA/2008/0112).

Fatemi, S.; Imaninasab, R. (2016) **Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials**. Construction and building materials, vol 120, p. 450-456.

Fernandes, M. G. P.; Junior, A. P. W.; Ferreira, W. L. G. (2018) **Análise do uso de resíduos provenientes da produção de mármore como agregado em misturas asfálticas**. 21ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) – São Paulo/SP, pp. 1-12.

Ferreira, M. C.; Thomé, A.; Rosa, F. D.; Posse, M. K. (2017) **Avaliação da resistência de material reciclado de pavimento com adição de nata de cimento**. 20º Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) – Florianópolis/SC, pp. 1-11.

Ferreira R. L. S.; Fonseca, N. J. M.; Pereira, J. E. S.; Nóbrega, A. K. C.; Anjos, M. A. S. (2019). **Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 µm) do agregado reciclado de RCD**. Cerâmica, vol. 65, nº 373, São Paulo.

Fiesp – Federação das indústrias do estado de São Paulo. 2017. **Cadeia produtiva da construção**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/infografico-cadeia-da-construcao/>>Acessoem: 15 Out 2017.

Freitas, I. T. A.; Delfino M. G. S.; Matos, D. A.; Suarez, D. A. A. (2017) **Uso de materiais reciclados de pavimentação na construção rodoviária no Brasil**. 20º Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) – Florianópolis/SC, pp. 1-9.

Ganjian, E.; Jalull, G.; Sadeghi-Pouya, H. (2015) **Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks**. Construction and building materials, vol 77, p. 270 – 275.

Garcês, A.; Ribeiro, G. Z.; Vaz, E. F.; Sereno, M. V. C.; Oliveira, V. N. (2014) **Utilização de material proveniente de fresagem na composição de base e sub-base de pavimentos flexíveis**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Goiânia/GO, pp. 1-7.

Gomez-Meijide, B.; Pérez, I.; Pasadín, A. R. (2016) **Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixtures: evolutionary properties**. Journal of cleaner production, vol 112, p. 588 – 598.

Grubba, D. C. R. P.; Parreira, A. B. (2010) **Análise da influência do tempo de cura sobre o comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto compactado nas energias intermediária e modificada**. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Gramado/RS, pp. 1-7.

Huang, Y.; Bird, R. N.; Heidrich, O. (2007) **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. Resources, Conservation and Recycling, vol 52, p. 58 – 73.

_____. IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**: Brasil, 2010. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>> Acesso em: 31 Out 2017.

Kumar, R. (2017) **Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete**. Construction and building materials, vol 142, p. 248 – 255.

Leite, F. C.; Motta, R. S.; Vasconcelos K. L.; Bernucci L.(2011). **Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements**. Construction and building materials, vol 25, p. 2972 – 2979.

Levy, S. M.; Helene, P. R. L. **Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1º, Goiânia, Brasil. Agosto 1995 Anais. Goiânia, pp 315 – 325.

Lourenço, V. M. Q.; Cavalcante, E. H. (2015) **Dosagem de misturas asfálticas do tipo CAUQ utilizando agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 44ª Reunião anual de pavimentação (RAPv), ISSN 1807-5568 – Foz do Iguaçu/PR, pp. 1-12.

Martínez, P. S.; Cortina, M. G.; Martínez, F. F.; Sánchez, A. R. (2016). **Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication**. Journal of cleaner production, vol 118, p. 162-169.

Medeiros Jr., R. A.; Gusmão, A. D.; Fucale, S. P. (2010). **Investigação laboratorial do uso de resíduo da construção civil como agregado graúdo em estaca de compactação “argamassada”**. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Gramado/RS, pp. 1-8.

Morafa, S. H.; Saesaei A. H.; Gohari, O. M.; Afshar, M. J. H. (2017) **An experimental investigation on applying the recycled aggregates obtained from oil contaminated concrete exposed to seawater as road unbound pavement materials**. Construction and building materials, vol 157, p. 292 – 299.

Motter, J. S. (2013) **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (mestrado em engenharia de construção civil) – Universidade Federal do Paraná, Paraná/PR. 260 p.

Muller, E. R.; Rosa, F. D. (2014) **Estudo das propriedades mecânicas de um pavimento reciclado com a adição de cimento Portland**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Goiânia/GO, pp. 1-5.

Ossa, O.; García J. L.; Botero, E. **Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry**. Journal of cleaner production, Vol 135, p. 379 – 386.

Özalp, F.; Yilmaz, H. D.; Kara, M.; Kaya, Ö.; Sahin, A. (2016) **Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving Stone, Kerband concrete pipes**, vol 110, p. 17 – 23.

Proença, F. T. T. C.; Silva, R. C. F.; Fucale, S. P.; Rabbani, E. K. (2012) **Análise das características físicas de bica corrida reciclada de resíduos da construção civil (RCC) para uso em pavimentação**. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Porto de Galinhas/PE, pp. 1-7.

Rezende, L. R.; Marques, M. O.; Oliveira, J. C.; Carvalho, J. C.; Guimarães, R. C.; Resplandes, H. M. S.; Costa, L. C. S. (2016) **Field Investigation of Mechanic Properties of Recycled CDW for Asphalt Pavement Layers**. J. Mater. Civ. Eng.

Rodrigues, W.; Magalhães Filho, L. N. L.; Pereira, R. dos 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=S217533692016000100130&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 04 nov. 2016.

Sabai, M. M.; Cox, M. G. D. M.; Mato, R. R.; Egmond, E. L. C.; Lichtenberg, J. J. N. (2013) **Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania**. *Resource, Conservation and Recycling*, vol 72, p. 9 – 19

Sebrae. 2008. **Cadeia produtiva da construção civil – cenários econômicos e estudos setoriais**. Disponível em: http://189.39.124.147:8030/downloads/Construcao_civil.pdf. Acesso em: 15 Out 2017.

Sena Neto, P. G. (2018) **Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo pré-misturado a frio (PMF) utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD)**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. 99 p.

Schneider, D. M. (2003) **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação (mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 131 p.

Silva, V. A.; Fernandes, A. L. T. (2012) **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCC) em Uberaba-MG**. *Sociedade & Natureza*, ano 24, n. 2, p. 333-344.

Silva, R. V.; Brito, J.; Dhir, R. K. (2014) **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production**. *Construction and building materials*, vol 65, p. 201 – 217.

Sinisterra, F. Q. (2014) **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília/DF. 168p.

Soutsos, M. N.; Tang, K.; Millard, S. G. (2012) **The use of recycled demolition aggregate in precast concrete products – Phase III: Concrete Pavement flags.** Construction and Building Materials, vol 36, p. 674 – 680.

Souza, M. V. R.; Sinisterra, F. Q.; Farias, M. M.; Gómez, A. (2012) **Avaliação mecânica de um Concreto Asfáltico Usinado à Quente confeccionado com agregado de resíduo de demolição reciclado.** XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) – Porto de Galinhas/PE, pp. 1-9.

Suzuki, K. Y.; Klinsky, L. M. G.; Vasconcelos, K. L. (2018) **Resistência à tração e dano por umidade induzida de misturas asfálticas recicladas.** 21ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) – São Paulo/SP, pp. 1-11.

Tabsh, S. M.; Abdelfatah, A. S. (2009) **Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete.** Construction and building materials, vol 23, p. 1162 – 1167.

Tam, V. W. Y.; Soomro, M.; Evangelista, A. C. J. (2018) **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000 – 2017).** Construction and building materials, vol 172, p. 272 – 292.

Tavira, J; Jiménez, J. R.; Ayuso, J.; Sierra, M. J.; Ledesma, E. F. (2018) **Functional and structural parameters of a paved Road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil.** Construction and building materials, vol 164, p. 57 – 69.

Acker, A. V. (2009) **Reciclagem de materiais de construção.** Disponível em: <<http://techn17.pini.com.br/engenharia-civil/152/reciclagem-de-materiais-de-construcao-286651-1.aspx>> Acesso em: 8 Nov 2017

Unep. **GEO3 – Global environment outlook 3.0: past, present and future perspectives.** Nairobi: Unep, 2002.

Xuan, D. X.; Schlangen, E.; Molenaar, A. A. A.; Houben, L. J. M. (2014) **Influence of quality and variation of recycled masonry aggregates on failure behavior of cement treated demolition waste.** Construction and building materials, vol, 71, p. 521 – 527.

Yanik, K. Report: **Global demand for aggregates to rise.** 18 de Março de 2016. <<http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise>> (18 de Outubro de 2017).

Yuan, H.; Shen, Liyin (2011) **Trend of there search on construction and demolition waste management.** Waste management, vol 31, p. 670 – 679.