



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**TAYNÁ ARAÚJO DANTAS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS**  
**ORNAMENTAIS COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2019**

**TAYNÁ ARAÚJO DANTAS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS  
ORNAMENTAIS COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Campina Grande –  
UFCG, para encerramento do componente  
curricular e conclusão da graduação em  
Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

**Co-orientador:** Me. Daniel Beserra Costa

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2019**

**FOLHA DE APROVAÇÃO****Autora: Tayná Araújo Dantas****Título: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Defendido e aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Co-Orientador: Me. Daniel Beserra Costa  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Avaliador Interno: Prof. Me. Paulo Germano Tavares Marinho Filho  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Avaliador Externo: Talita Miranda de Sousa  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Asdrúbal e Edinilza, por terem sempre me motivado e me dado suporte para chegar onde cheguei. As minhas irmãs Ingrid e Livia e a minha avó Joana por todo o amor, carinho e apoio.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Asdrúbal Alves Dantas e Edinilza Valdevino Araújo Dantas, por todo amor, carinho, apoio, incentivo e esforço que sempre fizeram para proporcionar a realização dos meus sonhos e a formação do meu caráter. As minhas irmãs, Ingrid e Lívia por todo companheirismo, paciência com as minhas inquietudes e, apesar das implicâncias, serem o meu porto seguro. A minha avó paterna, Joana, por seu amor incondicional e por ser o meu maior exemplo. Vocês são tudo para mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, pelo apoio, compressão, confiança e pela oportunidade de adquirir conhecimentos e orientações que ajudaram no meu crescimento profissional, acadêmico e pessoal.

Ao meu co-orientador, Me. Daniel Beserra Costa, por ter tido toda paciência do mundo comigo, por sempre me incentivar, persistir e puxar minha orelha quando preciso, por todo apoio, conhecimento e ajuda na execução desse trabalho e por ter se tornado um grande amigo.

Ao Prof. Dr. Walter Santa Cruz, por todos os ensinamentos, orientações e bons momentos compartilhados.

Aos meus amigos e colegas de graduação, por todos os momentos maravilhosos compartilhados. Um agradecimento especial a Erivan, Lucas Rafael, Túlio, Gabi, Mariana, Éricles, João Maria, Abraão, Aretusa e Felipe por toda a vivência e pelos laços criados. A Débora, por ser uma amiga incrível e por ter se tornado a minha irmã de alma, quem eu sempre pude contar com todo apoio e amizade essa que levarei para o resto da vida.

Aos meus amigos de escola, Amanda, Larissa, Cinthia, Danusa e Adrian, por sempre me apoiarem, acreditarem em mim e torcerem pelas minhas conquistas, além de todo amor e carinho partilhado nesses tantos anos de amizade.

A Dayane, por ter sido a minha maior inspiração, por tornar os meus dias mais felizes, contagiando com todo seu bom humor, palhaçadas e amor, e por ter estado ao meu lado sempre, sendo o melhor presente que a vida me deu.

A JBR Engenharia LTDA e a Granfuji pelo fornecimento dos materiais utilizados nessa pesquisa.

A UFCG, que possibilitou a minha formação profissional como Engenheira Civil.

E aqueles que não foram citados, mas, que de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal e para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A construção civil é um dos setores mais importantes da economia, sendo essencial ao desenvolvimento do país, porém, por consequência, é considerado um dos setores que mais consomem recursos naturais, desde a produção de insumos utilizados até a execução da obra e sua operação. Nesse seguimento, o Brasil é mundialmente reconhecido na produção e comercialização de rochas ornamentais, que durante o beneficiamento primário transforma quase 30% dos blocos, em volume, em resíduo fino. Tendo em vista a necessidade de oferecer uma destinação mais adequada para os resíduos sólidos obtidos no beneficiamento de rochas ornamentais e visando contribuir com a sustentabilidade, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicação prática do resíduo de beneficiamento das rochas ornamentais (RBRO) em misturas asfálticas, atuando como material de enchimento (fíler). Para este fim, foram realizados estudos quanto às propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica com CAP 50/70 e utilizando teores diferentes de RBRO como fíler, substituindo o teor de cal, e analisando com base em resultados obtidos para misturas com adição de cal hidratada. De forma geral, as misturas com adição de RBRO se mostraram viáveis para uso em obras de pavimento, visto que os valores normativos foram superados e os resultados obtidos foram equivalentes ao da mistura de referência. Conclui-se que a análise quanto a resistência à deformação permanente foi determinante para concluir que o teor de 2% de RBRO na mistura apresenta melhor performance.

**Palavras Chave:** Resíduos em misturas asfálticas. Fíler. Rochas ornamentais. RBRO.

## ABSTRACT

Civil construction is one of the most important sectors of the economy, being essential to the development of the country, but, consequently, it is considered one of the sectors that most consume natural resources, from the production of inputs used until the execution of the work and its operation. In this sequence, Brazil is recognized worldwide in the production and commercialization of ornamental rocks, which during the primary processing transform almost 30% of the blocks, by volume, into fine residues. The objective of this research was to evaluate the practical application of ornamental rock processing residue (RBRO) in asphalt mixtures, acting as filler material. For this purpose, studies were carried out on the mechanical properties of an asphalt mixture with CAP 50/70 and using different RBRO contents as a filler, replacing the lime content, and analyzing on the basis of results obtained for mixtures with addition of hydrated lime. In general, mixtures with RBRO addition were shown to be viable for use in pavement works, since the normative values were exceeded and the results obtained were equivalent to those of the reference mixture. It is concluded that the analysis of the resistance to permanent deformation was determinant to conclude that the 2% RBRO content in the mixture presents better performance.

Keywords: Residues in asphalt mixtures. Filler. Ornamental rocks. RBRO.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Granulometria requerida para os fíleres. ....	7
Tabela 2 – Composições de RBRO de diferentes origens. ....	14
Tabela 3 - Características reológicas do ligante asfáltico. ....	18
Tabela 4 - Caracterização dos agregados graúdos utilizados nessa pesquisa .....	19
Tabela 5 - Caracterização dos agregados miúdos utilizados nessa pesquisa .....	19
Tabela 6 - Análise granulométrica dos agregados .....	20
Tabela 7 - Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário .....	21
Tabela 8 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de CAPs estimados.....	22
Tabela 9 - Parâmetros volumétricos em função do teor ótimo de projeto .....	22
Tabela 10 - Resultados de módulo de resiliência total e instantâneo. ....	27
Tabela 11 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral. ....	29
Tabela 12 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral. ....	30
Tabela 13 - Resultados de Flow Number.....	32
Tabela 14 - Flow Number mínimo para diferentes níveis de tráfego definido pela NCHRP 09-33.....	33

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Curva granulométrica com os tipos de graduação – Representação convencional de curvas granulométricas .....	5
Figura 2 - Curva granulométrica com os tipos de graduação – Representação de curvas granulométricas pelo SHRP - Superpave.....	5
Figura 3 - Camadas de pavimento flexível .....	7
Figura 4 - Fíler obtido da moagem fina de calcário.....	8
Figura 5 - Corte das chapas de granito e mármore .....	11
Figura 6 - Tanques de decantação.....	12
Figura 7 - Classificação dos resíduos provenientes do processamento do mármore .....	13
Figura 8 - Fluxograma de atividades .....	16
Figura 9 - RBRO.....	17
Figura 10 - Distribuição granulométrica dos agregados .....	20
Figura 11 - Composição granulométrica FC.....	21
Figura 12 - Separação dos materiais .....	23
Figura 13 - Corpos de prova com adição de RBRO .....	23
Figura 14 - Prensa UTM.....	24
Figura 15 - Resultados comparativos de módulo de resiliência instantâneo. ....	27
Figura 16 - Resultados comparativos de módulo de resiliência total. ....	28
Figura 17 - Resultados comparativos de resistência à tração por compressão diametral. ....	29
Figura 18 - Resultados comparativos de resistência ao dano por umidade reduzida.....	31
Figura 19 - Resultados comparativos de Flow Number.....	32

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASMT	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP II E	Cimento Portland composto com Escócia
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EM	Especificação do Material
ES	Especificação de Serviço
FC	Faixa C intermediária
FN	Flow Number
GO	Goiás
IE	Instruções de Execução
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
PG	Performance Grade
RBRO	Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais
RBRO-G	Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais de Granito
RBRO-M	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais de Mármore
RBV	Relação Betume-Vazios
RRT	Resistência à Tração Retida por Umidade Induzida

RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTC	Resistência à Tração dos corpos de prova Condicionados
RTFO	Rolling Thin Film Over
RTnc	Resistência à Tração dos corpos de prova não Condicionados
SEPLAN	Secretária de Planejamento e Orçamento
SBS	Polímero Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
USA	United States of America
UTM	Universal Testing Machine
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vv	Percentual de Vazios

**LISTA DE SÍMBOLOS**

%	Porcentagem
$\mu\text{m}$	Micrometro
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de Alumínio
$^\circ\text{C}$	Graus Celsius
$\text{CaO}$	Óxido de Cálcio
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de Ferro
g	Gramas
Gmm	Densidade máxima medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Hz	Hertz
h	Horas
H	Altura do corpo de prova
$J_{nr\ 0,1}$	Complância Não-Recuperável para 0,1 KPa
$J_{nr\ 3,2}$	Complância Não-Recuperável para 3,2 KPa
$J_{nr\ diff}$	Complância Não-Recuperável diferencial
$\text{K}_2\text{O}$	Óxido de Potássio
kPA	Kilopascal
MPa	Megapascal
$\text{MgO}$	Óxido de Magnésio
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mmHg	Milímetros de Mercúrio
$n^\circ$	Número
N	Newton
$\text{Na}_2\text{O}$	Óxido de Sódio

P	Carga de ruptura
R <sub>0,1</sub>	Recuperação elástica para 0,1 KPa
R <sub>3,2</sub>	Recuperação elástica para 3,2 KPa
R <sub>diff</sub>	Recuperação elástica diferencial
s	Segundos
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS .....	4
2.1.1 Classificação das misturas asfálticas quanto a graduação dos agregados .....	5
2.2 MATERIAL DE ENCHIMENTO (FÍLER).....	7
2.3 RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	10
2.3.1 Resíduos de mármore e de granito.....	12
2.3.3 Utilização de resíduos de rochas ornamentais como fíler.....	13
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 MATERIAIS .....	17
3.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	17
3.1.2 Agregados graúdos .....	17
3.1.3 Agregados miúdos .....	17
3.1.4 Fíleres.....	17
3.1.5 Caracterização dos ligantes.....	18
3.1.6 Caracterização dos agregados .....	18
3.2 MÉTODOS .....	20
3.2.1 Dosagem Superpave .....	20
3.2.2 Caracterização mecânica.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	27
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	28
4.3 LOTTMAN MODIFICADO.....	30
4.4 FLOW NUMBER .....	32
5 CONCLUSÕES.....	34

## 1 INTRODUÇÃO

Ultimamente, tem-se dado visibilidade às preocupações com o meio ambiente. A busca por sustentabilidade é constante, por isso que há cada vez mais estudos que avaliam produtos, materiais e métodos que nos permitam ser eficientes causando o mínimo de danos ao meio ambiente (SILVA, 2015).

A maioria dos processos produtivos são fontes geradoras de resíduos que se apresentam na forma de gases, líquidos ou sólidos. A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e, desde os primórdios da humanidade, até hoje, gera como subproduto uma elevada quantidade de resíduos de diversas naturezas, sendo também, responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não-renováveis (LINTZ et al., 2012).

A indústria de rochas ornamentais, fortemente relacionada com a indústria de construção civil, também é responsável por diversos impactos ambientais desde a prospecção mineral até a fase de polimento das placas e ladrilhos. Esses impactos incluem poeira, lama e fragmentos de rocha. Cerca de 30% de cada bloco de granito ou mármore não é aproveitado durante o beneficiamento primário, pois gera um resíduo na forma de lama, que depois de seco e destorroado se torna um pó fino (CALMON et al., 2005).

Segundo Alyamaç e Aydin (2015), este setor tem dois grandes problemas: o primeiro pode-se citar a poluição do ar decorrente do processo de corte dessas rochas que por sua vez é amenizado pelo processo de umidificação. O segundo é a poluição da água, pois a adição da água no corte dos mármore e granitos gera a lama, que é despejada sem um tratamento adequado (HANIEH et al., 2014).

O Brasil mundialmente reconhecido na produção e comercialização de rochas ornamentais. Segundo a Departamento Nacional de Produção Mineral (2016), a produção de rochas ornamentais no país no ano de 2015, ficou em torno de 9,5 megatoneladas, onde cerca de 24% deste montante foi exportado. Tendo em vista a elevada quantidade produzida no país de rochas ornamentais, faz-se necessário buscar métodos eficazes de aproveitamento dos resíduos gerados no beneficiamento. Diversas soluções foram encontradas em instituições de pesquisa, destacando-se a utilização dos resíduos minerais na composição de produtos de

concreto, argamassas, cerâmicas e outros para a construção civil (AGUIAR, 2012; ALMEIDA et al., 2015; LISBÔA, 2004; ROCHA, 2008; SANTOS, 2008).

É importante destacar que os resíduos de corte de mármore e granito possuem distribuição granulométrica que os caracteriza como um resíduo muito fino, portanto, boa parte dos estudos desenvolvidos propõe a utilização do RBRO como materiais de enchimento nas misturas asfálticas. A adição mais comumente executada nas misturas asfálticas é a cal hidratada, sendo utilizada como fíler e obtendo efeitos positivos tais como redução do envelhecimento, maior resistência ao dano devido à umidade, aumento da vida de fadiga e diminuição da susceptibilidade à deformação permanente (BOEIRA, 2011; BARDINI et al., 2013).

Alguns pesquisadores (BARDINI et al., 2013; GOTTARDI, 2015; MOURA et al., 2017; RODRIGUES, 2014; SOUZA et al., 2005) desenvolveram estudos baseados em uma possível utilização dos materiais provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como material de enchimento (fíler) em misturas asfálticas. Em geral, os resíduos de beneficiamento de granito e os resíduos do beneficiamento de mármore possuem composições diferentes e dessa forma, as propriedades químicas e físicas desses compostos são diferentes. Acredita-se que o tipo de resíduo de rocha ornamental adicionado em misturas asfálticas pode apresentar impacto positivo ou negativo no que diz respeito à adesividade do material ao ligante e às propriedades após envelhecimento do concreto asfáltico (MOURA et al., 2017).

Estudos desenvolvidos por Souza et al. (2005) e Gottardi (2015), mostraram que a adição de RBRO não foi tão eficaz quanto à adição de cal hidratada no desempenho de misturas asfálticas. Porém os rejeitos utilizados por estes autores eram de origem granítica (RBRO-G), e dessa forma apresentaram altos teores de sílica em sua composição, material este que, segundo Antunes (2013), compromete a adesividade da interface ligante-agregado.

Esta pesquisa visa estudar a utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), com elevado teor de mármore em sua composição, como material de enchimento nas misturas asfálticas dando um destino nobre para o rejeito que hoje apresenta-se como um grande poluente ambiental. Espera-se que as misturas asfálticas produzidas com RBRO, por conterem altos teores de compostos de cálcio, tenham comportamento mais próximo ao de concretos asfálticos com adição de cal hidratada.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a utilização de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais, apresentando elevado teor de mármore em sua composição, como fíler em misturas asfálticas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da incorporação de diversos teores de RBRO nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas;
- Determinar o teor ótimo de incorporação de RBRO nas misturas asfálticas;
- Avaliar as misturas asfálticas com adição de RBRO utilizando o método Superpave.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

As rodovias no Brasil apresentam desde 2001 um progressivo aumento no tráfego de veículos, resultando na necessidade de suportar esforços constantes e, cada vez, de maior intensidade. A camada de revestimento é a responsável por absorver a maior parte do esforço (BERNUCCI et al., 2010).

Materiais granulares e ligantes asfálticos, quando associados, resultam em misturas asfálticas nas quais devem possuir composição granulométrica definida de acordo com a função e utilização do pavimento e o tipo de ligante asfáltico conforme a função de assegurar as propriedades visco-elásticas e proporcionar agregação dos materiais granulares (SALES, 2015).

Segundo as definições especificadas na norma DNIT 031/2006 – ES, o concreto asfáltico, ou mistura asfáltica, é uma mistura composta de agregados graduados, material de enchimento (comumente chamado de fíler) se necessário e cimento asfáltico de petróleo, executada a quente em uma usina apropriada e que deve ser espalhada e compactada também quente.

Para os cimentos asfálticos de petróleo, podem ser empregados os seguintes tipos: CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100 ou cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros tipo SBS. O agregado graúdo utilizado pode ser pedra britada, escória, seixo rolado ou outro material que atenda as especificações complementares, tais elas:

- Desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%, podendo-se admitir agregados com índice superior a 50% se for comprovado desempenho satisfatório em utilização anterior;
- Índice de forme superior a 0,5 e partículas lamelares inferior a 10%;
- Perda de durabilidade inferior a 12% quando submetidos à avaliação.

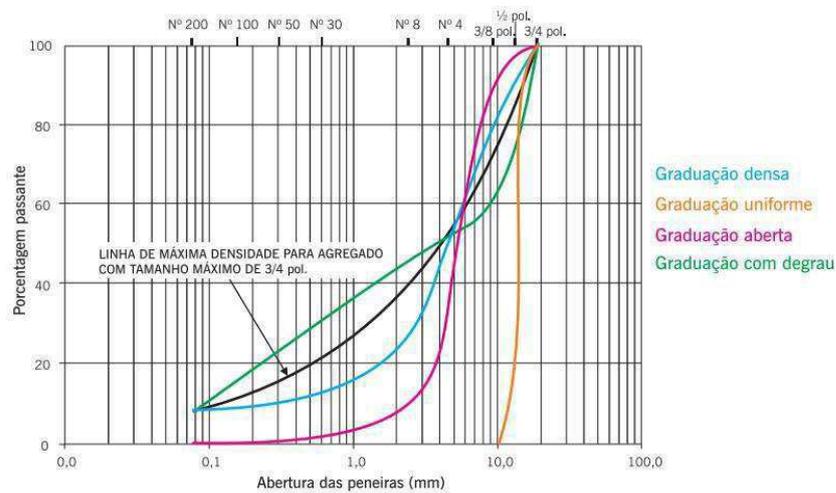
Ainda segundo a norma DNIT 031/2006 – ES, o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos, desde que suas partículas individuais sejam resistentes e estejam livres de torrões de argila e de substâncias nocivas, sendo o equivalente de areia igual ou superior a 55%. Já o material de enchimento deve ser constituído por materiais finamente

divididos e, na aplicação, devem estar secos e isentos de grumos, tais como cimento Portland, cal extinta, pós-calciários, cinza volante, dentre outros.

### 2.1.1 Classificação das misturas asfálticas quanto a graduação dos agregados

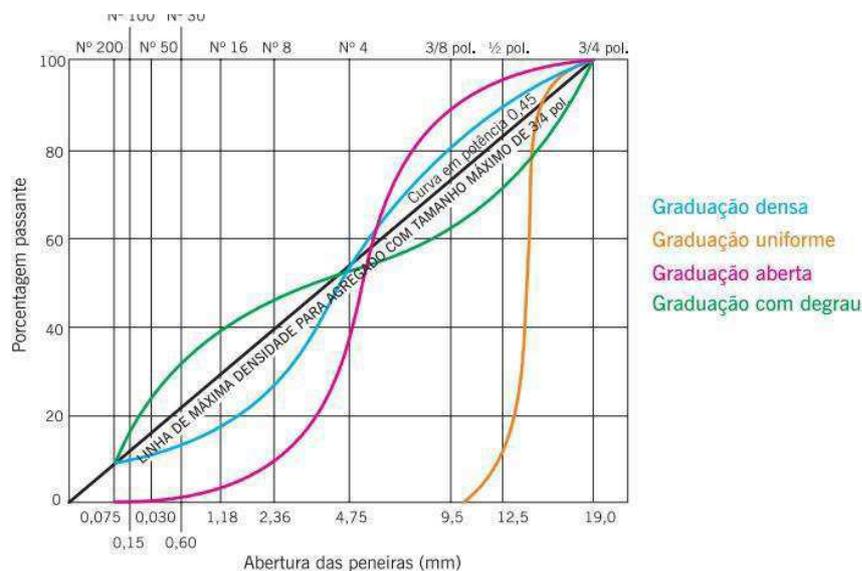
Bernucci et al. (2010) explica que “as misturas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destina”. Com relação a graduação dos agregados e filler, as misturas asfálticas à quente possuem subdivisões, conforme a ilustração da Figura 1 e 2.

Figura 1 - Curva granulométrica com os tipos de graduação – Representação convencional de curvas granulométricas



Fonte: BERNUCCI et al. (2010).

Figura 2 - Curva granulométrica com os tipos de graduação – Representação de curvas granulométricas pelo SHRP - Superpave



Fonte: BERNUCCI et al. (2010).

As misturas de graduação densa possuem curva granulométrica contínua e bem-graduada e apresentam poucos vazios pois os agregados de menores dimensões preenchem os vazios entre maiores, como explicam Bernucci et al. (2010). Esse tipo de mistura adquire resistência a partir do intertravamento dos agregados associado à viscosidade do ligante asfáltico que os envolve, possuindo elevada estabilidade (COSTA, 2017). Contudo, há problemas relacionados aos baixos valores de atrito entre os pneus e a superfície do pavimento que resultam em deficiências de macro-rugosidade destas misturas, como salientam Dantas Neto et al. (2006).

As misturas de graduação aberta possuem curva granulométrica uniforme, apresentam agregados com dimensões parecidas, muitos vazios interligados e, por essa razão, possuem característica drenante. Em outras palavras, a percolação de água no interior da mistura asfáltica é possível pois há uma insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores (BERNUCCI et al., 2010).

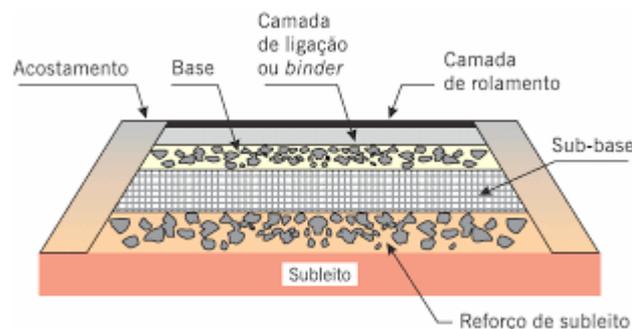
As misturas com graduação uniforme possuem curva granulométrica de faixa estreita, com pequena diferença de tamanho entre as partículas. Já as misturas descontínuas possuem curva granulométrica descontínua e permitem uma maior resistência à deformação permanente com maior contato entre os agregados graúdos, pois há um proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos (BERNUCCI et al., 2010). Conjuntamente, segundo Neves Filho (2004), as misturas asfálticas descontínuas tendem a ter melhor desempenho em termos de resistência à deformação permanente, ao início da fissuração por fadiga e ao desgaste quando comparados com misturas asfálticas convencionais.

Além disso, de acordo com IE – 09/2017 da Prefeitura de São Paulo, as misturas asfálticas recebem designações que variam conforme sua posição relativa e função na estrutura, como mostra na Figura 3, devendo atender a características especiais em sua formulação:

- Camada de rolamento ou capa asfáltica: camada superior da estrutura responsável em receber diretamente a ação do tráfego. A mistura empregada deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura e condições de rugosidade que proporcionem segurança ao tráfego, mesmo sob condições climáticas e geométricas adversas;

- Camada de ligação ou binder: camada posicionada abaixo da capa. Apresenta, em relação à mistura utilizada para camada de rolamento, diferenças de comportamento, decorrentes do emprego de agregados de maior diâmetro máximo, de maior porcentagem de vazios e menor relação betume-vazios;
- Camada de nivelamento ou regularização: serviço executado com massa asfáltica de graduação fina, com a função de corrigir deformações ocorrentes na superfície de um antigo revestimento, e simultaneamente, promover selagem de fissuras existentes.

Figura 3 - Camadas de pavimento flexível



Fonte: BERNUCCI et al. (2010)

## 2.2 MATERIAL DE ENCHIMENTO (FÍLER)

Por definição, o material de enchimento (fíler) é um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,0075 mm de abertura de malha quadrada (DNER – EM 367/97), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria requerida para os fíleres.

Abertura da malha (mm)	% em peso passando
0,42	100
0,18	95 – 100
0,075	65 - 100

Fonte: (DNER – EM 367/97).

Pinto (2018) explica que o material de enchimento, pode ser composto tanto por pó de calcário, materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, quanto qualquer outro material, como ilustra a Figura 4. Tem função de melhorar o desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água das misturas asfálticas, devendo obedecer às especificações próprias quem incluam limites para a granulometria.

Figura 4 - Fíler obtido da moagem fina de calcário



Fonte: SKS Mineração – Grupo SKS (ECIVIL – 2013)

Para alguns autores, Matos et al. (2012) e Antunes (2013), o fíler, quando incorporado nas misturas asfálticas pode apresentar dois tipos de comportamento, o comportamento do tipo de material inerte, quando preenche os vazios entre os agregados mais grossos da mistura, conferindo-lhes uma maior resistência, e outro comportamento enquanto material ativo, resultante das suas características superficiais (forma, textura, porosidade), finura e da sua composição química, que determinam o valor da magnitude e da intensidade, com que a adsorção ocorre, respectivamente, fenómeno que advém da interação fíler-betume, formando o mástique asfáltico. Este tipo de adsorção deve-se às forças de Van der Waals.

Al-Quadi et al. (2009) explica que o mástique asfáltico é o material formado pela mistura dos finos minerais com o ligante asfáltico e pode ser entendido como um componente da mistura asfáltica que liga os agregados, e como o componente da mistura que sofre deformação quando o pavimento é submetido ao carregamento do tráfego. Portanto, as características do fíler podem influenciar significativamente as propriedades do mástique e, conseqüentemente, causar alterações importantes no desempenho da mistura asfáltica. O fíler influencia o desempenho mecânico do mástique, física e quimicamente, e, por conseguinte, das misturas asfálticas. Misturini (2017) estudou a influência de diferentes tipos de fíler no comportamento do mástique e das misturas asfálticas e concluiu que as propriedades físicas de diferentes fíleres têm efeito direto nas propriedades mecânicas do mástique que vão originar.

Balbo (2007) comenta em seu livro que os fíleres adicionados à mistura têm a função de aumentar de viscosidade do CAP, gerando incremento do ponto de amolecimento, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência, melhorando o desempenho reológico, mecânico, suscetibilidade térmica e sensibilidade à água. Quando a porcentagem de fíler aumenta na mistura asfáltica, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral, porém, acima de um determinado teor, o fíler começa a prejudicar a trabalhabilidade bem como a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando também a capacidade de compactação da mistura.

Os fíleres convencionalmente utilizados são a cal e o cimento. Entretanto, os estudos apresentados a seguir apresentam a utilização de resíduos industriais em misturas asfálticas, visando agregar-lhe valor e diminuir o impacto ambiental.

Os autores Kütük-Sert e Kütük (2013) utilizaram fosfogesso, um subproduto das indústrias de fertilizantes fosfatados, como fíler em misturas asfálticas do tipo CBUQ e concluíram que teor ótimo de asfalto obtido a partir da mistura com fosfogesso foi menor do que os determinados para as misturas isentas deste material. Os parâmetros volumétricos (RBV, VAM, Vv) das misturas com e sem fosfogesso foram muito próximos. A estabilidade da mistura com resíduo foi menor em relação à mistura padrão. No entanto, os valores de fluência de ambos os tipos não foram muito diferentes. As misturas com a adição de fosfogesso mostraram um comportamento rígido. Embora o desempenho dos ensaios Marshall para as misturas com fosfogesso tenham sido menores, a adição deste pode ser adequada para ligantes utilizados em camada de ligação.

Gouveia (2013) estudou o efeito do uso de gesso como fíler nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos asfálticos. A autora concluiu que a adição de fíler gesso nas misturas asfálticas promoveu melhorias nas principais características mecânicas requeridas para o pavimento e todas as misturas compostas por fíler gesso, em substituição ao fíler calcário demonstraram desempenho superior. Os melhores resultados obtidos foram para aquelas misturas contendo maiores percentuais de gesso (60%, 80% e 100%), em substituição ao calcário. Por outro lado, as misturas asfálticas contendo fíler gesso ficam comprometidas quando submetidas à condição de umidade e os resultados dos ensaios realizados demonstraram perda de resistência à tração e perda de adesividade entre ligantes modificados e agregados.

Lucena (2008) estudou a utilização de resíduos de vidro planos como fíler em misturas asfálticas, analisando as propriedades físico-químicas e mecânicas. O vidro plano possibilitou a sua incorporação ao mástique sem alterações de suas características pois apresentou estabilidade térmica a temperaturas elevadas. A partir de resultados de estabilidade e fluência Marshall, de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de Lottman, a autora concluiu que o teor ideal de fíler de resíduo vítreo que pode ser incorporado na mistura asfáltica é de 4%, atendendo os requisitos da especificação de concreto asfáltico do DNIT 031/2006 - ES.

Lucena (2009) pesquisou a adição de resíduos de serragem de granito para uso ornamental e do processamento do caulim, mineral que é empregado na produção de tintas, plásticos, borrachas, etc. Ambos os resíduos apresentaram distribuição dos tamanhos das partículas aceitáveis para serem utilizados como fíler. Variando os teores dos resíduos, a autora verificou que as características das misturas como: estabilidade Marshall, resistência à tração e dano por umidade induzida atenderam as normas vigentes, e que o módulo de resiliência estava similar com valores encontrados na literatura. Além disso, a autora concluiu que as misturas asfálticas com fíler de resíduo de granito apresentam uma menor rigidez e uma menor susceptibilidade à presença de água quando comparadas com as misturas com fíler de resíduo do Caulim.

Por fim, em resumo, os motivos de utilizar fíler em misturas asfálticas decorre do fato que o mesmo preenche os vazios, aumenta a viscosidade do ligante asfáltico, e ativa o asfalto, espessando-o e encorpendo-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico correspondente. Simultaneamente, têm-se aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), do módulo de rigidez e da resistência à tração na flexão (SANTANA, 1995).

### 2.3 RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

De acordo com a SEPLAN-GO (2006), as rochas ornamentais e de revestimento são pedras naturais que podem ser extraídas em blocos ou placas, cortadas em formas variadas e, posteriormente, beneficiadas por meio de esquadrejamento, polimento, lustro e outras técnicas. São utilizadas tanto como peças isoladas (esculturas, tampos e pés de mesas, balcões e arte funerária em geral), e ainda em edificações, onde se destacam como revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas e soleiras.

Em 2015, a produção mundial estimada de rochas ornamentais atingiu 140 megatoneladas, com a China respondendo por cerca de 32,1%. No ranking mundial de produção, o Brasil se posiciona em 4º, detendo 9,5 megatoneladas equivalendo a cerca de 6,8% da produção total (DNPM, 2016). A participação dos granitos e similares correspondeu a cerca de 55% da produção nacional e as regiões Sudeste e Nordeste são responsáveis por cerca de 90% da produção nacional.

As rochas ornamentais se subdividem-se em dois grandes grupos: os granitos, que se enquadram genericamente como rochas silicáticas e os mármore, que se enquadram como as rochas carbonáticas. Sendo assim, constata-se que a maioria dos estudos feitos envolvem a utilização do resíduo do granito ou, como em muitos casos, não se especifica o tipo de rocha ornamental utilizada (MOURA et al., 2017).

Nas marmorarias, o resíduo de beneficiamento de mármore e granito é gerado devido ao uso das serras e politrizes, como ilustrado na Figura 5, para que as chapas fiquem no formato especificado pelo cliente.

Figura 5 - Corte das chapas de granito e mármore



Fonte: GOMES (2008)

Assim como descrito por Gomes (2008), normalmente, nas marmorarias, a lama gerada devido ao corte e polimento das chapas é depositada em tanques de decantação, como ilustra a Figura 6. Os tanques fazem a separação da lama, na qual os sedimentos ficam no tanque e a água é separada, sendo bombeada e reaproveitada. A lama que fica depositada nos tanques de decantação é retirada ou pelos próprios funcionários da empresa ou por meio dos caminhões

limpa-fossa, dando uma destinação inadequada ao RBMG, pois são depositadas em lotes clandestinos ou às margens dos rios.

Figura 6 - Tanques de decantação



Fonte: GOMES (2008)

### 2.3.1 Resíduos de mármore e de granito

Do ponto de vista geológico, o mármore é definido como uma rocha metamórfica essencialmente constituída por calcite e/ou dolomite com uma textura granoblástica e deriva de rochas carbonatadas sedimentares, que perderam as suas características originais e cujos carbonatos recristalizaram através do metamorfismo (RODRIGUES, 2014).

Llope (2011) define que o granito em termos geológicos é uma rocha ígnea, uniforme, de textura granular, constituída predominantemente de minerais de quartzo, feldspato e mica. O quartzo pode apresentar cores de acordo com a sua variedade, é muito resistente ao intemperismo e ele sobrevive à erosão em grãos que formam a maior parte das areias da praia e do deserto. A mica aparece no granito sob aspecto de pequenas lâminas. O feldspato pertence ao grupo de silicatos de alumínio com potássio, sódio, cálcio e mais raramente bário, sendo que o primeiro tem grande aplicação na indústria cerâmica e do vidro.

Os resíduos produzidos durante o processamento do mármore e do granito podem ser classificados de acordo com a dimensão das suas partículas, como ilustra a Figura 7. As partículas de maiores dimensões são provenientes de blocos/placas de mármore defeituosas ou partidas, enquanto as de tamanho médio a pequeno são produzidas durante o acabamento dos

blocos/placas. As partículas com dimensões reduzidas são constituídas por pó ou lamas, caso o pó esteja misturado com água.

Figura 7 - Classificação dos resíduos provenientes do processamento do mármore



Fonte: ADAPTADO DE SILVA (2016)

As ameaças causadas pela deposição dos resíduos de pó de rochas ornamentais, sem as devidas precauções, podem ser de carácter físico, químico e biológico. As consequências associadas à acumulação deste tipo de resíduos a céu aberto são as seguintes (BDOUR e AL-JUHANI, 2013):

- Diminuição da produtividade agrícola do solo: devido ao decréscimo da sua porosidade, absorção de água, capacidade da água percolar no seu interior, etc;
- Poluição atmosférica: devido à circulação do pó de mármore, após a sua secagem;
- Problemas de saúde: quando ocorre a inalação do pó;
- Redução do desempenho das máquinas e equipamentos: situados nas zonas industriais, devido à acumulação do pó de mármore que circula no ar;
- Limitação da capacidade de armazenamento e diminuição da qualidade da água, durante a estação das chuvas;

### 2.3.3 Utilização de resíduos de rochas ornamentais como filler

Ao observar algumas características específicas dos rejeitos do processamento de rochas ornamentais, houvesse o interesse de aplicar esse material como material de enchimento em misturas asfálticas. Sua fina granulometria e composição pré-definida de acordo com a rocha explorada são algumas das características que favorecem o seu uso na pavimentação, além do ganho ambiental envolvido ao se aplicar um subproduto que atualmente está poluindo o ambiente em pátios de estocagem e aterros sanitários (MOURA et al., 2017). Além do mais,

caso os resultados sejam satisfatórios poderia-se utilizar um material sem valor agregado em substituição aos fíleres comuns.

Como já visto, a influência do fíler em misturas asfálticas tem relação não apenas com o tamanho dos grãos, mas também com sua composição mineralógica, logo, é de se esperar que resíduos de rochas com composições químicas diferentes tenham comportamentos diferentes. Galetakis e Soutana (2016) caracterizou amostras de resíduos do beneficiamento de granito (RBRO-G) da Grécia, enquanto SILVA et al. (2015) e Moreira et al. (2003) caracterizaram um resíduo de uma jazida localizada na Paraíba. Para os resíduos do beneficiamento de mármore (RBRO-M), ainda há poucos estudos. Entretanto, Galetakis e Soutana (2016) caracterizou também RBRO-M na Grécia, enquanto Almeida et al. (2015) analisou resíduos no Espírito Santo. A Tabela 2 concentra informações sobre os principais compostos e suas respectivas faixas de porcentagem de composição mineralógica encontradas em análises feitas por alguns pesquisadores.

Tabela 2 – Composições de RBRO de diferentes origens.

Composto químico	RBRO-G	RBRO-M
	% segundo Galetakis e Soutana (2016), Silva et al. (2015) e Moreira et al. (2003)	% segundo Galetakis e Soutana (2016) e Almeida et al. (2015)
SiO <sub>2</sub>	45 – 70	0 – 1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 – 19	0 – 1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 – 13	0 – 1
K <sub>2</sub> O	3 – 4,5	0 – 1
CaO	3 – 6,5	52 – 56
Na <sub>2</sub> O	2 – 3	-
MgO	0 – 4,5	0 – 10
TiO <sub>2</sub>	0 – 2	-
Perda ao fogo	-	35 - 44

FONTE: MOURA et al. (2017)

Observa-se que os altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}$  são característicos de rochas ígneas graníticas e, além do mais, Silva (2015) ressalta que a presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  estão relacionadas ao método utilizado no beneficiamento do granito, com adição de granalha e óxido de cálcio para lubrificação do processo de corte/serragem.

Já foi comprovado em diversos estudos (AGUIAR, 2012; CALMON et al, 2005; GOMES, 2008; GONÇALVES, 2000; LISBÔA, 2004; MOURA et al., 2002; MOREIRA, et al., 2003; SILVA et al., 2015; SOUZA et al., 2005) que é viável a utilização do RBRO-G em vários materiais aplicados na construção. Destacando a utilização em misturas asfálticas, Souza et al. (2005) verificou a adição do RBRO-G, que é o resíduo proveniente do beneficiamento de granito, e comparou com adição de cal e cimento Portland, dois fílers tradicionalmente utilizados. Os resultados obtidos demonstram a real aplicabilidade dos resíduos de rochas ornamentais como fíler. Nos ensaios de estabilidade Marshall, a mistura com fíler de resíduo apresentou resultados semelhantes aos obtidos para a mistura que utilizou cal e resultados superiores aos obtidos para o cimento Portland. Além disso, o consumo de ligante foi intermediário, entre a massa asfáltica com adição de cal e a com adição de cimento Portland. Assim como Souza et al. (2015), Tapahuasco et al. (2012) também comprovou as vantagens da utilização de RBRO-G, alcançando resultados superiores em estabilidade e fluência se comparados à massa asfálticas convencional.

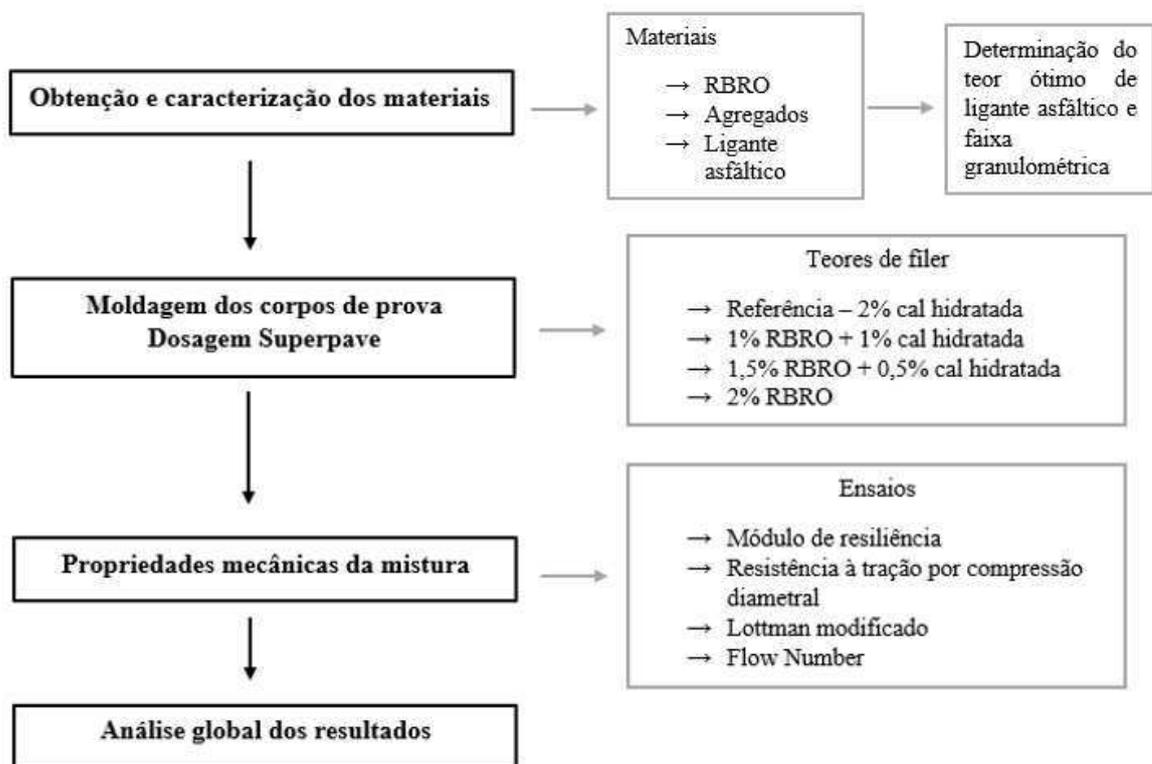
Quanto ao RBRO-M, pode-se observar que o resíduo de mármore é constituído principalmente por óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), que são óxidos característicos das rochas carbonáticas. O resíduo apresenta também menores quantidades de dióxido de silício e óxido sulfúrico (ALMEIDA et al., 2015). Nota-se uma alta perda de massa na calcinação do resíduo de mármore correspondente à liberação do  $\text{CO}_2$  dos carbonatos durante o aquecimento. A perda ao fogo é determinada utilizando a massa da amostra seca a  $110\text{ }^\circ\text{C}$  e a massa da amostra calcinada a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  durante 1h.

A maioria dos estudos ainda focam na caracterização e viabilidade do RBRO-M, existindo poucas pesquisas que estudam aplicações práticas para o material. Moura et al. (2002) comprovaram através de ensaios de lixiviação e solubilização que a utilização de resíduos do corte de mármore não apresenta restrição ambiental em seu uso. Além disso, argamassas produzidas com esse resíduo apresentaram melhores resultados de resistência à compressão.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados e dos ligantes asfálticos, assim como os procedimentos utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. A metodologia adotada está apresentada no Fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma de atividades



Os materiais utilizados na pesquisa foram cedidos pela JBR Engenharia e a parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Com exceção do RBRO, os demais materiais são os mesmos utilizados na dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG por Costa (2018).

Os ensaios foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infraestrutura e Transportes (DNIT), American

Society for Testing and Materials (ASTM) e American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) utilizado na pesquisa foi oriundo da construtora Andrade Guedes e utilizados no trecho executado na BR 101 – Trecho de Igassaru.

#### 3.1.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram Brita 19” e Brita 12,5” adquiridos junto à Pedreira Brita Forte, localizada na cidade de Pedras de Fogo, Paraíba.

#### 3.1.3 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados nessa pesquisa foram o pó de pedra e areia. O pó de pedra foi adquirido junto à Pedreira Brita Forte, localizada na cidade de Pedras de Fogo, Paraíba. A areia é proveniente de extração em rio.

#### 3.1.4 Fíleres

Os fíleres utilizados nessa pesquisa foram a cal hidratada e o RBRO. A cal hidratada foi adquirida no comércio de Campina Grande. O RBRO utilizado é uma mistura de resíduos provenientes do corte de mármore e do corte de granito obtidos na marmoraria Granfuji, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba (Figura 9).

Figura 9 - RBRO



### 3.1.5 Caracterização dos ligantes

De acordo com Costa (2018), a Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização reológica do ligante asfáltico CAP 50/70 utilizado na pesquisa.

Tabela 3 - Características físicas e reológicas do ligante asfáltico.

Ensaio	Norma	Amostra CAP 50/70
Ponto de amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	48,5
Penetração (mm)	ABNT NBR 6576	57,3
Recuperação elástica (%)	ABNT NBR 15086	-
Ponto de Fulgor (°C)	ABNT NBR 11341	> 250
Viscosidade Rotacional		
Temperatura 135 °C (cP)		371,25
Temperatura 150 °C (cP)	ABNT NBR 15184	185,00
Temperatura 177 °C (cP)		69,25
RTFO	ASTM D 2872	
Perda de Massa (%)		0,095
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576	76,21
Varição de Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	+ 4
Recuperação elástica retida (%)	ABNT NBR 15086	-
PG (°C)	AASHTO M 320	58
MSCR		
R0,1 (%)		2,3
R3,2 (%)		1,0
Rdiff (%)	AASHTO TP 70	55,5
Jnr 0,1 (kPa <sup>-1</sup> )		1,9
Jnr 3,2 (kPa <sup>-1</sup> )		2,0
Jnr diff (%)		4,9

Fonte: COSTA (2018)

Os resultados obtidos para o ligante se encontram dentro do especificado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), segundo resolução nº 19/2005 e nº 32/2010, respectivamente, garantindo que o mesmo não proporcionará influência nos resultados esperados no estudo.

### 3.1.6 Caracterização dos agregados

Os resultados da caracterização dos agregados graúdos são apresentados na Tabela 4, conforme Costa (2018).

Tabela 4 - Caracterização dos agregados graúdos utilizados nessa pesquisa

Ensaio	Norma	Amostra	
		Brita 19''	Brita 12,5''
Determinação do índice de forma	DNIT – ME 086/94	0,855	0,679
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )		2,646	2,643
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 081/98	2,636	2,630
Absorção (%)		0,35	0,52
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNIT – ME 035/98	21,26	21,26
Partícula alongada e achatada (%)	ASTM D 4791	3,32	2,82

Fonte: COSTA (2018)

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados graúdos estão dentro das especificações técnicas empregados pela metodologia Superpave, assim como, das do DNIT, possibilitando o uso desses agregados em misturas asfálticas.

Para os agregados miúdos, os resultados da caracterização são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização dos agregados miúdos utilizados nessa pesquisa

Ensaio	Norma	Amostra	
		Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm)	DNIT - ME 084/95	2,523	2,429
Massa específica aparente (g/cm)		2,447	2,356
Absorção (%)		0,87	0,68
Equivalente areia (%)	DNIT - ME 054/97	62,68	79,07
Angularidade de Agregado Miúdo (%)	AASHTO T 304	51,00	50,41

Fonte: COSTA (2018)

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados miúdos também estão dentro das especificações técnicas empregados pela metodologia Superpave, assim como, das do DNIT.

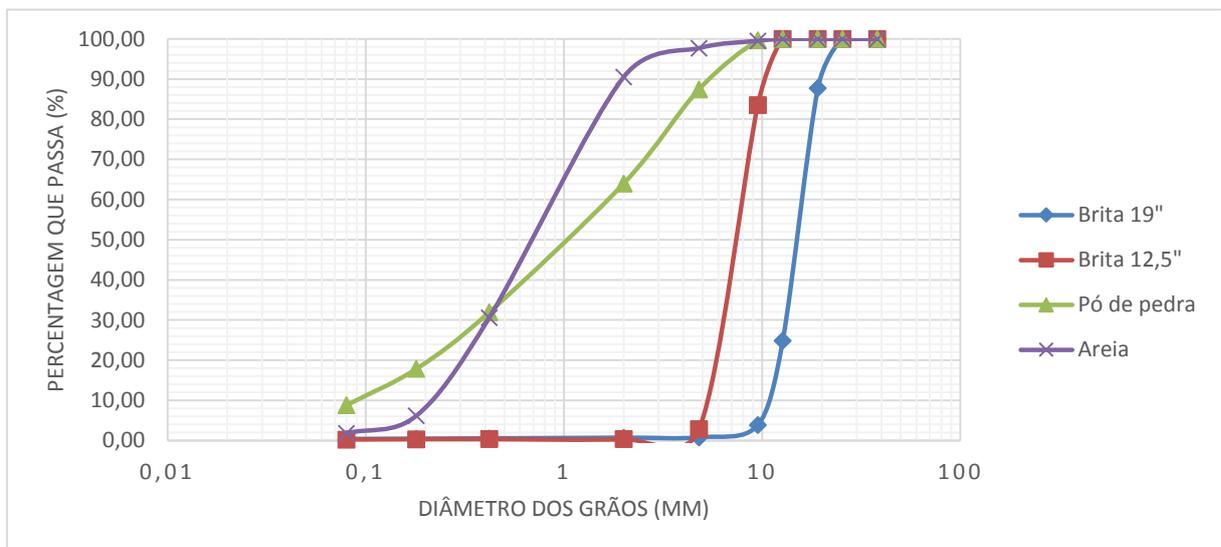
A Tabela 6 apresenta os resultados das análises granulométricas e as curvas granulométricas dos agregados são apresentadas na Figura 10.

Tabela 6 - Análise granulométrica dos agregados

Peneira		Porcentagem passante em massa (%)					
Nº	mm	Brita 19"	Brita 12,5"	Pó de Pedra	Areia	Cal	RBRO
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	87,74	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	24,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	3,84	83,50	99,64	99,52	100,00	100,00
Nº 4	4,8	0,80	2,80	87,46	97,71	100,00	100,00
Nº 10	2	0,71	0,37	63,98	90,50	100,00	100,00
Nº 40	0,42	0,54	0,35	31,95	30,60	100,00	100,00
Nº 80	0,18	0,45	0,33	17,84	6,16	99,90	83,40
Nº 200	0,08	0,40	0,25	8,80	1,81	94,48	66,80

Fonte: COSTA (2018)

Figura 10 - Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: COSTA (2018)

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Dosagem Superpave

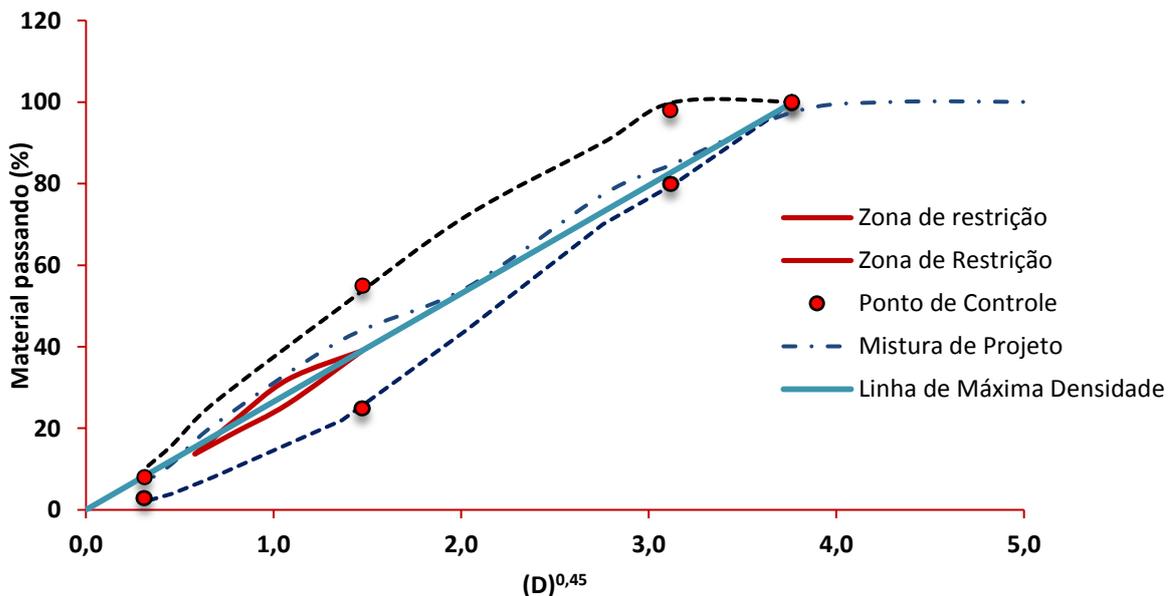
As curvas Fuller foram utilizadas para a realização da dosagem SUPERPAVE. A curva granulométrica intermediária adotada encontra-se dentro da Faixa C de granulometria do DNIT e foi a mesma utilizada na dissertação de mestrado de Costa (2018).

Utilizando dos conceitos de Pontos de controle e Zonas de transição, a Tabela 7 contém as proporções de agregados da curva granulométrica correspondente a Faixa C intermediária. Já a Figura 11 apresenta graficamente as composições granulométricas.

Tabela 7 - Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - CURVA INTERMEDIÁRIA											ESPECIFICAÇÃO	
	BRITA 19		BRITA 12.5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJ		
	TOTAL	20%	TOTAL	20%	TOTAL	9%	TOTAL	49%	TOTAL	2%		Faixa C	
1 1/2"	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	9,00	100,00	49,00	100,00	2,00	100,00	100	100
1"	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	9,00	100,00	49,00	100,00	2,00	100,00	100	100
3/4"	87,74	17,55	100,00	20,00	100,00	9,00	100,00	49,00	100,00	2,00	97,55	100	100
1/2"	24,90	4,98	100,00	20,00	100,00	9,00	100,00	49,00	100,00	2,00	84,98	80	100
3/8"	3,84	0,77	83,50	16,70	99,52	8,96	99,46	48,74	100,00	2,00	77,25	70	90
Nº 4	0,80	0,16	2,80	0,56	97,71	8,79	87,46	42,86	100,00	2,00	54,37	44	72
Nº 10	0,71	0,14	0,37	0,07	90,50	8,15	63,98	31,35	100,00	2,00	41,71	22	50
Nº 40	0,54	0,11	0,35	0,07	30,60	2,75	31,95	15,66	100,00	2,00	20,59	8	26
Nº 80	0,45	0,09	0,33	0,07	6,16	0,55	17,84	8,74	100,00	2,00	11,45	4	16
Nº 200	0,40	0,08	0,25	0,05	1,81	0,16	8,80	4,31	97,00	1,94	6,54	2	10

Figura 11 - Composição granulométrica FC



Fonte: COSTA (2018)

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada segundo a metodologia SUPERPAVE. Foram moldados e compactados os corpos de prova com variações de proporções  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$  sobre teor inicial de  $5,04\%$ , estabelecendo parâmetros volumétricos que permitiram definir

o teor ótimo de projeto da mistura estudada. A Tabela 8 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos, em função dos teores de CAPs estimados.

A densidade máxima medida (Gmm) foi determinada por meio do ensaio RICE TEST, segundo a norma ASTM D 2041.

Tabela 8 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de CAPs estimados.

Composição Granulométrica				
Teor de ligante (%)	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,54	2,466	3,93	9,98	59,99
5,04	2,448	2,70	9,97	60,88
5,54	2,424	1,10	9,86	61,68
6,04	2,41	0,31	10,14	63,24

Fonte: Costa (2018)

O teor ótimo de projeto definido para a mistura estudada foi de 4,50% para CAP 50/70, sendo os parâmetros volumétricos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros volumétricos em função do teor ótimo de projeto

Composição Granulométrica				
Teor de ligante (%)	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,50	2,470	3,86	9,77	59,17

Fonte: Costa (2018)

### 3.2.2 Caracterização mecânica

Para a realização dos ensaios e análise das propriedades mecânicas da mistura, foram moldados corpos de prova no compactador giratório SUPERPAVE com teor ótimo de 4,5% obtido através da dosagem Superpave (Figura 12) e incorporando o material de enchimento nos teores definidos: 1,0% RBRO + 1% cal hidratada; 1,5% RBRO + 0,5% cal hidratada e 2,0% RBRO sem adição de cal hidratada (Figura 13). Além disso, foram moldados corpos de prova nas mesmas condições utilizando a cal hidratada como filer no teor de 2%, sem adição de RBRO, para servir como parâmetros comparativos para os resultados obtidos das misturas asfálticas com adição de RBRO.

Figura 12 - Separação dos materiais



Figura 13 - Corpos de prova com adição de RBRO



### 3.2.2.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de MR foi realizado segundo as normas ASTM D 4123-83 e DNIT ME 135/2018. Os ensaios foram realizados na prensa UTM-25 (Figura 14) com auxílio do *software* UTS0031.39 *Indirect Tensile Modulus* e apesar de serem realizados sob as mesmas condições, as normas diferem quanto a obtenção dos deslocamentos resilientes no tempo de descarregamento. Na norma ASTM D 4123-82, o deslocamento resiliente obtido é o total, enquanto na norma DNIT ME 135/2017, o deslocamento resiliente obtido é o instantâneo.

Figura 14 - Prensa UTM



O ensaio consiste na aplicação de um carregamento cíclico a uma frequência de 60 ciclos por minuto (1 Hz), sendo 0,1 segundo o tempo de aplicação e 0,9 segundo para descarregamento, utilizando condicionamentos de 50 ciclos. O equipamento é automatizado e o deslocamento diametral recuperável será medido por dois LVDTs (Linear Variable Differential Transducer), localizados no eixo horizontal. O valor obtido pelo software para cálculo do MR é uma média dos resultados em 5 leituras após os ciclos de condicionamento que o corpo de prova é submetido.

### 3.2.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ou RT, permite simular a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica antes da sua ruptura, em um plano idêntico ao plano de aplicação da carga. A norma regulamentadora do ensaio é a DNIT ME 136/2018 e tem

por objetivo determinar a resistência à tração indireta de corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica.

Os corpos de prova destinados ao ensaio devem ter altura entre 35 a 65 mm e diâmetros de  $100 \pm 2$  mm e devem ser posicionados no dispositivo centralizador, com a superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, curvos em duas faces de curvatura igual ao do corpo de prova. Aplica-se uma carga vertical de compressão progressivamente, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até a ruptura total segundo o plano diametral vertical. Através do software, obtém-se a carga de ruptura e calcula a RT por meio da Equação 1.

$$RT = \frac{2P}{100 \pi D H} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

RT = Resistência à tração, em MPa;

P = Carga de Ruptura, em N;

D = Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm.

### 3.2.2.3 Lottman Modificado

O ensaio de Lottman Modificado, também conhecido como Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida, é normatizado pela AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867 e tem o objetivo de avaliar as propriedades de adesividade em misturas asfálticas considerando o efeito danoso da água, já que a mesma afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos moldados com volume de vazios de aproximadamente  $7 \pm 1\%$  e a análise é feita pela relação entre a resistência à tração de corpos de prova com condicionamento prévio e corpos de prova sem condicionamento.

Considerando os dois grupos de corpos de prova, os procedimentos com os corpos de prova ocorrem da seguinte maneira:

- Submete-se os corpos de prova condicionados a uma pressão de vácuo residual de 250-650mmHg, de maneira a obter saturação entre 70 e 80% de água;
- Coloca-se os corpos de prova condicionados em um involucro plástico, inserindo 10mL de água destilada e submete a um ciclo de congelamento de  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período de 16h;

- Após esse período, coloca-se os corpos de água condicionados a um ciclo de aquecimento em banho maria a 60°C por um período de  $24 \pm 1$  h e ao retirar, resfria-se em banho maria os corpos de prova condicionados a temperatura de 25°C por um período de  $2 \pm 1$  h.
- A partir dessa etapa, os corpos de prova não condicionados devem ser vedados em invólucros plásticos e submetidos ao banho maria para estabilização de temperatura;
- Então, realiza-se o ensaio de RT logo após estabilização da temperatura, nos corpos de prova condicionados (RTC) e não-condicionados (RTnc) e calcula a resistência a tração retida por umidade induzida (RRT), que é a razão entre RTC e RTnc.

#### 3.2.2.4 Flow Number

O ensaio de Flow Number é normatizado pela ABNT NBR 16505/2016 ou DNIT ME 184/2018. O ensaio tem objetivo de determinar a deformação permanente de um corpo de prova, resultante da aplicação de carregamento de compressão uniaxial vertical repetido. Os corpos de prova foram moldados e devem estar a uma temperatura de 60 °C para submetê-los a um pré-carregamento aplicando uma carga de compressão de 10,2 kPa por 60 segundos. Após, o carregamento cíclico de carga uniaxial de compressão de 204 kPa durante um período de 0,1 segundos com repouso de 0,9 segundos, mantendo a carga de pré-carregamento durante o período de repouso. O critério de parada ocorre quando se atinge 10000 ciclos ou a ruptura do corpo de prova.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados de acordo com o item 3.2.2.1, seguindo as especificações das normas ASTM D 4123-83 e DNIT ME 135/2018. A Tabela 10 apresenta as médias de módulo de resiliência total e instantâneo, respectivamente, de 3 corpos de prova de cada teor analisado na mistura. As Figuras 15 e 16 representam os resultados em forma gráfica das misturas asfálticas com adição de RBRO, utilizando a mistura asfáltica convencional com cal como referência.

Tabela 10 - Resultados de módulo de resiliência total e instantâneo.

DNIT - MR INSTANTÂNEO				
Amostra	Referência – 2% Cal	1% RBRO + 1% Cal	1,5% RBRO + 0,5% Cal	2% RBRO + 0% Cal
MR (MPa)	5865,72	5798,67	6724,33	6771,00
ASTM - MR TOTAL				
Amostra	Referência – 2% Cal	1% RBRO + 1% Cal	1,5% RBRO + 0,5% Cal	2% RBRO + 0% Cal
MR (MPa)	3411,56	3866,00	4666,67	4732,00

Figura 15 - Resultados comparativos de módulo de resiliência instantâneo.

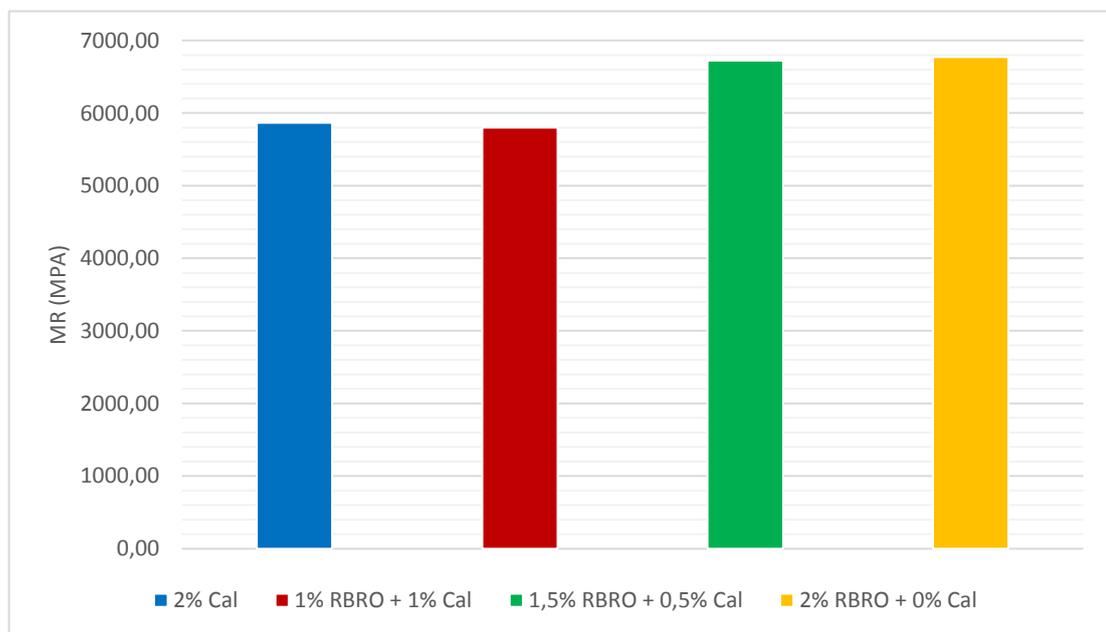
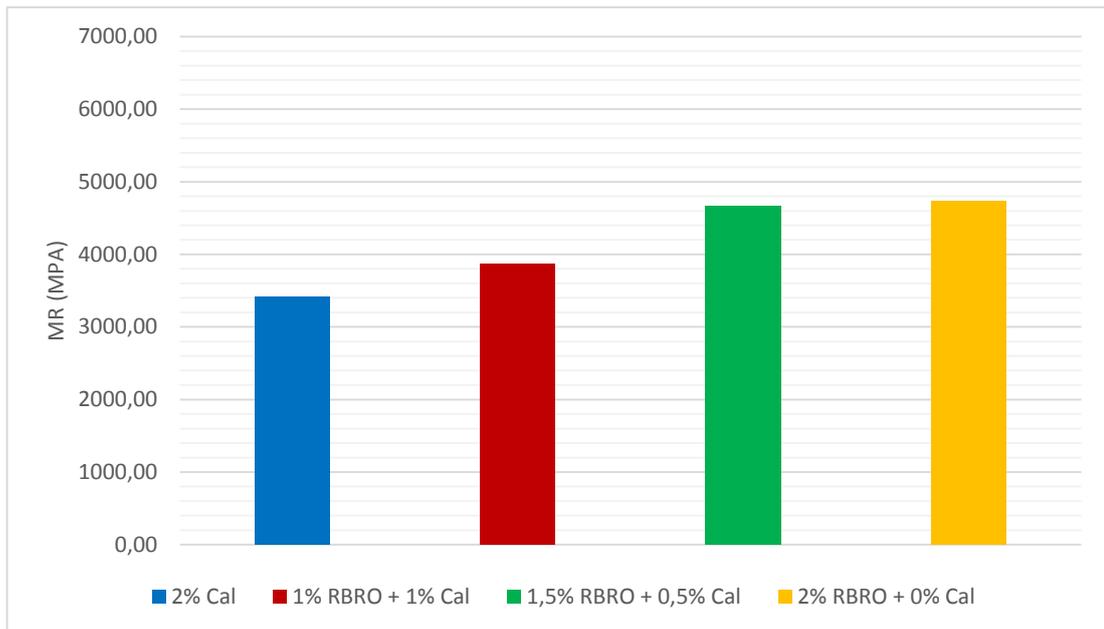


Figura 16 - Resultados comparativos de módulo de resiliência total.



Ao analisar os valores obtidos de MR instantâneo e total, nota-se que a mistura asfáltica com teor de 1% RBRO + 1% cal não apresenta diferenças significativas em comparação à mistura asfáltica com cal, independentemente da adição de RBRO ter reduzido em 50% o teor de cal utilizado na mistura. Entretanto, ao aumentar o teor de RBRO, também aumentou expressivamente a diferença nos valores de MR total e instantâneo com relação a mistura de referência. Além disso, pode-se observar que os MR obtidos entre os teores de 1,5% RBRO + 0,5% cal e 2% de RBRO são similares.

Segundo Bernucci (2010), para concretos asfálticos à 25 °C podem ser considerados valores típicos de MR na faixa de 2.000 a 8.000MPa, sendo os menores correspondentes a misturas com asfaltos modificados por polímeros ou por borracha e os maiores a misturas com asfaltos de consistência dura. Observa-se através das Figuras 13 e 14 e da Tabela 10 que todas as misturas estão situadas dentro da faixa definida.

#### 4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

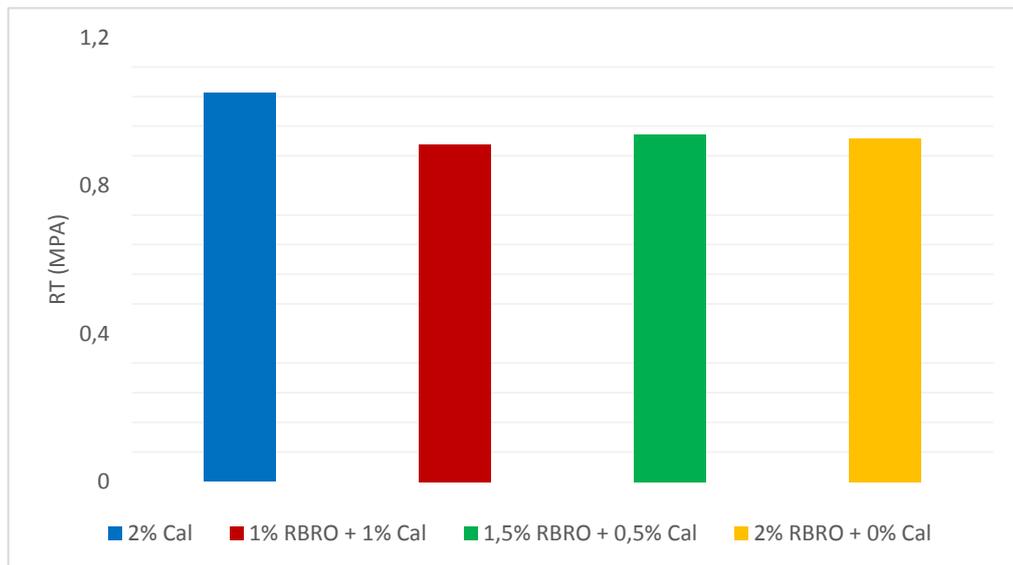
Os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral foram realizados de acordo com o item 3.2.2.2, seguindo as especificações da norma DNIT ME 136/2018. Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos de RT, sendo a média de 3 corpos de prova de cada teor analisado.

Tabela 11 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL				
Amostra	Referência – 2% Cal	1% RBRO + 1% Cal	1,5% RBRO + 0,5% Cal	2% RBRO + 0% Cal
RT (MPa)	1,05	0,91	0,94	0,93

De acordo com a norma DNIT ES 031/2006, para concretos asfálticos é estabelecido que o RT mínimo seja de 0,65 MPa. A Figura 17 revela de forma gráfica que todas as misturas atenderam a especificação do DNIT em relação à RT mínima, além de apresentar um comparativo com a mistura asfáltica de referência com teor de 2% de cal.

Figura 17 - Resultados comparativos de resistência à tração por compressão diametral.



Como pode-se observar, o valor da RT na mistura de referência é maior que a RT das misturas que utilizaram RBRO como fíler, entretanto, os valores não são consideravelmente discrepantes. Além disso, nota-se que a RT não segue um padrão dentre as misturas com teores de RBRO diferentes, pois, a mistura com 1,5% de RBRO apresentou uma redução de RT em relação a mistura com 2% de cal menor que a mistura com 2% de RBRO. Entretanto, a diferença entre as RT de todos os teores de RBRO é insignificante, podendo considerar que os dois teores apresentam a mesma resistência à tração.

Gottardi (2015) realizou estudo sobre propriedades mecânicas de misturas asfálticas com uso de RBRO variando os teores em 2, 3 e 4% utilizando a dosagem Marshall e obteve

uma RT de 0,69 MPa para o teor de 2% de RBRO, um resultado bem abaixo do encontrado nesta pesquisa.

Já no estudo realizado por Moura et al. (2017), utilizando misturas com teor de 1,5% de RBRO-G e de RBRO-M e a dosagem Marshall obteve-se RTs de 1,33 e 1,53, respectivamente. Comparando a essa pesquisa, observa-se que foram resultados muito discrepantes, porém, deve-se considerar que a mistura foi dosada pela metodologia Marshall, com teor ótimo de CAP de 5,1% e volume de vazios de 6,4%, além de que em ambas as pesquisas, o RBRO utilizado como fíler não possui as mesmas características.

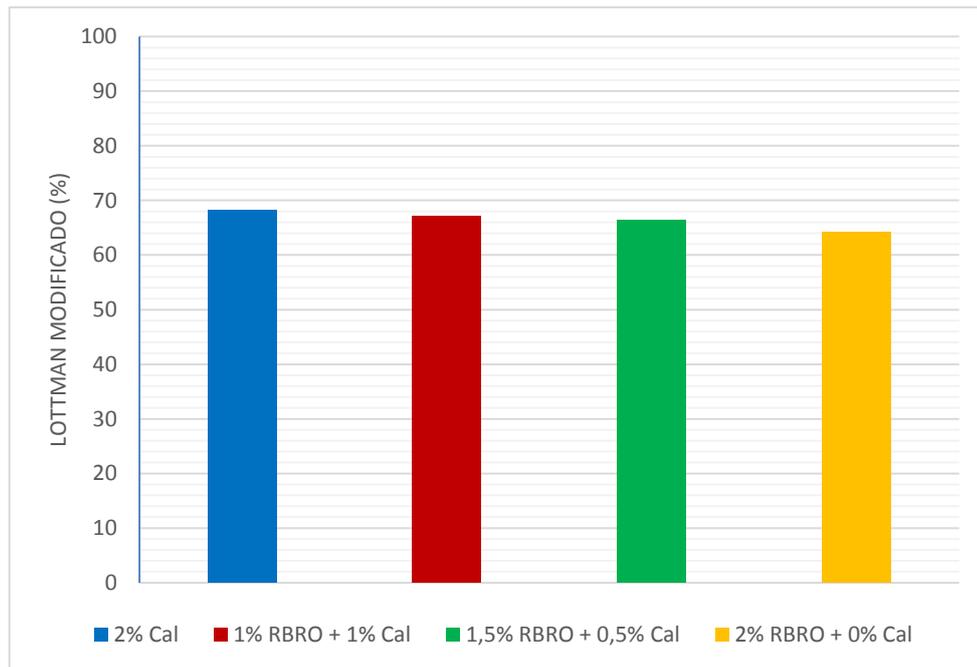
#### 4.3 LOTTMAN MODIFICADO

Os ensaios de Resistência ao Dano por Umidade Induzida foram realizados de acordo com o item 3.2.2.3, seguindo as especificações da norma AASHTO T 283-89 e ASTM D4867. Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos de RRT, sendo a razão obtida entre a média de 3 corpos de prova condicionados e 3 corpos de prova não condicionados de cada teor analisado. A Figura 18 ilustra em gráfico os tais resultados e demonstra um comparativo entre as misturas com adição de RBRO e a mistura de referência, que utiliza a cal como fíler.

Tabela 12 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

<b>RESISTÊNCIA AO DANO POR UMIDADE INDUZIDA</b>				
Amostra	Referência – 2% Cal	1% RBRO + 1% Cal	1,5% RBRO + 0,5% Cal	2% RBRO + 0% Cal
RRT (%)	68,14	67,02	66,39	64,11

Figura 18 - Resultados comparativos de resistência ao dano por umidade reduzida.



A AASHTO T283 - 99 determina que a resistência retida à tração mínima deve ser de 80%, para misturas dosadas através do método Superpave. Todavia, essa faixa limitante proposta de RRt foi considerada elevada, levando outras agências de estudo começarem a adotar valores de resistência retida à tração de 70% ou maiores, baseados em novas avaliações laboratoriais e práticas. Por outro lado, valores de resistência a tração de 60% ou menores indicam que as misturas são susceptíveis à umidade.

De acordo com resultados obtidos, nenhuma das misturas atingiram o critério de RRt mínima, sendo elas consideradas susceptíveis o dano por umidade. Entretanto, dentre as misturas analisadas, a com 1% RBRO + 1% cal apresenta melhor tolerância à ação da água, pois alcançou um percentual próximo ao limite de 70%, assim como a mistura de referência com 2% de cal, sem adição de RBRO.

Apesar de não ter sido realizada uma análise mineralógica no RBRO utilizado, porém, considerando que o mesmo dispõe de resíduos de mármore e granito misturados e baseando-se nos estudos de Gottardi (2015) e Moura et al. (2017), a ineficácia da sua utilização como agente melhorador de adesividade pode estar relacionada aos cristais formadores do mármore, que não agem como os compostos presentes na cal hidratada, e a presença de sílica entre seus componentes devido ao granito. De acordo com Biava e Steiner (2016), a sílica é um óxido

ácido, de interação eletroquímica negativa, e sua presença ocasiona repelência em relação ao CAP, que também possui mesma carga eletronegativa.

#### 4.4 FLOW NUMBER

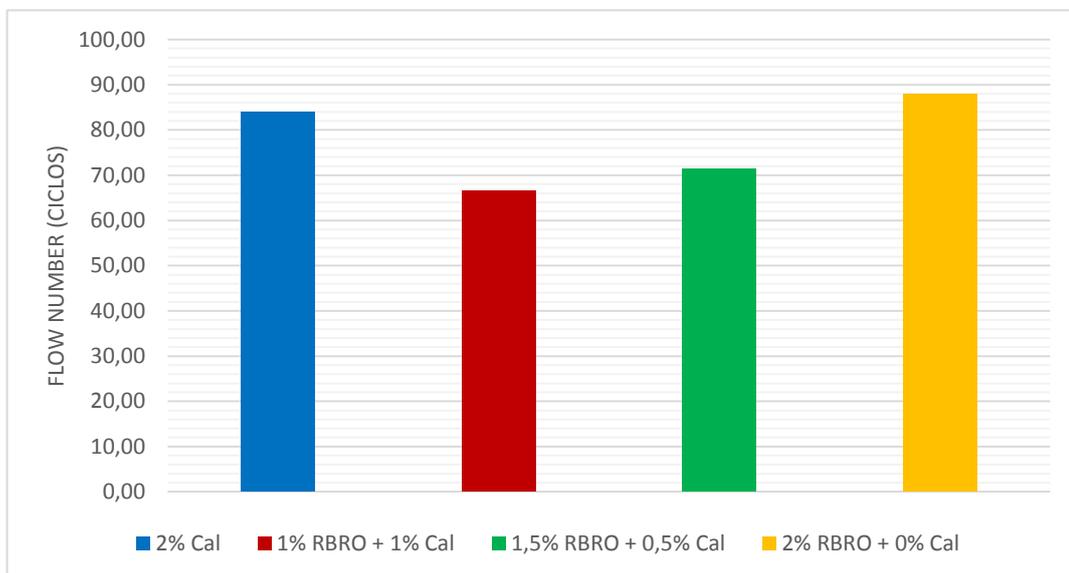
O ensaio uniaxial de carga repetida para determinação dos valores de Flow Number foi realizado de acordo com o item 3.2.2.4, seguindo as especificações da norma ABNT NBR 16505/2016 e DNIT ME 184/2018. Na Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos de FN, sendo a média entre 3 corpos de prova de cada teor analisado.

Tabela 13 - Resultados de Flow Number.

FLOW NUMBER				
Amostra	Referência – 2% Cal	1% RBRO + 1% Cal	1,5% RBRO + 0,5% Cal	2% RBRO + 0% Cal
FN (Ciclos)	84,00	66,50	71,50	88,00

A Figura 19 ilustra em gráfico tais resultados e demonstra um comparativo entre as misturas com adição de RBRO e a mistura com adição de cal.

Figura 19 - Resultados comparativos de Flow Number.



Dentre as misturas estudadas, observa-se que conforme aumentava o teor de RBRO na mistura, igualmente aumenta consideravelmente o desempenho em relação à resistência à deformação permanente. A mistura com 2% de RBRO apresentou o melhor resultado, superando inclusive o desempenho da mistura com cal utilizada como referência. Sabendo que

o esqueleto pétreo é semelhante para todas as misturas estudadas e que este determina a maior parte da resistência à deformação permanente, não é fácil justificar os resultados discrepantes obtidos. Contudo, pode-se justificar que o acréscimo no teor de RBRO e, conseqüentemente, diminuição do teor de cal contribuiu para aumentar a rigidez da mistura asfáltica e, como resultado, aumenta o efeito na deformação permanente.

Para os níveis de tráfego, a NCHRP 09-33 determina critérios de Flow Number expressos em equivalente de carga por eixo padrão (ESLs), representados na Tabela 14. Logo, pode-se observar que todas as misturas alcançaram o critério de FN para serem empregadas em pistas de tráfego médio.

Tabela 14 - Flow Number mínimo para diferentes níveis de tráfego definido pela NCHRP 09-33

Nível de Tráfego (10 <sup>6</sup> ESALs)		FN mínimo (Ciclos)
Leve	< 3	-
Médio	3 a < 10	53
Pesado	10 a < 30	90
Ext. Pesado	> 30	740

Vale ressaltar que apesar de serem realizados sob condições semelhantes, o ensaio de Flow Number, de acordo com a NCHRP 09-33, tem carga de compressão axial utilizada de 600 kPa e a carga de pré-carregamento de compressão utilizada de 30 kPa, três vezes maior que as cargas utilizadas no ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 16505/2016.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio das análises feitas e dos resultados obtidos nesse estudo, pode-se concluir que:

- Os resultados experimentais desta pesquisa cumprem o objetivo de fornecer conhecimento do comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas utilizando resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais como fíler em substituição ao uso convencional da cal hidratada, com relação as características mecânicas das misturas dosadas através do método SUPERPAVE. Entretanto, ao aumentar o teor de RBRO, também aumentou expressivamente a diferença nos valores de MR total e instantâneo com relação a mistura de referência.
- Ao analisar os valores obtidos de MR instantâneo e total, nota-se que a mistura asfáltica com teor de 1% RBRO + 1% cal não apresenta diferenças significativas em comparação à mistura asfáltica com cal, independentemente da adição de RBRO ter reduzido em 50% o teor de cal utilizado na mistura.
- No ensaio de resistência a tração por compressão diametral, pode-se observar que o valor da RT na mistura de referência é maior que a RT das misturas que utilizaram RBRO como fíler, entretanto, os valores não são consideravelmente discrepantes. Além disso, nota-se que a RT não segue um padrão dentre as misturas com teores de RBRO diferentes.
- No ensaio de resistência ao dano por umidade reduzida, de acordo com resultados obtidos, nenhuma das misturas atingiram o critério de RRt mínima, sendo elas consideradas susceptíveis o dano por umidade. Entretanto, dentre as misturas analisadas, a com 1% RBRO + 1% cal apresenta melhor tolerância à ação da água, pois alcançou um percentual próximo ao limite de 70%, assim como a mistura de referência com 2% de cal, sem adição de RBRO.
- No ensaio de Flow Number, dentre as misturas estudadas, observa-se que conforme aumentava o teor de RBRO na mistura, igualmente aumenta consideravelmente o desempenho em relação à resistência à deformação permanente. A mistura com 2% de RBRO apresentou o melhor resultado, superando inclusive o desempenho da mistura com cal utilizada como referência.

- Considerando os ensaios realizados, observa-se através dos resultados obtidos que as misturas com adição de teor de 1% de RBRO possuem mais similaridades com as misturas contendo a cal hidratada. Porém, ao avaliar conjuntamente todas as características mecânicas estudadas, conclui-se que o teor ótimo de RBRO é de 2% tendo em vista que em nos ensaios de MR e RT, os resultados obtidos são similares aos demais teores de RBRO. Contudo, em relação a resistência à deformação permanente, há uma discrepância maior nos valores obtidos e o a mistura com teor de 2% de RBRO se sobressai apresentando melhor desempenho quanto a deformação permanente, superando também a mistura de referência.

- Por fim, é possível afirmar que as misturas asfálticas com adição de RBRO utilizando o método Superpave promoveu resultados satisfatórios para, pois, os valores normativos mínimos foram superados em quase todos os ensaios e, em todos os ensaios, os resultados apresentaram semelhanças ao desempenho da mistura apontada como referência, que continha teor de 2% de cal hidratada como fíler. Embora a adição de RBRO tenha promovido o aumento da rigidez das misturas, todas as misturas analisadas podem ser utilizadas em obras de pavimento, indicando ser viável a utilização dos resíduos como material de enchimento.

## REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 70. **Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)**. Washington, D.C., 2013.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 283 – 89. **Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage**. Washington, D.C., 2014.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 304 – 17. **Standard method of test for uncompacted void content of fine aggregate**. Washington, D.C., 2017.

\_\_\_\_\_. AASHTO M 320. **Standard specification for performancegraded asphalt binder american association of state highway and transportation officials**. Washington, D.C., 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6560. **Materiais betuminosos: determinação do ponto de amolecimento: método do anel e bola**. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 6576. **Materiais betuminosos: determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 11341. **Derivados de petróleo: determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto cleveland**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15086. **Materiais betuminosos - determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 15184. **Materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 16505. **Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Rio de Janeiro, 2016.

AGUIAR, M. L. L. **Utilização de resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

AL-QUADI, I. L.; SAYED, T.; ALNUAIME, N. A.; MASAD, E. **Efficient transportation and pavement systems: Characterization, mechanisms, simulation and modeling**. London: Taylor & Francis Group, 2009.

ALMEIDA, T.F.; LEITE, F.H.G.; HOLANDA, J.N.F. **Caracterização de resíduo de pó de mármore para aplicação em materiais cerâmicos**. In: Primeiro Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

ALYAMAÇ, K. E.; AYDIN, A. B. **Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder**. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015.

ANTUNES, V.F.S. **Influência do Fíler no comportamento de mastiques betuminosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2041. **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures**. USA, 2011

\_\_\_\_\_. ASTM D 2872. **Effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)**. USA, 1997.

\_\_\_\_\_. ASTM D 4123. **Standard method of indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures**. USA, 1982.

\_\_\_\_\_. ASTM D 4791. **Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate**. USA, 2005.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARDINI, V. S. S. **Influência do filer mineral em propriedades de misturas asfálticas densas**. 344 p. Tese (Doutorado em ciências em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BDOUR, A. N.; AL-JUHANI, M. S. **Utilisation of waste marble powder in cement industry**. **International Journal of Environment and Waste Management**. 11:4. 399-409. ISSN 1478-9876, 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

BIAVA, L. R.; STEINER, L. R. **Análise de agregados por meio da determinação do dano por umidade induzida e adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso.** Artigo (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.

BOEIRA, F. D. **Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2011.

BRITO, A.T. **Avaliação e análise paramétrica de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas para pavimentação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CALMON, J.L.; MORATTI, M.; SOUZA, F.L.S.; CENCI, D.S. **Concreto auto-adensável utilizando resíduo de serragem de rochas ornamentais como filler.** In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, Recife. Anais...Recife: Ibracon, 2005. p.V453-466, 2005.

COSTA, L. F. da. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA.** 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

COSTA, D. B. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de Mohr Coulomb.** 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

DANTAS NETO, S. A.; FARIAS, M. M.; PAIS, J. C. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas de graduação descontínua (Gap Graded).** In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. 13., 2006, Anais. Maceió, 2006.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 035/98. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 054/97. **Equivalente areia.** Rio de Janeiro, 1997

\_\_\_\_\_. DNER – ME 081/98. **Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 084/95. **Agregado miúdo: determinação de densidade real.** Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 086/94. **Agregado: determinação de índice de forma.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – EM 367/97 – **Material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro, 1997.

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

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 135/2018. **Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 136/2018. **Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 184/2018. **Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Sumário Mineral 2016.** Disponível em <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2016>>. Acesso em 21 jul. 2018.

ECIVIL. **Significado de Fíler.** ECivil – Descomplicando a Engenharia, 2013. Disponível em: <<https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-filler.html>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

GALETAKIS, M.; SOUTANA, A. **A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine byproducts in the construction sector.** Revista Construction and Building Materials, n. 102, 2016.

GOMES, K. N. A. E. S. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) como fíler na produção de concretos.** 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Programas de Pós-Graduação de Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2008.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do Resíduo do Corte de Granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GOTTARDI, E.V. **O uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como filler em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2015.

GOUVEIA, F.P. **Estudo do efeito da adição de filler gesso nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos asfálticos.** 183p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília. Brasília. 2013.

HANIEH, A. A.; ABDELALL, S.; HASAN, A. **Sustainable development of stone and marble sector in Palestine.** Journal of Cleaner Production, 2014.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS. **IE – 09/2017. Instruções de execução - Camadas de concreto asfáltico usinado morno.** São Paulo, 2017.

KÜTÜK-SERT, T.; KÜTÜK, S. **Physical and marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete.** Journal of materials in civil engineering. Vol. 25, p 266-273, 2013.

LLOPE, W.J. **Activity concentrations and dose rates from decorative granite countertops.** J. Environ. Radioact. 2011.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação - Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 5, 166-181, 2012.

LUCENA, L. C. F. L. **Utilização de resíduos de vidros planos como filler em misturas asfálticas - Propriedades físico-químicas e mecânicas.** 122p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

MATOS, P. **Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados: interação agregado-betume.** 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

MISTURINI, N. **Estudo comparativo de misturas asfálticas produzidas com diferentes fileres.** 55p. Trabalho de Conclusão de Curso (Barachel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

MOURA, W.A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R.S. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso.** Feira de Santana, 2002.

MOURA, J. P. S.; OLIVEIRA, I. S., TEIXEIRA, J. E. S. L. **Efeito da mineralogia de resíduos de rochas ornamentais no desempenho de misturas asfálticas.** In: Anais do 31º Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, pp. 329 – 340, Recife, Pernambuco, Brasil, 29 Outubro – 01 Novembro, 2017.

MOREIRA, J.M.S.; FREIRE, M.N.; HOLENADA, J.N.F. **Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do Espírito Santo em cerâmica vermelha (Utilization of granite sawing waste from Espírito Santo state in red ceramic).** Universidade Federal Norte Fluminense. Rio de Janeiro. 2003.

**NCHRP Project 09-33 “Performance Testing Recommendations,” 132–134.**

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica - Conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos.** 1. Ed. - [Reimpr. ]. - Rio de Janeiro: LTC, 2018.

ROCHA, C. A. A. **Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos.** 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

RODRIGUES, R. F. B. **Desempenho mecânico de betões com incorporação de agregados muito finos provenientes das lamas de corte da indústria do mármore.** Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Lisboa: IST. 2014.

SALES, P. M. **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição de CCBit.** 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTANA, H. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfálticas.** In: Anais da Reunião Anual de Pavimentação – 29º RAPv, v. 01, pp. 575 – 604, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, 23-27 Outubro, 1995.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** 165 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SEPLAN-GO. **Verticalizar a produção, o maior desafio do setor em Goiás.** Revista Economia & Desenvolvimento, Goiânia, n. 23, 2006.

SILVA, G. G. da. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.** 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SILVA, A. F. C. de. **Resíduos de mármore e resíduos de construção e demolição no cimento.** 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Especialização em Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

SILVA, L.T.M.S.; SEVERO, U.A.B.; BEZZERA, U.A. **Utilização de resíduo de granito como substituição parcial do cimento da produção de concreto.** In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC 2015. Fortaleza. 2015.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J.K.G.; NETO, P.N.S.. **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente.** Universidade Federal de Campina Grande. 2005.

TAPAHUASCO, W.F.C.; SILVA, S.O.; PINTO,E.A.; MATOS, S.R.R.. **Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas graníticas como agregado mineral em misturas de concreto asfáltico.** 2012