UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE CASCALHO LATERÍTICO, ASFALTO FRESADO E RESÍDUO DE PÓ DE GRANITO NA PAVIMENTAÇÃO

GUILHERME BARBOSA TEIXEIRA
HIAGO DE BESSA BEZERRA
PEDRO AUGUSTO BARBOSA BORGES

GOIÂNIA
2017

GUILHERME BARBOSA TEIXEIRA
HIAGO DE BESSA BEZERRA
PEDRO AUGUSTO BARBOSA BORGES

UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE CASCALHO LATERÍTICO, ASFALTO FRESADO E RESÍDUO DE PÓ DE GRANITO NA PAVIMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para conclusão da disciplina TCC 2.

Orientadora: Prof. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende

GOIÂNIA
2017

Nome Dos Alunos

GUILHERME BARBOSA TEIXEIRA

HIAGO DE BESSA BEZERRA

PEDRO AUGUSTO BARBOSA BORGES

Título Do Trabalho

A UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE CASCALHO LATERÍTICO, ASFALTO FRESADO E RESÍDUO DE PÓ DE GRANITO NA PAVIMENTAÇÃO

Monografia Apresentada No Trabalho De Conclusão De Curso 2 Do Curso De Graduação Em Engenharia Civil Da Universidade Federal De Goiás

Aprovado Em 29/06/2017

Banca Examinadora:

Lilian R. de Rezende

Profa. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE – UFG

Prof. CARLOS ALBERTO LAURO VARGAS –UFG

Laynara Xavier Barroso

LAYNARA XAVIER BARROSO – UFG

Atesto Que As Revisões Solicitadas Foram Feitas:

Lilian R. de Rezende

Profa. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE – UFG

Em 05/07/2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, o nosso agradecimento a Deus por tudo.

À professora Lílian pelo brio de sua orientação, pela dedicação, pelas críticas e elogios, pelo conhecimento passado e por nos fornecer experiências fundamentais.

Às nossas famílias e nossos amigos que sempre foram presentes e forneceram o apoio necessário.

Ao técnico do Laboratório de Geotecnia da UFG, João Júnior, e ao técnico do Laboratório de Asfálto da UFG, Clayton, pelo auxílio na execução dos ensaios.

À Secretaria Municipal de Obras de Goiânia pela doação do asfalto fresado utilizado nesse trabalho

Ao Milton, funcionário da fazenda Angico, pela ajuda prestada na coleta do cascalho laterítico utilizado nesse trabalho

Em especial, às nossas avós por todo carinho que sempre nos passaram.

RESUMO

A indústria da construção civil gera grande quantidade de resíduos que se acumulam em lixões e aterros. Prover uma destinação adequada a esses materiais descartados é uma necessidade e obrigação da sociedade atual para com as gerações futuras. Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica de se utilizar dois resíduos da engenharia civil como componentes de base e sub-base de pavimento asfáltico. Os resíduos analisados foram o pó de granito resultante do processo de beneficiamento da rocha e o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) gerado na fase de restauração de pavimentos a partir do processo de fresagem. Em um primeiro momento, foi avaliada a possibilidade de se utilizar misturas contendo apenas RAP e pó de granito. No entanto, essas misturas, quando compactadas, não apresentaram uma clara umidade ótima. Então, passou-se a um segundo momento em que foram avaliadas misturas contendo RAP, pó de granito e cascalho laterítico, pois sendo este último um material comumente utilizado para a execução de base e sub-base, buscou-se, assim, uma melhor alternativa para atingir o objetivo da reutilização dos dois resíduos. Com as misturas contendo cascalho, foram definidas as umidades ótimas de compactação através do ensaio de compactação e, por fim, os corpos de prova foram moldados e submetidos ao ensaio triaxial dinâmico para determinação do comportamento mecânico do material sob ação de carga dinâmica. Para interpretação dos resultados em termos de módulo de resiliência, foram realizadas análises numéricas com o programa KENLAYER. Por fim, concluiu-se que a camada de base ou sub-base composta pelos três materiais nas dosagens estudadas é viável tecnicamente em virtude dos valores de módulo de resiliência encontrados.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimento. Aproveitamento de resíduos. Camadas granulares. Resíduo de pó de granito. RAP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pavimento de concreto de cimento Portland 12
Figura 2.2 – Pavimento asfáltico 12
Figura 2.3 – Granulometria – Pavimentos asfálticos 14
Figura 2.4 – Etapas do Capeamento Asfáltico 15
Figura 2.5 – Reciclagem a Frio em Usina 20
Figura 2.6 – Máquinas para Reciclagem Frio *in Situ* 20
Figura 2.7 – Reciclagem Profunda à Frio 21
Figura 2.8 – Principais Estados Exportadores Brasileiros em Volume 24
Figura 3.1 – Rap estocado no pátio da SEMOB 27
Figura 3.2 – Resíduo de granito contaminado com fragmentos de aço 28
Figura 3.3 – Coleta do cascalho 29
Figura 3.4 – Cesta imersa em água ligada à balança 32
Figura 3.5 – Picnômetros em aquecimento..... 33
Figura 3.6 – Ensaio para determinação da densidade máxima..... 34
Figura 3.7 – Aparelho utilizado na extração do betume do RAP 36
Figura 3.8 – Ensaio de granulometria por sedimentação 37
Figura 3.9 – Ensaio de massa específica do resíduo de granito 39
Figura 3.10 – Cascalho após ensaio de granulometria 41
Figura 3.11 – Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga dinâmica 45
Figura 3.12 – Máquina utilizada no ensaio triaxial dinâmico..... 46
Figura 3.13 – Equipamento de compactação para o ensaio triaxial 47
Figura 3.14 – Corpo de prova preparado para o ensaio triaxial..... 48
Figura 4.1 - RAP 50
Figura 4.2– Curva granulomética do RAP 52
Figura 4.3– Granulometria do resíduo de granito – por sedimentação..... 54
Figura 4.4– Curva granulométrica do cascalho..... 57
Figura 4.5– Curva de compactação da mistura 1..... 58
Figura 4.6– Curva de compactação da mistura 2..... 58
Figura 4.7– Curvas de compactação – Misturas de fresado, Cimento e Brita 59
Figura 4.8– Curvas de distribuição granulométrica das misturas 3 e 4 60
Figura 4.9– Curvas de ompactação das misturas 3 e 4 61
Figura 4.10– Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial para a mistura 3..... 64
Figura 4.11 – Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial para a mistura 4..... 65
Figura 4.12 – Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial para o cascalho 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas granulométricas utilizadas para materiais e misturas usadas em camadas de base 16
Tabela 2.2 – Resultados dos ensaios de laboratório obtidos para o cascalho de Inhumas-GO 17
Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios de laboratório obtidos para o cascalho de Goiânia-GO 18
Tabela 3.1 – Composição das Misturas Analisadas 30
Tabela 3.2 – Ensaios laboratoriais e normas 30
Tabela 3.3 – Tabela de massa mínima da norma DNER ME 083/1998 31
Tabela 3.4 – Sequência de tensões da fase de condicionamento 48
Tabela 3.5 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência 49
Tabela 4.1– Distribuição granulométrica do RAP 51
Tabela 4.2– Fração de pedregulho, areia, silte e argila do RAP 52
Tabela 4.3– Características do RAP estudado 53
Tabela 4.4– Distribuição granulométrica do granito com defloculante 53
Tabela 4.5– Distribuição granulométrica do granito sem defloculante 54
Tabela 4.6– Distribuição granulométrica do cascalho 55
Tabela 4.7– Percentual de pedregulho, areia, silte e argila do cascalho 56
Tabela 4.8– Características do cascalho 56
Tabela 4.9– Valores de umidade ótima e peso especifico seco das misturas 3 e 4 60
Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na etapa de prepação dos corpos de prova 62
Tabela 4.11- Resultado do ensaio triaxial do CP 3 - mistura 3 63
Tabela 4.12 - Resultado do ensaio triaxial dos CP'S 4 e 6 da mistura 4 63
Tabela 4.13 - Resultado do ensaio triaxial dos CP'S 7 e 8 do cascalho 64
Tabela 4.14 – Resultados obtidos a partir do ensaio Triaxial 67
Tabela 4.15 – Tensões calculadas no software KenLayer 68

LISTA DE SÍMBOLOS

ε^T	Deformação axial específica recuperável
ρ	Massa específica da água à temperatura de ensaio
σ^T	Tensão de tração
σ	Tensão de tração uniforme na direção-x (positiva)
%	Porcentagem
%pas	Porcentagem passante
%ret	Porcentagem retida
cm	Centímetro
cm/minuto	Centímetro por minuto
cm^3	Centímetros cúbicos
D	Diâmetro
D	Massa do picnômetro mais material betuminoso e água
g	Grama
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
h	Altura
H	Hora
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
kN/m	Quilo Newton por metro
kN/m^2	Quilo Newton por metro quadrado
kN/m^3	Quilo Newton por metro cúbico
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
Ms	Massa seca
N	Newton
nº	Número
ºC	Grau Celsius
Pa.s	Pascal segundo
rpm	Rotações por minuto

s	Segundo
T	Teor de asfalto
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO **09**
2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **11**
2.1 MATERIAIS CONVENCIONAIS UTILIZADOS NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS **11**
2.1.1 Revestimento **11**
2.1.2 Sub-Base e Base **15**
2.2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS **18**
2.2.1 Reciclagem à frio em usina **19**
2.2.2 Reciclagem à frio in situ **20**
2.2.3 Reciclagem profunda à frio (FDR) **20**
2.3 USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO **21**
2.3.1 RAP **22**
2.3.1.1 Betume 23
2.3.1.2 Granulometria 23
2.3.2 Resíduo de granito **23**
3 CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS **26**
3.1 MATERIAIS **26**
3.1.1 RAP **26**
3.1.2 Resíduo de granito **27**
3.1.3 Cascalho **28**
3.1.4 Misturas analisadas **29**
3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS **30**
3.2.1 Ensaios realizados com o RAP **30**
3.2.1.1 Granulometria **30**
3.2.1.2 Massa específica dos agregados graúdos **31**
3.2.1.3 Densidade real dos agregados miúdos **32**
3.2.1.4 Máxima massa específica **34**
3.2.1.5 Teor de asfalto **35**
3.2.2 Ensaios realizados com resíduos de granito **36**
3.2.2.1 Granulometria **36**
3.2.2.2 Massa específica **39**
3.2.3 Ensaios realizados com cascalho **40**
3.2.4 Ensaios realizados com as misturas **43**
3.2.4.1 Compactação **43**
3.2.4.2 Granulometria **45**
3.2.4.3 Traxial dinâmico **45**
4 CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS **50**
4.1 RAP **50**
4.2 RESÍDUO DE GRANITO **53**
4.3 CASCALHO **55**
4.4 MISTURAS SEM CASCALHO **57**
4.5 MISTURAS COM CASCALHO **59**
5 CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS **69**
5.1 CONCLUSÕES **69**
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **69**
REFERÊNCIAS **70**

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Atualmente, segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2016), existe um total de 1.720.756 km de rodovias no Brasil, sendo 211.468 km pavimentados - o que representa 12,3% do total, enquanto as não pavimentadas são 78,6% e as rodovias apenas planejadas são 9,1%. Observa-se, portanto, uma lacuna a se preencher, sendo que a construção, a pavimentação e a conservação de rodovias são necessidades urgentes.

O aumento populacional e da demanda de consumo estimulam a atividade industrial que gera uma grande quantidade de resíduos. Dentre as atividades geradoras de resíduos, a construção civil se destaca como a maior geradora (GAEDE, 2008). Visando a proteção ao meio ambiente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou a Resolução 307 a fim de regulamentar a gestão dos resíduos provenientes da construção civil. Os resíduos de demolição de estradas estão também sob regulamentação: “Considerando que os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas (...).” (CONAMA, 2002, p.1).

Durante a vida útil de um pavimento, a camada asfáltica superficial se deteriora sob a ação do tráfego e das intempéries. Para manter a qualidade do pavimento, manutenções devem ser feitas periodicamente. Dessa forma, o processo de fresagem de parte ou totalidade da camada asfáltica é etapa comum nos métodos de revitalização de pavimentos. A fresagem seguida de recapeamento restaura a superfície, evitando o levantamento do greide da pista que acarreta em problemas de drenagem. Como resultado, grande quantidade de material fresado é gerada e necessita de destinação.

O resíduo de fresagem da camada asfáltica, que a partir de agora será tratado por *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), pode ser reciclado e aplicado novamente ao pavimento. Nesse processo, o material fresado é misturado a uma nova mistura de ligante asfáltico e agregados virgens e reaplicado à camada asfáltica. Todavia, o percentual de RAP utilizado é limitado entre 30 e 50% (CALTRANS, 2006) a fim de garantir resistência mecânica da camada asfáltica. Portanto, a maior parte do material fresado não é reutilizada. Diante do cenário de aumento dos depósitos de RAP, encontrar uma destinação adequada ao material torna-se necessária.

Os Estados Unidos possuem ampla experiência na reutilização do RAP. Das 41 milhões de toneladas produzidas anualmente, cerca de 80% são reciclados (HOLTZ; EIGHMY, 2000). A maioria do resíduo é utilizada na capa asfáltica do processo de recapeamento e outra porção é usada como componente das camadas granulares. Pesquisa divulgada pela *Federal Highway Administration* (FHWA) mostrou que os estados americanos que utilizaram o material como componente de base ou sub-base tiveram resultados satisfatórios, bons ou excelentes. No Brasil, a reciclagem do pavimento ainda não é tão expressiva, mas vem ocorrendo desde a década de 80 (ARAÚJO, 2004).

O outro resíduo que será avaliado neste estudo é o pó de granito que é resultado do corte de peças de granito. Nesse processo, cerca de 25% do granito é transformado em pó (REIS; ALVAREZ, 2007). O Brasil está entre os cinco maiores produtores de rocha ornamental do mundo. Em 2015, foram exportados 1,17 milhões de toneladas de rochas processadas de granito e rochas similares como quartzito e pedra sabão (ABIROCHAS, 2015). Considerando a taxa de geração de pó advinda do corte, são aproximadamente 300 mil toneladas de resíduos gerados por ano, proveniente em sua maioria do beneficiamento do granito, que precisa ter destinação apropriada. Há, atualmente, algumas empresas de beneficiamento que aproveitam o resíduo, mas sua maior parte ainda é destinada a aterros.

A preocupação com os métodos construtivos utilizados e a minimização dos impactos ambientais tem suma importância no cenário atual. É nesse sentido que este trabalho foi desenvolvido. O objetivo foi avaliar a viabilidade técnica de execução de pavimentos com a utilização de misturas de RAP, pó de granito e cascalho laterítico para a confecção de bases e sub-bases. A utilização do resíduo de granito e RAP nas camadas de base e sub-base do pavimento não apenas evita a exploração das jazidas naturais de solos e agregados, mas entra em acordo com a resolução 307 do CONAMA que tem intensificado a exigência em relação à correta destinação dos resíduos de obras. Todavia, é necessário garantir a qualidade do pavimento ao usuário. Dessa maneira, este estudo foi baseado na bibliografia já existente, mas também em ensaios laboratoriais para análise do comportamento mecânico dos materiais alternativos, RAP e resíduo de granito, a serem empregados nas camadas estruturais do pavimento asfáltico. Estudar, analisar e, se possível, empreender novos materiais e métodos para garantir o desempenho adequado de pavimentos é, portanto, um trabalho cujos resultados terão consequências relevantes ao presente e ao futuro do setor de transporte nacional.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo que se segue trata da caracterização dos pavimentos tradicionalmente executados no Brasil, explicando sobre o comportamento mecânico, detalhes de execução e insumos utilizados. Além disso, são discutidas as diversas formas de reciclagem de pavimentos, assim como o uso de resíduos na pavimentação com ênfase no RAP e no pó de granito, apresentando o embasamento teórico necessário à compreensão da pesquisa desenvolvida.

2.1 MATERIAIS CONVENCIONAIS UTILIZADOS NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Essa seção trata dos materiais utilizados comumente na pavimentação brasileira. Além disso é feito uma analise do comportamento mecânico e características peculiares a cada tipo de pavimento.

2.1.1 Revestimento

Em um primeiro momento, tendo em vista o desenvolvimento de materiais e técnicas de pavimentação, faz-se necessário o estudo dos materiais convencionais já utilizados. Nesse ponto, há que se mencionar a divisão utilizada das estruturas de pavimento, tendo em vista as tensões e os deslocamentos, bem como sua espessura e as características para a escolha dos materiais.

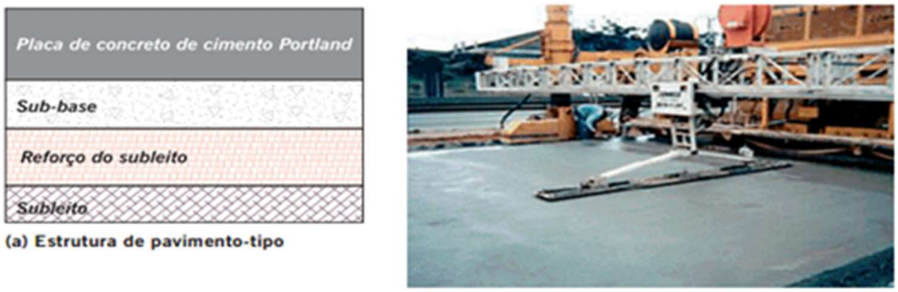
O revestimento, também chamado de capa, é a camada superficial que recebe diretamente contato pneumático com os veículos. É, portanto, responsável pela transferência dos esforços horizontais e verticais para as demais camadas. Além disso, é a faixa mais cara do pavimento e que deve ser a mais impermeável possível (SENÇO, 2001). A classificação dos revestimentos se dá quanto à rigidez, sendo estruturas rígidas ou flexíveis.

Tal distinção se dá porque, no caso do pavimento de concreto de cimento de Portland, a rigidez do revestimento é alta, ao passo que se distribuem as cargas de superfície e, consequentemente, alivia as tensões das demais camadas. Já no caso do pavimento asfáltico, a rigidez não é tão elevada quanto neste último, de forma que as cargas de superfície se concentrem em uma área e que as tensões se espalhem entre as demais camadas (BERNUCCI *et al.*, 2008). Apesar dessa classificação, nada impede que se possam aplicar camadas rígidas e flexíveis conjuntamente numa mesma rodovia, trabalhando uma sobre a outra. Por exemplo, as Vias Anhanguera e Anchieta, localizadas no estado de São

Paulo, possuem placas de concreto de cimento, revestimento rígido, executadas sobre concreto asfáltico, revestimento flexível.

O revestimento constituído de concreto de cimento de Portland tem suas camadas e execução representadas na Figura 2.1. Pavimentos rígidos são pouco deformáveis e rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações (SENÇO, 2001).

Figura 2.1 - Pavimento de concreto de cimento Portland (BERNUCCI *et al*., 2008)

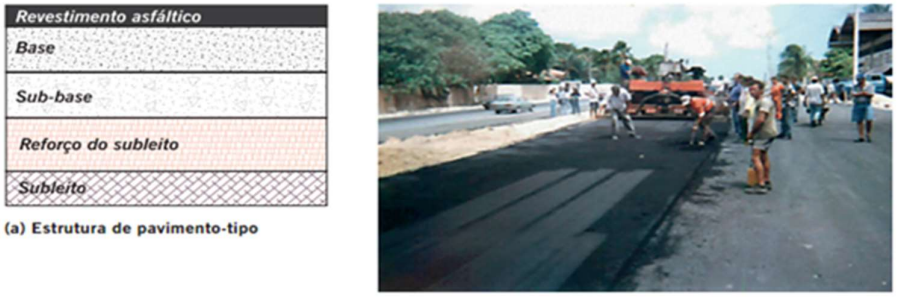


(a) Estrutura de pavimento-tipo

(b) Revestimento em concreto de cimento Portland sendo executado

As estruturas flexíveis, por sua vez, dizem respeito aos pavimentos asfálticos, tendo suas camadas representadas na Figura 2.2. É a mais utilizada no Brasil, onde aproximadamente 95% das rodovias são executadas com revestimento flexível (BERNUCCI *et al*., 2008). É definido pelo Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), como “aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas” (DNIT, 2006, p. 95).

Figura 2.2 - Pavimento asfáltico (BERNUCCI *et al*., 2008)



(a) Estrutura de pavimento-tipo

O revestimento flexível pode ser classificado em revestimento a quente ou a frio. Essa diferenciação se dá pelo tipo de ligante utilizado. As misturas feitas a frio são compostas por

Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) em que o agregado é aplicado à temperatura ambiente, ou seja, sem aquecimento prévio. É um produto mais econômico, porém de menor resistência. Já as misturas a quente são compostas pela incorporação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é realizado o aquecimento prévio do agregado para que se possa obter um produto mais nobre do que a mistura a frio. Como neste trabalho será analisado o asfalto fresado, resultado de mistura a quente, serão destacados os materiais que são comumente utilizados na confecção do concreto asfáltico a quente, e ainda o modo de execução da massa e como é realizada a aplicação na obra.

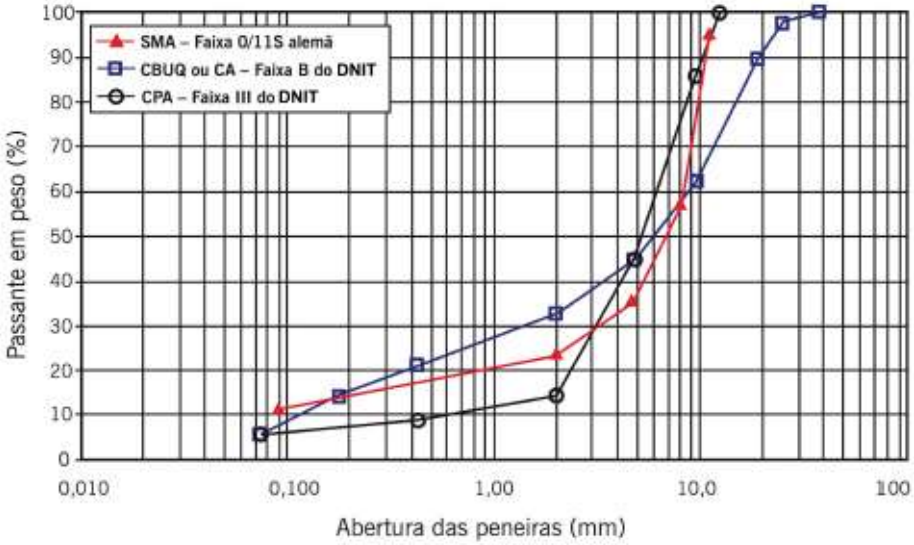
O tipo mais comum é o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) que trata de um produto da mistura de agregados de tamanhos variados e cimento asfáltico, sendo ambos aquecidos em temperaturas determinadas em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. Utiliza ligantes convencionais ou alternativos, como o Asfalto Modificado por Polímeros (AMP) ou o asfalto duro, compondo misturas asfálticas de módulo elevado (EME). O CBUQ é geralmente utilizado com apenas uma única camada de revestimento (BALBO, 2010).

Outro tipo é o *Stone Matrix Asphalt* (SMA) que é uma mistura densa e descontínua que possui uma grande proporção de agregados graúdos. É também composto por fíler, areia, ligante e fibras. Sua composição assegura à mistura uma boa estabilidade a temperaturas elevadas, resistência ao desgaste, boa adesividade entre os agregados e ligantes, resistência à derrapagem e redução do ruído, sendo, portanto, ideal para utilização em rodovias com alto volume de tráfego de caminhões, rampas, pontes, paradas de ônibus, e pistas de pouso (BERNUCCI *et al.*, 2008). O SMA é uma mistura com elevado teor de ligante asfáltico, o que resulta em custo de 20 a 40% maior que o CBUQ. Também possui uma produtividade inferior, pela dificuldade de incorporação do fíler à mistura.

O terceiro tipo mais usado é a Camada Porosa de Atrito (CPA) que possui granulometria aberta possibilitando uma maior percolação da água no seu interior, obtendo também uma boa aderência entre o pneu e o revestimento. Dessa forma, é um pavimento com menor risco de aquaplanagem, baixo ruído e lâmina d'água reduzida, proporcionando um maior conforto e segurança nos dias chuvosos (BERNUCCI *et al.*, 2008). Por possuir uma granulometria aberta, o CPA deve ser executado sobre uma camada de revestimento impermeável para evitar a entrada de água na estrutura do pavimento, o que aumenta os custos de execução. Outra desvantagem é que após certo tempo de utilização, os vazios do CPA podem ser preenchidos por impurezas, trazidas pelo vento e pela água que podem ir reduzindo a permeabilidade com a qual é planejada.

Os revestimentos que são normalmente usados como recapeamento são o concreto asfáltico e o SMA (BERNUCCI *et al.*, 2008). Tanto o CPA quanto o SMA, diferentemente do CBUQ que é camada única, são aplicados sobre outra camada pré-existentes. Outra diferença diz repeito à já citada granulometria. A Figura 2.3 apresenta a distribuição granulométrica de uma mistura CBUQ, enquadrada na Faixa B do DNIT (DNIT, 2006) e sua comparação com a CPA e o SMA.

Figura 2.3 – Granulometria – Pavimentos asfáltico (BERNUCCI *et* al., 2008)



A sequência de atividades básicas envolvidas na produção de misturas asfálticas a quente são: a estocagem e manuseio dos materiais componentes das misturas asfálticas na área da usina; proporcionamento e alimentação do agregado frio no secador; secagem e aquecimento eficiente do agregado à temperatura apropriada; controle e coleta de pó no secador; proporcionamento, alimentação e mistura do ligante asfáltico com o agregado aquecido; estocagem, distribuição, pesagem e manuseio das misturas asfálticas produzidas.

Já as etapas de serviço do capeamento asfáltico são: 1) O capeamento asfáltico é aplicado após a execução da base e sub-base. O piso deve estar regularizado e compactado. Utiliza-se brita graduada simples cujo diâmetro não excede 38 mm, e que tem entre 3% e 9% de finos. O transporte é feito através de caminhões basculantes e a distribuição do material na pista por vibroacabadora ou motoniveladora; 2) É feita a compactação da base através de rolos compactadores estáticos ou vibratórios. A compactação deve ser feita imediatamente após o espalhamento para evitar que a brita perca umidade; 3) É feita a imprimação da base de modo a garantir uma maior impermeabilidade e aderência entre o revestimento e a base.

Então, a mistura asfáltica é lançada de maneira uniforme; 4) Por último é feita a compactação do asfalto. Primeiro, é feito uma rolagem para atingir a densidade e impermeabilidade desejada, depois há de se fazer uma rolagem de acabamento em que são corrigidos pequenos erros da primeira rolagem. A Figura 2.4 ilustra o procedimento.

Figura 2.4 – Etapas do Capeamento Asfáltico (ilustração de Daniel Beneventti, NAKAMURA, 2016)

2.1.2 Sub-Base e Base

No que tange os materiais de base e sub-base, são utilizadas etapas de seleção e caracterização, no sentido de analisar as características de natureza dos materiais disponíveis, que devem ser resistentes, pouco deformáveis e permeáveis na medida de sua função, para, assim, serem utilizados nos pavimentos asfálticos.

Classificam-se em materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e em materiais asfálticos. Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão (a não ser aparente pela sucção) e que não resistem à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem à compressão, principalmente, e também à tração de pequena magnitude, graças à coesão dada pela fração fina. Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência à compressão e à tração. Há ainda misturas asfálticas e solo-asfalto que se destinam à camada de base e que poderiam ser classificadas como coesivas. Nesse caso, a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos, e por isso são enquadrados em classe diferente dos solos e dos materiais cimentados. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A título de exemplos, tem-se como materiais granulares e solos: brita graduada simples (BGS); macadame hidráulico e macadame a seco; solo-agregado, solo-natural e solo-melhorado com cimento ou cal; e a mistura asfáltica fresada. Dentre os materiais estabilizados quimicamente ou cimentados tem-se a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC); solo-cimento, solo-cal, e solo-cal-cimento; e o Concreto Compactado com Rolo (CCR). Os materiais asfálticos compreendem os solos-asfalto e emulsão; o macadame betuminoso; e a base asfáltica de módulo elevado.

Um dos insumos utilizados nesse trabalho é o cascalho laterítico. A decisão por se utilizar tal material se deu por quatro razões:

- Proximidade da jazida e grande disponibilidade de material;
- O material já foi utilizado como base de pavimento ;
- Existência de estudo já existente (ROCHA, 2016);
- Necessidade de se utilizar um material coesivo em conjunto com os resíduos estudados

O cascalho laterítico, também denominado pedregulho ou concreções lateríticas, é formado pelo processo de intemperismo. Sendo assim, mesmo imerso em água, as concreções lateríticas se mantém. Este material caracteriza-se pela presença abundante de óxido de ferro e alumínio, sendo reconhecido pela grande quantidade dos grãos que ficam retidos ao ser peneirado em uma peneira de abertura de 2,00 mm.

A Tabela 2.1, de acordo com a norma ES 098 (DNIT, 2007), representa as faixas granulométricas recomendadas quando a porcentagem de solo laterítico, passado na peneira no 200, não ultrapassa 2/3 do material quando na peneira 40:

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas utilizadas para materiais e misturas usadas em camadas de base (DNIT, 2006)

peneiras	abertura (mm)	Faixas Granulométricas A	Faixas Granulométricas B	Tolerâncias da faixa de projeto
		% em peso passando		
2"	50,8	100	-	-
1"	25,4	100-75	100	-
3/8"	9,5	85-40	95-60	-
Nº 4	4,8	75-20	85-30	-
Nº 10	2,09	60-15	60-15	+-7
Nº 40	0,42	45-10	45-10	+-5
Nº 200	0,075	30-5	30-5	+-2

Apesar dos bons parâmetros laboratoriais no que tange seu uso para executar camadas de bases de rodovias, o uso do cascalho laterítico encontra-se limitado à sua escassez próxima às obras e a sua localização em áreas protegidas pela legislação ambiental (ROCHA, 2016).

Batalione (2007) executou um trecho experimental de pavimentação no município de Inhumas-GO, localizado no Residencial Santa Bárbara nas ruas Maria de Morais e Pedro Teodoro, no qual foi utilizado cascalho de uma jazida localizada a 25 km do trecho. Os resultados de ensaios laboratoriais deste cascalho constam na seguinte Tabela 2.2. Já Araújo (2004), para construção de um trecho experimental no município de Goiânia, usou cascalho de uma pequena jazida localizada a 500 metros do trecho e estudou esta amostra em laboratório, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.3. Tais tabelas são aqui apresentadas apenas para exemplificar os cascalhos utilizados na região próxima a Goiânia.

Tabela 2.2 - Resultados dos ensaios de laboratório obtidos para o cascalho de Inhumas-GO (BATALIONE, 2007)

Parâmetros	Caracterização	Compactação	
		Proctor Intermediário	Proctor Modificado
Pedregulho (%)	36,1	-	-
Areia (%)	32	-	-
Silte (%)	12,6	-	-
Argila (%)	19,3	-	-
w_L (%)	33,3	-	-
w_P (%)	20,8	-	-
IP (%)	12,5	-	-
ρ (g/cm^3)	2,686	-	-
Classificação TRB	A-2-6	-	-
Classificação SUCS	GM	-	-
w_{ot} (%)	-	14,4	12,7
γ_{dmax} (KN/m^3)	-	19,8	19,6
Expansão (%)	-	0,1	0
CBR (%)	-	33	51

Obs.: w_{ot} = umidade ótima de compatação, γdmax = peso específico máximo seco, CBR = *California Bearing Ratio*, w_L = Limite de liquidez, w_p = Limite de plasticidade, IP = Índice de plasticidade, TRB = Transportation Research Board, SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos, ρ = Massa específica dos grãos.

Tabela 2.3. Resultados dos ensaios de laboratório obtidos para o cascalho de Goiânia-GO (ARAÚJO, 2008)

Parâmetros	Caracterização	Compactação	
		Proctor Intermediário	Proctor Modificado
Pedregulho (%)	68,33	-	-
Areia (%)	27,17	-	-
Silte (%)	3,5	-	-
Argila (%)	1	-	-
w_L (%)	38,1	-	-
w_p (%)	3,7	-	-
IP (%)	6,4	-	-
ρ (g/cm^3)	2,968	-	-
Classificação TRB	A-1-a	-	-
Classificação SUCS	GP	-	-
w_{ot} (%)	-	9,8	10,5
γ_{dmax} (KN/m^3)	-	19,8	19,6
Expansão (%)	-	0,01	0,01
CBR (%)	-	49	62

Obs.: w_{ot} = umidade ótima de compatação, γdmax = peso específico máximo seco, CBR = *California Bearing Ratio*, w_L = Limite de liquidez, w_p = Limite de plasticidade, IP = Índice de plasticidade, TRB = Transportation Research Board, SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos, ρ = Massa específica dos grãos.

2.2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A reciclagem do revestimento asfáltico pode ter duas finalidades distintas: aplicação como novo concreto asfáltico ou aplicação como material granular de base ou sub-base. A aplicação como componente da camada asfáltica pode se dar com utilização de usina fixa ou através de máquinas recicladoras móveis, conforme mostrado a seguir:

a) Reciclagem a quente em usina: a reciclagem a quente visa a reciclagem de RAP para utilização como concreto asfáltico. No processo, parte ou totalidade da camada asfáltica é fresada e o material coletado é levado à usina de mistura à quente. Na usina, o RAP é misturado a novos agregados e ao betume aquecido. O processo ocorre de forma similar à produção de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ).

b) Reciclagem a quente *in situ*: o objetivo desse tipo de reciclagem é o mesmo da reciclagem a quente em usina, porém a atividade ocorre toda *in loco*. O processo consiste no aquecimento do pavimento através da emissão de raios infravermelhos, seguido de escarificação de parte ou totalidade da camada asfáltica. O material é então misturado a novos agregados e betume aquecido e, por fim, aplicado sem a necessidade de se destinar a uma usina de mistura.

Já a reciclagem do revestimento asfáltico para aplicação como camada granular é o objeto de estudo deste trabalho e, portanto, será dada mais ênfase à sua caracterização. Nesse caso, não é necessário realizar o aquecimento do material, sendo denominada reciclagem a frio. Seu processamento pode se dar *in situ* ou em usina assim como a reciclagem a quente. O RAP pode ser aplicado puro ou pode ser feita adição de agregados virgens na composição da camada. A FHWA recomenda utilização de no máximo 30% de RAP para garantir boa performance mecânica da camada reciclada. Ainda de acordo com o órgão americano, pesquisas feitas com material reciclado obtiveram resultados de *California Bearing Ratio* (CBR) bem acima do requerido para base e sub-base de pavimento, comprovando a eficácia da reciclagem a frio. Quanto à adição de aditivos na mistura, como asfalto espumado, emulsão asfáltica ou cimento, a necessidade de incorporação dependerá do projeto, não sendo, portanto, um item obrigatório. Outra característica da reciclagem do pavimento para uso como camada granular é a possibilidade de se utilizar não apenas a camada de concreto asfáltico, mas também parte da camada de base. O método de reciclagem no qual se faz esse aproveitamento é denominado *Full Depth Reclamation* (FDR). Após a reciclagem a frio, é recomendável a execução de uma camada superficial de concreto asfáltico para proteção da camada reciclada (CALTRANS, 2006). A seguir são descritos os três métodos comuns para aproveitamento do RAP como material granular.

2.2.1 Reciclagem à frio em usina

A reciclagem a frio em usina se inicia com a fresagem da camada de concreto asfáltico. O material é então encaminhado para a usina de processamento onde o material é reciclado e então transportado de volta para o local de aplicação onde é distribuído, nivelado e compactado. O processo de reciclagem em usina não é o mais econômico dentre os três processos de reciclagem a frio em virtude do gasto com transporte de material, porém se torna uma boa opção em alguns casos (WIRTGEN, 2012), tais como:

- Quando o projeto prevê execução de camadas inferiores à camada reciclada;
- No caso de utilização de RAP estocado proveniente de outras obras;
- O material do pavimento for altamente variável e requerer processo de seleção;
- O material for muito duro e não permitir pulverização.

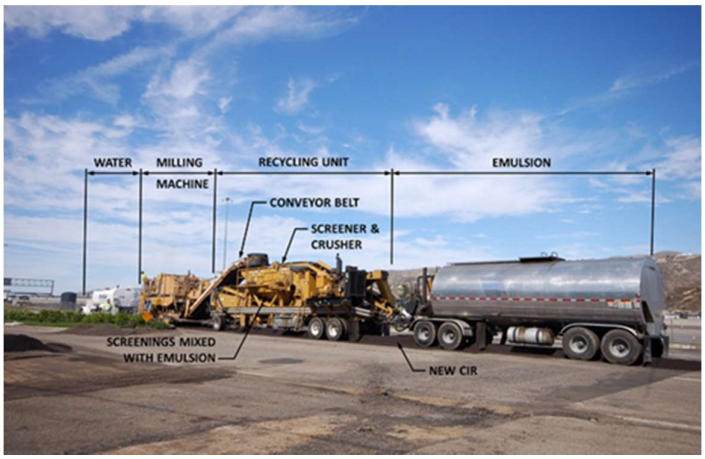
Apesar de não ser a melhor opção do ponto de vista econômico, a reciclagem a frio em usina permite elaboração de misturas mais elaboradas com maior controle na composição. A Figura 2.5 ilustra uma usina de reciclagem a frio.

Figura 2.5 - Reciclagem a Frio em Usina (WIRTGEN, 2012)

2.2.2 Reciclagem à frio in situ

A reciclagem a frio *in situ* permite tanto uma execução mais rápida quanto mais econômica em comparação ao processo em usina em virtude da exclusão ou redução significativa da necessidade de transporte de material. A reciclagem *in situ* é processada por um conjunto de máquinas que trabalham em sequência, formando um "trem de reciclagem", conforme ilustrado na Figura 2.6. A sequência de execução da camada reciclada *in situ* se inicia com o material sendo fresado e na sequência ele é pulverizado, adicionado de água (e aditivos, caso especificado em projeto), misturado, aplicado no local fresado, compactado por rolo compactador, nivelado por motoniveladora e por fim, compactado por rolos vibratórios e pneumáticos enquanto recebe a aplicação de água (WIRTGEN, 2012).

Figura 2.6 - Máquinas para Reciclagem Frio *in Situ* (LA COUNTY, 2003)



2.2.3 Reciclagem profunda à frio (FDR)

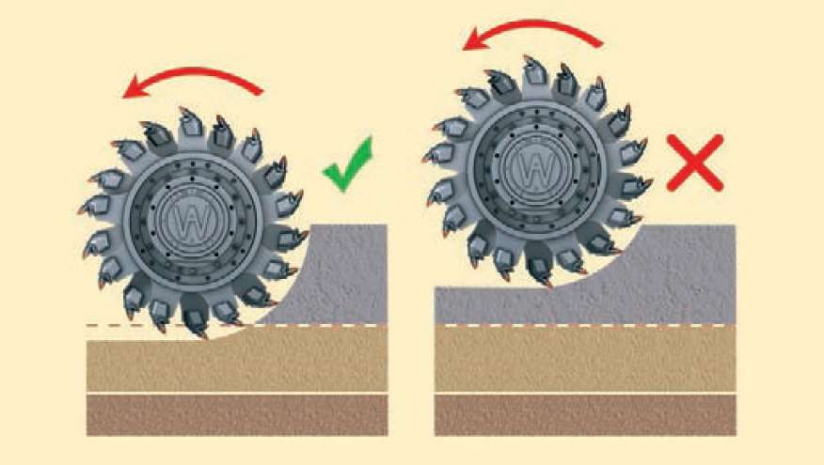
A reciclagem profunda a frio se caracteriza pela reciclagem de toda a camada asfáltica juntamente com parte da camada granular. Os dois materiais são misturados em

um processo que ocorre por completo *in situ*. O resultado é um pavimento altamente resistente à patologia de trinca por reflexão que é comum em pavimentos tratados por simples recapeamento (NIELSEN *et al.*, 2007). Kearney e Huffman (1999) afirmam que a reciclagem tipo FDR é a opção mais eficaz no tratamento de pavimentos com grande deformação plástica.

Ao contrário dos dois processos de reciclagem tratados anteriormente, a reciclagem profunda reconstrói não apenas a capa asfáltica, mas também parte da camada de base ou sub-base, conforme ilustrado na Figura 2.7. Portanto, a reciclagem FDR é capaz de corrigir também possíveis patologias das camadas granulares, como a deformação excessiva.

De acordo com Nielsen *et al.* (2007), a reciclagem FDR é a melhor alternativa de reabilitação do pavimento asfáltico que requeira melhora estrutural, correção da geometria ou melhora das camadas granulares.

Figura 2.7 - Reciclagem Profunda à Frio (WIRTGEN, 2012)



2.3 USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO

O desenvolvimento sustentável é algo que vem sendo discutido e analisado em todo o mundo, em vista do custo elevado dos recursos naturais e da degradação rápida dos mesmos. Com base nisso, estabelecer algum fim para alguns materiais que com o tempo acabam se tornando refugo, pode ajudar. Um exemplo disso é o uso de resíduos na pavimentação. Alguns estudos já foram e continuam sendo feitos para analisar a viabilidade do uso de resíduos industriais na estrutura de um pavimento, sejam estes usados no reforço do subleito, sub-base, base ou no próprio revestimento asfáltico. Como exemplo de resíduos que já foram testados ou até mesmo usados para este fim tem-se:

- Resíduo de Construção e Demolição (RCD);
- Escória de aciaria;
- Areia de fundição;
- Cinza de bagaço de cana;
- Cinza de casca de arroz;
- Cinza pesada de termelétrica;
- Lodo de estação de tratamento de esgoto;
- Borracha de pneus;
- Fosfogesso;
- etc.

Como neste trabalho será analisada a viabilidade técnica do uso do RAP juntamente com pó de granito nas camadas base e sub-base de pavimentos, na revisão serão apresentadas informações sobre esses dois tipos de resíduos.

2.3.1 RAP

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) é o resíduo mais utilizado na pavimentação. Entre as razões para sua vasta utilização podemos citar:

- Grande quantidade de material disponível em virtude do processo de manutenção e revitalização das rodovias e ruas pavimentadas com asfalto;
- Facilidade e economia gerada pelas maquinas recicladoras que permitem todo o processo de reciclagem *in situ;*
- Boa resposta mecânica da camada reciclada desde que bem dimensionada;
- Necessidade de se destinar o resíduo de maneira sustentável.

Assim como qualquer material a ser aplicado na engenharia civil, a caracterização física, química e mecânica do mesmo é essencial. No caso do RAP, por se tratar de um resíduo, a caracterização em laboratório recebe ainda mais importância. O material fresado tem suas características influenciadas por vários fatores como: composição e idade do pavimento fresado, máquina utilizada na fresagem, velocidade de fresagem. O manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012) destaca como principais características a serem analisadas: atividade do betume e granulometria, conforme apresentado a seguir.

2.3.1.1 Betume

A condição do betume presente no RAP permite sua classificação como “ativo” ou “inativo”. A caracterização pode ser feita visualmente através da análise tátil-visual ou através de ensaios laboratoriais. O material ativo apresenta aspecto pegajoso e coloração mais escura. O RAP “ativo” apresenta quantidade significante de betume em fase de oxidação pouco acentuada. O RAP “inativo”, em contrapartida, tem os agregados revestidos de ligante de betume com alto grau de oxidação, o que resulta em um material cinzento com pouca ou nenhuma adesividade. É importante definir bem se o RAP é “ativo” ou “inativo”, uma vez que o estado do ligante de betume é determinante para o comportamento do resíduo reciclado quando reutilizado. Um volume de 30% de brita deve ser misturado ao RAP ativo (WIRTGEN, 2012). O material ativo não apresenta boa compactação sob os rolos compressores, mas deforma com o tráfego.

2.3.1.2 Granulometria

As camadas granulares possuem a resistência mecânica baseada na interação entre as partículas do material. Quanto melhor o contato entre as partículas, melhor será a transferência de carga e, consequentemente, o deslizamento ou rearranjamento das partículas é reduzido. Como consequência, ocorre a redução da deformação permanente da camada sob ação do tráfego.

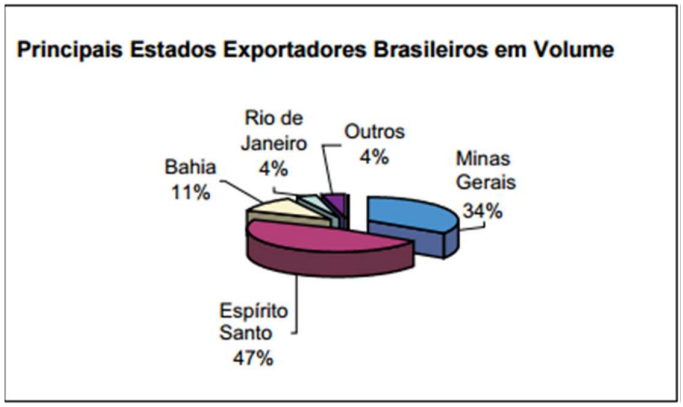
A forma e a distribuição granulométrica de resíduos dependem do seu processo de formação. No caso do RAP, o tamanho das partículas depende do espaçamento dos “dentes” da máquina de fresagem, sendo diretamente proporcionais. Espaçamento maior resulta em material maior. Da mesma forma, fresagem rápida também gera grãos maiores (FHWA, 1997).

A granulometria do RAP é função também da composição da camada asfáltica de onde teve origem e o processo de fresagem pode não ser suficiente para garantir um material bem distribuído. Nesses casos, a britagem e o peneiramento feito em usinas de reciclagem podem ser uma alternativa. Há ainda a possibilidade de se incorporar agregados virgens ao RAP para compor determinadas faixas granulométricas não presentes.

2.3.2 Resíduo de granito

O Brasil tem papel de destaque na produção mundial de granitos e mármores, produzindo em 2001 3,1 milhões de toneladas, o que representa 4,8% da produção mundial dessas rochas (BNDES, 2003). O Espírito Santo é o estado de maior capacidade graças às suas unidades de beneficiamento que têm alta produtividade. O gráfico apresentado na Figura 2.9 mostra a produção por estado.

Figura 2.8 - Principais Estados Exportadores Brasileiros em Volume (BNDES, 2003)



O processo de beneficiamento do granito gera resíduos em quatro diferentes etapas (GONÇALVES, 2000). Inicialmente, a rocha deve ser extraída das pedreiras e esse processo gera o chamado resíduo de lavra que são pequenos pedaços de rocha que não são aproveitados. Posteriormente, os grandes blocos extraídos precisam ser cortados em um tamanho padrão (3,0x2,0x1,5)m para que possam ser serrados. Nessa etapa, mais resíduo na forma pequenas pedras é gerado. Na terceira etapa, os blocos são serrados em chapas através de equipamentos chamados teares. Existem dois tipos principais de teares para a realização do corte: de fios diamantados e de lâminas metálicas. Desta maneira, o pó de granito resultante de cada um dos teares acaba sendo diferente um do outro. Enquanto no de fio diamantado gera um pó com maior pureza de granito, o resultante do corte com lâminas metálicas acaba saindo contaminado com pequenas frações de metal juntas ao pó.

O corte requer a utilização de uma poupa abrasiva composta de água, cal e granalha. Essa polpa se junta ao pó resultante da ação da lâmina sobre a rocha e produz o Resíduo do Corte de Granito (RCG). Por fim, as chapas são polidas e é gerado o resíduo de polimento. Na etapa de corte dos blocos, cerca de 25% do bloco de granito é transformado em pó (REIS; ALVAREZ, 2007). O RCG representa a maior parte do resíduo gerado no beneficiamento do granito e é ele que será considerado neste trabalho.

O Brasil é hoje o quinto maior produtor de rochas ornamentais do mundo (ABIROCHAS, 2015) o que significa também ser um grande gerador de RCG. Diante do cenário de aumento dos depósitos do resíduo nos pátios das empresas beneficiadoras do granito, alguns estudos já foram feitos no intuito de dar uma destinação para o resíduo. Algumas propostas para

aproveitamento do RCG são: aditivo de argamassa de assentamento, produção de tijolos de solo-cimento, produção de tijolos de cerâmica vermelha, aditivo para concreto (GONÇALVES, 2000). Não há ainda uma literatura expressiva tratando da aplicação do RCG como insumo na execução de pavimentos tradicionais, muito menos estudo sobre o uso deste como base e sub-base de pavimento asfáltico assim como será analisado nesta pesquisa. Apesar de não haver muito material nessa área, há a avaliação feita pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) quanto a possibilidade de utilização de resíduo de granito como agregado na confecção do concreto asfáltico. (CONCEIÇÃO, 2010)

No estudo feito pela UFRJ foram feitos ensaios para avaliar o uso desse material quanto à resistência mecânica e os níveis de ruídos dos pavimentos. Obtiveram que os pavimentos, nos quais foram utilizados os resíduos de granito, apresentaram resultado de resistência à tração de 1,04 MPa (valor apropriado para pavimentação). Nesse estudo, verificou-se, também, que os níveis de ruídos desses pavimentos foram 28 dB (valor próximo ao encontrado nos revestimentos com materiais convencionais, 30 dB). Adicionalmente, testaram o uso de resíduos de pedra-sabão misturados aos resíduos de granito, resultando em um pavimento com níveis de ruídos de 12 dB, alcançando uma diminuição de barulho em mais de 50% se comparado ao valor comumente encontrado nas vias públicas brasileiras atuais. Concluíram, portanto, que o uso dessa mistura é uma boa alternativa para ambientes que exijam um maior silêncio; como, por exemplo, hospitais e escolas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica de se utilizar misturas de RAP, pó de granito e cascalho laterítico como base ou sub-base de pavimentos asfálticos. Para tanto, comparou-se a resposta mecânica de materiais tipicamente utilizados na região de Goiânia-GO com o material estudado. Os insumos foram previamente caracterizados em laboratório e então misturados em diferentes proporções para análise. O RAP foi caracterizado quanto à granulometria, massa específica e teor de asfalto. O cascalho foi caracterizado quanto à granulometria e outros parâmetros apresentados foram retirados de bibliografia que já havia estudado o material. Já o resíduo de granito, foi ensaiado e definida a sua granulometria e massa específica. As misturas a serem analisadas foram submetidas a ensaios de compactação para definição da umidade ótima e, posteriormente, os corpos de prova foram moldados e ensaiados para determinação do módulo de resiliência.

O estudo iniciou-se com a tentativa de se utilizar misturas compostas apenas pelos dois resíduos, porém o ensaio de compactação das misturas, contendo apenas o RAP e o resíduo de granito não teve resultado satisfatório. Portanto, não tornou possível o prosseguimento da análise laboratorial com o ensaio triaxial dinâmico. O resultado do ensaio mencionado será apresentado e discutido no Capítulo 4. Como solução ao problema citado, foi proposto a adição de cascalho laterítico para melhorar a coesão e absorção de água do material. As misturas ensaiadas neste estudo serão expostas nos tópicos subsequentes.

Os ensaios laboratoriais apresentados neste capítulo foram realizados nos Laboratórios de Asfalto e de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (UFG).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram o resíduo do processo de fresagem de pavimentos asfálticos (RAP), o pó de granito gerado pelas indústrias de beneficiamento da rocha e o cascalho laterítico.

3.1.1 RAP

O RAP foi doado pela Secretaria Municipal de Obras de Goiânia-GO (SEMOB). O material é resultado da fresagem da capa asfáltica de diversas ruas da cidade; sendo, portanto um material heterogêneo.

A fresagem foi executada pela máquina fresadora Wirtgen W200 e estocado no pátio da SEMOB, como mostrado na Figura 3.1. De acordo com informações coletadas na data da coleta do material, o RAP já se encontrava estocado há cerca de três meses e exposto às intempéries.

A coleta foi feita seguindo as especificações da norma de coleta de amostras PRO 120 (DNER,1997). Primeiramente, foi feita uma limpeza da camada superficial que continha material orgânico proveniente da vegetação próxima ao local de estocagem, conforme mostrado na Figura 3.1. Em seguida, a coleta foi feita em diferentes pontos da pilha de resíduo. O material coletado foi identificado em tambores de PVC e então transportado para o Laboratório de Asfalto da UFG. No laboratório, o material foi misturado e, sempre que houve necessidade de se extrair amostras para os ensaios, submetido ao processo de quarteamento.

Figura 3.1 – RAP estocado no pátio da SEMOB

3.1.2 Resíduo de Granito

O resíduo de granito foi doado por uma empresa privada. O material é proveniente de Vila Velha – ES, estado que é o principal produtor e exportador de rocha ornamentais do país. O material é resultado de uma das primeiras etapas no processo de beneficiação da rocha: o corte, feito por teares, dos blocos extraídos da jazida em pedras brutas. A decisão de utilizar o material proveniente de Vila Velha em detrimento ao resíduo de granito produzido por empresas locais que trabalham também com o beneficiamento da pedra, porém em uma

etapa mais próxima do produto final, se deu em virtude da parceria informal deste trabalho com outros trabalhos nos quais é estudado o resíduo proveniente do ES.

Como explicado no capítulo 2, existem dois tipos principais de teares. No caso do granito usado nesse estudo, o tear utilizado foi o de lâminas metálicas, que é o equipamento mais tradicional nas indústrias brasileiras. A utilização desse tipo de equipamento requer aplicação de uma polpa abrasiva constituída de granalha de aço e cal. Essa solução é necessária para reduzir o desgaste da lâmina do tear. A consequência do uso dessa solução é a contaminação do pó de granito resultante do corte do bloco com os dois constituintes da polpa abrasiva. A Figura 3.2 mostra a presença de fragmentos de aço (pontos escuros) no resíduo utilizado neste estudo.

Figura 3.2 – Resíduo de granito contaminado por fragmentos de aço

3.1.3 Cascalho

O cascalho utilizado neste estudo é oriundo de uma jazida localizada na fazenda Angico no município de Ouro Verde de Goiás, que tem como coordenadas geográficas: 16º11'46'" Sul (latitude) e 49º11'26" Oeste (longitude). Esse material também foi estudado por Rocha (2016). O cascalho com laterita amarela foi coletado em cinco diferentes pontos da jazida afim de garantir uma amostragem representativa do material. A Figura 3.3 mostra um dos pontos de

coleta. O material coletado foi transportado, identificado com etiquetas e armazenado no Laboratório de Asfalto da UFG.

Figura 3.3 – Coleta do cascalho

3.1.4 Misturas Analisadas

Tendo em vista a análise da viabilidade técnica de se utilizar misturas de RAP e resíduo de granito como base ou sub-base de pavimento asfáltico, a execução de pavimentos com essa composição seria, do ponto de vista ambiental, a solução ideal por evitar a extração de matéria prima e dar destinação a esses dois resíduos. Entretanto, conforme o estudo que será apresentado no capítulo seguinte, as misturas compostas unicamente pelos dois resíduos não foram tecnicamente viáveis e, portanto, foram ensaiadas também misturas com adição de cascalho laterítico. As misturas estudadas são mostradas na Tabela 3.1. São quatro diferentes misturas com redução progressiva do teor de RAP. O alto teor de RAP adotado, que inclusive vai de encontro às recomendações da FWHA citadas no capitulo 2, foram escolhidas afim de testar se tais recomendações são adequadas para o material utilizado no Brasil e na tentativa de se otimizar a destinação dos resíduos através da confecção de bases com alto teor de resíduos. Os teores de cada insumo foram também determinados em função da parceria informal entre este trabalho e o trabalho de pesquisa de outros pesquisadores da área.

Tabela 3.1 – Composição das Misturas Analisadas

Mistura	Mistura 1		Mistura 2		Mistura 3			Mistura 4		
Material	Res. Granito	RAP	Res. Granito	RAP	Res. Granito	RAP	Cascalho	Res. Granito	RAP	Cascalho
Composição	5%	95%	10%	90%	5%	50%	45%	5%	30%	65%

3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

A Tabela 3.2 mostra os ensaios realizados para este trabalho. O procedimento dos ensaios foram todos baseados em normas técnicas brasileiras, com exceção do Rice Test que é descrito por norma americana.

Tabela 3.2 – Ensaios laboratoriais e normas

Material	Ensaio	Norma
RAP	Granulometria	ME 083 (DNER, 1998)
	Massa Específica Graúda	ME 195 (DNER, 1997)
	Massa Específica Miúda	ME 084 (DNER, 1995)
	Rice Test	ND T 209 (AASHTO, 2015)
	Teor de Asfalto	ME 053 (DNER, 1994)
Res. de Granito	Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 1984)
	Massa Específica	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Misturas	Granulometria	ME 083 (DNER, 1998)
	Compactação	ME 162 (DNER, 1994)
	Triaxial Dinâmico	ME 134 (DNIT, 2016)

3.2.1 Ensaios Realizados Com o RAP

3.2.1.1 Granulometria

O ensaio para determinação da distribuição granulométrica do RAP foi realizado conforme especificação da norma ME 083 do DNER. Do RAP coletado, foi retirada uma amostra, tendo em vista a recomendação de massa mínima, de acordo com a orientação da Tabela 3.3 retirada da norma. Deste modo, o material foi seco em estufa à temperatura média de 110°C, resfriado à

Tabela 3.3 – Tabela de massa mínima da norma DNER ME 083/1998

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos:	
4,8	1
Agregados graúdos:	
9,5	5
19	7
25	10
38	15
50	20

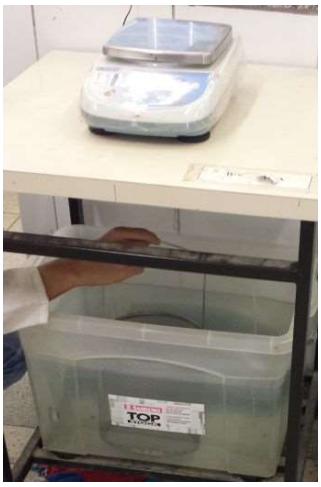
O peneiramento mecânico foi realizado com a prévia limpeza das peneiras e encaixe dessas com abertura de malha crescente do topo para a base. O material previamente seco foi colocado no topo e o peneiramento mecânico foi executado até que não se percebesse mais uma transferência significativa de material entre as peneiras. Finalizado o peneiramento, o material retido em cada peneira foi retirado e pesado.

3.2.1.2 Massa Específica dos Agregados Graúdos

A massa específica da porção graúda do RAP foi definida a partir do ensaio descrito na norma ME 195 do DNER. Do montante de material coletado já misturado e quarteado, foi extraído um volume suficiente para se obter 5kg de porção graúda, respeitando a recomendação da norma. O material foi peneirado na peneira de abertura 4,8mm até se obter a massa desejada e, então, foi lavado sobre a peneira para retirar os finos da superfície dos agregados.

O material lavado foi colocado em estufa à temperatura de 110°C e secado até atingir uma constância de massa. O agregado seco foi retirado da estufa, resfriado até temperatura que permitisse manipulação e imerso em água pelo período de 24 horas. Finalizado o período de imersão, a amostra foi retirada da água, espalhada em um pano e feita a secagem da água superficial dos agregados. A massa da amostra, na condição saturada com superfície dos agregados seca, foi aferida e identificada por parâmetro B. Após aferição do parâmetro B, o material foi inserido na cesta mostrada na figura 3.4 e medida a massa do agregado imerso em água (à temperatura de 23°C), definida por parâmetro C. Por fim, o material foi retirado novamente da imersão, retornado à estufa para secagem até constância de massa e teve seu peso seco aferido e gravado como parâmetro A.

Figura 3.4 – Cesta imersa em água ligada à balança



A massa específica na condição seca da porção graúda do RAP foi calculada, seguindo as orientações da norma ME 195 do DNER, pela Equação 3.1

$$\gamma s = \frac{A}{B - C} \tag{3.1}$$

onde:

γ_S: Massa específica seca;

A: Massa do agregado seco;

B: Massa do agregado saturado com superfície seca;

C: Massa do agregado imerso em água.

3.2.1.3 Densidade Real dos Agregados Miúdos

A densidade real da porção miúda do RAP foi determinada seguindo as orientações da norma técnica ME 084/95 do DNER. Primeiramente, foi coletado uma porção do RAP já previamente misturado e quarteado. O material foi peneirado utilizando as peneiras 4,8mm e 0,075mm para retirada da porção graúda e da porção fina. A amostra de agregados miúdos foi colocada em estufa para secagem. O material seco foi divido em três amostras de 250g a serem ensaiadas separadamente.

Após a preparação do material, três picnômetros secos e limpos tiveram suas massas aferidas e anotadas como parâmetro A e então cada amostra foi depositada em seu respectivo picnômetro. As massas dos picnômetros com as amostras foram também medidas

e registradas como parâmetro B. Após a aferição e registro dos valores, foi adicionada água destilada aos picnômetros e estes foram posicionados sob a chapa aquecedora, conforme mostrado na Figura 3.5. O aquecimento se deu por aproximadamente 15 minutos após início da fervura com agitamento dos picnômetros de tempos em tempos.

Tendo finalizado o aquecimento, os picnômetros foram retirados da chapa aquecedora e aguardou-se a queda da temperatura dos frascos até temperatura ambiente. Adicionou-se volume de água destilada aos três recipientes até alcançar o traço de referência dos picnômetros e foram aferidas as massas de cada um dos três recipientes, parâmetro registrado como C. Por fim, todo o material foi retirado dos picnômetros e água destilada foi adicionada até o traço de referência. Os picnômetros tiveram a massa aferida e registrada como parâmetro D.

Figura 3.5 – Picnômetros em aquecimento

A densidade real dos agregados miúdos foi calculada, para cada ensaio, a partir da Equação 3.2 extraída da norma técnica ME 084/95 do DNER.

$$D25 = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \tag{3.2}$$

Onde:

D_{25}: Densidade Real para água à temperatura de 25°C;

A: Massa do picnômetro vazio;

B: Massa do picnômetro com amostra;

C: Massa do picnômetro com amostra e água;

D: Massa do picnômetro com água.

3.2.1.4 Máxima Massa Específica

A determinação da máxima massa específica do RAP foi feita seguindo as orientações da norma americana ND T 209 da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Foram ensaiadas três amostras separadamente e os resultados foram comparados. Inicialmente, as amostras de RAP foram submetidas a secagem em estufa por tempo suficiente para garantir constância de massa. A amostra a ser ensaiada era retirada da estufa momentos antes do início do ensaio para que pudesse ser destorroada ainda quente para facilitar o processo. Uma vez finalizado o processo de destorroamento, a amostra era então submetida ao ensaio.

A sequência de execução do ensaio teve início com a secagem e limpeza do kitasato e aferição de sua massa. A primeira amostra foi inserida no kitasato e a massa do conjunto foi registrada. Em seguida, foi adicionada água destilada ao kitasato até cobrir com folga a amostra inserida, sua tampa foi rosqueada e o kitasato foi levado à mesa agitadora. O recipiente foi fixado à mesa e foi fixada à sua tampa uma mangueira ligada a um sistema de bomba de vácuo, conforme mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Ensaio para determinação da densidade máxima

A mesa agitadora foi configurada conforme especificado na norma americana, a bomba de vácuo foi acionada e o ensaio perdurou por 15 minutos. Finalizado o processo de retirada do

ar da amostra, o volume de ar restante no interior do recipiente foi preenchido com mais água destilada até eliminar o máximo de bolhas de ar de seu interior. O kitasato foi levado até a balança e teve sua massa gravada como parâmetro E. Na sequência, todo o material foi retirado, o kitasato foi limpo e seco, preenchido novamente com água destilada e a massa do conjunto foi aferida e gravada como parâmetro B.

A máxima massa específica foi calculada, para cada um dos três ensaios realizados, pela Equação 3.3 extraída da norma ND T 209 da AASHTO.

$$Dmax = \frac{A}{A + D - E} \tag{3.3}$$

onde:

D_{max}: Máxima massa específica do RAP;

A: Massa da amostra seca;

D: Massa do Kitasato com água destilada;

E: Massa do Kitasato com amostra e água destilada.

3.2.1.5 Teor de Asfalto

A determinação do percentual de betume do RAP foi realizada seguindo as instruções da norma ME 053/94 do DNER. Foram executados três ensaios e os resultados foram comparados. A preparação das amostras a serem ensaiadas se deu com o prévio aquecimento do RAP, destorroamento a fim de desmanchar os grumos, quarteamento e separação de três amostras de aproximadamente 1000 g de massa.

O ensaio se iniciou com a medição e registro da massa de cada uma das amostras. A amostra a ser ensaiada foi despejada no prato do aparelho extrator de betume e a ela foi adicionado 150 g de tricloroetileno, solvente utilizado para remover o betume dos agregados. A amostra foi deixada em repouso por 15 minutos para ação do solvente e o aparelho foi então rotacionado manualmente até que todo o fluido (betume + solvente) fosse escoado para fora do prato. Finalizado o escoamento, mais solvente foi adicionado ao RAP e o equipamento girado novamente. O processo se repetiu até a percepção visual de que no fluido escoado não havia mais presença de betume, que era indicado pela manutenção da característica transparência do Tricloroetileno. Finalizado o ensaio, as amostras foram levadas à estufa,

onde se mantiveram por 24h para secagem. Por fim, a massa das amostras secas foi aferida e registrada. A Figura 3.7 mostra o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 3.7 – Aparelho utilizado na extração do betume do RAP

3.2.2 ENSAIOS REALIZADOS COM O RESÍDUO DE GRANITO

O resíduo de granito foi caracterizado quanto à granulometria e à massa específica com auxílio de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.2.2.1 Granulometria

O ensaio para definição da granulometria do insumo foi feito seguindo as orientações da norma NBR 7181/ 1984 da ABNT. A preparação da amostra ensaiada seguiu as diretrizes da norma NBR 6457/ 1986.

A execução do ensaio deu-se em conformidade com o método para análise granulométrica de solos prescrevido na NBR 7181. O material analisado, por ser tido como fino, não foi submetido ao peneiramento. Foram coletados duas amostras de aproximadamente 70 g de material previamente seco até umidade higrocópica. Foram feitos dois ensaios de sedimentação: com e sem adição de defloculante.

O material foi pesado, de acordo com a recomendação de resolução de 0,01g e anotação como Mh. E, ainda, retirado 100 g para três determinações da umidade higroscópica (h), conforme a NBR 6457.

Em seguida, foi colocado o material em um béquer de 250 cm³ para adicionar o defloculante, com uma proveta, inserindo 125 cm³ de solução de hexametafosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 cm³ de solução. No caso do ensaio sem defloculante, a imersão da amostra foi feita em água destilada. As misturas ficaram imersas por cerca de 20 horas.

Após este repouso, a mistura a ser ensaiada foi colocada no copo de dispersão, sendo utilizada a bisnaga com água destilada para retirar todo o material aderido ao béquer e adicionando-a até que o nível ficou 5 cm abaixo das bordas do copo. Prosseguiu, então, por 15 minutos, a dispersão.

Em seguida, foi transferido para a proveta, novamente utilizando a bisnaga com água destilada para retirar todo o material aderido ao copo, e adicionada água destilada até o nível 1.000 cm³.

A proveta foi colocada em um local com temperatura aproximadamente constante, e agitada com a baqueta de vidro, mantendo as partículas em suspensão, e, então, após atingida a temperatura de equilíbrio, foi utilizada uma mão para tampar a boca da proveta e realizar movimentação de rotação com o auxílio da outra.

Após um minuto desta agitação, a proveta foi colocada na mesa e foi anotada, imediatamente, a hora exata do início da sedimentação. Em seguida, o densímetro foi introduzido na dispersão, sendo realizadas as leituras equivalentes ao tempo de sedimentação (t) de 0,5, um e dois minutos. A Figura 3.8 mostra a proveta pouco tempo após seu posicionamento na bancada para inicio da sedimentação.

Figura 3.8 – Ensaio de granulometria por sedimentação

Tendo por base o início da sedimentação, bem como a recomendação de inserir o densimetro 15 segundos antes de cada de leitura na dispersão, foram obtidas as seguintes leituras: 4, 8, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas.

Ressalta-se que, no momento das leituras, foram observadas as exigências normativas quanto à sua realização na parte superior do menisco, com interpolação de 0,0002, após o densímetro em equilíbrio, bem como, após cada leitura, o densímetro foi colocado em proveta com água limpa na mesma temperatura da dispersão.

Finalizado o ensaio, as equações 3.4 e 3.5 foram utilizadas para traçar a curva de distribuição granulométrica.

$$Qs = N \times \frac{\delta}{\delta - \delta d} \times V.\delta c.\frac{L - Ld}{\frac{Mh}{100 + h} \times 100} \tag{3.4}$$

onde:

Qs= porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

N = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm;

δ = massa especifica dos grãos do solo, em g/cm³

δd = massa especifica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm³;

V= volume da suspensão, em cm³

δc = massa específica da água à temperatura de calibração do densímetro (20), em g/cm³

L = Leitura do densímetro na suspensão;

Ld = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão;

Mh = massa do material úmido submetido à sedimentação, em g;

h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0mm.

$$d = \left(\frac{1800\eta}{\delta - \delta d} - \frac{a}{t}\right)^{0,5} \tag{3.5}$$

onde:

d = diâmetro máximo das partículas, em mm;

η = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, a temperatura de ensaio, em g x s/cm²;

a = altura de queda das partículas correspondente a leitura do densímetro, em cm;

t = tempo de sedimentação, em s;

δ = massa específica dos grãos do solo, em g/cm³;

δd = massa específica do meio dispersor, a temperatura de ensaio, em g/cm³.

3.2.2.2 Massa Específica

O ensaio foi norteado pelos príncipios e recomendações da norma NBR 6508/1984 da ABNT, porém com duas mudaças: o picnômetro foi substituido por balão volumétrico e a retirada dos gases foi feita através da fervura e não por aplicação de vácuo. Neste ensaio foram utilizadas três cápsulas, em que foram inseridos, aproximadamente, 50 g de resíduo de granito em cada. Ressalta-se que este resíduo havia sido previamente seco ao ar até atingir a umidade higroscópica. Em cada cápsula foi inserida água destilada até o ponto de imersão, reservando por mais de 12 horas.

Após este período, procedeu-se o ensaio em cada cápsula isoladamente. Em um primeiro momento, a cápsula foi colocada no copo de dispersão por 15 minutos. A dispersão foi transferida para um balão volumétrico por meio de um funil de vidro, sendo utilizada uma pisseta para retirar todo o material aderido no copo.

O balão volumétrico, então, foi colocado na chapa aquecedora, conforme Figura 3.9, e aquecido até atingir o ponto de fervura, onde permaneceu por mais 15 minutos, sendo agitado periodicamente. Em seguida, foi transferido para uma mesa para resfriar. Juntamente ao balão, dois béqueres com aproximadamente 800 ml de agua destilada em cada um também foram aquecidos até atingirem o ponto de fervura e permaneceram na chapa aquecendo por mais 15 minutos.

Figura 3.9 – Ensaio de massa específica do resíduo de granito

Após isso, o balão volumétrico e os béqueres foram levados para um aquário, permanecendo em banho Maria, até todos atingirem a mesma temperatura.

Atingida a temperatura, o balão foi retirado e seco. Adicionou-se água dos béqueres para atingir a marcação do balão e, em seguida, obteve a massa na balança.

Descartado a amostra, o balão foi limpo para, posteriormente, enchê-lo com água destilada até a referida marcação e, assim, obteve-se a segunda massa. O cálculo da massa específica foi feito com o uso da equação 3.6.

$$D = \frac{A}{A + B - C} \tag{3.6}$$

onde:

D: Massa específica do resíduo de granito;

A: Massa da amostra seca;

B: Massa do balão volumétrico com água destilada;

C: Massa do balão volumétrico com amostra e água destilada.

3.2.3 ENSAIOS REALIZADOS COM O CASCALHO

O cascalho utilizado neste estudo é proveniente da mesma jazida do material estudado na dissertação de mestrado de Rocha (2016). A caracterização completa do material apresentada no próximo capítulo foi extraída dessa dissertação. Neste trabalho foi realizada apenas a caracterização granulométrica do cascalho.

O ensaio de granulometria do cascalho foi feito seguindo as recomendações da norma NBR 7181/ 1984 da ABNT, que trata da análise granulométrica de solos e a preparação da amostra ensaiada seguiu as diretrizes da norma NBR 6457/ 1986.

A preparação da amostra ensaiada iniciou com a secagem ao ar e destorroamento dos torrões existentes no cascalho coletado. O material seco foi reduzido com o auxílio do repartidor de amostra e foi separada uma massa de aproximadamente 8 kg de material. O valor exato da massa da amostra foi aferido em balança e registrado como Mt.

A amostra preparada foi submetida ao peneiramento mecânico na peneira de malha 2mm. Desta forma, foi separada em duas bandejas a porção retida da parcela passante. O material graúdo, que ficou retido, foi lavado sob a peneira 2 mm afim de eliminar o material fino retido nos grãos e colocado na estufa para secagem em temperatura de 105°C. Do material passante foi retirado uma amostra de aproximadamente 120 gramas e outra de aproximadamente 100 gramas. A amostra menor foi distribuída em 3 cápsulas e utilizada para ensaio de umidade higroscópica. A amostra maior foi pesada e sua massa registrada como Mh. Após pesagem a amostra miúda foi lavada sob a peneira de malha 0.075 mm e levada à estufa para secagem.

Após secagem em estufa, tanto a parcela graúda quanto a parcela miúda foram submetidas ao peneiramento mecânico para separação do material por faixas granulométricas. O material graúdo foi previamente pesado e teve sua massa registrada como Mg. Na sequência, foi passado pelas peneiras de malha 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, e 4,8 mm. O material miúdo foi passado pelas peneiras 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075mm. O material retido em cada peneira e na bandeja acoplada na parte inferior da sequência de peneiras foi pesado e registrado para construção da curva de distribuição granulométrica. A Figura 3.10 mostra as diferentes variações granulometricas do cascalho.

Figura 3.10 – Cascalho após ensaio de granulometria

Finalizado todo o processo descrito nas etapas anteriores, foi calculada a massa total da amostra seca (Ms), a porcentagem de material graúdo passado em cada peneira (Qg) e a porcentagem de material fino passado em cada peneira (Qf). O cálculo se deu baseado nas equações 3.7, 3.8 e 3.9 respectivamente. De posse dos resultados, foi plotada a curva de distribuição granulométrica do cascalho.

$$Ms = \frac{Mt - Mg}{100 + h} * 100 + Mg \tag{3.7}$$

Onde:

M_s: Massa total da amostra seca;

M_t: Massa da amostra seca ao ar;

M_g: Massa do material seco retido na peneira de 2mm;

h: Umidade higroscópica do material passante na peneira 2mm.

$$Qg = \frac{Ms - Mi}{Ms} * 100 \tag{3.8}$$

Onde:

Q_g: Porcentagem do material passado em cada peneira;

M_s: Massa total da amostra seca;

M_i: Massa do material retido acumulado em cada peneira.

$$Qf = \frac{Mh * 100 - Mi(100 + h)}{Mh * 100} * N \tag{3.9}$$

Onde:

Q_f: Porcentagem de material passado em cada peneira

M_h: Massa de material úmido submetido ao peneiramento fino;

h: Umidade higroscópica do material passante na peneira 2mm;

M_i: Massa do material retido acumulado em cada peneira;

N: Porcentagem de material que passa na peneira 2mm.

3.2.4 ENSAIOS REALIZADOS COM AS MISTURAS

Tendo concluído a caracterização de cada um dos materiais, iniciou-se a caracterização e análise do comportamento mecânico das misturas em estudo. O objetivo inicial foi a análise das misturas compostas apenas por resíduo de granito e RAP e por fim foram ensaiadas as misturas adicionadas de cascalho.

3.2.4.1 Compactação

O ensaio de compactação foi feito tanto para as misturas contendo apenas os dois resíduos, quanto para misturas destes com o cascalho laterítico. O objetivo do ensaio é a determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo para compactação dos corpos de prova a serem submetidos ao ensaio triaxial dinâmico. Todos os ensaios foram feitos seguindo as recomendações da norma ME 162/94 do DNER. Cada mistura foi ensaiada cinco vezes com diferentes teores de umidade para determinação da curva de compactação. A energia de compactação adotada nos ensaios foi a Proctor intermediária.

Inicialmente, os componentes da mistura a ser ensaiada foram secos ao ar e então a amostra foi misturada respeitando as proporções em massa de cada componente. A amostra foi submetida ao peneiramento na peneira de 19 mm e o montante retido foi substituído por massa equivalente de material retido entre as peneiras 4,8 mm e 19 mm. A amostra misturada e peneirada foi então adicionada de água para alcançar a umidade presumível previamente determinada e misturada para homogeneizar o material. Por fim, a amostra foi colocada em saco plástico e deixada em cura úmida por 24 horas.

O ensaio de compactação se iniciou com a preparação do cilindro de compactação, que foi fixado à base, juntamente com o disco complementar, e posicionado em piso de concreto plano. A amostra foi retirada do saco plástico e compactada em cinco camadas, recebendo 26 golpes por camada. Ao final da compactação, o colarinho do cilindro de compactação foi removido e a superfície do material compactado foi rasado com o uso de uma régua de aço. O conjunto molde e material compactado foi desconectado da base e pesado. Para dedução da massa do molde, a massa do material úmido compactado foi registrada como P'h.

Utilizando o extrator de amostras, o material compactado foi extraído do molde e desmanchado. Da parte central foram coletadas três cápsulas de material para cálculo da umidade da amostra. As cápsulas foram pesadas e colocadas em estufa à temperatura de 105°C e mantidas até a verificação de constância de massa do material. Com o valor da

massa de cada cápsula previamente registrado, foram calculados o valor da massa úmida, registrado como Ph e da massa seca, registrado como Ps.

Finalizado o ensaio, foram calculados o valor da massa específica aparente úmida e umidade da amostra ensaiada utilizando as equações 3.10 e 3.11 respectivamente. Por fim, de posse dos dois parâmetros e da equação 3.12, foi calculada a massa específica aparente seca da amostra. As três equações utilizadas foram extraídas da norma ME 162/94 do DNER.

$$\gamma h = \frac{P'h}{V} \tag{3.10}$$

Onde:

γh: Massa específica aparente úmida do solo compactado;

P'h: Massa do solo úmido compactado;

V: Volume do solo compactado.

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100 \tag{3.11}$$

Onde:

h: Teor de umidade em percentagem;

Ph: Massa do solo úmido;

Ps: Massa do solo seco.

$$\gamma s = \gamma h * \frac{100}{100 + h} \tag{3.12}$$

Onde:

γs: Massa específica aparente seca do solo compactado;

γh: Massa específica aparente úmida do solo compactado;

h: Teor de umidade em percentagem.

3.2.4.2 Granulometria

Foi realizado o ensaio de granulometria apenas para as misturas 3 e 4, pois as misturas 1 e 2 não apresentaram resultados satisfatórios na compactação e por isso não foram estudadas mais profundamente. Os ensaios foram feitos baseados na norma NBR 7181/ 1984 da ABNT, que trata da análise granulométrica de solos e a preparação da amostra ensaiada seguiu as diretrizes da norma NBR 6457/ 1986. Portanto, seguiu a mesma sequência detalhada no ensaio de granulometria do cascalho, que foi descrito na seção 3.2.2.1. A única diferença dos ensaios com as misturas em relação ao ensaio feito com o cascalho foi a etapa inicial de preparação das misturas nas proporções estabelecidas pela Tabela 3.1.

3.2.4.3 Triaxial Dinâmico

A determinação do módulo de resiliência dos materiais estudados foi a principal etapa deste trabalho, pois possibilitou analisar o comportamento das misturas analisadas sob ação de carregamento dinâmico. O módulo de resiliência é o módulo elástico do material após aplicação de cargas repetidas e representa o que acontece ao pavimento sob ação do tráfego de veículos. As camadas granulares são enrijecidas com o passar do tempo, tendo o valor de módulo de elaticidade alterado ao longo da vida útil do pavimento. Dessa forma, o valor do módulo de resiliência tem extrema importância para o dimensionamento do pavimento, considerando tal processo de enrijecimento do material granular. A figura 3.11 mostra as tensões às quais o corpo de prova fica submetido durante o ensaio e mostra também as deformações plástica e elástica que ocorrem durante as aplicações de carga. O ensaio foi realizado na máquina UTM-30, mostrada na Figura 3.12, e tanto o ensaio quanto a preparação dos corpos de prova foram feitos segundo as recomendações da norma DNIT 134/2016 – ME.

Figura 3.11 – Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga dinâmica (BERNUCCI *et al*., 2008)

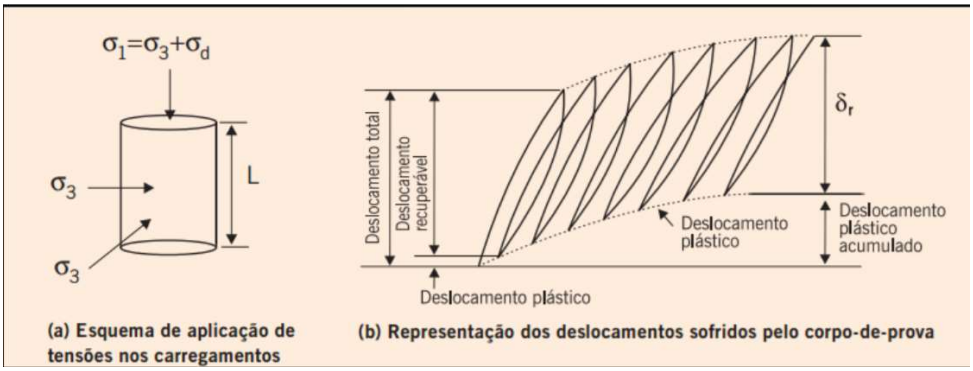
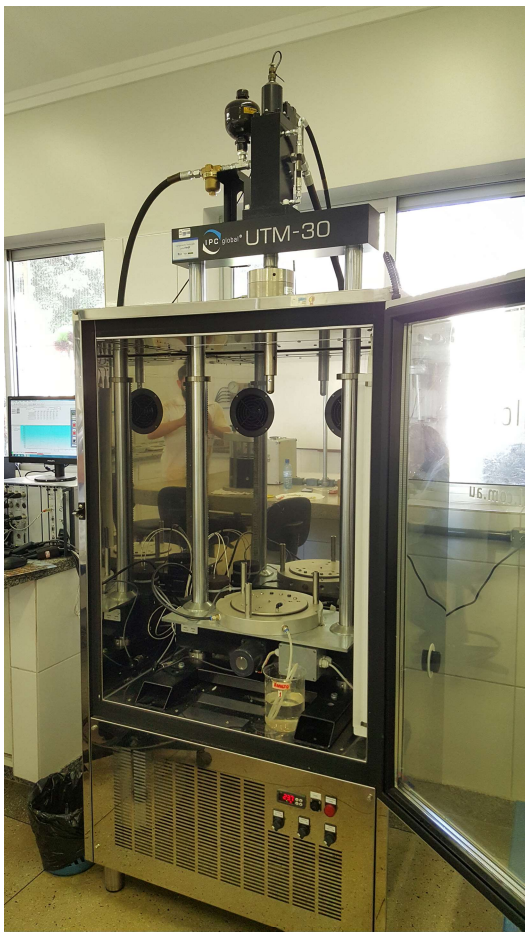


Figura 3.12 – Máquina utilizada no ensaio Triaxial Dinâmico



Foram moldados três corpos de prova para cada mistura, com a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo determinados no ensaio de compactação. Para tanto, definiu-se que o grau de compactação dos corpos de prova deveria variar entre 99% e 100%. O equipamento utilizado para a moldagem dos corpos de prova e a quantidade de camadas de compactadas foram diferentes daqueles usados no ensaio de compactação e por esse motivo houve a necessidade de se calcular a quantidade de golpes por camada utilizando a Equação 3.13 para manter a mesma energia de compactação para ambos ensaios. A equação resultou na aplicação de 10 golpes por camada, assim como recomendado na norma do ensaio.

$$E = \frac{N * n * p * h}{V} \tag{3.13}$$

Onde:

E: Energia de compactação;

N: Numero de golpes por camada;

n: Numero de camadas;

p: Peso do soquete;

h: Altura de queda do soquete.

Inicialmente, foram preparadas três amostras para cada mistura e a estas foram adicionadas água para alcançarem a umidade ótima. A quantidade de água utilizada foi calculada a partir dos valores de umidade higroscópica de cada um dos três insumos das misturas. As amostras preparadas foram então colocadas em sacos plástico e mantidas em cura úmida por cerca de 24 horas.

No dia seguinte à preparação das amostras, estas foram compactadas com o equipamento mostrado na Figura 3.13. Inicialmente o molde cilíndrico teve suas paredes internas lubrificadas para facilitar a extração do corpo de prova e sua massa foi registrada como P1. O cilindro foi posicionado na base do equipamento e a amostra previamente umidificada foi compactada em 10 camadas. Por fim, o cilindro foi removido, sua massa com o corpo de prova foi registrada como P2 e corpo de prova foi extraído do interior do molde com o auxílio de um extrator hidráulico.

Figura 3.13 – Equipamento de compactação para o ensaio Triaxial

O corpo de prova teve suas dimensões aferidas com o uso de paquímetro e levado imediatamente, afim de evitar perda de umidade, para a etapa de preparação do corpo de prova para o ensaio triaxial dinâmico. O corpo de prova foi envolvido por uma membrana de

borracha, apoiado a uma pedra porosa e a ele foram colados dois transdutores mecânicos em posições diametralmente opostas como mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Corpo de prova preparado para o ensaio triaxial

Finalizada a preparação do corpo de prova, esse foi inserido na máquina para realização do ensaio. Conforme indicado na norma DNIT 134/2016 – ME, foi aplicada inicialmente uma sequência de carregamentos cíclicos com a finalidade de eliminar as deformações permanentes iniciais que podem ocorrer nas primeiras aplicações da tensão desvio. Foram aplicadas 500 repetições de cada par de tensão mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Sequência de tensões da fase de condicionamento

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_1/σ_3
0.07	0.07	0.14	2
0.07	0.21	0.28	4
0.105	0.315	0.42	4

Ao final da fase de condicionamento do corpo de prova, iniciou-se o procedimento para determinação de módulo de resiliência, com aplicação dos 18 pares de tensões mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_1/σ_3
0.02	0.02	0.04	2
	0.04	0.06	3
	0.06	0.08	4
0.035	0.035	0.07	2
	0.07	0.105	3
	0.105	0.14	4
0.05	0.05	0.1	2
	0.1	0.15	3
	0.15	0.2	4
0.07	0.07	0.14	2
	0.14	0.21	3
	0.21	0.28	4
0.105	0.105	0.21	2
	0.21	0.315	3
	0.315	0.42	4
0.14	0.14	0.28	2
	0.28	0.42	3
	0.42	0.56	4

Ao finalizar a aplicação de todos os pares de tensão, o equipamento forneceu uma planilha resumo contendo diversos parâmetros calculados durante o ensaio, tais como deformação permanente, deformação recuperável, tensão de confinamento aplicada, tensão desvio aplicada, módulo de resiliência, etc. De posse dos valores resultantes do ensaio de cada um dos três corpos de prova, foi feito o tratamento e analise dos dados. O detalhamento desse processo é feito no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta as análises e os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais descritos no capítulo anterior. Além disso, os resultados são comparados com dados obtidos em outros estudos no intuito de corroborar com os julgamentos feitos a respeito do comportamento das misturas estudadas. Destacam-se aqui a apresentação e análise dos resultados do ensaio triaxial, fundamentais para o objetivo deste trabalho.

4.1 RAP

Antes da caracterização laboratorial do RAP, foi feita a análise tátil-visual para verificar se o betume presente estava ativo ou inativo conforme mencionado na revisão bibliográfica. Concluiu-se se tratar de um betume inativo, pois a coloração era clara e não foi detectado nenhum aspecto pegajoso no material, conforme mostrado na Figura 4.1. A inatividade do betume já era esperada, tendo em vista se tratar de um material fresado de pavimentos em estado de deterioração já acentuados.

Figura 4.1– RAP

A caracterização laboratorial do RAP se iniciou com o ensaio de granulometria cujo resultado é mostrado na Tabela 4.1. O tamanho nominal máximo mostrado na tabela se refere à

abertura da primeira peneira, no sentido do peneiramento, a reter ao menos 10% de material. No caso do RAP, a peneira 3/8” cuja abertura é de 9,5mm.

Tabela 4.1– Distribuição granulométrica do RAP

Peso Seco (g)		14989.9			
Peneiras		**Massa Retida (g)**	**% Retido**	**% Retido Acumulado**	**% Passante**
N	**mm**				
3"	75	0	0.0	0.0	100.0
2"	50	0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.5	0	0.0	0.0	100.0
1"	25	830.3	5.5	5.5	94.5
3/4"	19	895.6	6.0	11.5	88.5
3/8"	9.5	3171.6	21.2	32.7	67.3
N° 4	4.75	4946.9	33.0	65.7	34.3
N° 8	2.36	970.4	6.5	72.1	27.9
N° 10	2	591.3	3.9	76.1	23.9
N° 16	1.18	1119.9	7.5	83.6	16.4
N° 30	0.6	1028.2	6.9	90.4	9.6
N° 40	0.425	267.8	1.8	92.2	7.8
N° 50	0.3	522.8	3.5	95.7	4.3
N° 100	0.15	301.5	2.0	97.7	2.3
N° 200	0.075	242.2	1.6	99.3	0.7
Bandeja	0	50.2	0.3	99.7	0.3
Tamanho Nominal Máximo		9.5mm			

A partir dos valores obtidos no ensaio, foi feita a curva granulométrica da Figura 4.2 para analisar a granulometria do material. Baseado no Manual de Pavimentação do DNIT, o material se enquadra na Faixa A de materiais a serem empregados como base granular. Além disso, foram calculados os parâmetros Coeficiente de Uniformidade (CU) e Coeficiente de Curvatura (CC). Os valores encontrados (CU= 11,53 e CC=1,59) indicam que o material é bem graduado. Os percentuais de pedregulho, areia, silte e argila presentes na composição do RAP são apresentados na Tabela 4.2.

Figura 4.2– Curva granulométrica do RAP

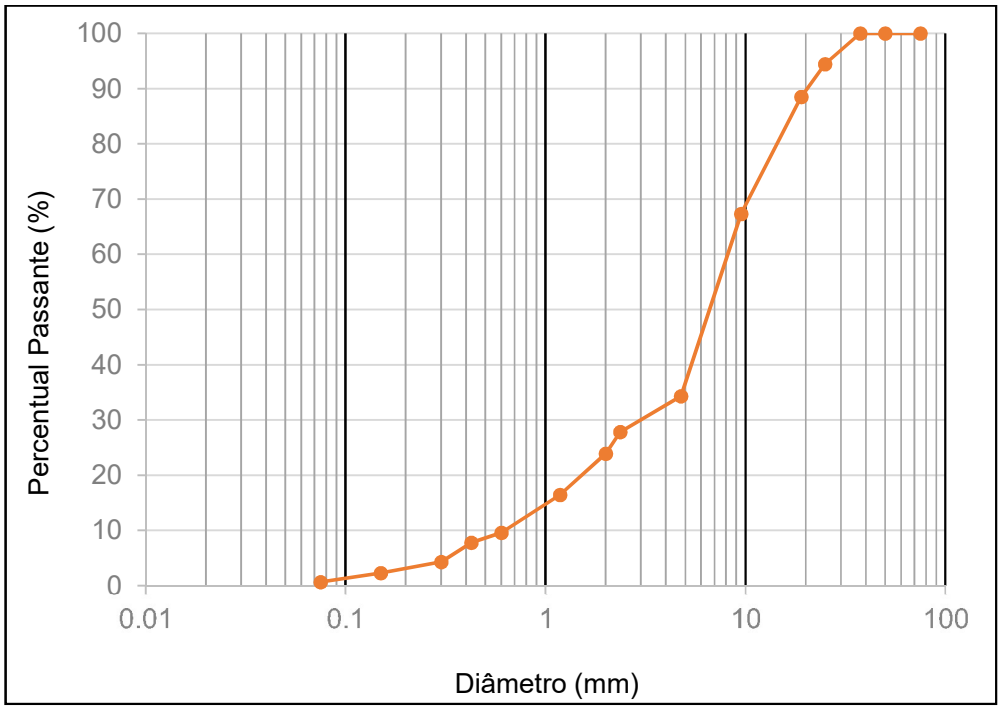


Tabela 4.2– Fração de pedregulho, Areia, Silte e Argila do RAP

Fração	Porcentagem (%)
Pedregulho	65,7
Areia grossa	10,4
Areia media	16,1
Areia fina	7,1
Silte+Argila	0,3

Além do ensaio de granulometria, foram determinados também, conforme explicado no capítulo anterior, a massa específica da porção graúda e miúda do RAP, a massa específica do RAP integral e o teor de asfalto do RAP. Os resultados dos ensaios laboratoriais são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3– Características do RAP estudado

Propriedade	Resultado
Massa específica do RAP (g/cm^3)	2.56
Massa específica dos agregados graúdos (g/cm^3)	2.39
Massa dos Agregados Miúdos (g/cm^3)	2.52
Teor de Asfalto (%)	4.9

4.2 RESIDUO DE GRANITO

O resultado da análise granulométrica do resíduo de granito realizada através da sedimentação com defloculante é apresentado na Tabela 4.4. Já o resultado obtido sem o uso do defloculante aparece na Tabela 4.5. A utilização do defloculante mostrou que o resíduo de granito possuía leve agregação de partículas, o que resultou em um maior percentual de grãos menores que 0,01mm na curva granulométrica com defloculante.

Tabela 4.4– Distribuição granulométrica do granito com defloculante

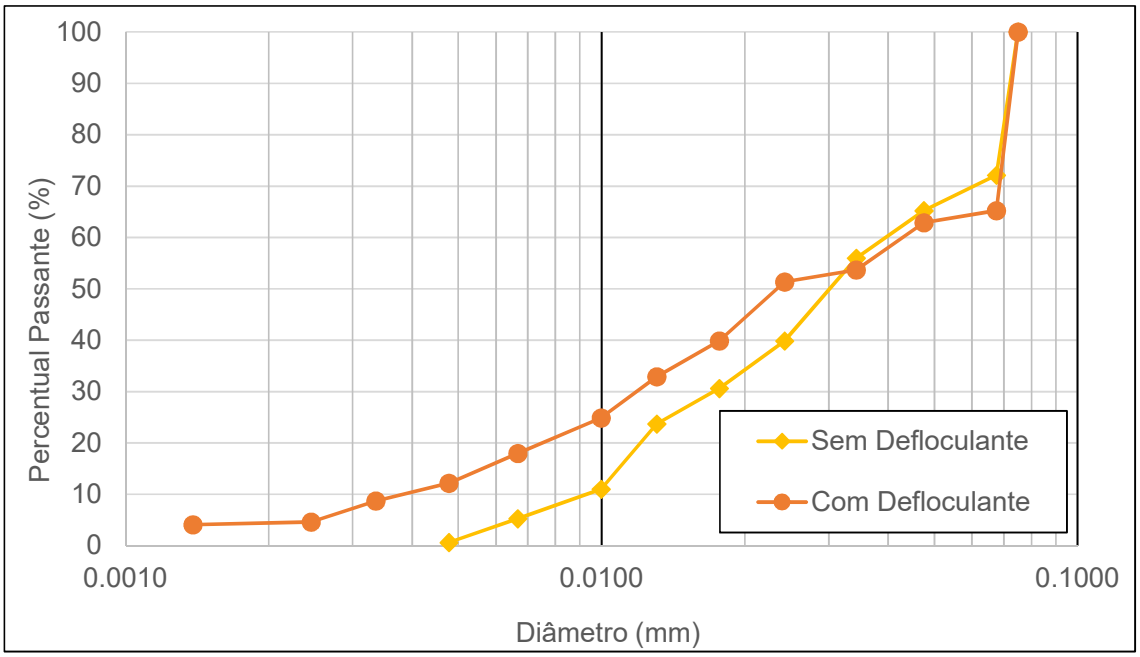
Diâmetro (mm)	Porcentagem passante (%)
0,0750	100
0,0675	65,20
0,0475	62,90
0,0343	53,68
0,0242	51,37
0,0177	39,85
0,0131	32,93
0,0100	24,86
0,0067	17,95
0,0048	12,18
0,0034	8,73
0,0025	4,63
0,0014	4,12

Tabela 4.5– Distribuição granulométrica do granito sem defloculante

Diâmetro (mm)	Porcentagem passante (%)
0,0750	100
0,0675	72,12
0,0475	65,20
0,0343	55,98
0,0242	39,85
0,0177	30,63
0,0131	23,71
0,0100	11,03
0,0067	5,27
0,0048	0,66
0,0034	0,00
0,0025	0,00
0,0014	0,00

A partir dos valores definidos nas tabelas 4.4 e 4.5, confeccionou-se as curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.3.

Figura 4.3– Granulometria do resíduo de granito por sedimentação



Os resultados obtidos mostram que o resíduo de granito avaliado apresenta uma curva bem distribuída de finos, o que pode ser útil no preenchimento de vazios. Podendo, portanto, favorecer uma maior resistência das misturas.

A caracterização do granito também se deu através da determinação da sua massa específica e o resultado foi 2,64 g/cm³, valor dentro da faixa de referência para rochas graníticas (PATRICIO, 1998).

4.3 CASCALHO

O cascalho utilizado neste estudo, conforme já mencionado, é proveniente da mesma jazida do cascalho utilizado na dissertação de mestrado de Rocha (2016). Com exceção do ensaio de granulometria, as demais características apresentadas neste tópico foram extraídas do referido estudo em virtude da não disponibilidade de tempo para realiza-los neste trabalho. O ensaio de granulometria apresentado na Tabela 4.6, teve resultado diferente do ensaio apresentado por Rocha (2016). O material apresentou um percentual maior de material passante na peneira n. 200, provavelmente consequência de uma coleta em pontos distintos da jazida.

Tabela 4.6– Distribuição granulométrica do cascalho

Peso Seco (g)		7997,02		
Peneiras		**% Retido**	**% Retido Acumulado**	**% Passante**
N	**mm**			
2"	50	0,0	0,0	100,00
1"	25	6,2	6,2	93,81
3/4"	19	6,1	12,3	87,73
3/8"	9,5	18,7	31,0	69,03
N° 4	4,75	16,8	47,8	52,23
N° 10	2	12,8	60,6	39,45
N° 16	1,18	4,7	65,3	34,70
N° 30	0,6	3,6	68,9	31,06
N° 40	0,425	1,8	70,7	29,27
N° 50	0,3	3,4	74,2	25,84
N° 100	0,15	3,6	77,8	22,21
N° 200	0,075	3,6	81,4	18,58
Tamanho Nominal Máximo		9.5mm		

Os percentuais de Pedregulho, Areia, Silte e Argila são apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7– Percentual de pedregulho, Areia, Silte e Argila do cascalho

Fração	Porcentagem (%)
Pedregulho	47,8
Areia grossa	12,8
Areia media	10,2
Areia fina	10,7
Silte+Argila	18,6

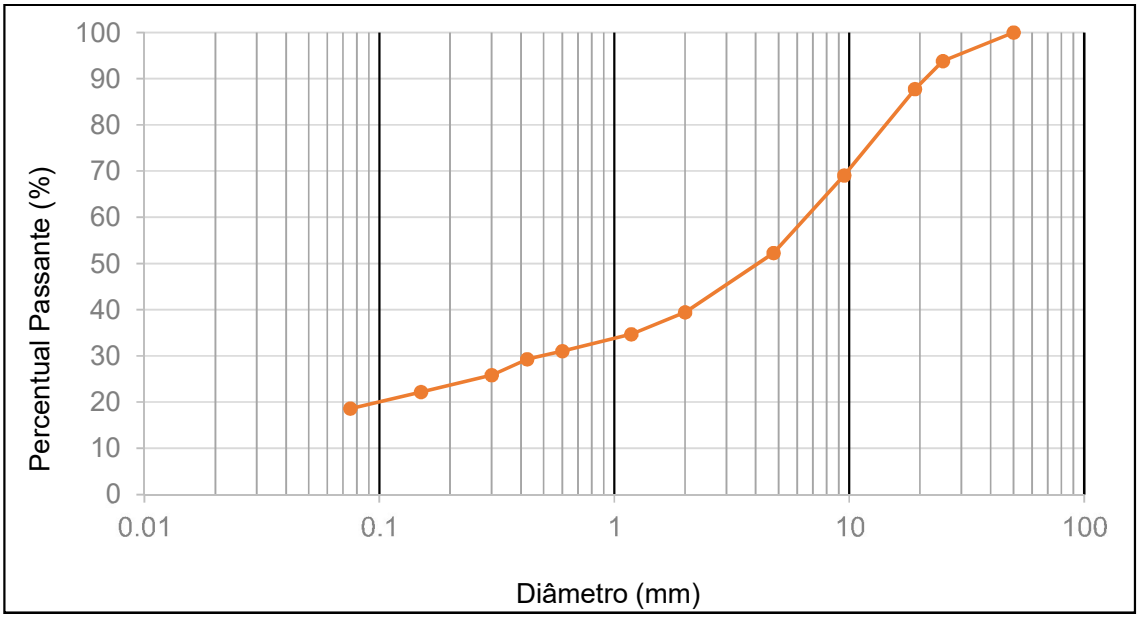
A partir dos valores obtidos foi feita a curva granulométrica da Figura 4.4. Já os demais valores, retirados do estudo feito por Rocha (2016) sobre este cascalho, são apresentados na Tabela 4.8. Além do ensaio de caracterização granulométrica, também foi feito ensaio triaxial para comparar o comportamento mecânico de uma base composta apenas por cascalho com bases compostas pelas misturas 3 e 4. O resultado do ensaio é apresentado no item 4.5 do Capítulo 4.

Tabela 4.8– Características do cascalho (ROCHA, 2016)

Parâmetros	**Cascalho Natural**
Limite De Liquidez (%)	40
Limite De Plasticidade (%)	26
Índice De Plasticidade (%)	14
Índice De Atividade (%)	1,61
Classificação SUCS	GM
Classsificação TRB	A-2-6
Massa Específica Fração Passantes Na Peneira 4,8mm (g/cm³)	2,95
Massa Específica Dos Grãos Retidos Na Peneira 4,8mm (g/cm³)	2,91
Absorção De Água	6,26

Obs.: SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos; TRB = Transportation Research Board; GM = Pedregulho com silte.

Figura 4.4– Curva granulométrica do Cascalho



4.4 MISTURAS SEM CASCALHO

As misturas 1 e 2 mostradas na Tabela 3.1 foram submetidas ao ensaio de compactação que resultou nas curvas mostradas nas Figuras 4.5 e 4.6. Nota-se um comportamento anômalo da curva de compactação, não sendo possível determinar o ponto de umidade ótima. As misturas compostas apenas pelos dois resíduos aparentemente não apresentaram boa absorção de água, talvez em virtude do betume aderido às partículas do RAP, pois se trata de um composto orgânico hidrofugante. Como consequência, observou-se uma considerável exsudação da água durante a compactação nas amostras com umidades próximas a 10%. Por essa razão, a umidade determinada após secagem das cápsulas não foi próxima da umidade presumível. Na mistura 1, a amostra com umidade presumível de 10% teve umidade das cápsulas de 5,54%, enquanto para a umidade presumível de 12%, o resultado foi 8,02%. O mesmo ocorreu com a mistura 2 na amostra de umidade presumível de 10%, que teve a umidade média das capsulas de 7,72%.

Figura 4.5– Curva de compactação da mistura 1

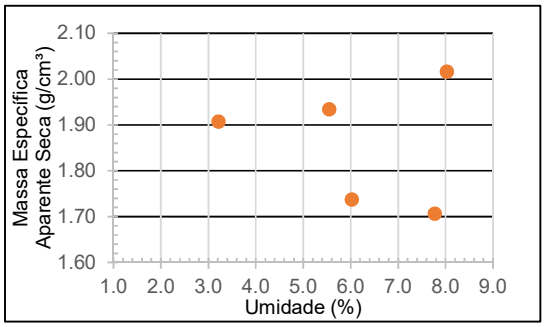
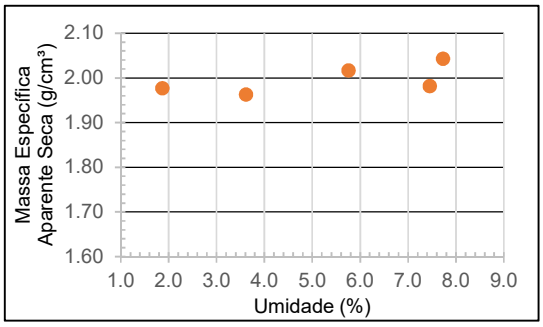


Figura 4.6– Curva de compactação da mistura 2

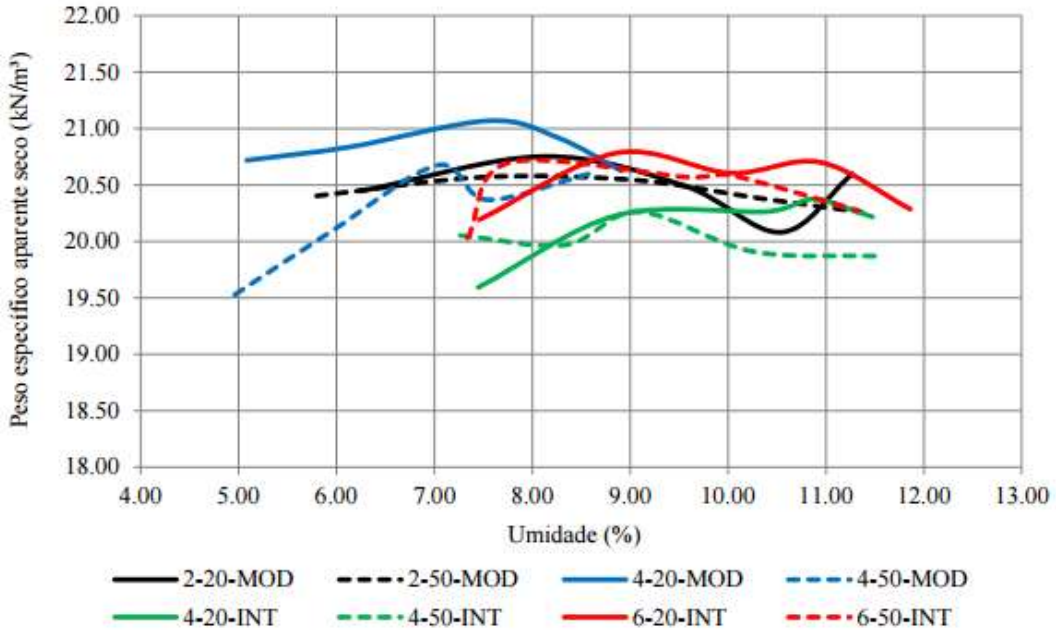


Em virtude do comportamento observado nos gráficos de compactação das misturas compostas apenas por RAP e resíduo de granito, optou-se pela adição do cascalho laterítico com intuito de melhorar o comportamento das misturas quando adicionadas de água. A determinação da umidade ótima de compactação tem grande importância no objetivo dessa pesquisa, pois possibilita a moldagem dos corpos de prova a serem submetidos ao ensaio triaxial dinâmico. Além disso, a obtenção de uma curva de compactação com apenas um pico de densidade seca permitiria um melhor controle de qualidade no caso de uma possível execução em obra.

No trabalho desenvolvido por Fedrigo (2015), em que foi avaliada a resistência à compressão de oito misturas diferentes constituídas por RAP, brita graduada e cimento; alterando, em cada uma delas, a porcentagem de fresado (20% e 50%), o teor de cimento (2%, 4% e 6%), a energia de compactação e o tempo de cura dos corpos de prova (3, 7 e 14 dias), os resultados obtidos dos ensaios mostraram que algumas misturas não atingiram uma curva de compactação com apenas um pico.

As curvas de compactação com as oito misturas realizadas por Fedrigo (2015) estão apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Curvas de compactação – Misturas de fresado, Cimento e Brita. Fonte: Fedrigo (2015)



Nesta pesquisa, como as misturas constituídas apenas de RAP e granito não apresentaram uma curva de compactação com umidade ótima bem definida, resolveu-se buscar outra mistura que pudesse obter essa característica. Vale ressaltar que não há por parte da pesquisa deste trabalho, o intuito de exaurir o tema com detalhes sobre as razões que possam ter causado tal desempenho, uma vez que o tema principal é a busca pela possibilidade de reaproveitamento do RAP e do pó de granito para a confecção de base e sub-base na pavimentação. No entanto, duas razões podem ser apontadas como hipóteses para o fato desse comportamento. No estudo realizado por Lee e Suedkamp (1972), em que foram feitos 700 ensaios de compactação com 35 tipos de solos diferentes, constatou-se que solos com baixo Limite de Liquidez (abaixo de 30%) ou solos altamente coesivos e com altos Limites de Liquidez (acima de 70%) possuem curvas de compactação com mais de um pico. Como nem o RAP nem o pó de granito são materiais coesivos, a suspeita é que a mistura possua baixo Limite de Liquidez. A segunda hipótese é a de como o RAP não se trata propriamente de um solo, mas sim de um material betuminoso que não permite uma boa absorção de água no seu interior, o ensaio de compactação não permite avaliar um padrão de comportamento existente na densidade seca máxima em função da umidade empregada.

4.5 MISTURAS COM CASCALHO

Conforme explicado na seção anterior, optou-se pela adição do cascalho laterítico a fim de melhorar o comportamento das misturas, quando adicionadas de água, e possibilitar o

prosseguimento do estudo com o ensaio triaxial dinâmico. A curva granulometrica da Figura 4.8 mostra a distribuição granulometrica das duas misturas 3 e 4 juntamente com o RAP e cascalho. De acordo com as faixas granulométricas do Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), a mistura 3 se enquadra na faixa C e a mistura 4 nas faixas D e E. Os ensaios de compactação, diferentemente do caso em que se usou apenas o pó de granito e o RAP, apresentaram curvas de compactação com umidade ótima (w_{ot}) bem definidas – conforme mostrado na Figura 4.9. A Tabela 4.9 especifica os valores de Wot e máximo peso específico aparente seco (γd) obtidos para as misturas 3 e 4.

Figura 4.8– Curvas de distribuição granulométrica das misturas 3 e 4

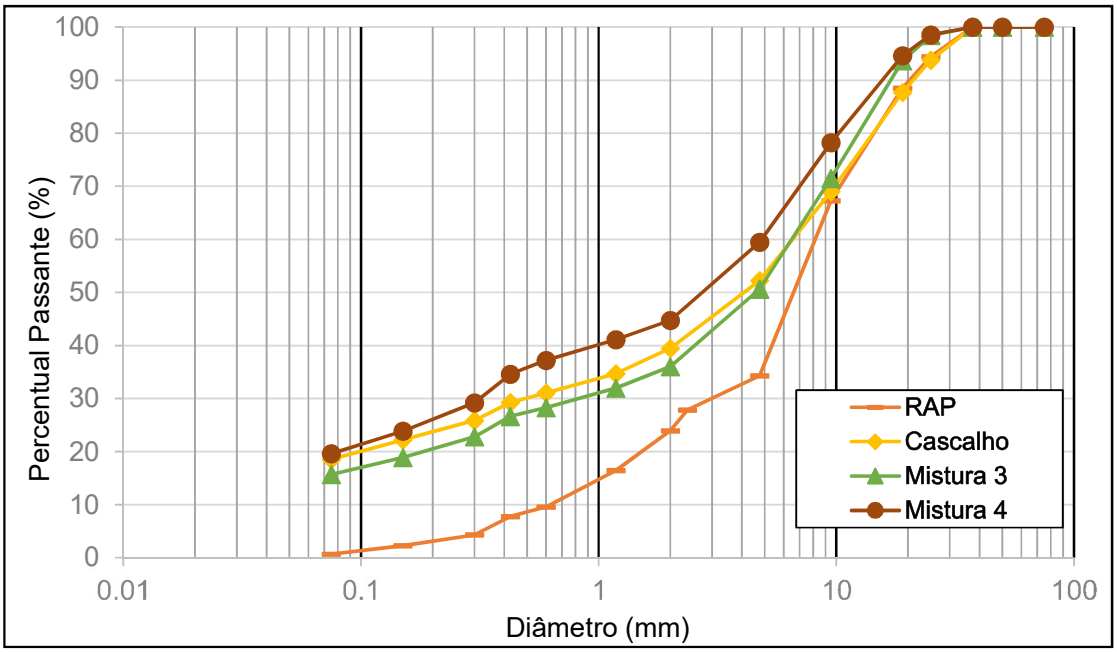
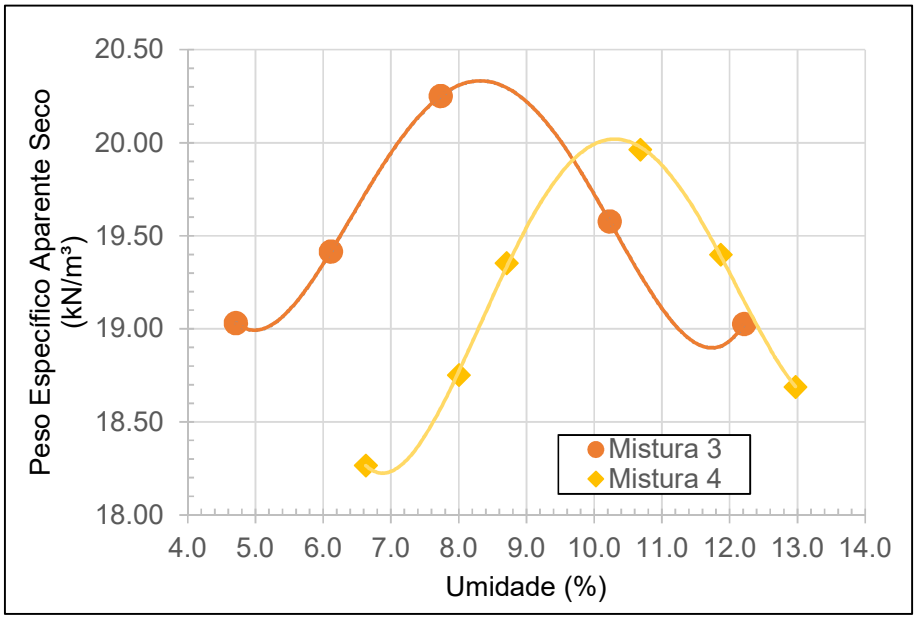


Tabela 4.9– Valores de umidade ótima e máximo peso especifico seco das misturas 3 e 4

Mistura	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m³)
3	8,19	20,34
4	10,25	20,01

Os dados obtidos mostram que a mistura 4, na qual houve uma maior quantidade de cascalho em relação ao RAP, apresentou uma maior umidade ótima. Tal fato pode ser justificado uma vez que o cascalho tem maior teor de que o RAP, o que aumenta a absorção de água da mistura.

Figura 4.9 – Curvas de compactação das misturas 3 e 4



Uma vez definido a umidade ótima de compactação, foi realizado o ensaio triaxial dinâmico. Foram moldados três corpos de prova (CP) para cada mistura analisada e dois para o cascalho puro. Os parâmetros obtidos na etapa de preparação dos mesmos são apresentados na Tabela 4.10. Os corpos de prova do cascalho foram moldados baseados na umidade ótima presumível a partir da análise tátil-visual. Por essa razão não foi inserido na Tabela 4.10 os valores de γdmax e grau de compactação. A analise tátil-visual resultou em uma umidade ótima presumível de 11%, semelhante ao valor encontrado por ROCHA, 2016, que foi de 11,1%.

Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na etapa de prepação dos corpos de prova

Material	Corpo de Prova	wot (%)	w (%)	Δw (%)	γd (KN/m³)	γdmax (KN/m³)	GC (%)
Mistura 3	CP 1	8.19	7.05	-1.14	20.05	20.74	98.5
	CP 2	8.19	7.26	-0.93	20.16	20.74	99.1
	CP 3	8.19	8.31	0.12	20.28	20.74	99.7
Mistura 4	CP 4	10.25	10.07	-0.18	20.00	20.74	99.9
	CP 5	10.25	9.83	-0.42	19.90	20.74	99.4
	CP 6	10.25	9.77	-0.48	19.92	20.74	99.5
Cascalho	CP 7	11.00	11.18	0.18	19.29	-	-
	CP 8	11.00	10.82	-0.18	19.41	-	-

Obs.:wot = umidade ótima obtida, w = umidade de compactação da amostra no triaxial dinâmico, Δw = variação da umidade nos ensaios, γdmax = peso específico aparente seco máximo, γd = peso específico aparente seco da amostra no triaxial dinâmico, GC = grau de compactação.

Os corpos de prova 1 e 2 tiveram umidade consideravelmente abaixo da umidade ótima esperada. Além disso, o módulo de resiliência apresentou valores bem distintos entre os três corpos de prova da mistura 3. Por essa razão, optou-se por desconsiderar os CP's 1 e 2 na análise dos resultados do ensaio triaxial. A Tabela 4.11 mostra os parâmetros resultantes do ensaio triaxial para o CP 3 da mistura 3. Já na mistura 4, os três corpos de prova resultaram em umidade próxima à umidade ótima e grau de compactação dentro do limite de erro de 1%. Porém, os módulos de resiliência resultantes do CP 5 foram consideravelmente maiores (até 40 vezes maior em alguns ciclos) que os valores dos CP's 4 e 6, portanto foi necessário excluí-lo da analise final. Em contrapartida, os CP's 4 e 6 tiveram comportamento semelhante, possibilitando assim a utilização dos dois resultados na análise final. Para tanto, foi tomada a média aritmética dos resultados desses CP's como sendo os parâmetros representativos da mistura 4. A Tabela 4.12 mostra os parâmetros resultantes do ensaio triaxial dos CP's 4 e 6. O mesmo foi feito para os CP's do cascalho, pois também apresentaram resultados semelhantes como mostrado na Tabela 4.13.

Tabela 4.11 - Resultado do ensaio triaxial do CP 3 - mistura 3

σ3 (MPa)	σd (MPa)	θ (MPa)	MR (MPa)
0.0207	0.0211	0.0832	589.8
	0.0425	0.1046	581.6
	0.0609	0.123	546.9
0.0345	0.0355	0.139	677.6
	0.0677	0.1712	613
	0.1038	0.2073	606
0.0504	0.0509	0.2021	731.5
	0.1017	0.2529	658.3
	0.1557	0.3069	666.9
0.0689	0.0688	0.2755	749.6
	0.1369	0.3436	734.8
	0.2078	0.4145	774.6
0.1029	0.1021	0.4108	862.5
	0.2076	0.5163	891.1
	0.3083	0.617	973.4
0.138	0.1373	0.5513	1050.7
	0.2752	0.6892	1070.1
	0.4114	0.8254	1146.2

Obs.: σ3 = Tensão confinante, σd = tensão desvio, θ = somatório das tensões principais MR = módulo resiliente

Tabela 4.12 - Resultado do ensaio triaxial doS CP'S 4 e 6 da mistura 4

σ3 (MPa)	CP 4			CP 6		
	σd (MPa)	θ (MPa)	MR (MPa)	σd (MPa)	θ(MPa)	MR (MPa)
0.0207	0.0204	0.0825	767.7	0.0195	0.0816	611.3
	0.0402	0.1023	650.3	0.0433	0.1054	654.1
	0.0635	0.1256	536.8	0.0605	0.1226	544.9
0.0345	0.034	0.1375	710.8	0.0328	0.1363	666.1
	0.0687	0.1722	567.2	0.0694	0.1729	602
	0.1019	0.2054	511	0.1019	0.2054	545
0.0504	0.0508	0.202	749.5	0.052	0.2032	755.6
	0.1031	0.2543	571.6	0.1018	0.253	607.1
	0.1558	0.307	561.6	0.1536	0.3048	583.9
0.0689	0.0692	0.2759	760.8	0.0693	0.276	757
	0.1381	0.3448	634.6	0.1371	0.3438	647.2
	0.2059	0.4126	643.5	0.2081	0.4148	670.6
0.1029	0.1028	0.4115	819.1	0.1034	0.4121	839.1
	0.2062	0.5149	763.4	0.2072	0.5159	779.4
	0.3098	0.6185	840.5	0.3096	0.6183	819.2
0.138	0.138	0.5523	937.5	0.1386	0.5529	955.2
	0.2742	0.6885	925.4	0.2747	0.689	918.1
	0.4121	0.8264	998	0.4123	0.8266	946.6

Obs.: σ3 = Tensão confinante, σd = tensão desvio, θ = somatório das tensões principais MR = módulo resiliente

Tabela 4.13 - Resultado do ensaio triaxial doS CP'S 7 e 8 do cascalho

σ3 (MPa)	CP 7			CP 8		
	σd(MPa)	θ(MPa)	MR (MPa)	σd(MPa)	θ(MPa)	MR (MPa)
0.0207	0.0204	0.0825	1226.1	0.022	0.0841	935.7
	0.0412	0.1033	1042	0.041	0.1031	1132.7
	0.0612	0.1233	1031	0.0619	0.124	1037.5
0.0345	0.0339	0.1374	1154	0.0356	0.1391	1281.4
	0.0698	0.1733	1086	0.0685	0.172	1091.4
	0.1028	0.2063	975.6	0.1026	0.2061	1014.9
0.0504	0.0513	0.2025	1122.1	0.0512	0.2024	1266.2
	0.1025	0.2537	981.1	0.103	0.2542	1087.4
	0.1543	0.3055	901.2	0.1559	0.3071	957.5
0.0689	0.0697	0.2764	1176.5	0.0697	0.2764	1297
	0.1373	0.344	990.3	0.1375	0.3442	1045.6
	0.2072	0.4139	907.1	0.2071	0.4138	977.9
0.1029	0.1028	0.4115	1158.6	0.1036	0.4123	1325.9
	0.2064	0.5151	1015	0.2067	0.5154	1125.8
	0.3093	0.618	1035.7	0.3092	0.6179	1104.1
0.138	0.1373	0.5516	1219.4	0.1369	0.5512	1399.1
	0.2743	0.6886	1112.3	0.2753	0.6896	1222.5
	0.4123	0.8266	1120.2	0.4122	0.8265	1199.9

Obs.: σ3 = Tensão confinante, σd = tensão desvio, θ = somatório das tensões principais '

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 contêm os gráficos mencionados no capítulo anterior: MR em função da tensão confinante (σ_3), MR em função da tensão desvio (σ_d), MR em função do somatório de tensões principais (θ) e MR em função da σ_3 e σ_d (modelo composto). Os três primeiros gráficos foram construídos utilizando o Excel e o gráfico em 3D, que representa o modelo composto, foi feito com auxílio do software Maple 18.

Os gráficos a e b das Figuras 4.10 e 4.11 mostram que o valor do módulo de resiliência de ambas as misturas é dependente da variação das tensões confinante e desvio, porém a mistura 3 apresenta maior sensibilidade para essa variação. Pode-se notar ainda que o modelo composto apresentou melhor valor de R^2 para ambas as misturas e também para o cascalho. Esse modelo é, portanto, a melhor opção para representar a variação do módulo resiliente sob carga dinâmica para ambas os três casos. A Tabela 4.14 mostra as equações geradas por cada um dos métodos para cada caso.

Figura 4.10– Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial dinâmico para a mistura 3 a) Modelo σ3 b) Modelo σd c) Modelo Θ d) Modelo Composto.

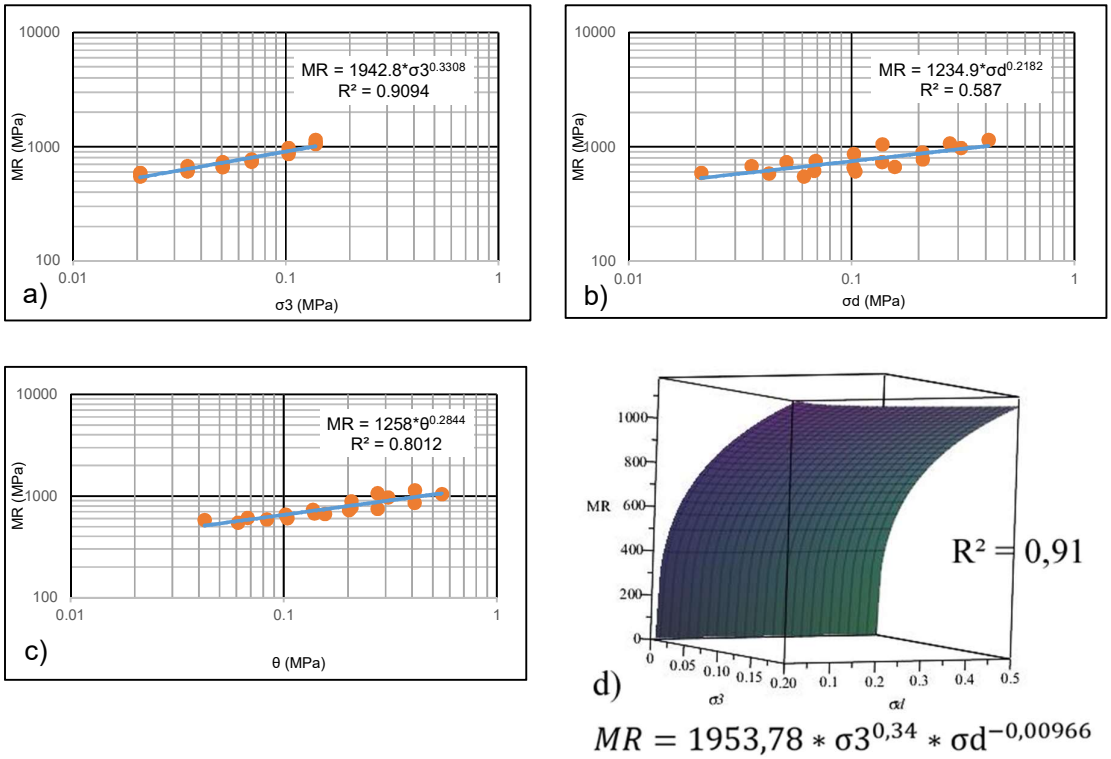


Figura 4.11 – Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial dinâmico para a mistura 4 a) Modelo σ3 b) Modelo σd c) Modelo Θ d) Modelo Composto.

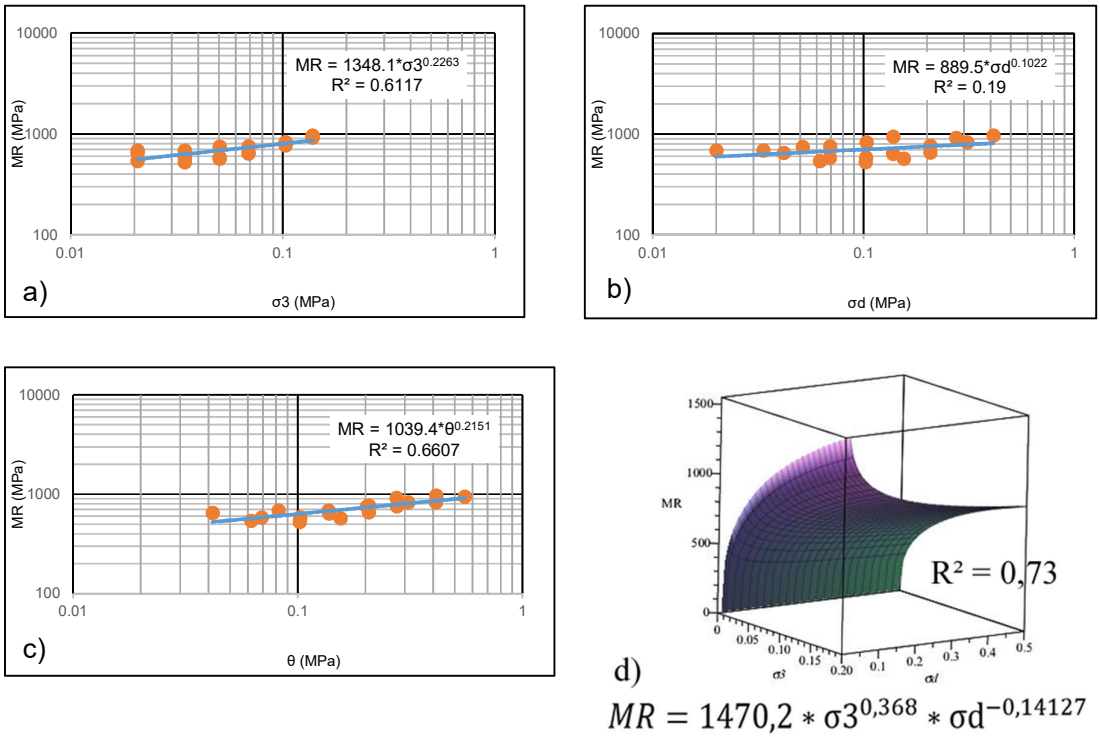


Figura 4.12 – Gráficos obtidos com os resultados do ensaio triaxial dinâmico para o cascalho a) Modelo σ3 b) Modelo σd c) Modelo Θ d) Modelo Composto.

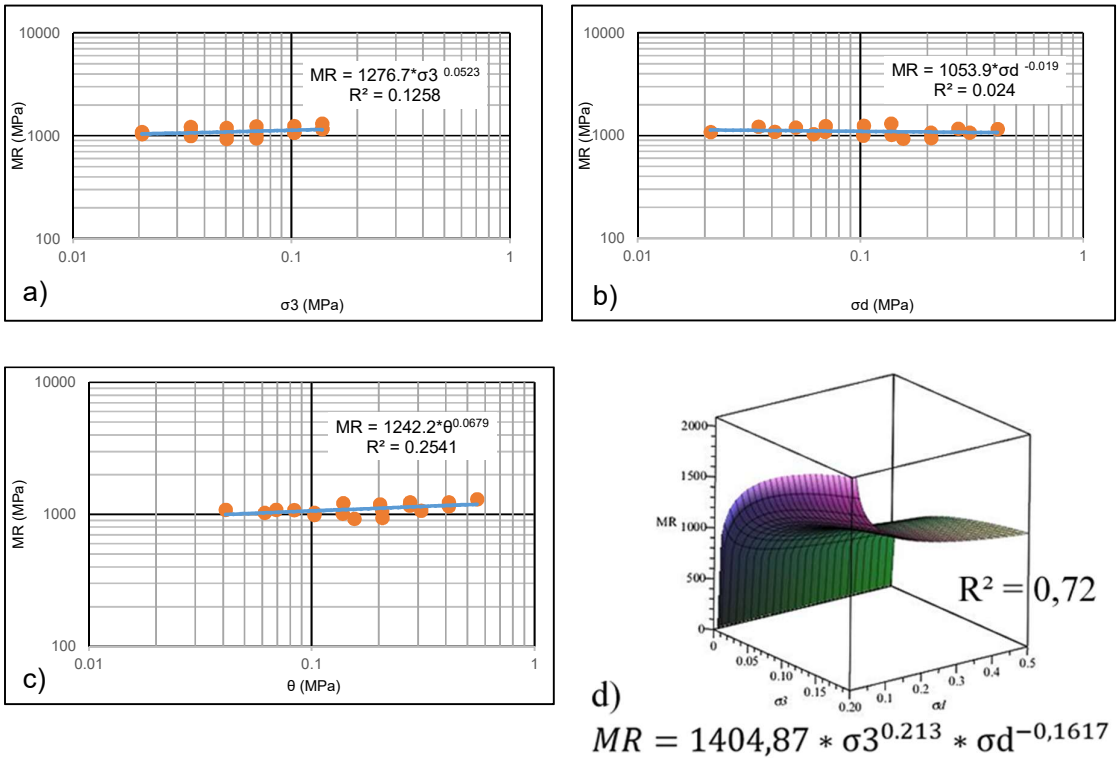


Tabela 4.14 – Resultados obtidos a partir do ensaio Triaxial

Material	Modelo	k1	k2	k3	Resultado	R²
Mistura 3	σ3	1942.85	0.331	-	$MR = 1942{,}85 * \sigma 3^{0{,}331}$	0.90
	σd	1234.91	0.218	-	$MR = 1234{,}91 * \sigma d^{0{,}218}$	0.58
	θ	1258.00	0.284	-	$MR = 1258 * \theta^{0{,}284}$	0.80
	Composto	1953.78	0.340	0.0097	$MR = 1953{,}78 * \sigma 3^{0{,}34} * \sigma d^{-0{,}00966}$	0.91
Mistura 4	σ3	1348.08	0.226	-	$MR = 1348{,}08 * \sigma 3^{0{,}226}$	0.61
	σd	889.50	0.102	-	$MR = 889{,}5 * \sigma d^{0{,}102}$	0.19
	θ	1039.40	0.215	-	$MR = 1039{,}4 * \theta^{0{,}215}$	0.66
	Composto	1470.20	0.368	0.1413	$MR = 1470{,}2 * \sigma 3^{0{,}368} * \sigma d^{-0{,}14127}$	0.73
Cascalho	σ3	1276.71	0.052	-	$MR = 1276.71 * \sigma 3^{0.052}$	0.13
	σd	1053.95	0.018	-	$MR = 1053.95 * \sigma d^{0.018}$	0.02
	θ	1242.20	0.067	-	$MR = 1242.2 * \theta^{0.067}$	0.25
	Composto	1404.87	0.213	0.1617	$MR = 1404{,}87 * \sigma 3^{0.213} * \sigma d^{-0{,}1617}$	0.72

A partir dos resultados da análise feita para o ensaio triaxial, foi analisada a viabilidade técnica da utilização das misturas e do cascalho como base de pavimento da rodovia escolhida para o estudo: GO-080. A razão da escolha dessa rodovia se deu em virtude do cascalho utilizado nesse estudo ser o mesmo utilizado como base da rodovia (ROCHA, 2016). Portanto, adotou-se a configuração do pavimento existente naquela rodovia.

Para a análise foi utilizado o software KENLAYER, que possibilitou a determinação do módulo de resiliência da camada de base por meio de um método analítico da teoria da elasticidade. Para tanto, foram utilizados os parâmetros abaixo para simular tanto a configuração do pavimento existente da rodovia, quanto a aplicação de carga do eixo padrão rodoviário:

- Carga atuante com 10,8 cm de raio e pressão de 560 kPa;
- Revestimento do tipo CBUQ com espessura de 5 cm, MR de 2000 MPa e coeficiente de Poisson (v) de 0,33;
- Camada de base com espessura de 20cm e v de 0,35. Foram aplicados vários valores de MR até convergência para o valor calculado pelo modelo composto;
- Camada de sub-base com espessura de 20cm, MR de 300 MPa e v de 0,40;
- Camada de subleito com espessura semi-infinita, MR de 100 MPa e v de 0,45.

A simulação feita no software resultou nos valores de de tensões mostrados na Tabela 4.15. Usando esses valores nas equações obtidas para cada material, obteve-se valores de módulo de resiliência de 466 MPa para a mistura 3, 411 MPa para a mistura 4 e 626 MPa para o cascalho. O valor do módulo de resiliência da mistura 3 foi superior ao da mistura 4. O

resultado condiz com o estudo de Costa, Bradshaw e Snyder (2014), que concluiram que misturas com maior teor de RAP possuem maior módulo de resiliência. Ainda avaliando os módulos resultantes, observa-se que todos estão inseridos na faixa de valores de módulo de resiliência sugerida por Bernucci *et al*. (2008) para aplicação como camada de base.

Tabela 4.15 – Tensões calculadas a partir do Software KENLAYER

Material	σ_d (MPa)	σ_3 (MPa)	MR (MPa)
Cascalho	0.21847	0.00714	626
Mistura 3	0.21105	0.01417	466
Mistura 4	0.20771	0.01719	411

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÓES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas na aérea de pavimentação com interesse na sustentabilidade do reaproveitamento de resíduo de granito e RAP. Os temas abordados são baseados nos dados obtidos ao longo deste estudo.

5.1 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível analisar as características e os parâmetros mecânicos de misturas contendo RAP, pó de granito e cascalho laterítico para a sua reutilização na execução de base e sub-base de pavimento. Além disso, avaliou-se a possibilidade de se usar apenas RAP e granito para esse mesmo fim, não obtendo, contudo, sucesso na obtenção de uma curva de compactação que possibilitasse a realização do ensaio triaxial.

Entretanto, a partir dos valores resultantes, no ensaio triaxial dinâmico, do módulo resiliente das misturas, pode-se concluir que as misturas contendo RAP, pó de granito e cascalho nas dosagens estudadas são viáveis tecnicamente. Ambas as misturas obtiveram módulos de resiliência acima de 400 MPa, satisfatórios para a aplicação como base ou sub-base de pavimento.

5.2 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

No intuito de complementar o estudo desenvolvido nesta pesquisa, são apresentadas algumas sugestões para as pesquisas futuras:

- Analisar misturas com teores de RAP superiores a 50%;
- Avaliar um maior número de corpos de prova para uma mesma amostra;
- Avaliar a viabilidade econômica da reutilização das misturas estudadas;
- Investigar a influência da granulometria do cascalho no resultado final do ensaio triaxial;
- Investigar a influência da presença de metais resultantes do beneficiamento do granito.
- Avaliar misturas com resíduo de granito produzidos por empresas de beneficiamento da região

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira e Normas Técnicas, NBR 6457: **Amostras de solo – Preparação paraensaios de compactação e ensaios de caracterização**, Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira e Normas Técnicas, NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira e Normas Técnicas, NBR 7181: **Solo – Análise granulométrica**, Rio de Janeiro, 1984.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **ABIROCHAS em Notícia**. Ano 1, numero 4, 2015. Disponível em: <https://issuu.com/abirochas/docs/abirochas_noticia_4>. Acesso em: 18 de out. 2016.

BALBO, J.T. **Concretos Asfálticos.** *In:* ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, p.1447-1480.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica, formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEBA, 2008, 504p.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **BNDES. Rochas ornamentais: exportações promissoras**. Luiz Mauricio da Silva Cunha Maria Lúcia Amarante de Andrade Elisa Seixas de Souza. 2003. Disponível em: < http://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 04 de NOVEMBRO DE 2016.

CALTRANS – STATE OF CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANPORTATION. **Interim Report Construction Completion for Cold-in-Place Recycling.** Marysville, CA, 2006

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2016: Relatório Gerencial**. 2016. Disponível em: <http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf>. Acesso em: 18 de nov. 2016.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002.** Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

CONCEIÇÃO, M.N.. **Avaliação Mecânica e Acústica do Pavimento Asfáltico Formado com Resíduos Oriundos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais.** 2010. Disponível em <http://biblio.cetem.gov.br>. Acesso em 05 de NOVEMBRO de 2016.

COSTA, J. M.; BRADSHAW, A. S.; SNYDER, R. L. **Resilient moduli of a naturally aged RAP and aggregate blend**. Geo-Congress 2014, Atlanta, Geórgia, p.3026-3034, 2014.

CUNHA, N. L.. **USO DE MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS PARA BASE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO MUNICÍPIO DE APARECIDA DE GOIÂNIA - GO**. 2011. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- UFG, Goiânia, 2011. Disponível em:<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/1341/1/Dissertacao%20part1%20Nelson%20Luis%20da%20Cunha.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

DNER – DEPARTAMENO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 083: Agregados - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998, 5p.

DNER – DEPARTAMENO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 195: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1997, 5p.

DNER – DEPARTAMENO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 53: Misturas betuminosas: Percentagem de betume.** Rio de Janeiro, 1994, 5p.

DNER – DEPARTAMENO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 84: Agregado miúdo – Determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1995, 3p.

DNER – DEPARTAMENO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 162/94: Solos – compactação utilizando amostras trabalhadas.** Rio de Janeiro, 1994, 7p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ª. ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em 05 de novembro de 2016.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 134/16: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016, 18p.

FEDRIGO, W. **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM**. 2015. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- UFRS, Porto Alegre, 2015. Disponível em:<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/118850/000969390.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 jun. 2017.

FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**. [S.l.]: Federal Highway Admnistration, 1997. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap134.cfm>. Acesso em: 02 nov. 2016.

GAEDE, P.M. **Gestão dos resíduos da construção civil no município de Vitória-ES e normas existentes**. 2008. 74p. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000. 135p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

HOLTZ, K; EIGHMY, T.T. Scanning european advances in the use of recycled materials in highway construction. **Public Roads**, United States of America, v 64, p. 34-40, 2000.

KEARNEY, E.J.; AND HUFFMAN, J.E. Full-Depth Reclamation Process. **Transportation Research Record 1684**, Paper No. 99-1209, 1999.

LEE P. Y.; SUEDKAMP, R. J. Characterization of irregularly shaped compaction curves of soils. Highway Research Record, Vol. 381, p. 1 – 9, 1972.

NAKAMURA, J. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**: Os tipos de revestimentos, o maquinário necessário e os cuidados na contratação, projeto e execução. 16. Disponível em: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/artigo260588-4.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2016.

NIELSEN, N. N.; HAUSER, B.; PREBER, T.; SEBAALY, D.J.; HUFT, D.; BANG, S. Quality Base Material Produced Using Full Depth Reclamation on Existing Asphalt Pavement Structure. **Federal Highway Administration,** FHWA Contract No. DTFH61-06-R-0003, 2007.

PATRÍCIO, S. M. R., Neves, G. A., Brasileiro, F. E., Ferreira, H. C. Ferreira, **Anais do 13º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Curitiba, PR (1998) p. 4385-4392.

REIS, A.S.; ALVAREZ, C.E. **A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais**. *In:* ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2007, Mato Grosso do Sul, **Anais…** Mato Grosso do Sul: ANTAC, 2007.

ROCHA, M.T. **Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação.** 2016. 99p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: PINI, 2001. v. 2. 761p.

WIRTGEN. **Manual de reciclagem a frio.** Wirtgen GmbH. Alemanha. 2ª ed. 2012.