



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



HAYANNE MACÊDO DE MELLO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS DE SUBLEITO DE PAVIMENTOS
COM A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E
GRANITO (RCMG)**

Cajazeiras - PB
2019

HAYANNE MACÊDO DE MELLO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS DE SUBLEITO DE PAVIMENTOS
COM A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E
GRANITO (RCMG)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Me. Laiana Ferreira da Costa

Cajazeiras - PB
2019

IFPB
Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

M527e

Mello, Hayanne Macêdo de

Estabilização de solos de subleito de pavimentos com a utilização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) / Hayanne Macêdo de Mello; orientadora Laiana Ferreira da Costa.- Cajazeiras, 2019.-
75 f.: il.

Orientador: Laiana Ferreira da Costa.
TCC (Bacharelado em Eng. Civil) – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

1. Pavimentação 2. Subleito 3. RCMG I. Título

CDU 514.11(0.067)

HAYANNE MACÊDO DE MELLO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS DE SUBLEITO DE PAVIMENTOS
COM A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E
GRANITO (RCMG)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Laiana Ferreira da Costa – IFPB - *Campus* Cajazeiras

Orientadora

Prof.^a Me. Thays Nogueira Rodrigues – UFCA – *Campus* Juazeiro do Norte

Examinadora Externa

Prof.^a Esp. Ornella Almeida Lacerda Lira – IFPB - *Campus* Cajazeiras

Examinadora Interna

Cajazeiras, 12 de março de 2019

Este trabalho é dedicado à minha família, o bem mais precioso que tenho nesta vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, que nos momentos mais difíceis, me deu forças para vencer as dificuldades e conseguir concluir essa jornada.

Aos meus pais, Valci Alves e Maria Ailê, pelo apoio e confiança em todos os momentos de minha vida. Obrigada por todo carinho e amor que sempre me deram, me fortalecendo para seguir em frente. Amo vocês.

Aos meus irmãos, Harley e Halison, pela amizade, pelos conselhos e ensinamentos. Essa conquista é nossa. Vocês são essenciais em minha vida.

Aos amigos, em especial a minha cunhada Renata Kalina pelo incentivo, companheirismo e ajuda no desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas do IFPB pelo companheirismo e apoio nas horas difíceis, em especial: Elissandra, Francisco Gonçalves, John Williams e Monaliza.

A Leonardo e Mayza pelo esforço e ajuda durante os ensaios de laboratórios. Muito obrigada pela ajuda, serei eternamente grata a vocês.

A minha orientadora Prof^a. Me. Laiana, pela dedicação, por todo conhecimento transmitido e pela paciência que teve durante a realização desta pesquisa. Você é um exemplo de pessoa e professora, uma inspiração para mim.

Ao Instituto Federal da Paraíba, IFPB, pela oportunidade de realização de trabalhos na área de pesquisa.

Ao Laboratório de Geotecnia do IFPB pela realização dos ensaios, sob a orientação da técnica do laboratório Mery Angela.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria, pela disponibilidade e apoio tecnológico prestado.

A Cerâmica Irmãos Rolim, pelo apoio no fornecimento do solo utilizado nesta pesquisa.

A Marmoraria Cajamar, pelo fornecimento de dados e do resíduo.

E a todos que contribuírem de forma direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa, a todos os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Grande parte dos processos industriais no setor de extração e beneficiamento de rochas ornamentais são fontes geradoras de resíduos, entre eles o Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG) gerado no processo de acabamento final nas marmorarias. O resíduo gerado nesse setor, quando não tratado ou descartado em locais inapropriados podem provocar impactos ambientais, tais com degradação de mananciais, assoreamento de rios, ocupação inadequada de áreas férteis e poluição do ar. Sendo assim, esse estudo consiste na análise da viabilidade técnica da utilização do RCMG na estabilização de solos de subleito de pavimentos propondo, então, uma reintrodução desse resíduo na cadeia produtiva, amenizando os sérios problemas ambientais oriundos do descarte inadequado e ainda proporcionando uma minimização da extração de agregados naturais. Os teores de RCMG, em peso, adicionados ao solo natural estudado foram de 10%, 25% e 35%, determinados com base em uma pesquisa bibliográfica. O solo natural, o resíduo e as composições (solo + RCMG) foram caracterizados por meio dos ensaios de análise granulométrica, massa específica, limite de liquidez e limite de plasticidade. Em seguida, foram realizados os ensaios de compactação Proctor para a determinação da umidade ótima e do peso específico máximo e o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) para a obtenção da capacidade de suporte de carga e do valor da expansão do solo natural e das composições. Verificou-se que o teor de 25% apresentou as melhores condições para ser utilizado como material de corpo de aterro de subleito de um pavimento, com base nas especificações do Departamento Nacional de Infraestruturas e Transportes (DNIT). Dessa forma, a adição do resíduo de corte de mármore e granito no solo apresentou-se viável tecnicamente para ser utilizado como estabilizante de solos de subleito de rodovias.

Palavras-Chave: Estabilização, pavimentação, subleito, RCMG.

ABSTRACT

Most of the industrial processes of extraction and processing of ornamental stone sector are waste generating sources, among them the Marble and Granite Cutting Residue (MGCR), generated in the final touch process. The waste generated in this sector, when untreated or discarded in inappropriate places can cause environmental impacts, such as water sources degradation, siltation of rivers, fertile areas improper occupation and air pollution. Thus, this study is a technical feasibility analysis of using MGCR into subgrade soil stabilization, hence, proposing a reintroduction of this waste into the production chain, mitigating the serious environmental problems originated from inappropriate disposal and yet providing an environmental gain by minimizing natural aggregates extraction. The MGCR contents, by weight, added to the studied soil were 10%, 25% and 35%, determined on the basis of a bibliographic survey. The natural soil, the waste product, and compositions (soil + MGCR) were characterized by the granulometric analysis tests, specific weight, liquid limit, and plastic limit. Thereafter, Proctor compaction tests were performed to determine the optimum moisture, maximum unit weight, and *California Bearing Ratio* (ISC or CBR) test to obtain the load bearing capacity and the natural soil and compositions expansion value. It was found the 25% yield presented better conditions to be used as landfill body material for the subgrade of a pavement, based on the specifications of the National Department of Infrastructures and Transportation (DNIT). Therefore, marble and granite cuttings addition to the soil was technically feasible to be used as a subgrade soil stabilizer in highways.

Keywords: Stabilization, paving, subgrade, MGCR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura tipo de pavimento flexível	21
Figura 2 – Estrutura tipo de pavimento semirrígido.....	22
Figura 3 – Estrutura tipo de pavimento rígido.....	22
Figura 4 – Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2017.....	27
Figura 5 – Empresas do setor de rochas operantes no Brasil - 2017.....	27
Figura 6 – Fluxograma das etapas do beneficiamento de rochas de mármore e granito	29
Figura 7 – Escala granulométrica ABNT e AASHO.....	32
Figura 8 – Curva de compactação.	35
Figura 9 – Curva de compactação de um solo com diferentes energias.....	37
Figura 10 – Sequência de atividades desenvolvidas na pesquisa	39
Figura 11 – Jazida do solo natural	40
Figura 12 – Coleta da amostra de solo. a) colocação do solo nos sacos de linhagem, b) solos coletados armazenados no laboratório.....	41
Figura 13 – Beneficiamento secundário de mármore e granito. a) depósito das chapas brutas, b) máquina de corte serrando a chapa bruta, c) transporte da lama para o tanque, d) lama em processo de decantação.....	42
Figura 14 – Processo de acabamento final na marmoraria. a) acabamento das peças, b) polimento com lixas.	43
Figura 15 – Esquema de classificação pelo método da SUCS	44
Figura 16 – Esquema de classificação pelo método TRB	45
Figura 17 – Preparação das amostras para ensaios de caracterização. a) secagem das amostras ao ar livre até a umidade higroscópica, b) destorroamento com a mal de gral e almofariz, c) quarteamento	46

Figura 18 – Etapas do ensaio de granulometria por peneiramento. a) passagem do material na peneira de 2mm, b) conjunto de peneiras no agitador mecânico.....	47
Figura 19 – Etapas do ensaio de granulometria por sedimentação. a) amostra imersa na solução, b) amostra após 12h de imersão, c) amostra no aparelho dispersor, d) leitura do densímetro e verificação da temperatura.	47
Figura 20 – Etapas do ensaio de massa específica. a) amostra imersa em água, b) amostra no aparelho dispersor, c) amostra na bomba à vácuo, d) pesagem do picnômetro + amostra + água.....	48
Figura 21 – Determinação dos limites de consistência . a) limite de liquidez, b) limite de plasticidade	50
Figura 22 – Etapas do ensaio de compactação. a) homogeneização, b) compactação, c) extração do corpo de prova, d) coleta de amostra para determinar a umidade.....	51
Figura 23 – Etapas do ensaio de CBR. a) imersão do corpo de prova, d) penetração.....	52
Figura 24 – Curva granulométrica do solo natural	54
Figura 25 – Curva granulométrica do RCMG	56
Figura 26 – Curva granulométrica do solo e do resíduo	57
Figura 27 – Curva granulométrica das amostras	59
Figura 28 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos	61
Figura 29 – Curva de compactação do solo natural.....	62
Figura 30 – Resultados do teor de umidade ótima	63
Figura 31 – Resultados da massa específica aparente seca máxima	63
Figura 32 – Curva de compactação das amostras.....	64
Figura 33 – Resultados de expansão média das amostras	65
Figura 34 – Resultados do CBR médio das amostras.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações para camada de reforço de subleito.....	23
Quadro 2 – Especificações para camada de sub-base.....	23
Quadro 3 – Especificações para camada de base	23
Quadro 4 – Especificações para o subleito.....	24
Quadro 5 – Classificação quanto ao coeficiente de uniformidade	32
Quadro 6 – Classificação quanto ao coeficiente de curvatura.....	33
Quadro 7 – Classificação quanto a plasticidade	33
Quadro 8 – Energias de compactação	36
Quadro 9 – Energias de compactação para cada camada	37
Quadro 10 – Ensaio realizados na pesquisa e suas respectivas normas.....	44
Quadro 11 – Resultados do ensaio de granulometria do solo natural	53
Quadro 12 – Resultados do ensaio de massa específica e índices de consistência do solo natural.....	55
Quadro 13 – Resultados do ensaio de granulometria do RCMG	55
Quadro 14 – Resultados do ensaio de massa específica e índices de consistência do RCMG.....	58
Quadro 15 – Resultados do ensaio de granulometria das amostras.....	58
Quadro 16 – Resultados dos índices de consistência	60
Quadro 17 – Classificação das amostras	61
Quadro 18 – Resultados do ensaio de compactação.....	62
Quadro 19 – Resultados do ensaio de expansão e CBR.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CC	Coeficiente de Curvatura
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CNT	Conferência Nacional de Transporte
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CU	Coeficiente de Uniformidade
DDA	Disco de Desbaste
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
ES	Especificação de Serviço
hot	Umidade ótima
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MR	Módulo Resiliente

N	Número de operação de eixo padrão
NBR	Norma Brasileira Registrada
ND	Não determinado
NP	Não plástico
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCMG	Resíduo de Corte de Mármore e Granito
RCS	Resistência à Compressão Simples
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SNV	Sistema Nacional de Viação
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
Ys máx	Peso específico máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	PAVIMENTO	20
2.1.1	Classificação dos Pavimentos	21
2.1.2	Especificações para as Camadas do Pavimento	22
2.1.3	Especificações para o Subleito do Pavimento.....	24
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	25
2.3	SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	26
2.4	RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO.....	28
2.5	EXPERIÊNCIAS COM RESÍDUOS DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO..	29
2.6	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	31
2.6.1	Caracterização Física.....	31
2.6.2	Sistema de Classificação dos Solos.....	34
2.6.3	Compactação e CBR	35
3	MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA NA PESQUISA.....	39
3.1	MATERIAIS	40
3.1.1	Solo Natural.....	40
3.1.2	Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG)	41
3.2	METODOLOGIA	43
3.2.1	Ensaio Realizados	43

3.2.1.1	Análise Granulométrica.....	46
3.2.1.2	Massa Específica	48
3.2.1.3	Limites de Consistência.....	49
3.2.1.4	Ensaio de Compactação.....	50
3.2.1.5	Ensaio de CBR	51
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	53
4.1.1	Solo Natural.....	53
4.1.2	RCMG	55
4.1.3	Composições	58
4.2	COMPACTAÇÃO	61
4.3	EXPANSÃO E CBR	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	68
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT) o setor rodoviário brasileiro é responsável pela integração da maior parte do sistema de transporte no país, sendo a principal alternativa para a movimentação de cargas e pessoas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional.

A malha rodoviária nacional composta por 1.735.621km de rodovias apresenta 212.866km pavimentados, representando cerca de 12,3% do total. No ano de 2017 a CNT realizou uma avaliação de 105.814km de rodovias federais e estaduais pavimentadas em todo o país. Da extensão total avaliada, 61,8% apresentam algum tipo de deficiência, sendo considerada 33,6% em estado regular, 20,1% ruim e 8,1% péssimo. Neste estudo, foi identificado que a maior parte das deficiências está associada ao não atendimento das exigências técnicas, tanto da capacidade de suporte como da qualidade dos materiais empregados nas camadas do pavimento (CNT, 2017).

Um requisito básico na concepção de uma rodovia é que os materiais que compõem as diferentes camadas do pavimento, inclusive o solo de subleito, apresentem características tais que confirmem estabilidade e resistência mecânica quando submetidos aos esforços solicitantes do tráfego durante a vida útil do pavimento (PATRICIO, 2015). Segundo Sartori (2015) no processo de execução da estrutura do pavimento, para uma melhor viabilidade técnica e econômica da obra, o ideal é utilizar o solo já existente no local, no entanto, ocorre que nem sempre o mesmo atende as especificações mínimas exigidas para a sua utilização.

Dentro desse contexto, se sobressai a técnica de estabilização de solos utilizada para melhorar as características do material *in loco* ao invés de elevar o custo da obra com transporte de materiais de empréstimo, contribuindo também para a diminuição da exploração de recursos naturais, que por sua vez encontra-se em crescente escassez. Para Senço (2001), estabilizar um solo significa dar a ele condições de resistir a deformações e ruptura durante todo o período em que sua função exija atender a tais características.

Nos últimos anos, várias pesquisas foram desenvolvidas (BEHAK, 2007; GRUBBA, 2009; HORTEGAL et al., 2009; NETO et al., 2016; ROQUE, 2017) no intuito de avaliar o comportamento do solo quando estabilizado com resíduos provenientes dos mais diferentes

processos (Indústria da Construção Civil; Agroindústria) e mostraram que tais materiais alternativos proporcionam melhorias nas características de solos naturais.

A indústria de extração e beneficiamento de rochas ornamentais vem apresentando grande crescimento associado à elevada geração de resíduos nas três etapas do seu processo produtivo: extração de rochas nas pedreiras; corte dos blocos de rocha e serraria e acabamento final nas marmorarias (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). O Brasil é o quarto maior produtor mundial nesse ramo industrial, possuindo cerca de 10.000 empresas, dentre as quais pelo menos 400 exportadoras regulares, integram sua cadeia produtiva e respondem por 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos. Dentre as empresas desse setor, as marmorarias perfazem mais de 60%, sendo responsáveis pela maior parte dos empregos agregados ao setor de rochas no Brasil (ABIROCHAS, 2018).

Segundo Gonçalves (2000), o Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG), gerado na fase de serraria e acabamento final das rochas nas marmorarias, foi estimado em 165 mil toneladas. Oito anos depois passou para um milhão e 250 mil toneladas, gerando um aumento de 95% ao ano (FILHO, 2008). Essa grande quantidade de resíduo quando não tratado ou descartado em locais inapropriados podem gerar impactos ambientais, tais como degradação de mananciais, assoreamento, ocupação de áreas férteis pela deposição irregular do resíduo, poluição do ar com emissão de particulados e turvamento dos cursos de água. Esses problemas estão relacionados diretamente com o porte do empreendimento, a localização, as características sociais e ambientais de entorno e as tecnologias utilizadas no processo. (MOHNOT et al., 2016).

A utilização do resíduo de mineração vem sendo estudado na fabricação de cerâmicas (MELLO, 2006), produção de argamassa (APOLINÁRIO, 2014), concreto (GONÇALVES, 2000), e na área de pavimentação na produção de mástiques de concreto betuminoso (BERNUCCI et al., 2005), de bases e sub-base (ALECRIM, 2009), além de ser utilizado como agregado mineral em misturas asfálticas (MARTIN et al., 2008).

Nesse contexto, destaca-se a importância da avaliação desse resíduo na estabilização de solos de subleito de pavimentos, com o objetivo de avaliar sua influência nas características do solo natural (índice de grupo (IG), granulometria, massa específica, limites de consistência, teor de umidade ótimo, expansão e capacidade de suporte) o que proporcionará um panorama

sobre possíveis mudanças proporcionadas pelo RCMG nas propriedades físicas e mecânicas do solo estudado.

Sendo assim, esse estudo consiste na análise da viabilidade técnica do uso de RCMG na estabilização de solos de subleito, por meio de ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica. A finalidade dessa pesquisa é compreender as mudanças de comportamento de um solo estabilizado com RCMG como forma de contribuir para a reintrodução desse resíduo na cadeia produtiva, amenizando assim os sérios problemas ambientais oriundos do descarte inadequado desse resíduo e proporcionando um ganho ambiental pela minimização da extração de agregados naturais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial técnico da utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG), proveniente do beneficiamento secundário na marmoraria, visando seu emprego na estabilização de solos de subleito de um pavimento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter a caracterização física do solo natural, do resíduo e das composições (solo/resíduo);
- Classificar o solo natural, o RCMG e as composições conforme métodos da *Transportation Research Board* (TRB) e do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS);
- Determinar a umidade ótima e a massa específica máxima para o solo no estado natural e para as composições;
- Determinar o índice de suporte de carga e o valor da expansão para o solo no seu estado natural e para as composições;

- Comparar os resultados de ensaios de caracterização e de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) do solo natural com as composições, através de parâmetros estabelecido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT).
- Determinar o teor ótimo de adição do RCMG no solo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Uma breve descrição sobre o que será abordado em cada capítulo está descrita a seguir:

No Capítulo 1 está apresentada a introdução, contextualizando o tema proposto, a justificativa, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando temas sobre o pavimento e suas classificações, as principais camadas que compõe sua estrutura e estabilização de solos. Além de explanar sobre o setor de rochas ornamentais e o resíduo de corte de mármore e granito. Também abordará informações importantes sobre os ensaios laboratoriais que serão realizados na pesquisa.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados e os métodos adotados na realização do trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões a respeito da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne informações bibliográficas importantes para o desenvolvimento desta pesquisa, coletadas em publicações correntes. Inicialmente, será abordado sobre a definição e classificação dos pavimentos, bem como as características de suas camadas constituintes. Posteriormente, será explicada a técnica de estabilização de solos, indicando os principais métodos e elencando algumas pesquisas relevantes sobre o assunto. Em seguida, será apresentado uma breve explanação sobre rochas ornamentais, abordando o setor industrial e o resíduo de corte de mármore e granito, finalizando com uma síntese de informações dos ensaios laboratoriais realizados na pesquisa.

2.1 PAVIMENTO

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define pavimento como sendo uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre o terreno de fundação, a qual é designada de subleito.

Este tipo de estrutura tem como função principal suportar os esforços oriundos de cargas e de ações climáticas, sem que apresentem processos de deterioração de modo prematuro. Dessa forma, a pavimentação está destinada a proteger as camadas inferiores das intempéries e proporcionar aos usuários um tráfego seguro, confortável e regular (BALBO, 2007). Para isso, é necessário que o pavimento apresente requisitos mínimos, quanto ao nível funcional e estrutural.

Em relação ao nível funcional deve ser garantida a aderência (pneu/pavimento), uma baixa geração de ruído, a drenagem de águas superficiais e a resistência do pavimento para suportar os esforços solicitantes do tráfego, além de garantir a impermeabilidade com o objetivo de proteger as camadas inferiores. Quanto ao nível estrutural deve ser verificada a capacidade de suporte do pavimento frente as solicitações impostas pelo tráfego de veículos e dos agentes climáticos (FERNANDES, 2012).

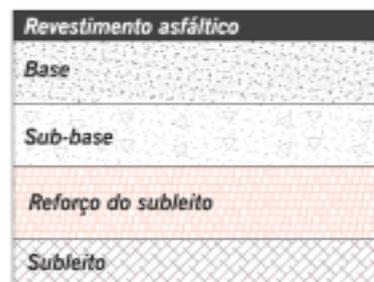
A estrutura do pavimento é composta por subleito, leito, sub-base, base e revestimento asfáltico ou placa de concreto. Cada camada é composta por materiais de características e propriedades distintas, que se comportam de maneira diferente quanto à deformação, quando

submetidos a carregamentos externos (SILVA E CARNEIRO, 2014). A ausência de alguma dessas camadas, irá depender do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez, espessura das camadas, e condições ambientais (BERNUCCI et al., 2008).

2.1.1 Classificação dos Pavimentos

De maneira geral, os pavimentos são classificados em: flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis, objeto de estudo, são aqueles em que todas as camadas sofrem deformações elásticas, apresentando grande flexibilidade e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Em geral essa estrutura é composta por uma camada de revestimento asfáltico, apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos (BERNUCCI et al., 2008). A Figura 1 mostra uma estrutura tipo de pavimento flexível.

Figura 1 – Estrutura tipo de pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al, 2008

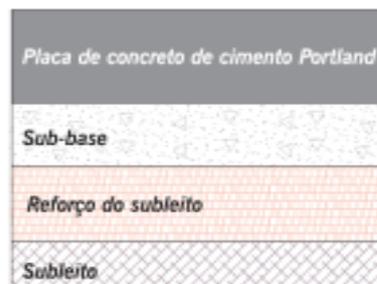
Os pavimentos flexíveis apresentam vantagens em relação aos demais tipos de pavimentos, entre elas podemos citar as mais importantes: menor custo inicial, se adaptam a eventuais recalques do subleito, rapidez na execução e liberação ao tráfego e reparações fáceis e rápidas (RODRIGUES, 2017).

Os pavimentos semirrígidos, são uma situação intermediária entre os flexíveis e os rígidos, sendo caracterizado por apresentar uma camada de materiais granulares tratados por algum aglutinante e uma camada de sub-base estabilizada mecanicamente (SANTOS, 2010). A Figura 2 mostra uma estrutura tipo de pavimento semirrígido.

Figura 2 – Estrutura tipo de pavimento semirrígido

Fonte: DER-PR, 2008

Os pavimentos rígidos por sua vez, são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento portland, que possui uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006). A camada de revestimento pode ser feita com concreto pré-moldado ou produção *in loco*, apresentando suas particularidades de projeto, execução, operação e manutenção (BALBO, 2007).

Figura 3 – Estrutura tipo de pavimento rígido

Fonte: Bernucci et al, 2008

2.1.2 Especificações para as Camadas do Pavimento

De acordo com Bernucci et al. (2008), as camadas dos pavimentos flexíveis precisam apresentar propriedades para suportar as cargas de tráfego definidas em projeto. Para as camadas de base e sub-base são requeridos materiais que não possuam coesão (a não ser aparente pela sucção), e que não resistam à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. São aceitáveis também os 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.

A camada de reforço do subleito pode ou não existir. Sua presença se dá quando o material do subleito possui qualidade inferior ou em casos que se deseja reduzir as espessuras das camadas granulares, de base e sub-base (BALBO, 2007). Segundo a norma DNIT 138/2010 os materiais constituintes são solos ou mistura de solos, de qualidade superior à do subleito.

O DNIT estabelece em suas especificações de serviço os valores máximos e mínimos de expansão e CBR, respectivamente, a serem obtidos pelo solo, para serem utilizados nas camadas de reforço do subleito, sub-base e base estabilizada granulometricamente como mostra os Quadros 1, 2 e 3.

Quadro 1 – Especificações para camada de reforço de subleito

CBR (%)	Expansão máxima (%)
Superior ao do subleito	$\leq 1,0$

Fonte: DNIT 138/2010 - ES

Quadro 2 – Especificações para camada de sub-base

Tipo de Solo	CBR (%)	Expansão Máxima (%)	Índice de Grupo
Tradicional	≥ 20	$\leq 1,0$	0
Laterítico	≥ 20	$\leq 0,5$	$\neq 0$

Fonte: DNIT 139/2010 - ES

Quadro 3 – Especificações para camada de base

Operação de Eixo Simples	CBR (%)	Expansão Máxima (%)
$N \leq 5 \times 10^6$	≥ 60	$\leq 0,5$
$N > 5 \times 10^6$	≥ 80	$\leq 0,5$

Fonte: DNIT 141/2010 - ES

2.1.3 Especificações para o Subleito do Pavimento

Lekna et al. (2015) define subleito como sendo uma estrutura formada por solo natural, sobre a qual são colocadas as demais camadas granulares do pavimento. Dessa forma, a qualidade e a estabilidade dessa estrutura são os principais fatores responsáveis pelo desempenho adequado e serviço de qualquer estrada durante a sua vida útil.

O subleito deve ser considerado e estudado até as profundidades em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego, geralmente em torno de 0,60 a 1,50m de profundidade. Ele também deve ser constituído de solos que não apresentem expansão elevada quando saturados e devem proporcionar boa capacidade de suporte (MARQUES, 2006).

O DNIT estabelece em suas especificações de serviço os valores máximos e mínimos de expansão e CBR para o subleito, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Especificações para o subleito

Camada	CBR (%)	Expansão máxima (%)
Corpo do aterro	$\geq 2,0$	$\leq 4,0$
Final	$\geq 2,0$	$\leq 2,0$

Fonte: DNIT 108/2009 - ES

Se essas considerações não forem alcançadas, o solo dever ser substituído por um material melhor, ou deverá ser feito a estabilização do mesmo.

Tecnicamente recomenda-se que o subleito apresente solos, com grau de compactação mínimo de 100% obtido através do ensaio de densidade “in situ” com emprego do frasco de areia, normatizado pela NBR 7185/2016. Quanto ao ensaio de compactação realizado no laboratório deve ser utilizado a energia de Proctor Normal. Para solos finos lateríticos ou para solos granulares pode ser utilizada a energia de 100% do Proctor Intermediário (CINTRA, 2012).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A técnica de estabilização de solos é definida como sendo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos (MACHADO et al., 2017). Em geral, existem três principais métodos de estabilização de solos: mecânico, granulométrico e químico, estes podem ser usados individualmente ou em conjunto.

A estabilização mecânica por compactação é considerada o método mais utilizado e mais antigo na construção de estradas, e consiste na redução do volume de vazios pela aplicação sucessivas de cargas no solo, aumentando a densidade, durabilidade, compacidade, e, conseqüentemente, a resistência mecânica do solo. Por outro lado, a estabilização granulométrica consiste na mistura de dois ou mais materiais com diferentes tamanhos de partículas, em proporções adequadas, visando produzir um novo material homogeneizado com propriedades de engenharia desejado (LIM et al., 2014).

Segundo Guimarães (2002), a estabilização química, refere-se ao procedimento no qual uma quantidade de material químico orgânico ou inorgânico é adicionada ao solo natural, para melhorar suas propriedades. Os estabilizantes mais usuais são materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, cimento Portland, cal, pozolanas e outros.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na área de estabilização de solos, principalmente utilizando resíduos de diversos processos como agente estabilizante, dentre os quais pode-se citar o uso de rejeito de quartzito (ALECRIM, 2006), o uso de resíduos de construção e demolição - RCD (HORTEGAL et al., 2009) e o uso de fibras de polipropileno (NETO et al., 2016), todos com aplicação nas camadas que constituem os pavimentos flexíveis.

No estudo de Alecrim et al (2006) foi comprovado que a proporção de 60% de rejeito de quartzito apresentou o melhor desempenho relativo aos ensaios de CBR e do Módulo Resiliente (MR). Quanto a adição do RCD, o autor concluiu que a composição solo-RCD analisada era de uso promissor na pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas aceitáveis de acordo com as normas consultadas. Em relação ao resíduo de fibras de polipropileno adicionados ao solo, houve um aumento na sua resistência em 16% e uma

redução nas taxas de expansibilidade, apresentando dessa forma, valores satisfatórios para utilização em sub-base, de acordo com o Manual do DNIT (2006).

Ainda podem ser citados as pesquisas de Behak (2007), Grubba (2009) e Patrício (2015). Behak (2007) realizou um estudo sobre a estabilização de solo arenoso com o uso de cinza de casca de arroz (CCA) e cal, e constatou uma melhoria na resistência e durabilidade do solo natural, além de torná-lo menos deformável, permitindo seu uso em camadas de sub-base de pavimentos.

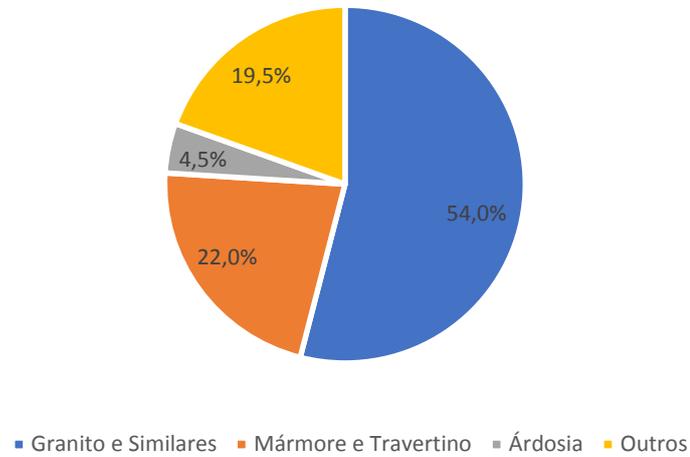
Grubba (2009) analisou o comportamento mecânico do agregado reciclado de concreto (ARC) e verificou um ganho considerável da resistência e rigidez do solo natural, indicando que esse tipo de resíduo pode ser empregado como agregado natural nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

Patrício (2015), desenvolveu um estudo para avaliar a eficácia do uso de associação polimérica na estabilização de solos a serem utilizados em camadas de base de pavimentos rodoviários. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a associação polimérica proporcionou ao solo uma melhoria nas propriedades mecânicas em termos de CBR, Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo Resiliente (MR). Portanto, essa aplicação, mostrou-se eficiente na estabilização dos solos estudados, tornando eficaz sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários a que podem ser submetidos ao tráfego leve e/ou pesado.

2.3 SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

De acordo com a NBR 15012/2013 rochas ornamentais são materiais pétreos naturais, submetidos a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizados em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos arquitetônicos, decoração, mobiliário e arte funerária

Os principais tipos de rochas ornamentais são os granitos e os mármore. Porém, outras rochas estão presentes neste campo, como travertinos, quartzitos, arenitos, conglomerados, ardósias, etc. Esta maior importância dos granitos e dos mármore é decorrente do volume de sua extração, como mostra a Figura 4 (ABIROCHAS, 2018).

Figura 4 – Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2017

Fonte: Autoria própria, 2018

O setor de rochas ornamentais abrange um importante patrimônio profissional brasileiro, gerando em torno de 35 mil postos agregados ao beneficiamento primário, 60 mil às marmorarias e 10 mil nos segmentos de tecnologia e serviços. Em sua cadeia produtiva, conta com 10 mil empresas, com predominância das marmorarias. A Figura 5 apresenta o número de empresas vinculados ao setor (ABIROCHAS, 2018).

Figura 5 – Empresas do setor de rochas operantes no Brasil - 2017

Segmento	Nº estimado de empresas	Participação
Marmoraria	6.100	61,0%
Beneficiamento	2.000	20,0%
Lavra	1.000	10,0%
Exportadoras	400	4,0%
Serviços	300	3,0%
Depósitos de chapas	100	1,0%
Indústrias de máquinas, equipamentos e insumos	100	1,0%
Total	10.000	100%

Fonte: ABIROCHAS, 2018

2.4 RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO

As rochas ornamentais apresentam processos produtivos diferentes uns dos outros. No entanto, de acordo com o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM, 2004), mármore e granitos pertencem ao mesmo grupo, conforme as características de lavra e de beneficiamento.

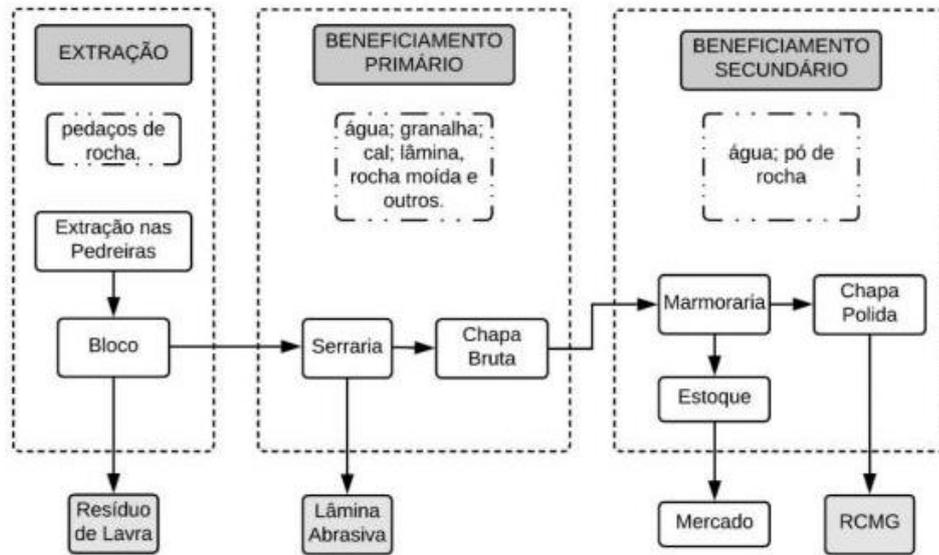
Os mármore são rochas carbonatadas, onde se inclui calcários dolomitos e outros correspondentes metamórficos. O calcário é formado principalmente por calcita (carbonato de cálcio) enquanto os dolomitos são basicamente dolomita (carbonato de cálcio e magnésio). O mármore, é formada tanto de forma sedimentar quanto metamórfica. Já a classe dos granitos pertence à família das rochas silicáticas, incluindo as ígneas ácidas, constituídos por cristais de feldspato, plagioclásio, quartzo e mica (biotita e/ou muscovita), como seus minerais essenciais, podendo ocorrer ainda a presença de anfibólio e piroxênio como minerais acessórios (MELLO, 2006).

Em relação ao ciclo produtivo, compreende-se em três etapas básicas: extração, beneficiamento primário e beneficiamento secundário. O processo de extração acontece nas pedreiras, e corresponde na obtenção das rochas brutas em blocos de formato retangulares e medindo aproximadamente $3,0 \times 2,0 \times 1,5\text{m}^3$. Nesse processo é gerado um resíduo de lavra, pedaços de rocha que não foram aproveitados ou de rochas que fissuraram.

O beneficiamento primário, conhecido também como serragem ou desdobramento, constitui-se do corte dos blocos de rochas para obtenção de chapas com medidas em torno de $2,80 \times 1,90 \times 0,02\text{m}^3$. O resíduo gerado durante esta etapa é uma lama proveniente de uma polpa abrasiva utilizada nos teares. Essa polpa é composta basicamente de água, granalha, cal, rocha moída e pequenos fragmentos metálicos devido ao desgaste das lâminas durante o corte.

O beneficiamento secundário, última etapa do ciclo produtivo, acontece nas marmorarias e pode ser subdividida em três processos pelos quais o produto ornamental passa: o polimento ou outro tipo de acabamento, o corte e o acabamento final. Nessa etapa, também é gerado um resíduo, composto basicamente por resíduo de rochas e água (APOLONÁRIO, 2014). A Figura 6 esquematiza as três etapas ocorridas no beneficiamento dessas rochas.

Figura 6 – Fluxograma das etapas do beneficiamento de rochas de mármore e granito



Fonte: Adaptado de Apolinário, 2014

O resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) ocorre em forma de finos formados a partir do processo de recorte e polimento de peças, confeccionadas a partir das chapas geradas nas serrarias. A composição química do resíduo é diversificada, e no geral, o resíduo é formado, em grande parte, por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), cal (CaO) e óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O), contudo, encontra-se também o óxido de ferro (Fe_2O_3), que pode aparecer em maior quantidade devido ao desgaste das lâminas de corte (GONÇALVES, 2000; MENEZES, 2009; SILVA et al., 2005; DESTEFANI E HOLANDA, 2011 apud APOLINÁRIO, 2014).

O RCMG geralmente é encaminhado às lagoas de sedimentação diretamente no solo da própria empresa, ou a filtros tipo prensa. Em seguida, este é transportado e disposto em aterros sem nenhum tratamento prévio (REIS e TRISTÃO, 2007 apud APOLINÁRIO, 2014). Essa má disposição, provoca assoreamento de rios, contaminação de lençóis freáticos e gera conflitos entre os órgãos ambientais e as populações vizinhas (SILVA et al., 2004).

2.5 EXPERIÊNCIAS COM RESÍDUOS DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO

Okagbue; Onyeobi (1999) avaliou a viabilidade técnica em utilizar o resíduo de mármore para estabilização de solos tropicais vermelhos para uso na pavimentação. As proporções de resíduo adicionado ao solo natural foram 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Foram

realizados ensaios de caracterização física, compactação e CBR. Os resultados mostraram que os parâmetros geotécnicos dos solos naturais foram melhorados substancialmente pela adição do fino de pedreira de mármore; a plasticidade foi reduzida em 20 a 33% e os valores de CBR aumentaram entre 30 a 46% e 27 a 55%, respectivamente. Os maiores valores de resistência e CBR foram alcançados com 8% do resíduo de mármore. Dessa forma, o resíduo de mármore pode ser utilizado como estabilizantes de solos tropicais, sendo viável sua utilização como material de base para rodovias com baixo volume de tráfego e como material de sub-base para rodovias com elevado volume de tráfego.

Batalione (2007) avaliou o potencial da utilização do rejeito fino de uma pedreira de granito para estabilização de quatro solos tropicais (Caturai, Inhumas, Goianira e Cascelho), visando seu uso em camadas de pavimentos urbanos de tráfego leve. As proporções de resíduo adicionado ao solo natural foram 15%, 25% e 35%. Nesse estudo realizou-se a investigação de campo e de laboratório. Quanto a investigação de laboratório foi realizada através da caracterização física, química e mineralógica, bem como do comportamento mecânico, através dos ensaios de compactação e CBR.

Os resultados mostraram que a adição do resíduo produziu uma redução no índice de plasticidade, observando uma maior redução para maiores quantidades de resíduos. Com relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, a inclusão do resíduo no solo produziu um aumento na massa específica seca máxima e a redução do teor de umidade ótimo em relação ao solo natural. Quanto ao CBR com imersão o teor de 35% para todos os solos apresentou-se o menor valor. Portanto, quanto a influência do resíduo no valor do CBR, verificou-se que nos solos de Caturai e Inhumas os melhores desempenhos foram obtidos com o teor de 15% e o solo de Goianira apresentou o melhor resultado com o teor de 25%. Essa quantidade de resíduo adicionada ao solo produziu um CBR de 20%, credenciando esta mistura como material de sub-base. Em relação a expansão, a inclusão do resíduo ao solo natural, provocou um ligeiro aumento, porém dentro do permitido pelo DNIT. Em geral comprovou-se a viabilidade técnica na estabilização de solos, podendo apresentar vantagens econômicas na sua utilização para produção de uma estrutura de pavimento urbano de tráfego leve.

Gurbuz (2015) desenvolveu um estudo sobre o uso de resíduos de mármore na estabilização do solo argiloso sob efeitos de congelamento-descongelamento em construção de estradas. As proporções de pó estudadas foram 2,5%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em peso seco do solo. Nesse estudo realizou-se ensaios de caracterização química e mineralógica,

caracterização física e ensaios de compactação em miniatura. Dois conjuntos de amostras foram preparados neste estudo, o primeiro conjunto de amostras foi exposto a ciclos de congelamento-descongelamento, e o segundo não. Os resultados indicaram que o teor de 10% de resíduo apresentou o melhor desempenho. Dessa forma, o pó de mármore é viável tecnicamente para ser usado como um material para estabilização de solos argilosos em sub-bases na construção rodoviária.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO

Na pavimentação é indispensável conhecer e caracterizar o solo antes da sua utilização, identificar a natureza, sua composição, entender o seu comportamento, e estudar as suas propriedades físicas e mecânicas. Ensaios de laboratório permitem entender as características e aferir a adequabilidade e a necessidade de correção da composição do solo para determinado uso na construção (SANTOS, 2012).

Segundo as recomendações do DNIT, dentre os ensaios necessários para caracterizar um solo a ser utilizado em pavimentação são: Análise granulométrica – NBR 7181/16; Determinação da massa específica dos grãos – NBR 6458/16; Determinação do limite de liquidez – NBR 6459/16; Determinação do limite de plasticidade – NBR 7180/16; Ensaio de compactação - NBR 7182/16 e Índice de Suporte Califórnia (ISC) - NBR 9895/16.

Os ensaios de análise granulométrica, massa específica e os limites de consistência são denominados ensaios de caracterização física, enquanto que os ensaios de compactação e CBR relacionam-se a capacidade de suporte e expansão do solo.

2.6.1 Caracterização Física

Na análise granulométrica, determina-se as dimensões das partículas presente em um solo dentro de determinados limites convencionais. Esses limites, de acordo com a escala granulométrica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), são: pedregulho - conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 e 4,8mm; areia, entre 4,8 e 0,05mm; silte, entre 0,05 e 0,005mm; argila, inferiores a 0,005mm. Na Figura 7 estão indicadas as escalas granulométricas da ABNT e a da *American Association*

Quadro 6 – Classificação quanto ao coeficiente de curvatura

Coeficiente de Curvatura	
$CC < 1$	Mal graduado
$1 < CC < 3$	Bem graduada
$CC > 3$	Mal graduado

Fonte: Caputo, 1996

Sob o ponto de vista dos índices consistência ou limites de Atterberg, esses são comumente utilizados na avaliação do material, objetivando o estudo de seus diferentes estados em presença da água.

Nos ensaios de consistência, são obtidos o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade. O limite de liquidez permite identificar a umidade de transição entre os estados líquido e plástico de um determinado material. Já o limite de plasticidade indica a umidade de transição entre o estado plástico e o semissólido. Por fim, o índice de plasticidade é obtido pela diferença entre esses dois limites (CARNEIRO et al., 2001).

O índice de plasticidade (IP) defini o estado plástico do material, assim, quanto maior o IP, mais plástico será o solo, por conseguinte, mais argiloso (Caputo, 1996). Diante desses parâmetros o solo recebe uma classificação, como mostra o Quadro 7.

Quadro 7 – Classificação quanto a plasticidade

Índice de Plasticidade	
$1 < IP < 7$	Fracamente plásticos
$7 < IP < 15$	Medianamente plásticos
$IP > 15$	Altamente plásticos

Fonte: Caputo, 1996

A NBR 11804/1991 estabelece para a execução de base e sub-base de pavimentos, valores inferiores a 25% para o limite de liquidez e 6% para o índice de plasticidade, buscando evitar a perda de suporte ou a expansão excessiva da camada do pavimento.

Em relação a massa específica do solo, o seu conhecimento é necessário para a determinação da caracterização do mesmo. Head (1986) afirma, que cada solo possui uma massa específica diferente de acordo com a presença de minerais que o compõe. Para a maioria

dos solos seus valores variam, em média, entre 2,30 e 2,90g/cm³. Pode-se considerar como valor médio, para efeitos de cálculos, por exemplo, a massa específica como 2,65g/cm³, isto porque os constituintes minerais predominantes nos solos são o quartzo, os feldspatos e os silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades reais estão em torno de 2,65g/cm³ (SANTANA, 2009).

2.6.2 Sistema de Classificação dos Solos

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos diversos solos perante as solicitações de interesse da engenharia, levou ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos. O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do problema.

A Mecânica dos Solos procurou criar um sistema de classificação que permitisse o agrupamento de solos dotados de características similares tanto do ponto de vista geotécnico como do comportamento. Dessa forma, os principais sistemas de classificação de solos utilizados mundialmente é o Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e a classificação *Transportation Research Board* (TRB), antigo *Highway Research Board* (HRB), que é o mais empregado atualmente para uso em estradas.

O Sistema Unificado surgiu na década de 40 durante a 2^o guerra mundial e foi criado por Casagrande para utilização em aeroportos. Posteriormente foi adaptada para uso no laboratório e no campo pelas agências americanas *Bureau of Reclamation* e *U.S. Corps of Enginneers*, com simplificações que permitem a classificação sistemática. O sistema utiliza como princípio a separação dos solos em grupos de acordo com a sua granulometria, deformabilidade e plasticidade (BATALIONE, 2007).

Por outro lado, a classificação TRB, tem sido bastante utilizada no reconhecimento de solos para a construção de pavimentos rodoviários, principalmente, classificando os solos de acordo com a demanda para materiais de subleito em rodovias. Essa classificação subdivide-se em grupos e subgrupos, cada um atendendo a diferentes faixas de graduação, limites de Atterberg e Índice de Grupo.

O índice de grupo (IG) é um número inteiro com intervalo de variação entre 0 e 20, indicando respectivamente, solo ótimo e péssimo quanto a capacidade de suporte. Esse índice

também indica as propriedades indesejáveis fornecidas pela fração fina do solo: silte, argila, húmus e outras. Em geral, a qualidade do desempenho de um solo como material de subleito é inversamente proporcional ao índice de grupo (DAS, 2007).

2.6.3 Compactação e CBR

A compactação pode ser entendida como um processo que visa melhorar as propriedades de um dado material, através da ação mecânica imposta ao solo quando submetido a um esforço de compressão. Dentre as principais melhorias, em termos de propriedades geotécnicas, podem ser citados o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte, retratada através do CBR. A compactação também reduz o índice de vazios, a permeabilidade, a contração e a compressibilidade (JUNIOR, 2005).

O ensaio de compactação definido por Proctor, tem como objetivo, determinar a relação entre o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima do solo quando compactado a uma determinada energia. Essa relação pode ser observada na Figura 8, que mostra uma curva típica de compactação, onde a massa específica varia em função da umidade do solo (CAPUTO, 1996).

Figura 8 – Curva de compactação.

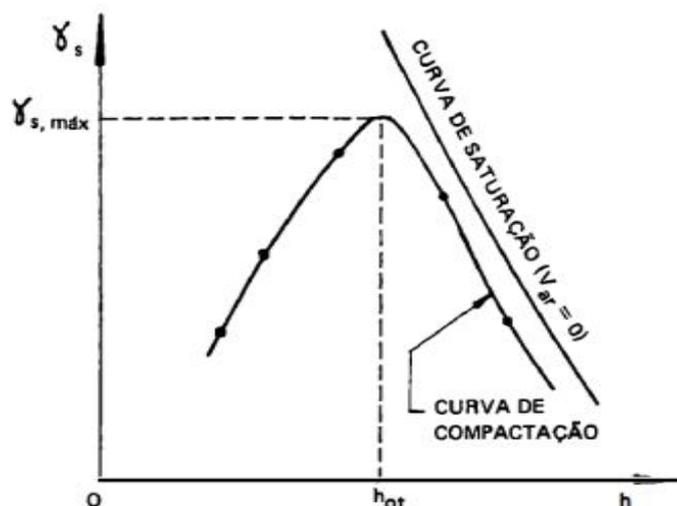


Fig. 12-1

Fonte: Caputo, 1996

De acordo com Proctor, a partir de um determinado teor de umidade, a água impede a expulsão do ar, não reduz o atrito e nem influencia no rearranjo das partículas do solo, fazendo com que a compactação não tenha mais eficiência no acréscimo de densidade. Há, portanto, para uma dada energia, uma densidade máxima que é obtida para um certo teor de umidade, denominado ótimo, onde se configura uma relação ideal entre água, ar e solo no processo de compactação. O teor de umidade ótimo (hot) é representado pelo ponto de inflexão da curva, referente à energia aplicada no ensaio de compactação, em que se obtém a massa específica seca máxima (γ_s máx.).

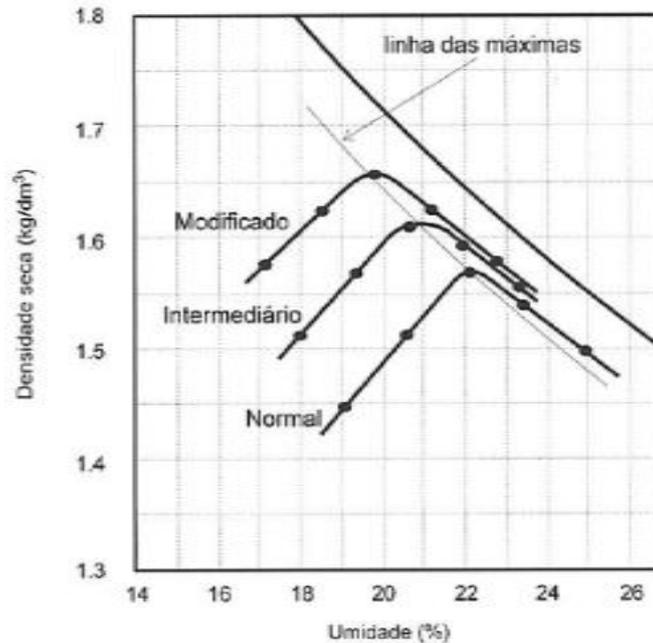
O ensaio de compactação pode ser realizado utilizando-se 3 níveis de energia, normal, intermediária e modificada, variando-se com esta finalidade as dimensões do molde, soquete, número de camadas e de golpes, conforme mostra o Quadro 8.

Quadro 8 – Energias de compactação

CILINDROS	CARACTERÍSTICAS INERENTES A CADA ENERGIA	ENERGIA		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
PEQUENO	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de camadas	3	3	5
	Nº de golpes por camada	26	21	27
GRANDE	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Nº de camadas	5	5	5
	Nº de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182/2016

A medida que a energia de compactação aumenta, a umidade ótima diminui e a massa específica seca máxima aumenta, conforme mostra a Figura 9. A escolha da energia de compactação é feita em função do uso que será dado ao material analisado e geralmente para as camadas mais importantes do pavimento, onde se necessita de uma melhoria nas propriedades do solo, sob o ponto de vista de seu comportamento nas solicitações pelo tráfego, utiliza-se a maior energia de compactação e, conseqüentemente, o maior custo (PINTO, 2006).

Figura 9 – Curva de compactação de um solo com diferentes energias

Fonte: Pinto, 2006

O DNIT estabelece para cada camada a energia de compactação a ser aplicada, conforme mostra o Quadro 9.

Quadro 9 – Energias de compactação para cada camada

CAMADA	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO
Subleito	Normal (corpo do aterro)
	Intermediária (camada final)
Reforço de Subleito	Intermediária ou Modificada
Sub-base	Intermediária ou Modificada
Base	Modificada

Fonte: DNIT 108/2009; 138/2010; 139/2010; 141/2010

A utilização de energias maiores pode acarretar um aumento no peso específico aparente seco do solo, porém existe a possibilidade de se aplicar um esforço de compactação bem maior, no caso da energia modificada, e ocorrer a quebra dos grãos perdendo assim sua capacidade de suporte (CAPUTO, 1996).

Outro fator a ser considerado sobre as propriedades do solo é em relação ao ensaio de *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), traduzido como Índice de Suporte Califórnia (ISC), que foi introduzido no final da década de 1940 e é empregado até hoje no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

O CBR é utilizado como uma medida de resistência para avaliar o comportamento das camadas do pavimento e do subleito, sendo mundialmente empregado para projetos de pavimentos. Também é utilizado na seleção de materiais para pavimentação, bem como no controle tecnológico de terraplenos ou subleito (PREUSSLER, 2007).

O ensaio de CBR, segundo NBR 7182/2016 é definido como a relação percentual entre o carregamento de um pistão padrão sobre um solo e o carregamento de um material padrão de pedra britada. A partir desse ensaio é possível obter a expansão da amostra na presença de água. A expansão do solo, está relacionado com a composição química, mineralógica, a estrutura, a porosidade e a umidade do solo.

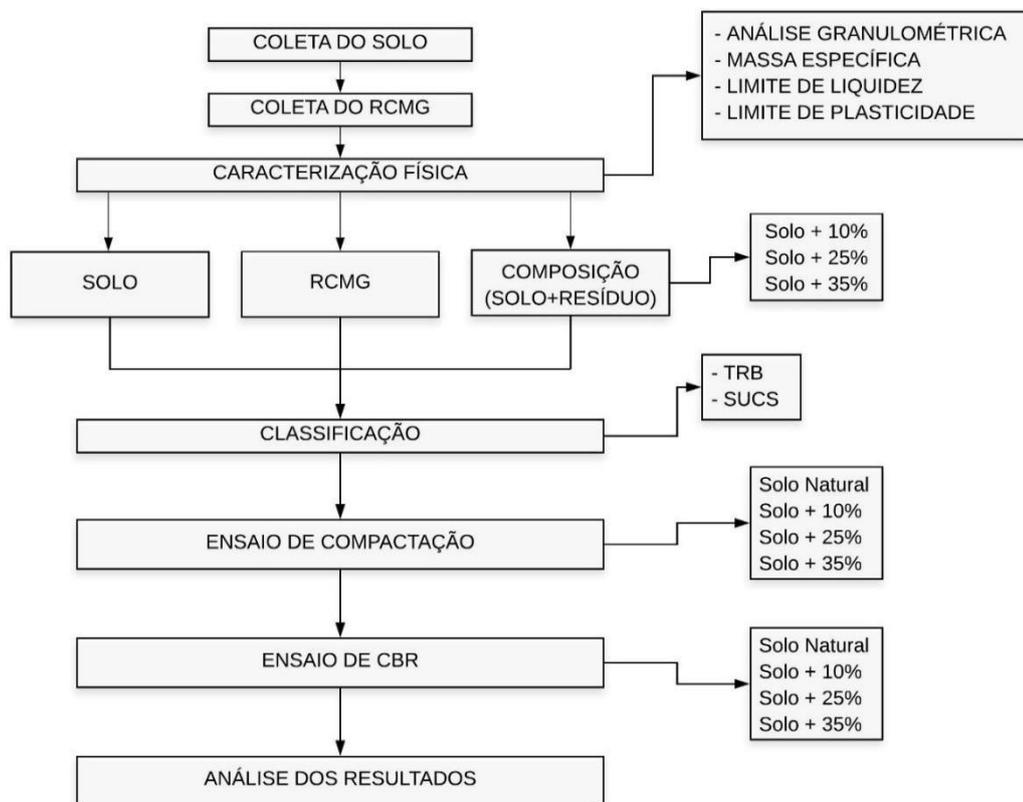
A vantagem desse ensaio é a simplicidade de aplicação e, segundo Senço (1997), o CBR é uma das características mais aceitas para se avaliar o comportamento de um solo nas diversas camadas que compõe o pavimento, seja como subleito, reforço do subleito, sub-base e base.

Os principais fatores que afetam os resultados de CBR são a densidade, umidade e a textura dos solos. Para os solos finos, com alto percentual de argila, as pressões devido ao fenômeno de expansão são bastante afetadas. Para este material, os ensaios de CBR são usualmente realizados variando as condições de umidade e densidade, também usando três energias diferentes (YODER e WITCZAK, 1975 apud JUNIOR, 2005).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA NA PESQUISA

Neste capítulo serão descritos os materiais, a metodologia e as especificações dos ensaios de caracterização física, compactação e CBR dos materiais analisados. A Figura 10 abaixo mostra o fluxograma com todas as etapas metodológicas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 10 – Sequência de atividades desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Autoria própria, 2018

A fase experimental procurou-se inicialmente investigar as características físicas do solo e do resíduo individualmente, estudando posteriormente as composições (solo + resíduo), ambos com base em ensaios laboratoriais. Por fim, foram realizados os ensaios de compactação Proctor para a determinação da umidade ótima e do peso específico máximo e em seguida o ensaio de CBR para a determinação da resistência à penetração e expansão do solo natural e das composições.

3.1 MATERIAIS

Este tópico apresenta uma descrição da procedência, coleta e armazenamento dos materiais usados nessa pesquisa.

3.1.1 Solo Natural

O solo analisado foi fornecido pela Fábrica Irmãos Rolim Cerâmica, localizada na zona rural do município de São Joao do Rio do Peixe – PB (Figura 11).

Figura 11 – Jazida do solo natural



Fonte: Autoria própria, 2018

A coleta do solo (Figura 12.a) utilizado na pesquisa foi realizada diretamente no pátio de armazenamento da Fábrica Irmãos Rolim Cerâmica. Foram utilizados pá, enxada e sacos de linhagem como instrumentos de coleta. O solo foi então levado ao Laboratório de Geotecnia do IFPB, ficando acondicionado nos sacos (Figura 12.b).

Figura 12 – Coleta da amostra de solo. a) colocação do solo nos sacos de linhagem, b) solos coletados armazenados no laboratório.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2018

3.1.2 Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG)

O resíduo de corte de mármore e granito foi coletado na forma de lama seca na pilha de estocagem na Marmoraria Cajamar, localizada no setor industrial do município de Cajazeiras- PB. Foram utilizados os instrumentos, pá, enxada e sacos de linhagem como instrumentos de coleta. O resíduo foi então levado ao Laboratório de Geotecnia do IFPB, ficando acondicionado nos sacos.

A empresa estudada realiza apenas o beneficiamento secundário das rochas, que consiste na etapa de corte, polimento e acabamento. As chapas chegam à empresa medindo aproximadamente $1,90 \times 2,80 \times 0,02\text{m}^3$ e são levadas ao local de estoque, sendo agrupadas de acordo com o tipo de rocha (Figura 13a).

Após a chegada das chapas brutas, o primeiro passo do processo de corte é a máquina com serra de disco de diamante (Figura 13b). Todo o processo é realizado com a presença de água para facilitar o corte, resfriar a lâmina e evitar a dispersão de material particulado, gerando uma lama formada por resíduo de rochas e água, que é direcionada através de uma tubulação para um tanque, onde a parte mais viscosa da lama é decantada (Figuras 13c e 13d). Em seguida a parte decantada é direcionada para o processo de secagem natural, pela exposição direta ao ar, sendo depois conduzidas às pilhas de estocagem.

Figura 13 – Beneficiamento secundário de mármore e granito. a) depósito das chapas brutas, b) máquina de corte serrando a chapa bruta, c) transporte da lama para o tanque, d) lama em processo de decantação.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2018

Após os primeiros cortes as peças são enviadas para o acabamento final e polimento, como mostra a Figura 14. Nessa etapa utilizam-se o disco de desbaste (DDA) ou fresa e o rebolo para lapidar, fazer cantos arredondados e acabamento com brilho. Neste local, os acabamentos são realizados com lixas secas e lixas d'água. Os resíduos gerados nessa etapa também são direcionados para os tanques de decantação.

Figura 14 – Processo de acabamento final na marmoraria. a) acabamento das peças, b) polimento com lixas.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2018

3.2 METODOLOGIA

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas e procedimentos nacionais: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT); e internacionais: *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

As proporções da mistura entre o solo e o resíduo foram definidas a partir de uma revisão bibliográfica. Para o resíduo de granito a faixa de 10 a 35% de adição apresentou resultados mais satisfatórios em relação ao CBR, valores superiores a 35% apresentaram condições indesejadas (BATALIONE, 2007). Quanto ao resíduo de mármore, os melhores resultados foram a adição de 10% do resíduo (GURBUZ, 2015). Dessa forma, definiu-se a adição dos percentuais de 10, 25 e 35% do resíduo de mármore e granito em relação ao peso do solo, com base nesses teores usualmente estudados pelos autores.

3.2.1 Ensaios Realizados

Os ensaios de caracterização física e de compactação foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal da Paraíba, Campus Cajazeiras, enquanto que o CBR foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria,

Cajazeiras, seguindo às recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), constantes nas normas descritas a seguir:

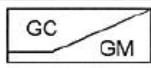
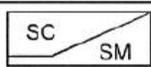
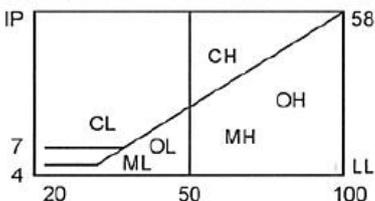
Quadro 10 – Ensaio realizados na pesquisa e suas respectivas normas.

ENSAIOS LABORATORIAIS	
Preparação da Amostra	ABNT - NBR 6457/2016
Análise Granulométrica	ABNT - NBR 7181/2016
Massa Específica dos Grãos	ABNT - NBR 6458/2016
Limite de Liquidez	ABNT - NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade	ABNT - NBR 7180/2016
Compactação	ABNT - NBR 7182/2016
CBR	ABNT - NBR 9895/2016

Fonte: Autoria própria, 2018

Os ensaios de caracterização física foram realizados com o objetivo de identificar e classificar as amostras. Os métodos de classificação utilizados foram o da SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e TRB (*Highway Research Board*), conforme o esquema das Figuras 15 e 16 respectivamente.

Figura 15 – Esquema de classificação pelo método da SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
			GM	
		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
		S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	SC 	
			SM	
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto, 2006

Figura 16 – Esquema de classificação pelo método TRB

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2				
% P #200 > 35	A-4				
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				

Fonte: Pinto, 2006

Após a coleta do resíduo, foi necessário um tratamento prévio para a retirada de matéria orgânica e de algumas impurezas. O resíduo apesar de ser um material pulverulento, apresentava muitos torrões, sendo necessário passar pelo processo de secagem ao ar livre até a umidade higroscópica, e em seguida executar o destorroamento com almofariz e mão de gral, para desmanchar os torrões e homogeneizar a amostra. Feito isso, realizou-se o quarteramento para reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa para realização dos ensaios. Quanto a preparação do solo, o mesmo passou pelo processo de secagem ao ar livre até a umidade higroscópica, sendo em seguida executado o destorroamento com almofariz e mão de gral, para desmanchar os torrões e homogeneizar a amostra, e posterior o quarteramento para reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa para realização dos ensaios. Esses processos podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 – Preparação das amostras para ensaios de caracterização. a) secagem das amostras ao ar livre até a umidade higroscópica, b) destorroamento com a mal de gral e almofariz, c) quarteamento



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria, 2018

3.2.1.1 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento e sedimentação com uso de defloculante, a fim de desagregar possíveis torrões ainda existentes. Nesse ensaio foi possível obter a curva de distribuição granulométrica que representa a porcentagem em peso de cada faixa de tamanho das partículas em relação ao peso total seco. As Figuras 18 e 19 ilustram alguns dos procedimentos realizados para o ensaio de granulometria das amostras.

Figura 18 – Etapas do ensaio de granulometria por peneiramento. a) passagem do material na peneira de 2mm, b) conjunto de peneiras no agitador mecânico.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2018

Figura 19 – Etapas do ensaio de granulometria por sedimentação. a) amostra imersa na solução, b) amostra após 12h de imersão, c) amostra no aparelho dispersor, d) leitura do densímetro e verificação da temperatura.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2018

3.2.1.2 Massa Específica

O ensaio de massa específica foi realizado pelo método do picnômetro, com secagem prévia da amostra. Foram realizados 4 ensaios para cada amostra (solo e resíduo) e o resultado final foi obtido pela média de pelos menos dois ensaios satisfatórios, ou seja, quando não diferirem mais que $0,02\text{g/cm}^3$. A Figura 20 mostra a execução de algumas etapas do ensaio.

Figura 20 – Etapas do ensaio de massa específica. a) amostra imersa em água, b) amostra no aparelho dispersor, c) amostra na bomba à vácuo, d) pesagem do picnômetro + amostra + água.



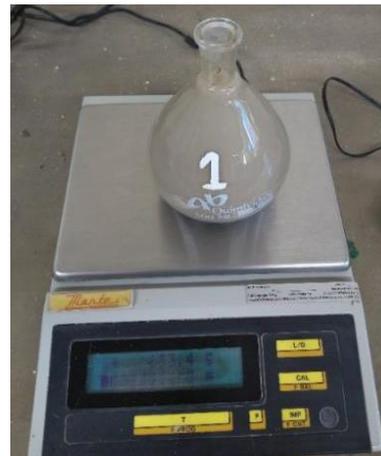
(a)



(b)



(c)



(d)

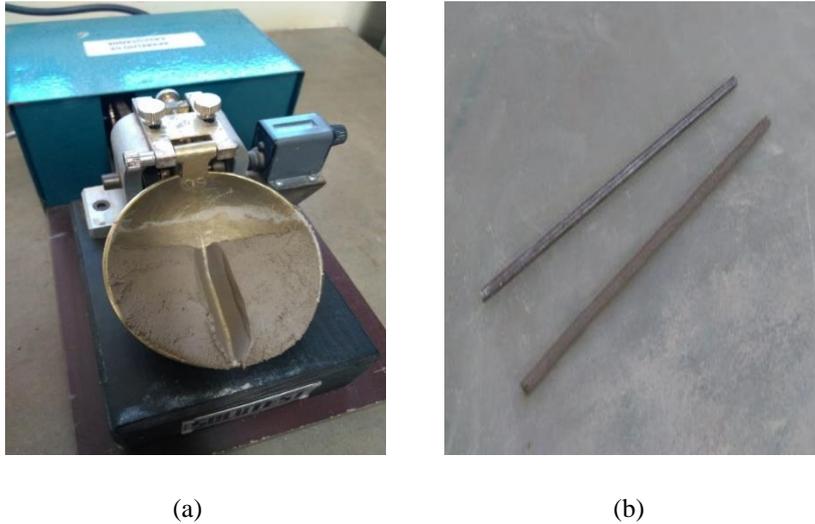
Fonte: Autoria própria, 2018

3.2.1.3 Limites de Consistência

O ensaio de limite de liquidez (LL) foi realizado com o auxílio do aparelho de Casagrande (Figura 21.a). Foram realizadas 5 determinações, onde obteve-se o número de golpes necessário para fechar o sulco feito na amostra e as umidades correspondentes. Com esses resultados, traçou-se um gráfico no qual as ordenadas são os números de golpes e as abcissas são os teores de umidade correspondente. O limite de liquidez representa o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

No ensaio de limite de plasticidade (LP) foi determinado a porcentagem de umidade para a qual a amostra de solo começou a se fraturar, na tentativa de moldar, com ele, um cilindro de 3mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (Figura 21.b). Dessa forma, o limite de plasticidade representa a menor umidade em que se pode moldar esse cilindro. Foram realizadas 3 determinações de umidade, sendo o resultado final a média dos três valores.

Figura 21 – Determinação dos limites de consistência . a) limite de liquidez, b) limite de plasticidade



Fonte: Autoria própria, 2018

Após a caracterização física do solo e do resíduo individualmente, passou-se ao preparo das composições entre o solo e resíduo. Essas composições foram submetidas aos mesmos ensaios de caracterização física descritos anteriormente.

Ao final desta etapa, foi realizada a classificação do solo natural, do resíduo e das misturas de acordo com a metodologia do Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e a *Transportation Research Board* (TRB), que é o mais empregado atualmente para uso em estradas.

3.2.1.4 Ensaio de Compactação

No ensaio de compactação, optou-se pela utilização da energia do Proctor Normal, seguindo as recomendações do DNIT para o subleito. O ensaio foi realizado com reuso de material, utilizando o cilindro grande com 5 camadas e 12 golpes cada camada, essas características foram definidas durante a preparação da amostra para o ensaio.

O ensaio foi realizado para diferentes teores de umidade, iniciando em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível e adicionando ao teor de umidade 2 % até obter no mínimo 5 pontos, 2 no ramo seco, 1 próximo a umidade ótima e 2 pontos no ramo úmido, determinando-se, para cada um deles, a massa específica aparente. Com esses pontos foi possível construir a

curva de compactação para o solo natural e as para as composições. A Figura 22 apresenta algumas etapas desse ensaio.

Figura 22 – Etapas do ensaio de compactação. a) homogeneização, b) compactação, c) extração do corpo de prova, d) coleta de amostra para determinar a umidade.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2018

3.2.1.5 Ensaio de CBR

O ensaio de CBR foi realizado utilizando amostras passantes na peneira 19mm. Este ensaio foi executado em três etapas: moldagem dos corpos-de-prova com os parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos no ensaio de compactação, imersão em

água por um período de quatro dias, sendo efetuadas as leituras no extensômetro de 24 em 24h e realização do ensaio de penetração nos corpos-de-prova pós imersão, por um pistão de diâmetro padronizado, em velocidade constante, para o cálculo do CBR. Na Figura 23 estão apresentadas algumas etapas da realização desse ensaio.

Figura 23 – Etapas do ensaio de CBR. a) imersão do corpo de prova, d) penetração



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2018

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório. Expondo inicialmente os resultados de caracterização física do solo, do resíduo e das composições e posteriormente, os resultados de compactação, CBR e expansão das amostras, além de expor um comparativo entre o solo natural e as composições.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 Solo Natural

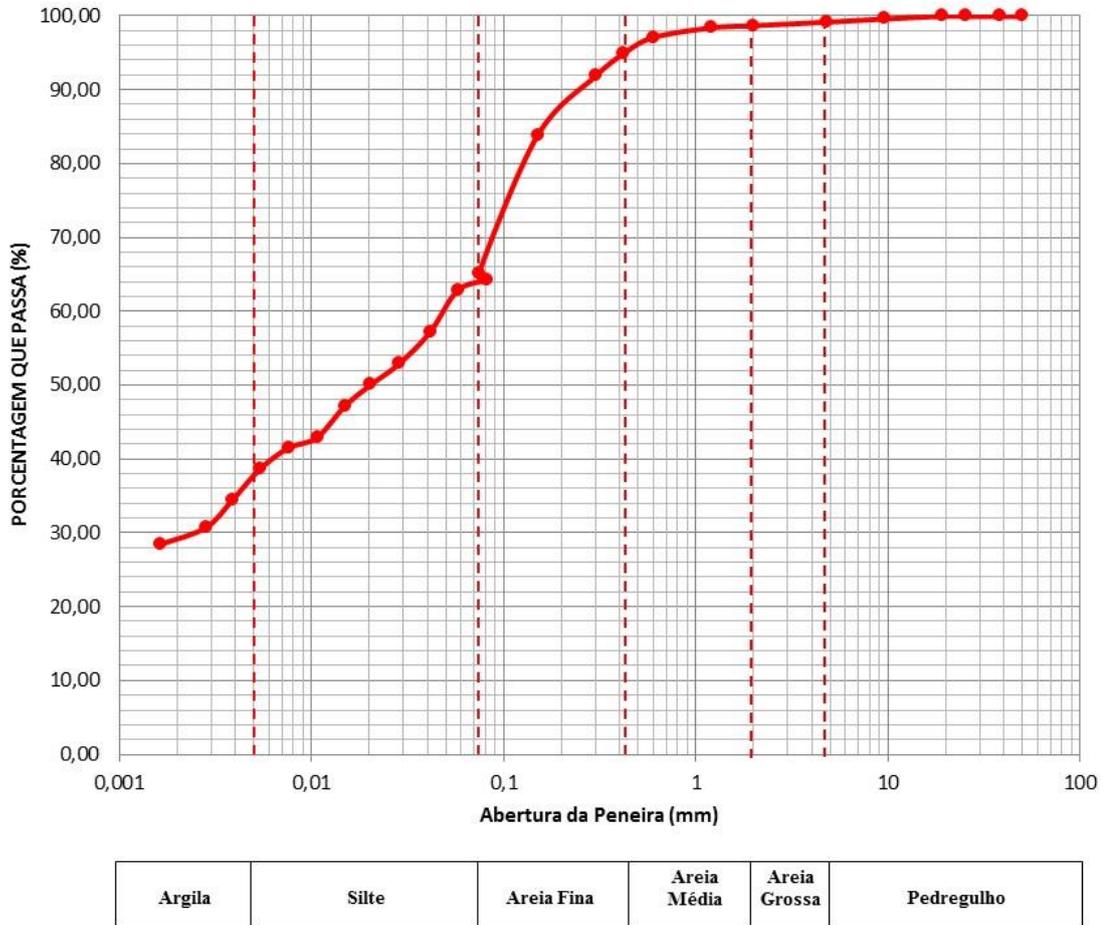
No ensaio de granulometria do solo natural, foi possível determinar a porcentagem passante de cada faixa de tamanho das partículas em relação ao peso total do solo, como mostra o Quadro 11. Com esses valores foi possível traçar a curva granulométrica.

Quadro 11 – Resultados do ensaio de granulometria do solo natural

Composição Granulométrica %	
Pedregulho (> 4,8 mm)	0,78
Areia Grossa (2,0 – 4,8 mm)	0,48
Areia Média (0,42 – 2,0 mm)	3,78
Areia Fina (0,075 – 0,42 mm)	29,83
Silte (0,005 - 0,075 mm)	26,42
Argila (< 0,005 mm)	38,70
Índices Granulométricos	
Coefficiente de uniformidade (CU)	ND
Coefficiente de Curvatura (CC)	ND

O solo natural apresentou uma maior quantidade de finos, representado pelo percentual de 38,70% de argila e uma parcela significativa de silte, com percentual de 26,42%. Em relação a fração grossa, a que predomina no solo é a areia fina, representando 29,83%. A Figura 24 apresenta a curva granulométrica do solo analisado.

Figura 24 – Curva granulométrica do solo natural



Em relação aos coeficientes de uniformidade (CU) e coeficiente de curvatura (CC) da curva granulométrica do solo, não foi possível determiná-los (ND), tendo em vista a impossibilidade de definir o diâmetro efetivo, correspondente a 10% em peso total de todas as partículas menores que ele. O solo é classificado quanto a sua granulometria em uma argila arenosa-siltosa.

O Quadro 12 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica e índices de consistência. A massa específica do solo apresentou um valor de $2,628\text{g/cm}^3$, estando coerente com o intervalo apresentado por Santana (2009) para a maioria dos solos, onde a massa específica varia entre $2,3\text{g/cm}^3$ e $2,9\text{g/cm}^3$.

Quadro 12 – Resultados do ensaio de massa específica e índices de consistência do solo natural

Massa Específica (g/cm ³)	2,628
LL (%)	23
LP (%)	15
IP (%)	8

Tomando-se como referência os parâmetros adotados por Caputo (1996) para o índice de plasticidade, considera-se o solo como medianamente plástico, já que o mesmo se encontra no intervalo entre 7 e 15%. A plasticidade do solo está relacionada diretamente com a quantidade de argila presente na amostra.

O solo natural foi classificado pelas metodologias TRB e SUCS, respectivamente, em A-4 e CL. O solo A-4 apresenta-se como solos siltosos com pequena quantidade de material grosso e de argila de baixa compressibilidade. De acordo com o manual do DNIT (2006), esse solo apresenta comportamento fraco a pobre para o subleito. O solo CL na metodologia SUCS, apresenta-se como uma argila de baixa compressibilidade.

4.1.2 RCMG

Na análise granulométrica do resíduo, foi possível determinar a porcentagem passante de cada faixa de tamanho das partículas em relação ao peso total do resíduo, como mostra o Quadro 13.

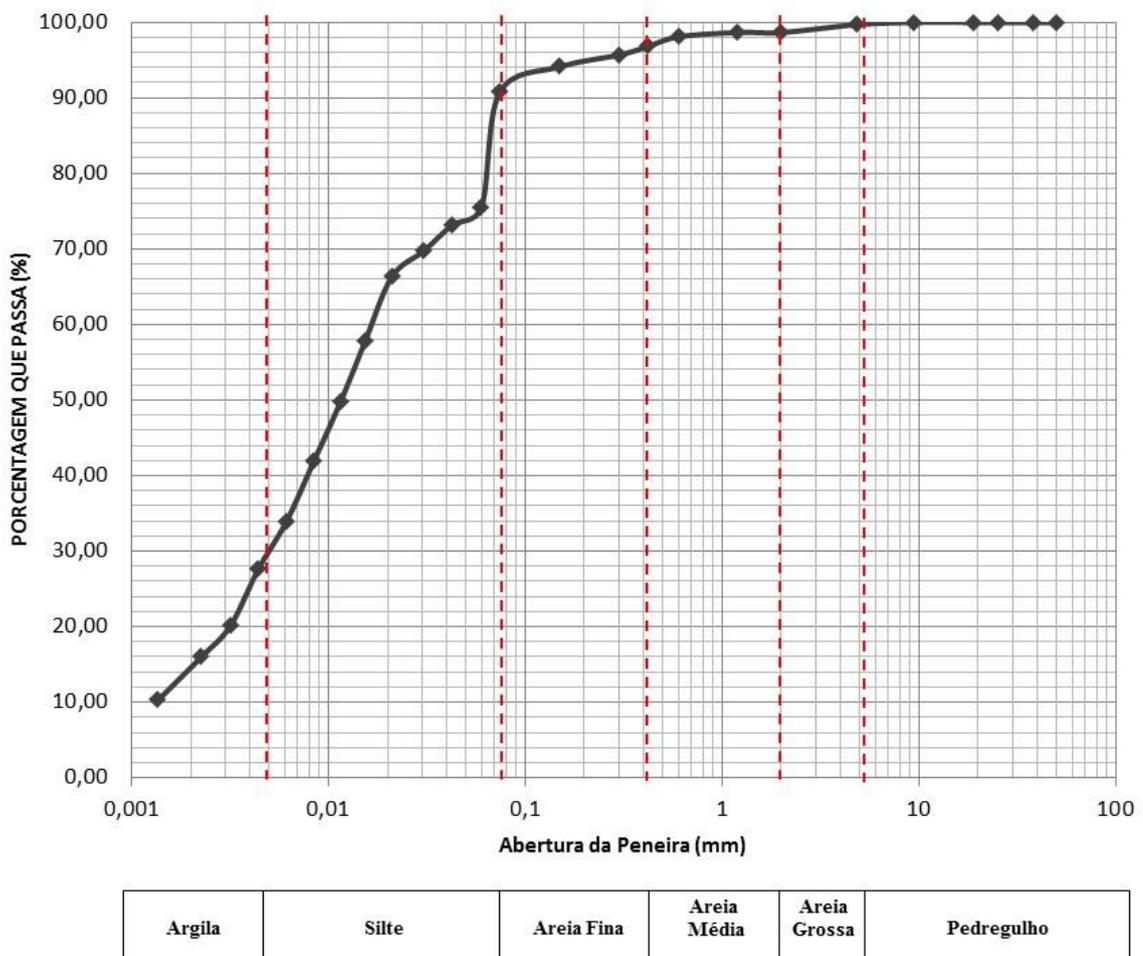
Quadro 13 – Resultados do ensaio de granulometria do RCMG

Composição Granulométrica (%)	
Pedregulho (> 4,8 mm) %	0,29
Areia Grossa (2,0 – 4,8 mm) %	1,03
Areia Média (0,42 – 2,0 mm) %	1,84
Areia Fina (0,075 – 0,42 mm) %	6,08
Silte (0,005 - 0,075 mm) %	63,07
Argila: (< 0,005 mm %) %	27,69
Índices Granulométricos	
Coefficiente de uniformidade (CU)	12,86
Coefficiente de Curvatura (CC)	0,99

O resíduo apresentou uma maior quantidade de finos, representado pela fração de silte (63,07%). Em relação a fração grossa, os percentuais foram pouco significativos, apresentando a maior fração de areia fina (6,08%).

Com esses valores foi possível construir a curva granulométrica, bem como classificá-la em relação ao coeficiente de uniformidade (CU) e coeficiente de curvatura (CC). A Figura 25 apresenta a curva granulométrica do resíduo.

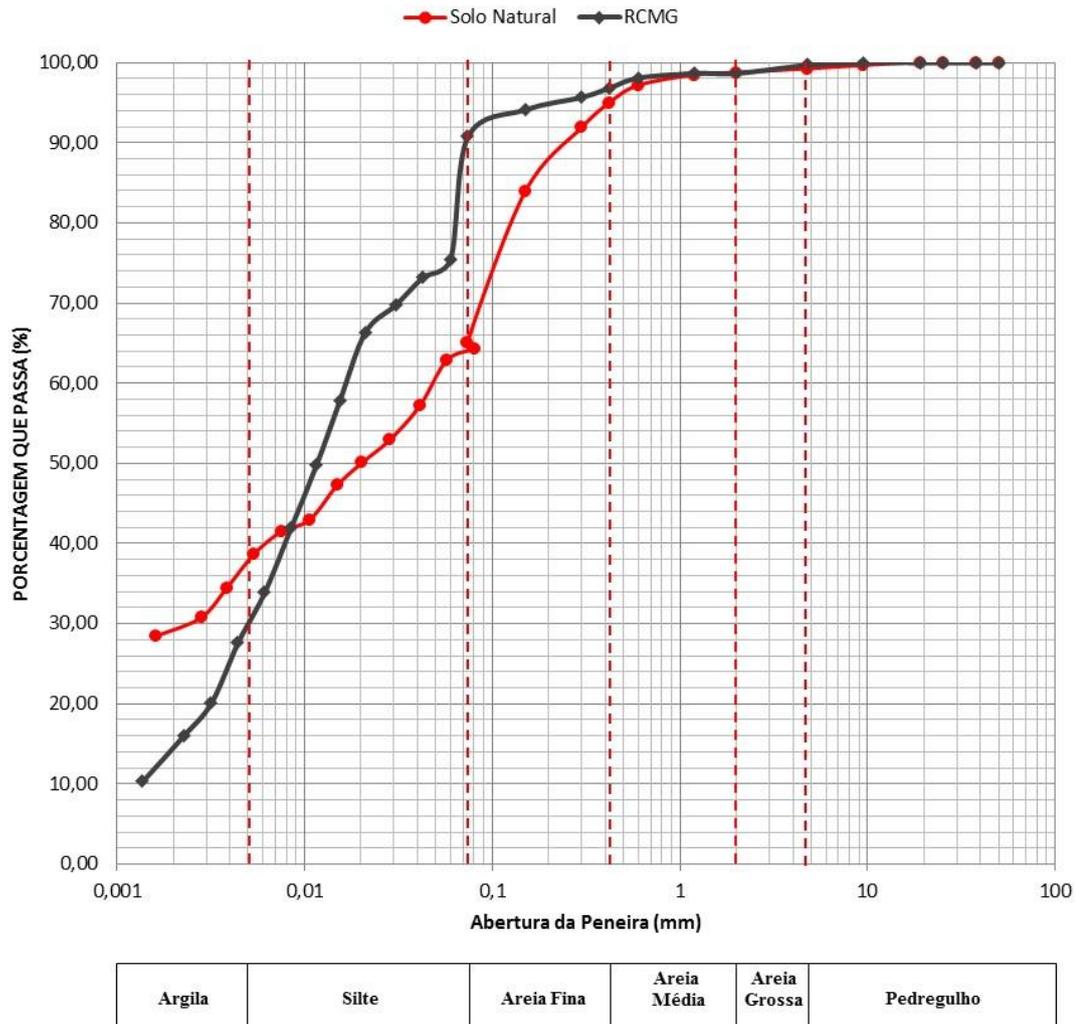
Figura 25 – Curva granulométrica do RCMG



Tomando-se como referência os índices granulométricos, pode-se aferir que a curva apresenta uma uniformidade média e mal graduada, portanto, mostra-se um tipo de material na qual a maior parte dos grãos é do mesmo tamanho. Quanto a classificação granulométrica, o resíduo é um silte argiloso com pouca areia.

Fazendo um comparativo entre solo e resíduo com base na curva granulométrica (Figura 26), podemos observar que a maior diferença está relacionada a quantidade de finos (argila e silte). O solo apresenta predominância de argila, enquanto que o resíduo apresenta predominância de silte.

Figura 26 – Curva granulométrica do solo e do resíduo



Com relação aos resultados dos ensaios de consistência e massa específica do resíduo, os mesmos são apresentados no Quadro 14. A massa específica do resíduo e do solo são bem próximas, devido a influência dos finos nesses dois materiais. Quanto aos índices de consistência verificou-se que o resíduo não apresenta propriedade plástica sendo considerado um material não plástico (NP).

Quadro 14 – Resultados do ensaio de massa específica e índices de consistência do RCMG

Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	2,587
LL	NP
LP	NP
IP	NP

Embora o resíduo tenha se classificado como um silte argiloso e apresentado uma grande quantidade de finos, não se pode conferir a esse material as mesmas propriedades que um solo natural apresentaria, já que se trata de um material oriundo do processo de corte e acabamento de rochas. Dessa forma, a análise do comportamento plástico é fundamental para avaliar o processo de estabilização dos solos.

4.1.3 Composições

As composições foram definidas com base em estudo bibliográfico. Nesse sentido, conforme já apresentado, foram adotados os teores de 10, 25 e 35% do resíduo. O Quadro 15 apresenta os resultados das composições granulométricas do solo natural e das respectivas misturas.

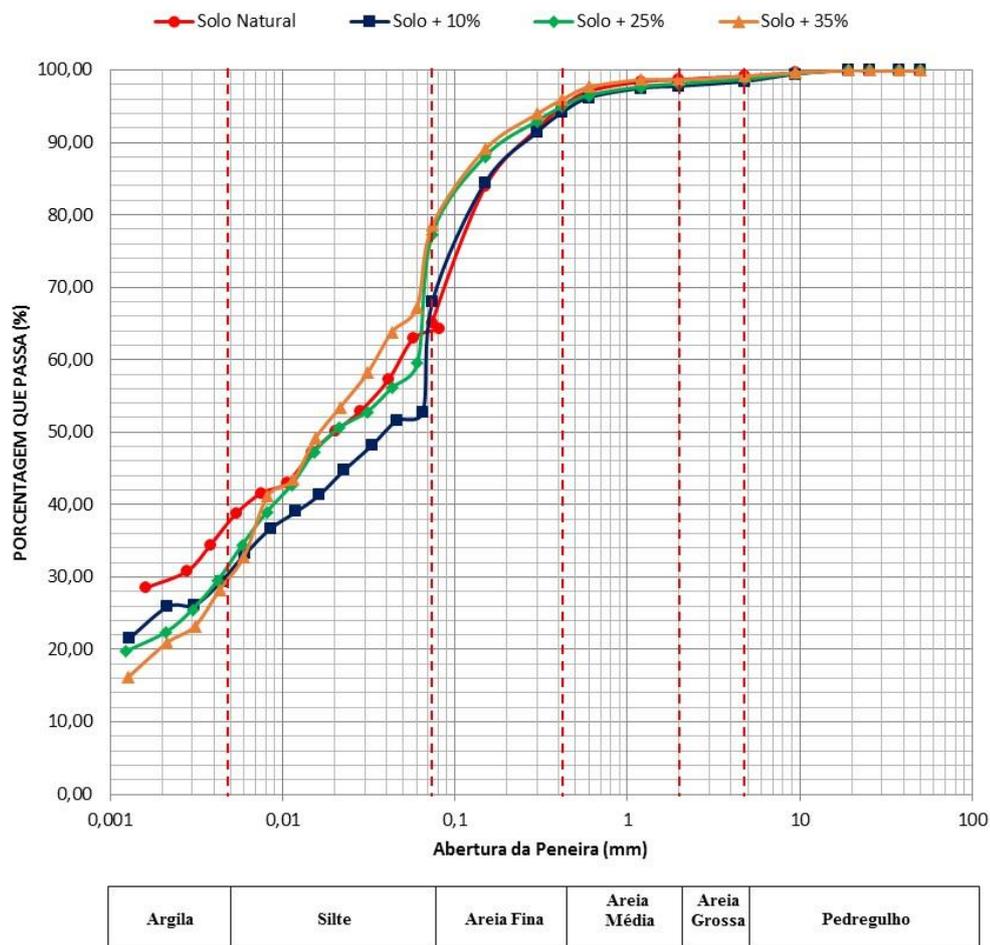
Quadro 15 – Resultados do ensaio de granulometria das amostras

Composições Granulométricas (%)							Índices Granulométrico	
Amostra	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	CU	CC
Solo Natural	0,78	0,48	3,78	29,83	26,42	38,70	ND	ND
Solo + 10%	1,62	0,66	3,60	26,08	38,67	29,37	ND	ND
Solo + 25%	1,33	0,63	3,14	17,58	47,79	29,52	ND	ND
Solo + 35%	0,79	0,53	2,72	17,47	50,32	28,18	ND	ND

Observa-se que com a adição de 10% do resíduo a quantidade de argila diminuiu 9,33%. Em contrapartida a quantidade de silte teve um aumento expressivo de 12,25%, o que de fato comprova a alteração da granulometria do solo com a adição do resíduo, já que o mesmo apresenta a maior fração de silte. O mesmo comportamento foi observado com a adição de 25 e 35% do resíduo. Dessa forma, quanto maior a adição do resíduo no solo, menor será a fração de argila e maior a fração de silte. Este comportamento condiz com os resultados apresentados por Batalione (2006).

A caracterização quanto a sua granulometria para o solo + 10%, solo + 25% e solo + 35% foram respectivamente: silte arenoso argiloso com vestígios de pedregulho, silte argiloso arenoso com vestígios de pedregulho e silte argiloso arenoso. Embora essa classificação não seja suficiente para determinar as propriedades e o tipo de solo, é notório que houve uma alteração quanto a sua granulometria, passando de uma argila arenosa (solo natural) para um silte arenoso ou argiloso com presença de pedregulhos. Na Figura 27, que mostra o comparativo das curvas granulométricas, pode-se observar essa redução da quantidade de argila do solo natural, em todas as composições.

Figura 27 – Curva granulométrica das amostras



Analisando os índices de consistência (Quadro 16), pode-se observar que o solo + 25% e o solo + 35% apresentaram uma redução no valor do limite de liquidez, tornando o solo natural menos compressível e, portanto, apresentando um menor recalque quando submetidos a esforços, conforme afirma o Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

Analisando o limite de plasticidade, observa-se que houve um aumento de 4% do solo natural para todas as composições, o que significa que com a inserção do resíduo a mistura necessitará de uma quantidade maior de água para se tornar plástica.

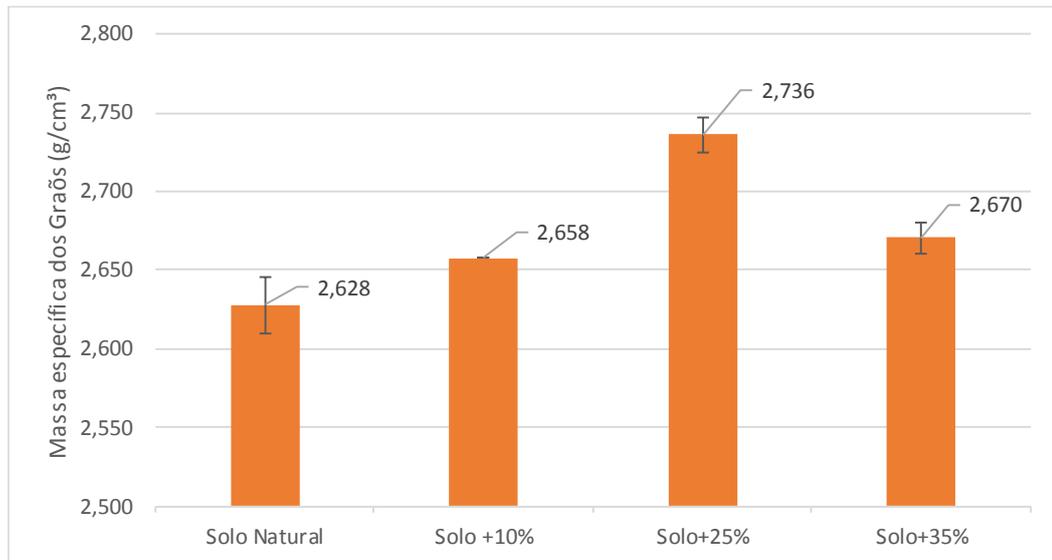
Quadro 16 – Resultados dos índices de consistência

Amostra	Índices de Consistência (%)		
	LL	LP	IP
Solo Natural	23	15	8
Solo + 10%	24	19	5
Solo + 25%	22	19	3
Solo + 35%	16	19	NP

Em relação ao índice de plasticidade, a inserção de resíduo no solo conseguiu diminuir esse índice, até tornar a mistura não plástica com o teor de 35% de resíduo. Essa redução está relacionada com a quantidade de argila presente na composição, bem como no fato de estar adicionando ao solo natural um material não plástico. Portanto, quanto maior o teor de resíduo no solo, menor será a plasticidade e conseqüentemente o solo apresentará menores deformações.

Analisando os resultados de massa específica (Figura 28), observa-se que para todas as composições houve um aumento pouco significativo em relação ao valor obtido para o solo natural. Esse aumento está relacionado com a presença de finos na massa do material para um mesmo volume.

Um comportamento específico a destacar foi a redução da massa específica para o solo + 35%, embora seja uma pequena variação se comparado as outras composições. Essa redução pode estar relacionada com a granulometria, tendo em vista uma fração de mais de 50% de silte, o que corresponde a um tipo de material na qual a maior parte dos grãos é do mesmo tamanho e, portanto, apresenta-se com mais vazios, diminuindo a relação massa e volume. A composição solo + 25% foi a que apresentou a maior massa específica, com desvio padrão de 0,01.

Figura 28 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos

As composições de 10, 25 e 35% foram classificadas pelas metodologias TRB e SUCS. Todas permaneceram com a mesma classificação do solo natural para a metodologia TRB, havendo uma alteração apenas para o solo + 25% e solo + 35% na metodologia SUCS, que passou de um CL (argila) para um ML (silte), como mostra o Quadro 17.

Quadro 17 – Classificação das amostras

Amostra	Classificação	
	TRB	SUCS
Solo Natural	A-4	CL
Solo + 10%	A-4	CL
Solo + 25%	A-4	ML
Solo + 35%	A-4	ML

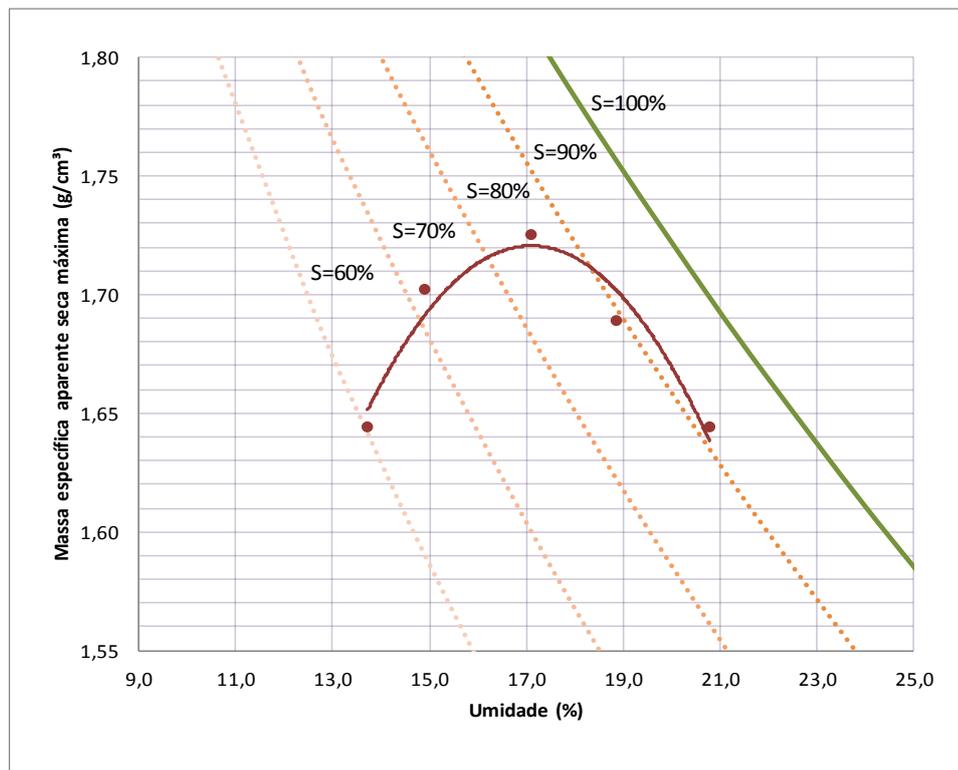
4.2 COMPACTAÇÃO

Na análise dos resultados de ensaio de compactação foi possível determinar por meio das curvas de compactação a umidade ótima e o peso específico máximo para o solo natural e para as composições, como mostra o Quadro 18.

Quadro 18 – Resultados do ensaio de compactação

Amostra	Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	Teor de Umidade Ótimo (%)
Solo Natural	1,720	17,2
Solo + 10%	1,755	16,5
Solo + 25%	1,780	15,5
Solo + 35%	1,705	18,0

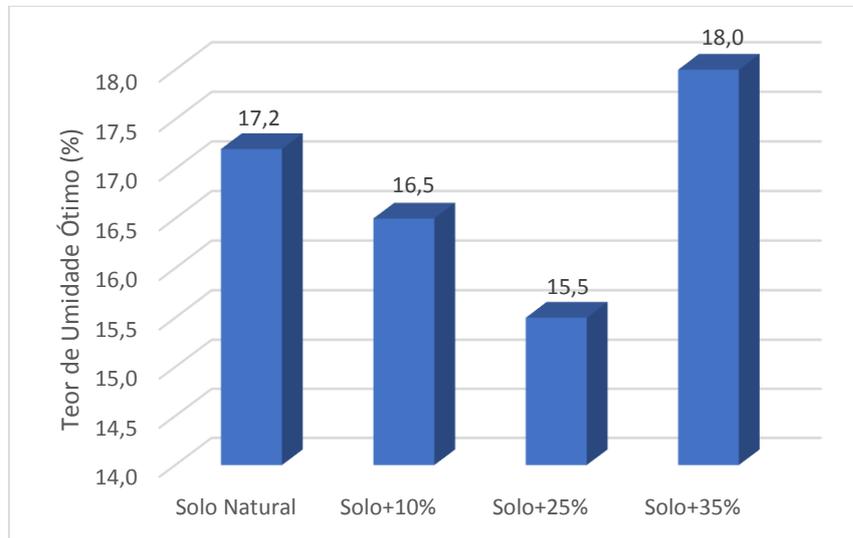
De acordo com Pinto (2006), a curva de compactação do solo pode estar em qualquer posição abaixo da curva de saturação, mas nunca acima dela. Os pontos ótimos das curvas de compactação devem situar-se em torno de 80 a 90% de saturação. Esse comportamento pode ser observado na curva de compactação do solo natural (Figura 29).

Figura 29 – Curva de compactação do solo natural

Observa-se na Figura 30 que para as composições de 10% e 25%, a umidade ótima foi reduzida se comparada ao solo natural. Esse comportamento pode estar diretamente relacionado com a granulometria, pois quanto menor o percentual de finos em uma mistura, menor será a quantidade de água necessária, tendo em vista uma menor superfície específica (REDIVO, 2011). Entretanto, para o teor de 35% a umidade ótima aumentou. Uma possível indicação desse comportamento, é a influência da parcela de silte (50,48%) na mistura, já que apresentou o

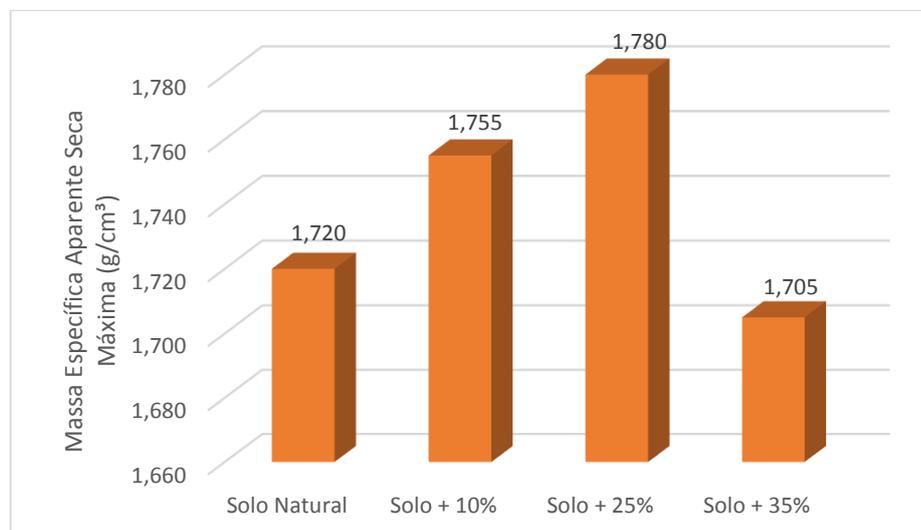
maior percentual. Dessa forma, pode-se aferir que adição de resíduo a partir de 35% aumenta o valor de umidade ótima da mistura.

Figura 30 – Resultados do teor de umidade ótima



Analisando a massa específica seca máxima (Figura 31), observa-se que para os teores de 10 e 25% houve um aumento de 2,03 e 3,49%, respectivamente. Um comportamento específico a destacar, foi em relação a redução do peso específico após a adição de 35%. Nesse caso, pode-se perceber que quanto maior a umidade ótima, menor a massa específica, por isso essa composição apresentou resultados semelhantes ao solo natural. No entanto, a redução de peso foi pouco significativa, atingindo apenas um percentual de 0,87%.

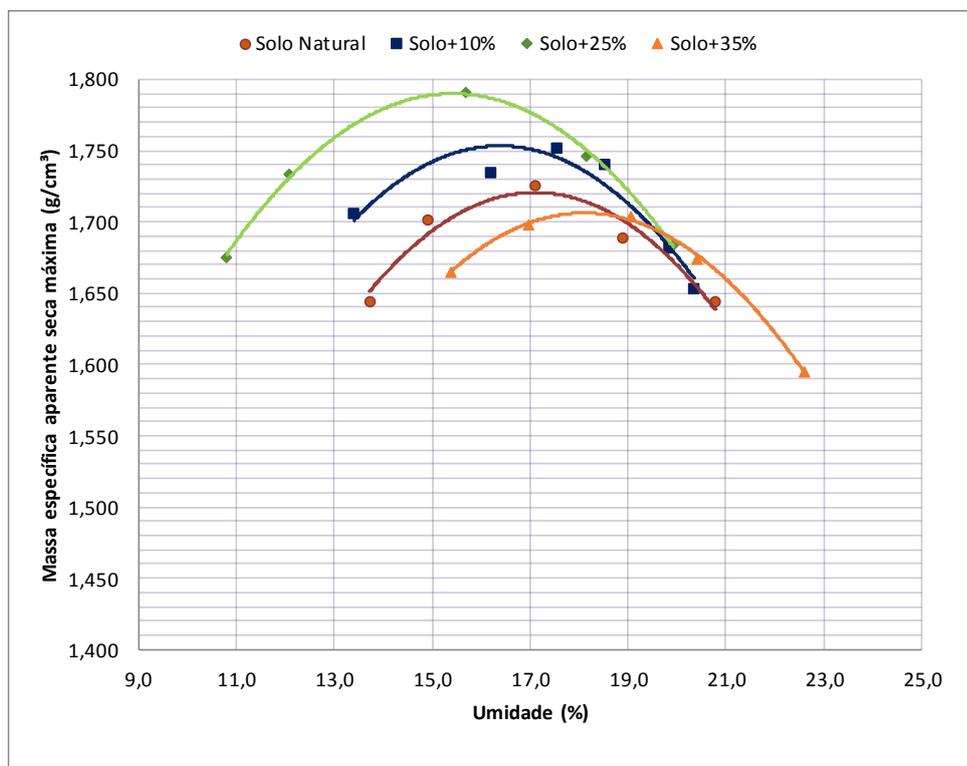
Figura 31 – Resultados da massa específica aparente seca máxima



De acordo com valores típicos de massa específica máxima e umidade ótima apresentados por Pinto (2006) a curva de compactação do solo natural (Figura 32) expõe um comportamento de um silte pouco argiloso, apresentando massa específica seca máxima baixa, da ordem de 1,5 a 1,6g/cm³, e umidades ótimas elevadas, da ordem de 18 a 22%. A medida que se adicionou os percentuais de 10 e 25% de resíduo no solo, as curvas de compactação sofreram modificações, se aproximando mais de uma areia silte-argilosa, onde apresentam massa específica seca máxima mais elevadas, da ordem de 1,7 a 1,8g/cm³ e umidades ótimas mais baixas, da ordem de 15 a 16%.

Em relação ao teor de 35% adicionado ao solo, observa-se que a curva voltou a apresentar um comportamento semelhante ao do solo natural, apresentando uma menor massa específica e uma maior umidade ótima. Este fato tende a evidenciar uma relação com a distribuição granulométrica já que essa composição apresentou a maior fração de silte (50,32%).

Figura 32 – Curva de compactação das amostras



Dessa forma, o teor de 25% apresentou o melhor comportamento, pois proporcionou ao solo natural uma maior máxima específica seca com um menor teor de umidade ótimo.

4.3 EXPANSÃO E CBR

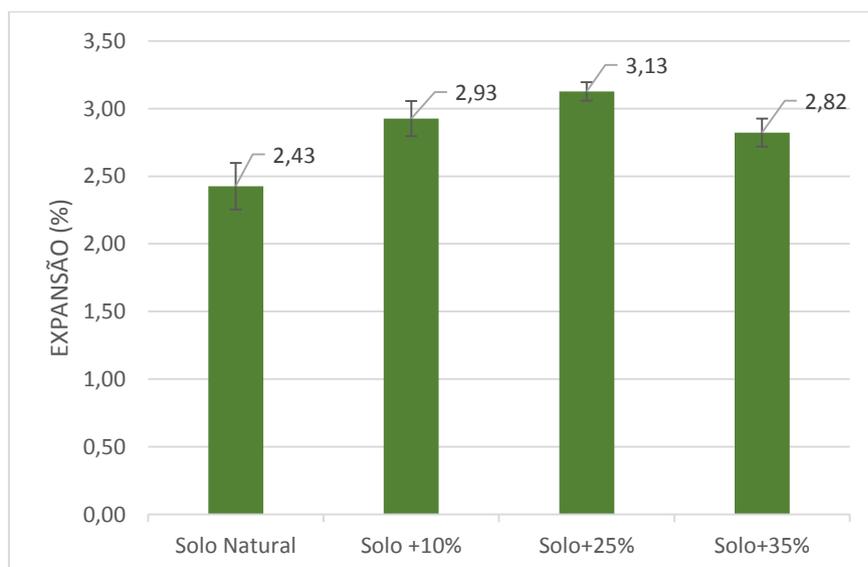
Os resultados dos ensaios de expansão e CBR estão apresentados no Quadro 19 e representam a média de dois ensaios realizados para cada amostra.

Quadro 19 – Resultados do ensaio de expansão e CBR

Amostra	Umidade ótima (%)	Umidade ótima média (%)	Desvio padrão	Massa específica aparente seca (g/cm³)	Expansão (%)	CBR (%)
Solo Natural	17,2	17,6	0,26	1,693	2,43	2,28
Solo+10%	16,5	16,5	0,03	1,711	2,93	3,66
Solo+25%	15,5	15,9	0,30	1,718	3,13	3,66
Solo+35%	18,0	18,0	0,00	1,705	2,82	3,66

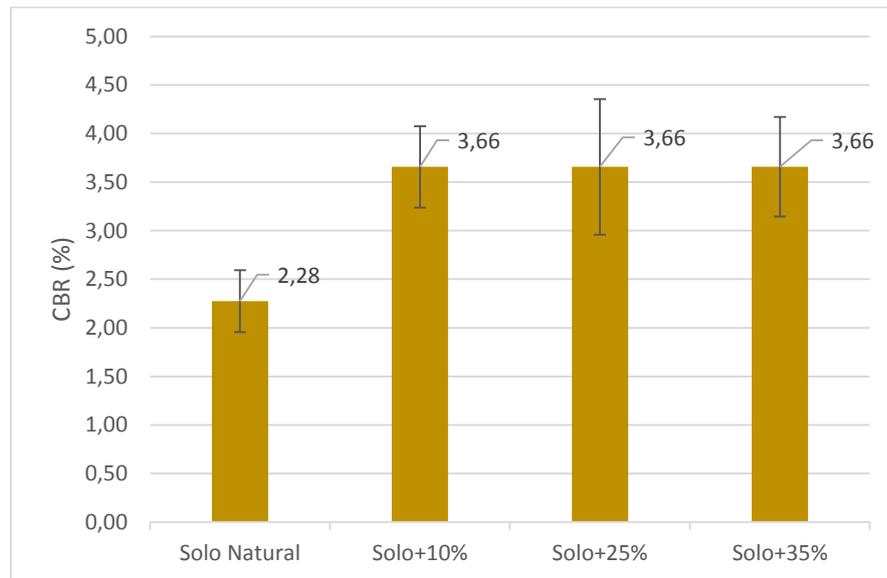
Observa-se que a adição do resíduo para os todos os percentuais propiciou um aumento na expansão do solo (Figura 33), entretanto, menor que 4%, valor máximo estabelecido pela Norma do DNIT 108/2009 para ser utilizado no corpo do aterro do subleito de um pavimento. Portanto, o aumento da expansão pode indicar que o resíduo de corte de mármore e granito é um material expansivo, no entanto como a composição solo + 35% não seguiu a tendência de aumento do valor da expansão tal afirmação poderia ser comprovada por meio de uma análise química e mineralógica do RCMG.

Figura 33 – Resultados de expansão média das amostras



Analisando os resultados do ensaio de CBR, pode-se observar que a adição de resíduo proporcionou um aumento de 1,38% no índice de CBR, comparado ao valor obtido para solo natural, (Figura 34) para todas as composições analisadas.

Figura 34 – Resultados do CBR médio das amostras



Nos estudos desenvolvidos por Porter (1942), no intuito de correlacionar as propriedades dos solos com seu índice de CBR, foi constatado que não há relação entre a massa específica seca e o índice de CBR, ou seja, solos diferentes compactados com o mesmo peso específico podem apresentar índices de CBR inferiores a 10% ou superiores a 100%. Isso justifica o fato de todas as composições apresentarem o mesmo índice de CBR, embora possuam máxima específica seca diferentes.

Porter (1942) também analisou o índice de plasticidade e constatou que não há uma relação bem definida entre essa propriedade e o índice de CBR, pois solos com IP abaixo de 10% apresentaram CBR baixo ou superiores a 100%.

A relação entre essas variáveis é bastante complexa. Portanto, na prática o solo deve estar em condições de umidade e massa específica bem próximas das previstas em laboratório, garantindo a eficiência do pavimento durante sua vida útil.

Verifica que o solo + 35% foi a composição com menor expansão e, portanto, apresenta o melhor desempenho, tendo em vista que o índice de CBR permaneceu igual para todos os percentuais. No entanto, essa composição foi a que apresentou a menor massa específica e a

maior umidade ótica, representando um maior custo no campo por causa da maior quantidade de água a ser utilizada.

A composição solo + 25% foi a de melhor comportamento na compactação, mas foi a que apresentou valor de expansão mais elevado, no entanto, este valor ficou abaixo do limite máximo permitido pelo DNIT.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto ao resíduo utilizado neste trabalho, a sua composição química pode variar de acordo com a preferência dos clientes da região, por rochas de mármore e de granito, portanto, a amostra e as alterações provocadas no solo natural podem apresentar variações em relação a outras pesquisas.

Com base nas análises realizadas a respeito da caracterização granulométrica, pode-se concluir que a adição do resíduo ao solo natural alterou sua distribuição granulométrica. Estas alterações foram observadas pela redução das frações de argila e aumento das frações de silte para todas as composições analisadas. Neste caso, pode-se perceber que quanto maior a quantidade de resíduo adicionado ao solo, maior a redução de argila e aumento de silte. Com relação à forma das curvas granulométricas, estas foram alteradas principalmente na região das frações finas.

Analisando os índices de consistência, foi verificado que a inclusão do resíduo ao solo natural produziu uma redução no limite de liquidez, tornando o solo menos compressível. Em relação a plasticidade, para todas as composições analisadas houve uma redução e quanto maior o teor de resíduo no solo, menor foi a plasticidade. Este comportamento está relacionado com a redução da quantidade de argila, além do resíduo apresentar plasticidade nula.

Em relação a massa específica, para as composições de 10 e 25% houve um aumento, em contrapartida para composição de 35% houve uma diminuição. Essas alterações não apresentaram mudanças significativas, devido a semelhança da massa específica do solo natural e do resíduo.

Com relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, verificou-se que a adição de 10 e 25% de resíduo no solo provocou uma redução da umidade ótima e um aumento da massa específica aparente seca. Para a adição de 35% verificou-se um aumento no teor de umidade ótimo e uma redução da massa específica. Nestas condições, a composição solo + 25% apresentou o melhor desempenho, provocando uma redução de 1,7% da umidade ótima e um aumento de 3,49% da massa específica aparente seca.

A inclusão do resíduo melhorou o desempenho desse solo quanto ao índice de CBR, provocando um aumento no valor do CBR para todas as composições analisadas, embora tenha apresentado um aumento na expansão, mas dentro do permitido pelas recomendações do DNIT.

Dessa forma, a adição do resíduo de corte de mármore e granito no solo, apresentou-se viável tecnicamente para ser utilizado como estabilizante de solos de subleito de um pavimento de acordo com as especificações exigidas pelo DNIT.

Com relação ao melhor teor de resíduo, percebeu-se que a mistura solo + 25% apresentou o melhor desempenho, podendo ser utilizado como corpo do aterro do subleito de um pavimento.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de complementar e esclarecer melhor alguns pontos dessa pesquisa, sugere-se a realização dos seguintes estudos adicionais:

- Realizar ensaios de caracterização física, compactação e CBR com teores acima de 35%;
- Realizar ensaios de caracterização química e mineralogia do resíduo e das composições, para melhor compreender o comportamento das interações entre o solo natural e o resíduo, principalmente em termos de expansão;
- Realizar ensaios de sucção com o objetivo proporcionar um entendimento mais aprofundado da resistência mecânica das composições.

REFERÊNCIAS

ALECRIM, A.V. (2009). **Estudo do resíduo de quartzito foliado para o emprego em estruturas de pavimentos**. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. 193p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9895**: Solo: índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações – terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11804**: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. (2018). **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Brasília.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica.** 190 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2007.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L. B; MAMM, L.; BARRA, B.S. **Influência do pó calcário do estado do Pará na dosagem dos mastíques e na viscosidade dos cimentos asfálticos do petróleo.** 36º Reunião Anual de Pavimentação, RAPv. Curitiba, 2005.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 1 ed. Rio de Janeiro. PETROBRÁS: ABEDA, 2008.

CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: 6ª ed v 1, 1996.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S.; CASSA, J.C.S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom.** 312 p. Salvador, 2001.

CINTRA, P. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição em estruturas de pavimento.** 65 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Guaratinguetá, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. (2017). **Pesquisa CNT de rodovias: relatório gerencial.** Brasília: CNT: SEST: SENAT.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. **Deliberação normativa nº 74.** Minas Gerais, 2004.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 6ª ed. São Paulo: Ed. Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006). **Manual de pavimentação.** 3 ed. Publicação IPR, Rio de Janeiro.

_____. **DNIT 108/2009–ES**: Terraplenagem – aterros – especificação de serviços. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **DNIT 138/2010–ES**: Pavimentação – reforço do subleito – especificações de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 139/2010–ES**: Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – especificações de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 141/2010–ES**: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificações de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS (2008). **Norma de Pavimentos Flexíveis e Rígidos**. Paraná.

FARIA, M. A. de. **Irrigação por gotejamento e microaspersão**. Curso de Pós-graduação "Lato Sensu" (especialização) a distância: Sistemas pressurizados de irrigação. Lavras: UFLA/FAEPE, 145 p. 2000.

FERNANDES, G. F. L. **Utilização de resíduos de construção e demolição como materiais de construção de pavimentos rodoviários – Estado da Arte**. Dissertação (Mestrado) Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, 2012.

FILHO, C. C. **Situação e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais e de revestimento**. In: III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais e VI Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. 2007, Natal. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 16-40, 2008.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. **A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector**. Construction and Building Materials, v.102, n.1, p. 769-781, 2016.

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

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 163 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

GURBUZ, A. **Marble powder to stabilise clayey soils in subbases for road construction.** Road Materials and Pavement Desing, Nebraska, v. 16:2, p. 481-492, 2015.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testint bulk 1,** Pentech, London, England, 1986.

HORTEGAL, M. V; FERREIRA, T. C; ANA, W. C. S. **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – Ma.** Pesquisa em Foco, São Luiz, v. 17, n.2, p. 60-74, 2009.

JUNIOR, J.D.S. **O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará,** 211 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2005.

LEKNA, B. M.; GOUTHAM, S.; SHANKAR, A. U. R. **Evaluation of lateritic soil stabilized with arecanut coir for low volume pavements.** Transportation Geotechnics, Amsterdam, v.2, n.1, p. 20-29, 2015

LIM, S. M. et al. **Critical review of innovative soil road stabilization techniques.** International Journal of Engineering and Advanced Technology, Bhopal, v.3, n.5, p. 204-211. 2014.

MACHADO, L. F. M. et al. **Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos.** Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, 2017.

MARQUES, G. L. O. **Notas de aula da disciplina de pavimentação.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, 2009.

MARTIN, C. M. M.; RIBEIRO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. **Utilização do rejeito oriundo do corte de rochas ornamentais como agregado mineral em pavimentação asfáltica.** In. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM. Rio de Janeiro, 2008.

MELLO, R. M. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha.** 69 p. Dissertação

(Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MOHNOT, J.K; RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H.K. **Recycling of dimensional stone waste in concrete**: A review. *Journal of Cleaner Production*, v.135, p. 312-331, 2016.

NETO P. S. L. et al. **Estudo de utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para a pavimentação rodoviária**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 2016.

OKAGBUE C.O.; ONYEObI T.U.S. **Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction**, Nigéria. v. 53, p. 372-380, 1999.

PATRÍCIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários**. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3a ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, v. 1. 356 p. 2006.

PORTER, O. J. (1942). **Foundations for flexible pavements**. Highway Research Board Proceedings 2, p. 100-136. USA.

PREUSSLER, L. A. **Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento**. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2007.

REDIVO, I. M. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego**. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2011.

RODRIGUES, T. N. **Estudo comparativo do CBR “in situ” & LWD para determinação da capacidade de suporte de subleitos**. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2017.

ROQUE, P.F.B. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação.** 141 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

SANTANA, S. C. **Indicadores físicos da qualidade de solos no monitoramento de pastagens degradadas na região Sul do Tocantins.** 76 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Tocantins. Gurupi, 2009.

SANTOS, J. M. R. **Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários.** 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro, 2010.

SANTOS, M. N. **Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra.** PUC – Relatório de iniciação científica. Rio de Janeiro, 2012.

SARTORI G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão.** Campo Mourão: Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2015.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, A. P. A. **Caracterização e classificação ambiental da lama abrasiva do beneficiamento de rochas ornamentais.** Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Campina Grande, 2013.

SILVA, J. E. M.; CARNEIRO, L. A. V. **Pavimentos de concreto: Histórico, tipos e modelos de fadiga.** Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, v. 31, p. 14-33, 2014.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1997.