



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB

CENTRO DE TECNOLOGIA - CT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA URBANA

**USO DE AGREGADOS DE ROCHAS CALCÁRIAS PARA CAMADAS
DE PAVIMENTOS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE**

FELIPE CORDEIRO DE LIMA

João Pessoa - PB

2015

FELIPE CORDEIRO DE LIMA

**USO DE AGREGADOS DE ROCHAS CALCÁRIAS PARA CAMADAS
DE PAVIMENTOS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo

João Pessoa - PB

2015

L732u Lima, Felipe Cordeiro de.
 Uso de agregados de rochas calcárias para camadas de
 pavimentos estabilizadas granulometricamente / Felipe
 Cordeiro de Lima.- João Pessoa, 2015.
 96f.
 Orientador: Ricardo Almeida de Melo
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. Engenharia civil e ambiental. 2. Calcário. 3. Mistura solo-
 agregado. 4. Estabilização granulométrica. 5. Pavimentação.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

***“USO DE AGREGADOS DE ROCHAS CALCÁRIAS PARA CAMADAS DE
PAVIMENTOS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE”***

FELIPE CORDEIRO DE LIMA

Dissertação aprovada em 22 de setembro de 2015.

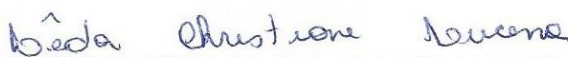
Período Letivo: 2015.2



**Prof. Dr. RICARDO ALMEIDA DE MELO - UFPB
(Orientador)**



**Prof. Dr. GIVANILDO ALVES DE AZEREDO - UFPB
(Membro Interno)**



**Prof. Dr. LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - UFCG
(Membro Externo)**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, pelo amor, dedicação, incentivo na busca de conhecimentos e por minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, meus irmãos, meu pai, meus tios e primos por todo o amparo em toda a minha vida.

Ao Professor Dr. Ricardo Melo pela orientação.

Ao técnico João pelo apoio e ensinamentos durante a realização dos ensaios, a Serginho e aos demais técnicos do LAPAV.

Aos alunos de iniciação científica Vinicius e Germano.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, em especial ao Paulo Marinho.

À PETROBRÁS pelo auxílio financeiro para reforma do LAPAV e compra de equipamentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos professores do PPGECAM pelo conhecimento compartilhado e membros da coordenação.

Aos professores Lêda e Givanildo pela atenção e contribuição neste trabalho.

Aos amigos do PPGECAM, especialmente aos de engenharia urbana.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.

RESUMO

As obras de pavimentação requerem uma grande demanda por materiais, principalmente para serem empregados em camadas granulares de pavimentos. Em muitos casos, os materiais disponíveis não apresentam características adequadas para uso, sendo necessário, dessa forma, a aplicação de técnicas que melhorem as suas características, ou ainda, realizar a busca por novos materiais em outras regiões. Nesse sentido, esta pesquisa tem por objetivo estudar a estabilização granulométrica de um solo local, a partir da adição de agregados calcários para uso em camadas granulares de pavimentos. O solo utilizado classifica-se como um solo arenoso e possui baixa plasticidade. O agregado calcário apresenta todas as frações em sua composição, com a predominância da fração graúda, e baixa resistência. Com os resultados da distribuição das partículas do solo e do agregado calcário foram determinadas a proporção de cada material nas misturas solo-agregado. Para isso, as faixas granulométricas C e D para bases estabilizadas granulometricamente do DNIT foram consideradas. As misturas foram determinadas em três cenários, sendo adicionados ao solo 25%, 50% e 75% de agregado calcário em relação a sua massa. Os resultados mostraram o aumento das frações grosseiras no solo e a redução da plasticidade, à medida que o teor do agregado na mistura aumentou. Com relação às características mecânicas, determinadas pelo Índice de Suporte Califórnia, módulo de resiliência e resistência à compressão simples, as misturas apresentaram resultados melhores que o solo e agregado calcário. Em todos os ensaios de caracterização mecânica, os melhores resultados foram observados para as misturas compostas por 50% de solo e 50% de agregado, pela maior estabilidade em função do rearranjo das partículas. Assim, conclui-se que o agregado calcário pode ser empregado em mistura com solo arenoso, com uso restrito para camadas de sub-base de pavimentos.

Palavras-chave: calcário, mistura solo-agregado, estabilização granulométrica, pavimentação.

ABSTRACT

Paving works require a great demand for materials, mainly to be used in granular layers of pavements. In many cases, the available materials do not provide suitable characteristics for use, if necessary, therefore, the application of techniques to improve their characteristics, or even carry out the search for new materials in other regions. In this sense, this research objectives to study the particle size stabilization of a local soil from the addition of limestone aggregates for use in granular layers of pavements. The soil is classified as a sandy soil and has low plasticity. The limestone aggregate presents all the fractions in its composition, with the predominance of coarse fraction, and low resistance. Accord in to the results of particles size distribution of soil and limestone aggregate it was determined the proportion of each material in the soil-aggregate mixtures. For this, the C and D particle size ranges for well graded stabilized bases from DNIT were considered. The mixtures were determined in three scenarios with addition of soil 25%, 50% and 75% limestone aggregates in relation to their mass. The results carried out increasing coarse soil fractions and decreasing of plasticity, as the aggregate content in the mixture was increased. With respect to mechanical properties, California Bearing Ratio, resilience modulus and compressive strength carried out for the mixtures were bigger than the soil and the limestone aggregate. In all mechanical tests, the best results were carried out for mixtures consisting of 50% soil and 50% aggregates, provided by biggest stability in function of particles rearrangement. That way, it can be concluded that the sandy soil and limestone aggregates mixtures can be used in sub-base layers for paving.

Keywords: limestone, mixture soil-aggregate, granulometric stabilization, paving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1: TIPOS DE MISTURAS SOLO-AGREGADO SEGUNDO YODER E WITCZAK (1975)...	24
FIGURA 3.1: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DE ATIVIDADES.	39
FIGURA 3.2: SOLO ESTUDADO.	41
FIGURA 3.3: ASPECTO DOS MATAÇÕES DE ROCHAS CALCÁRIAS: (A) ANTES DA BRITAGEM; (B) APÓS A BRITAGEM.....	41
FIGURA 3.4: PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS: QUARTEAMENTO.....	42
FIGURA 3.5: PRENSA PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ISC.....	48
FIGURA 3.6: EQUIPAMENTO E CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE MR.	49
FIGURA 3.7: EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	50
FIGURA 3.8: CORPO DE PROVA E ENSAIO DE RCS.....	52
FIGURA 4.1. CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO CALCÁRIO.	56
FIGURA 4.2. CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO.....	57
FIGURA 4.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS.....	60
FIGURA 4.4. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM BASE NA FAIXA C.	61
FIGURA 4.5. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM BASE NA FAIXA D.	61
FIGURA 4.6. VARIAÇÃO DO LL E IP COM ADIÇÃO DE CALCÁRIO.	63
FIGURA 4.7. CURVAS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO AGREGADO CALCÁRIO.	65
FIGURA 4.8. CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO.....	65
FIGURA 4.9. . RESULTADOS DA MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA E UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE CALCÁRIO.	67
FIGURA 4.10. CURVAS GRANULOMÉTRICAS ANTES E APÓS COMPACTAÇÃO.....	68
FIGURA 4.11. CURVAS GRANULOMÉTRICAS APÓS COMPACTAÇÃO COMPARADAS COM A FAIXA C.....	69
FIGURA 4.12. CURVAS GRANULOMÉTRICAS APÓS COMPACTAÇÃO COMPARADAS COM A FAIXA D.....	69
FIGURA 4.13. COMPORTAMENTO DO ISC EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.....	70
FIGURA 4.14. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM1 (SOLO).....	74
FIGURA 4.15. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM2 (25% CALCÁRIO).	75
FIGURA 4.16. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM3 (50% CALCÁRIO).	75
FIGURA 4.17. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM4 (75% CALCÁRIO).	75
FIGURA 4.18. COMPORTAMENTO DO MR EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.....	77
FIGURA 4.19. CURVAS DE RCS DAS AMOSTRAS.....	78
FIGURA 4.20. RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS O ENSAIO DE RCS.	80
FIGURA 4.21. COMPORTAMENTO DO RCS EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: GRADUAÇÃO PARA ENSAIO DE ABRASÃO <i>LOS ANGELES</i>	44
TABELA 3.2. TENSÕES EMPREGADAS NA FASE DE CONDICIONAMENTO PARA O ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	49
TABELA 3.3. TENSÕES DE CARREGAMENTO EMPREGADAS NO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.	50
TABELA 4.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO CALCÁRIO (%).	53
TABELA 4.2: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO CALCÁRIO (%).	54
TABELA 4.3: PROPRIEDADES DO AGREGADO CALCÁRIO.....	54
TABELA 4.4: PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.	57
TABELA 4.5. PERCENTUAL DE AGREGADO E SOLO PARA AS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS (FAIXA C).....	58
TABELA 4.6. PERCENTUAL DE AGREGADO E SOLO PARA AS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS (FAIXA D).....	59
TABELA 4.7. DENOMINAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS.....	59
TABELA 4.8: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS.	60
TABELA 4.9: MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DAS AMOSTRAS.....	62
TABELA 4.10: PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS.....	62
TABELA 4.11: CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO.....	63
TABELA 4.12: PROPRIEDADES DE COMPACTAÇÃO PARA AS AMOSTRAS.....	66
TABELA 4.13: RESULTADOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) (%).	70
TABELA 4.14: RESULTADOS DA EXPANSÃO.	71
TABELA 4.15: CONSTANTES DE REGRESSÃO E DOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) DAS AMOSTRAS.	73
TABELA 4.16: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (KPa).....	79

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1: FAIXAS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA BASE.	25
QUADRO 2.2: CORRELAÇÃO PROVÁVEL ENTRE ISC E CLASSIFICAÇÃO TRB E SUCS.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CEN	<i>Comité Européen de Normarlization</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CT	Centro de Tecnologia
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LAPAV	Laboratório de Geotecnia e Pavimentos
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LSR	Laboratório de Solidificação Rápida
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
M _R	Módulo de resiliência
NP	Não plástico
RCS	Resistência à Compressão Simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba

LISTA DE SIMBOLOS

E_c	Energia de compactação
n	Número de golpes
P	Peso do soquete
H	Altura de queda
V	Volume de solo a ser compactado
N	Número de camadas
σ_d	Tensão desvio
ϵ_r	Deformação específica resiliente
Δh	Deformação resiliente
h_0	Altura inicial do corpo de prova
σ_3	Tensão de confinamento
k_1, k_2, k_3	Constantes determinadas experimentalmente
P_a	Pressão atmosférica
θ	Primeiro invariante de tensões
τ	Tensão de cisalhamento octaédrica
$\rho_{m\acute{a}x}$	Massa específica seca máxima
$W_{\acute{o}tm}$	Umidade ótima
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	19
2.2.1 Estabilização química	20
2.2.2 Estabilização mecânica.....	21
2.2.3 Estabilização granulométrica	22
2.3 COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS GRANULOMETRICAMENTE.....	23
2.3.1 Granulometria	23
2.3.2 Plasticidade do solo.....	25
2.3.3 Características de compactação.....	26
2.3.4 Índice de Suporte Califórnia	28
2.3.5 Módulo de Resiliência	31
2.4 AGREGADO CALCÁRIO	34
2.4.1 Características do calcário	34
2.4.2 Características químicas e mineralógicas	34
2.4.3 Características físicas	35
2.5 USO DE CALCÁRIO EM PAVIMENTAÇÃO	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 PROGRAMA DE ATIVIDADES.....	39
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	40
3.2.1 Coleta e preparação das amostras.....	40
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO CALCÁRIO	42
3.3.1 Caracterização química.....	43
3.3.2 Análise granulométrica.....	43
3.3.3 Massa específica e absorção de água.....	43
3.3.4 Ensaio de desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	43
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	44

3.4.1	Análise granulométrica.....	44
3.4.2	Massa específica	45
3.4.3	Limites de consistência.....	45
3.4.4	Classificação dos solos	45
3.5	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	46
3.6	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS	46
3.6.1	Ensaio de Compactação.....	47
3.6.2	Análise granulométrica antes e após a compactação.....	48
3.6.3	Índice de suporte Califórnia (ISC) e expansão	48
3.6.4	Módulo de Resiliência	49
3.6.5	Resistência à compressão simples.....	51
4	RESULTADOS	53
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO CALCÁRIO	53
4.1.1	Composição química	53
4.1.2	Propriedades do agregado calcário.....	54
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	56
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO	58
4.3.1	Composição das misturas	58
4.3.2	Análise granulométrica.....	59
4.3.3	Massa específica	62
4.3.4	Limites de consistência.....	62
4.3.5	Classificação das misturas solo-agregado.....	63
4.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	64
4.4.1	Compactação.....	64
4.4.2	Ensaio de granulometria após a compactação para as misturas solo-agregado.....	67
4.4.3	Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão	70
4.4.4	Módulo de resiliência	72
4.4.5	Resistência à Compressão Simples (RCS).....	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	81
5.1	CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS ENSAIOS REALIZADOS	81
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	83
	REFERÊNCIAS.....	84

APÊNDICES A – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS AMOSTRAS EM FUNÇÃO DA TENSÃO DESVIO E DA TENSÃO CONFINANTE	91
APÊNDICES B - CURVAS DE RCS DAS AMOSTRAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento do setor de engenharia de transportes é fundamental para o desenvolvimento do país. Para isso, são necessários investimentos em infraestrutura viária, o que gera uma grande demanda de insumos para serem empregados na pavimentação. Os principais insumos empregados em camadas de pavimentos são os materiais granulares provenientes de atividades mineradoras. A escolha desses materiais para construção ou recuperação de pavimentos deve ser realizada com base em suas características físicas, mecânicas e econômicas, como a exploração dos materiais e custos com transportes.

No cenário atual, os materiais com frações granulométricas adequadas para serem empregadas em base e sub-base de pavimentos apresentam-se como fator limitante para o setor de transporte, uma vez que estas fontes se encontram cada vez mais escassas e distantes dos centros consumidores. Esta realidade não difere da região da grande João Pessoa no estado da Paraíba.

Diante dessa realidade, cabe à Engenharia Geotécnica de Pavimentos buscar novas alternativas através de pesquisas. Dentre os materiais convencionais mais utilizados na pavimentação pode-se destacar o calcário, onde algumas pesquisas apresentam o bom comportamento desse material em camadas de pavimentos rodoviários (YILMAZ e KARASAHIM, 2010; MAHROUS *et al.*, 2010; LUZIA *et al.*, 2012). No entanto, os estudos sobre a utilização do calcário em pavimentos na região são poucos.

No Nordeste brasileiro, a exploração mineral é uma das principais atividades econômicas desenvolvidas na região. Dentre os variados materiais extraídos podem destacar as rochas carbonáticas (calcário e dolomita), que possuem jazidas presentes em todos os estados. Na região da grande João Pessoa, estado da Paraíba, existem grandes jazidas de calcário, em que, apesar de estarem disponíveis, esses materiais não são usados na pavimentação. Atualmente, o uso desses materiais é feito predominantemente por indústrias de cimento *Portland*.

Dessa forma, a pesquisa pretende investigar o emprego de agregados de calcário em base e sub-base de pavimentos na região da grande João Pessoa, substituindo materiais convencionais utilizados tradicionalmente na região, como cascalho, areia natural e solo. A

substituição total ou parcial de materiais naturais por materiais provenientes da exploração de pedreiras tem sido bastante utilizada na pavimentação.

Outra solução encontrada pela Engenharia Geotécnica de Pavimentos consiste na estabilização dos materiais naturais. Principalmente no caso dos solos, emprega-se esta técnica quando estes materiais não puderem ser utilizados no mesmo estado que se encontram nas jazidas. Os estabilizantes mais utilizados são os aditivos, cimento *Portland* e a cal. Porém é muito comum empregar a técnica de estabilização granulométrica, adicionando ao solo materiais granulares, como areia, cascalho e agregados. A estabilização de solos com aditivos elevam os custos nas obras, tendo valores superiores quando se faz uso de misturas granulométricas. Além do mais, o uso da técnica da estabilização granulométrica proporciona ao solo maior resistência quando submetido aos esforços oriundos do tráfego.

Os mais variados materiais foram empregados em misturas com solos para várias finalidades, dentre eles destaca-se o uso de materiais resultantes da extração mineral (BATALIONE, 2007; ALECRIM 2009; SILVEIRA, 2010; SAGHAFI *et al.*, 2013), agregados de resíduos da construção civil (GRUBBA, 2009), areia de fundição (KLINSKLY, 2014; TEIXEIRA, 2014), dentre outros. A grande maioria destes trabalhos constatou o bom desempenho do uso desses materiais em misturas com solos.

Nesse contexto, a presente pesquisa visa avaliar o emprego de agregado calcário na composição de misturas com solo, em substituição aos materiais naturais atualmente empregados na região da grande João Pessoa em camadas de pavimentos. As características dos materiais empregados nas misturas solo-agregado são analisadas por ensaios laboratoriais, de modo a acrescentar conhecimento, estabelecer conclusões e sugestões sobre aplicações dos materiais pesquisados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo principal avaliar o uso de diferentes teores de agregados calcários em camadas de pavimentos estabilizadas granulometricamente.

1.2.2 Objetivos específicos

Em termos específicos, esta pesquisa propõe os seguintes objetivos:

- investigar as propriedades tecnológicas do agregado calcário;
- estudar as propriedades físicas e mecânicas das amostras dos materiais estudados;
- avaliar o comportamento das misturas solo-agregado em relação à quantidade de agregado nas amostras;
- comparar o desempenho dos diferentes cenários estudados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura desta pesquisa está dividida em cinco capítulos, conforme as descrições a seguir:

- Capítulo 1: este capítulo introduz o tema da pesquisa e sua relevância, além disso, estão descritos os objetivos e a estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: refere-se a uma revisão bibliográfica sobre a temática conceitual de estabilização de solos. São expostos também as principais características físicas e mecânicas dos materiais empregados na pavimentação e sua influência diante da estabilização granulométrica. Ainda, estão apresentadas as principais características dos agregados calcários usados em pavimentação;
- Capítulo 3: neste capítulo estão apresentados os materiais empregados, os procedimentos para determinação dos teores de cada material nas misturas, solo-agregado, bem como os procedimentos experimentais propostos para a realização desta pesquisa;
- Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com os materiais, bem como mostra as análises de resultados baseadas nas especificações técnicas e nas diferentes misturas solo-agregado;
- Capítulo 5: relata as considerações sobre o programa experimental, as mais relevantes conclusões obtidas nesta pesquisa e algumas sugestões para pesquisas futuras.
- Por fim, estão apresentadas as referências que serviram de suporte para esta pesquisa, seguida dos apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os temas mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Esta revisão foi dividida em quatro tópicos: considerações básicas, estabilização de solos, características dos solos estabilizados, agregados calcários e seu uso em pavimentação.

Nesse contexto, buscou-se explicar conceitos básicos sobre pavimentos rodoviários, conceitos fundamentais sobre estabilização de solos, abordando as características e os principais tipos de estabilização utilizados na pavimentação. Este apresenta também, as principais características dos agregados calcários e seu desempenho ao ser empregado em camadas granulares de pavimentos, com base em pesquisas nacionais e internacionais.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários uma melhora nas condições de rolamento da rodovia, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2007). As camadas de um pavimento pode ser subleito, reforço de subleito, sub-base, base e revestimento.

Segundo a NBR 7207 (ABNT, 1982), subleito consiste na camada de fundação do pavimento ou do revestimento. Enquanto, a sub-base compreende uma camada corretiva do subleito, ou complementar a base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem. A função principal da camada de base consiste em distribuir os esforços aplicados na superfície oriundos do tráfego de veículos, adequando as tensões e as deformações por cisalhamento e consolidação transmitidas ao subleito (KLINSKY, 2013). Para Balbo (2007), a camada de revestimento deve suportar à ação de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, perda de compactação ou desagregação de componentes.

Para Klinsky (2013), a camada de base deve apresentar capacidade para distribuir as tensões, a qual está relacionada às propriedades mecânicas dos materiais utilizados, assim como sua espessura. Um dimensionamento adequado deve proporcionar espessuras que evitem o excesso de carregamento no subleito.

Usualmente, as camadas de base e sub-base são construídas com materiais granulares de acordo com a sua disponibilidade nas proximidades da obra. Dentre os materiais, podem-se citar os agregados naturais, os solos e misturas compostas por esses materiais.

Os solos são amplamente empregados nas mais diversas obras de engenharia rodoviária. Apresentam-se como material de características variáveis de acordo com sua localização. Contudo, para sua utilização em muitos casos é necessário melhorar o comportamento de suas propriedades, por meio da adição de outros materiais, formando misturas. Estas misturas, denominadas de estabilização de solos, são feitas com materiais em proporções adequadas, de forma que proporcione o aumento na resistência dos solos após serem compactados. Para melhor compreensão desta técnica, a seguir está apresentada a contextualização acerca deste tema.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilizar um solo consiste em melhorar seu comportamento mecânico, tornando suas características resistentes às cargas externas e dos efeitos das variações climáticas, e dessa forma, atender às especificações de projeto desejadas. As propriedades de engenharia melhoradas ao realizar a estabilização de um solo, usualmente, são a expansibilidade, a resistência mecânica, a durabilidade e a permeabilidade (GONDIM, 2008).

O interesse pela estabilização do solo cresceu com a finalidade de melhorar os efeitos de carregamento cíclico de tráfego pesado, isto pela necessidade de pavimentos mais resistentes que muitas vezes não podem ser fornecidos pelos materiais granulares disponíveis (AMU et al., 2011).

As alterações nas propriedades do solo podem ocorrer por processos físicos, por meio da adição ou retirada de partículas de solo, por processos químicos, com a adição de quantidades pré-definidas de aditivos, ou ainda, por processos mecânicos, este principalmente por compactação do solo, o qual está associado aos outros processos.

Ao escolher o tipo de processo para estabilizar um solo deve-se considerar que estabilização não é um processo infalível pelo qual todas as propriedades dos solos serão melhoradas. Para escolher adequadamente o método de estabilização a ser empregado é importante focar as propriedades do solo que precisam ser corrigidas e as finalidades as quais se destinam o processo de estabilização (GONDIM, 2008).

Sendo assim, diante dos mecanismos utilizados para a estabilização de solos, os métodos de estabilização podem ser classificados em diferentes modalidades. As principais são a estabilização química, mecânica e granulométrica, apresentadas nos próximos itens.

2.2.1 Estabilização química

As propriedades dos solos podem ser melhoradas quando misturados com algum material químico, que se denomina estabilização química. Neste método de estabilização os aditivos interagem com as partículas do solo, visando melhorar e estabilizar as suas propriedades mecânicas e hidráulicas (OLIVEIRA, 2011).

Essa técnica baseia-se na utilização de aditivos, como o cimento Portland, asfalto, cal, e alguns produtos químicos (por exemplo, silicatos e polímeros), para alterar a estrutura química do solo, para que este possa alcançar o efeito desejado (CALIK e SADOGLU, 2014). Com aplicação destes aditivos com aplicação destes aditivos, na literatura é comprovada o aumento das propriedades de resistência do solo empregado em camadas de pavimentos (BAGHINI *et al.*, 2013; KHOURY *et al.*, 2013; RUVER *et al.*, 2013; LUCENA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2015), tais como o índice de suporte Califórnia, a resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

Na estabilização de camadas de base e sub-base de pavimentos, a cal e o cimento Portland são os materiais mais utilizados. Os efeitos da estabilização sobre o solo pode variar com o tipo de aditivo utilizado, como foi observado por Ban e Park (2014), os autores estabilizaram três solos com cimento e cal hidratada, nos teores de 5 e 10%. Para todos os solos observaram por meio da resistência à compressão simples, que a adição de cimento proporcionou resistência superior a cal. Com o aumento da proporção de estabilizante na mistura, a resistência à compressão simples teve aumento significativo independentemente do tipo de estabilizante. Também pôde ser visto que o cimento aumentou a resistência à compressão simples de forma mais eficaz. Pereira (2012) explica que a resistência do cimento é atingida em idades inferiores a cal, além disso, o cimento possui afinidade em utilizar uma maior variedade de solos.

2.2.2 Estabilização mecânica

As propriedades do solo podem ser melhoradas através da estabilização por compactação, que é uma estabilização mecânica que visa dar ao solo (ou mistura de solos) uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. É um método que sempre é utilizado na execução das camadas do pavimento (MARQUES, 2009). Gondim (2008) considera como métodos de estabilização mecânica os procedimentos que mudam apenas o arranjo das partículas do solo ou a sua granulometria.

Na busca pelo aumento no peso específico de um solo compactado, a técnica comumente empregada para realizar a estabilização mecânica, consiste no aumento da energia de compactação (SOUZA JUNIOR, 2005; YANG *et al.*, 2012; EBEREMU *et al.*, 2013; RIBEIRO e RIBEIRO JUNIOR, 2012), na qual, as demais características de compactação são mantidas.

Os autores Bastos *et al.* (2015), Pinto (2013) e Amorim (2013) ao analisarem a influência da variação de energia de compactação verificaram que os melhores resultados das características mecânicas, como a capacidade de suporte e resistência à compressão simples, são alcançados quando submetido ao nível de energia mais elevado.

As mesmas conclusões foram feitas por Cavalcante e Barroso (2009) ao investigar a influência da variação da energia de compactação em misturas de solos e areia. Os autores observaram que com o aumento da energia o solo tornou-se mais compacto e menos expansivo, e com isso ocorreu consideravelmente um aumento na sua capacidade de suporte.

A aplicação de uma energia maior nem sempre implica em melhores resultados na resistência do solo, como destaca Barros *et al.* (2014) ao submeter três solos estabilização mecânica, por meio da variação de energia Proctor. O autor verificou que em um solo energia menores que a modificada resultou na melhor condição de capacidade suporte. O que pode ser justificado pela modificação na estrutura do solo com acréscimo da energia. Dessa forma, além da energia de compactação as características dos solos são essenciais para obter resultados satisfatórios.

A comparação entre métodos de compactação também é utilizada na busca de uma melhor densificação dos solos. Oriola e Moses (2010), Joel e Agbedi (2011), Nwaiwu *et al.* (2012), por exemplo, analisaram o comportamento de solos compactados na energia Proctor e na energia utilizado no Oeste Africano, este nível de energia é convencionalmente utilizado na região.

Portanto, a estabilização mecânica visa melhorar as características geotécnicas dos solos por meio de métodos mecânicos, fornecendo ao solo um aumento da densidade do solo, melhorando dessa forma, sua resistência mecânica.

2.2.3 Estabilização granulométrica

Segundo Villibor (1982), a estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, obtendo um produto de estabilidade maior que os solos de origem, com condições adequadas para aplicação em cada caso particular. O autor menciona ainda que alguns fatores, tais como a natureza das partículas dos solos, influenciam diretamente no comportamento das composições granulométricas dos materiais.

Para Senço (2001), a estabilização granulométrica consiste no uso de solos naturais, rochas alteradas, naturais, ou misturas artificiais de solos ou rochas alteradas, ou ainda combinações desses materiais que oferecem, após o umedecimento e compactação, boas condições de estabilidade.

A estabilização granulométrica consiste no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais que se enquadrem dentro de uma determinada especificação. Proporcionando que a resistência da mistura seja garantida pelo contato entre os grãos das partículas maiores e os vazios sejam preenchidos pelos grãos das partículas mais finas. Dessa forma, propiciar uma menor permeabilidade e uma maior densidade (GONDIM, 2008).

Souza Almeida *et al.*(2010) enfatiza que a correção granulométrica de um solo corresponde a uma simples alternativa realizada por meio da mistura de materiais, que isoladamente, não satisfazem as exigências de projeto, produzindo um novo material que atenda as especificações de projeto sob as características granulométricas, de plasticidade e de comportamento mecânico. Os autores constataram a adequação nessas propriedades ao realizar misturas de umarenoso com solos argilosos, em especial nas características mecânicas determinadas pela capacidade suporte.

Assim como o autor supracitado, na literatura (TEIXEIRA, 2014; SALTAN e FINDIK, 2008; KLINSKY, 2013; YADU e TRIPATHI, 2013; EMMERT, 2010; COUTO, 2009; KLINSKY *et al.*, 2014; MISHRA e TUTUMLUER, 2012) encontra-se uso da mistura dos mais diversos materiais granulares com o objetivo de alterar as propriedades físicas e

mecânicas dos solos, proporcionando o seu maior desempenho. O comportamento de solos estabilizados granulometricamente está apresentado no item a seguir.

Portanto, define-se como estabilização granulométrica a alteração das propriedades do solo através da adição de um ou mais material, com a finalidade de proporcionar maior estabilidade entre as partículas, melhorando a resistência às tensões.

2.3 COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS GRANULOMETRICAMENTE

As principais propriedades do solo são formalmente determinadas por ensaios básicos, tais como granulometria, plasticidade, compactação e índice de suporte Califórnia (ISC). Mas para obter uma melhor análise devem ser analisadas outras características determinadas por ensaios triaxiais de cargas repetidas, como o Módulo de Resiliência (MR). Dessa maneira, é fundamental compreender a influência das propriedades do solo no processo de estabilização.

2.3.1 Granulometria

Para obter um material estável, é necessário uma granulometria bem proporcionada de material grosso, podendo ter certa quantidade de material argiloso (VILLIBOR, 1982). Assim, a composição granulométrica deve apresentar grãos de tamanhos variados, de forma, que as partículas menores preencham os vazios entre as partículas maiores, mantendo o atrito entre elas.

Diversos materiais são utilizados na estabilização de solos, cada qual com composição granulométrica particular. Dentre os materiais de fração grossa, podemos citar rocha natural, material de britagem, pedregulho, areias, escória, entre outros. Já o material de fração fina, temos os solos de características siltosas e argilosas. Na realização das misturas pode ser adicionado ao solo outro solo, assim como agregados. Essas misturas são denominadas de solo-agregado.

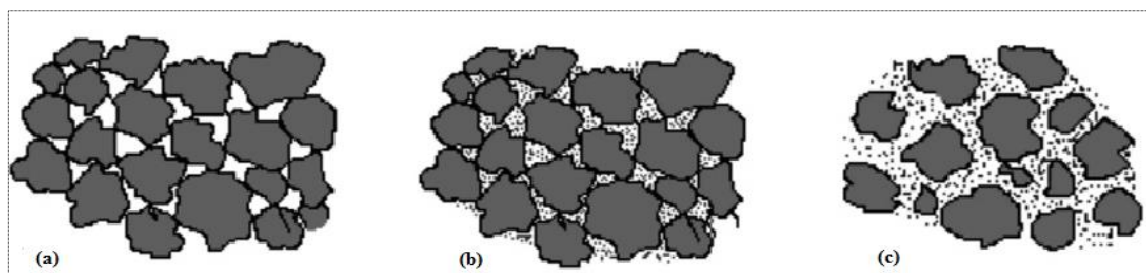
O estudo das frações das misturas é importante para compreender o comportamento das misturas granulométricas. Yoder e Witzak 1975 dividiu o arranjo granulométrico de misturas solo-agregado em três classes diferentes (Figura 2.1). Dependendo da proporção relativa entre a parte grossa e a parte fina, estas misturas podem ser assim classificadas (BERNUCCI et al., 2008):

(a) contato grão-grão: materiais de baixa densidade e sensibilidade a mudanças com a umidade ou com o congelamento, de boa permeabilidade e de difícil compactação;

(b) finos preenchem os vazios: misturas de alta densidade, apresentam contato grão-grão com permeabilidade mais baixa e resistência maior em geral que o tipo (a), de menor deformabilidade e dificuldade moderada de serem compactados;

(c) matriz de finos: nestas misturas não se garante contato grão-grão devido ao excesso de finos, apresentam densidade e permeabilidade inferiores ao tipo (b), podendo ser mesmo impermeável, dependendo da natureza dos finos. Esta mistura é afetada por variações de umidade e são de fácil compactação.

FIGURA 2.1: TIPOS DE MISTURAS SOLO-AGREGADO SEGUNDO YODER E WITCZAK (1975).



Fonte: Bernucciet al. (2008).

Segundo Bernucciet al. (2008) as misturas do tipo (b) e (c) são chamadas de solo-brita ou solo-areia. O tipo (c) tem sido denominado de solo-brita descontínuo. As misturas do tipo (a) e (b) são materiais bastante utilizados para base de pavimentos, de acordo com as especificações, onde o contato grão-grão seja garantido. Em geral, as misturas onde o contato grão-grão é garantido são tradicionalmente as preferenciais, embora a prática tenha mostrado grande sucesso no tipo (c), quando certos requisitos são observados. Nesse caso, o material fino empregado é de comportamento laterítico.

Na estabilização, é essencial obter uma curva granulométrica contínua, para isso, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece, na norma 141/10-ES, faixas de composição granulométrica para base. As faixas granulométricas estão destacadas no Quadro 2.1.

A porcentagem de cada material na mistura necessária para atender aos limites especificados pode ser determinada por meio de diferentes métodos: algébrico, do triângulo, gráfico de Rothfuchs, e das tentativas. Estes métodos indicam a dosagem de cada material.

Porém, devem ser confirmadas realizando-se ensaios de caracterização dos materiais (SOLIZ, 2007).

QUADRO 2.1: FAIXAS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA BASE.

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N \leq 5 \times 10^6$		Tolerâncias de faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT141/10.

Contudo, não se deve deter apenas à composição granulométrica, visto que outros fatores podem influenciar nas propriedades do solo estabilizado. Uma solução consiste em acrescentar ao solo granulometrias que estejam faltando, por exemplo, adicionar areia a um solo argiloso, e vice-versa. Teixeira (2014) adicionou areia de fundição na proporção variando de 20 a 80% a um solo argiloso. A partir do aumento do teor de areia de fundição, o material passou a ter característica arenosa, com diminuição da fração fina, silte e argila.

Para determinar uma mistura granulométrica, deve-se conhecer a natureza das partículas. Além disso, a composição granulométrica de um solo tem influência direta nas propriedades de plasticidade, de compactação, capacidade de suporte, entre outras. Por isso, a importância de se obter uma mistura com granulometria adequada, contendo frações grossas, médias e finas.

2.3.2 Plasticidade do solo

A sensibilidade à água dos solos está relacionada à sua granulometria. As frações grosseiras são pouco sensíveis à água, diferentemente das frações finas que possuem alta sensibilidade. Essa propriedade do solo é determinada em laboratório pelos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), e por diferença destes obtêm-se o índice de plasticidade (IP).

De acordo com Santanna (1998), para solos estabilizados o limite de liquidez tem por finalidade avaliar a absorção de água. Além disso, possui ligação com a manutenção da estabilização com a variação de umidade, enquanto o limite de plasticidade por sua vez avalia a expansão do solo. O índice de plasticidade indica a quantidade máxima de água absorvidas

pelos finos do solo. Portanto, quanto maior for o IP, maior a quantidade de água que o solo absorve.

Dessa forma, para prevenir a perda de suporte ou expansão, são estabelecidos limites superiores para estas propriedades do solo. Adota-se o limite de liquidez inferior a 25% e índice de plasticidade menor que 6%. A determinação destes limites está relacionada com os finos presentes, os quais após serem compactados absorvem água e aumentam seu volume. Valores superiores a estes estabelecidos implicam no afastamento dos grãos, consequentemente a redução da resistência por atrito (SANTANNA, 1998).

Na estabilização granulométrica procura-se adicionar materiais ao solo que possam reduzir sua plasticidade e atender aos requisitos estabelecidos. Saltan e Findik (2008) estudaram a adição de pedras-pomes, em proporções variando de 10% a 35% da massa em um material granular que apresentava elevados índices de plasticidade e que não era permitido o seu uso desse material diretamente em camadas de sub-base. No final dos testes, os autores verificaram que os limites de consistência diminuíram à medida que aumentou as porcentagens de pedra-pome na mistura, atendo aos requisitos para serem empregadas em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

Batalione (2007) ao utilizar rejeitos finos (nos percentuais de 15, 25 e 35%) de uma pedreira de granito na estabilização de solos, verificou a redução do índice de plasticidade. Para o autor, este comportamento condiz com a redução do teor de argila do solo natural em função da adição do rejeito, composto de areia e silte.

2.3.3 Características de compactação

A compactação consiste na aplicação de pressão, vibração ou impacto ao solo com a finalidade de melhorar as suas propriedades mecânicas, provocando a expulsão do ar dos poros do solo, resultando principalmente no aumento da sua massa específica. Outros benefícios podem ser citados, como o aumento da resistência ao cisalhamento e da capacidade suporte, e redução do índice de vazios, permeabilidade, contração e compressibilidade (SOUZA JUNIOR, 2005).

O processo de compactação é dado pela lubrificação das partículas do solo. Este efeito permite o deslizamento entre as partículas e consequentemente sua acomodação devido à contribuição da água utilizada no processo. Estando a umidade baixa, nota-se um aumento

no atrito entre as partículas, o que dificulta o arranjo entre dos grãos. Na compactação a quantidade de água e das partículas permanece constante. O aumento da massa específica ocorre pela eliminação de ar dos vazios. Portanto, para a energia aplicada existe um teor de umidade, denominado de umidade ótima, que conduz a massa específica seca máxima (RIOS, et al., 2013)

As propriedades resultantes da compactação estão diretamente relacionadas com a natureza do solo. Em solos estabilizados procuram-se materiais que misturados e compactados aumentem o massa específica seca aparente máxima. O valor da umidade ótima varia de acordo com as características do material.

A estabilidade de materiais granulares compactados é afetada segundo Klinskly (2013) principalmente pelo atrito interno, coesão, compressibilidade e a possibilidade dos materiais sofrerem expansão e contração. O autor ainda destaca que o atrito interno é o mecanismo de resistência dos pedregulhos e areia, enquanto que nos solos mais finos, a resistência associa-se principalmente a coesão. A fração argila relaciona-se com a compressibilidade, expansão e contração.

O aumento da massa específica seca máxima é um comportamento esperado ao estabilizar solos com os mais variados materiais. Yadu e Tripathi (2013) ao apresentar resultados da estabilização de um solo com escória verificaram que à medida que houve o incremento na proporção de escória na mistura, a massa específica seca do solo aumentou gradualmente. O aumento desta característica também foi observado por Emmert (2010) ao realizar a mistura de um solo laterítico arenoso com cascalho, na proporção de 50% para cada material. O autor observou que com o aumento da energia de compactação a massa específica seca máxima também aumentou. Quanto à umidade ótima, em ambos os casos, esta propriedade reduziu à medida que acrescentaram o material ao solo.

O comportamento de redução da umidade ótima também foi encontrado por Silveira (2010) ao adicionar finos de granito nas associações com solo natural. Para a autora, a redução da umidade ocorre devido ao aumento de percentual de frações grossas nas misturas, e conseqüentemente, a quantidade de água para se atingir a umidade ótima diminui. O aumento das frações grossas poderia estar relacionado à granulometria arenosa dos finos de granito ou mesmo com sua natureza química e mineralógica. A autora também observou uma variação da umidade ao adicionar finos de mecaxisto ao solo, onde à mistura que apresenta o maior percentual de finos obteve uma umidade final superior às demais misturas. Dessa

forma, conclui que houve um aumento das partículas finas, necessitando assim de maior quantidade de água para atingir a umidade ótima de compactação.

As características de compactação estão relacionadas às propriedades dos materiais que compõem a mistura. Além disso, o processo de compactação em misturas solo-agregado, dependendo da resistência dos agregados, alteram sua distribuição granulométrica. Para analisar este comportamento, principalmente em matérias frágeis como os resíduos, realiza-se análise granulometria antes e após a compactação. Como foi feito por Redivo (2011) ao estudar misturas de diferentes solos com cacos de telhas e tijolos, nos teores de 30, 50 e 70% em relação à massa do solo, observou diferenças granulométricas nas misturas antes e após a compactação. O autor verificou que quanto maior a proporção do material cerâmico, maior foi a alteração nas frações das misturas.

A compactação de solos estabilizados é, portanto, um ensaio no qual seus resultados sofrem influência da umidade, da energia de compactação e principalmente das características dos materiais empregados. Os materiais granulares apresentam comportamento diferente dos coesivos quando submetido às mesmas condições de compactação.

Deve-se ressaltar, entretanto, que os resultados da umidade ótima são fundamentais para a determinação de outras características do solo, tais como a capacidade de suporte, resistência à compressão e resiliência.

2.3.4 Índice de Suporte Califórnia

A resistência do solo utilizado em camadas granulares de pavimentos pode ser medida por meio do método de índice de suporte Califórnia (ISC), ou CBR (*Californiabearingratio*). Neste procedimento laboratorial é determinada a relação entre a pressão necessária para produzir a penetração de um pistão em um corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir esta mesma penetração em uma brita padronizada.

Com a capacidade suporte determinada no ensaio de ISC é possível determinar, por meio de equações empíricas, a estrutura do pavimento. Além disso, no ensaio é determinada a expansão do solo. De acordo com Bastos (2013), a expansão é uma propriedade utilizada para classificar a potencialidade de uso de um material em rodovias, pois solos de expansão significativa tendem a sofrer deformações ao serem solicitados e apresentam baixa capacidade de suporte quando em contato com a água.

As especificações do DNIT:ES 139 e 141/2010 para camadas estabilizadas granulometricamente fixam granulometria, limites de consistência, Índice de Suporte Califórnia mínimo e expansão máxima. Para camadas de base, o ISC deve ser superior a 60% na energia de compactação Proctor intermediária e a expansão inferior a 0,5%. Para a energia modificada o valor do ISC deve ser superior a 80%. No caso, da sub-base os limites são de ISC maior que 20% e expansão menor que 1,0%.

Emmert (2010) realizou a mistura de um solo laterítico arenoso com cascalho, sendo a mistura composta por 50% de cada material. O solo puro apresentou baixa resistência (ISC de 8,0% na energia modificada). Após ser estabilizada com o cascalho a mistura atingiu um valor de ISC de 58,3% e expansão de 0,06%, podendo ser empregado em camada de sub-base.

A resistência de um solo estabilizado está relacionada aos fatores que influenciam na compactação, como as características de origem dos materiais e sua granulometria. De acordo com as características físicas dos materiais é possível prever os resultados de ISC, como indica o DNIT (2006), que apresenta uma correlação entre os valores de ISC em função da classificação de solos pelo *Transportation Research Board* (TRB) e Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como pode ser visto no Quadro 2.2.

QUADRO 2.2: CORRELAÇÃO PROVÁVEL ENTRE ISC E CLASSIFICAÇÃO TRB E SUCS.

Classificação TRB	ISC provável (%)	Classificação SUCS	ISC provável (%)
A-1-a	40 a mais de 80	GW	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80	GP	30 a mais de 60
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80	GM	20 a mais de 60
A-2-6 e A-2-7	12 a 30	GC E SW	20 a 40
A-3	15 a 40	SP E SM	10 a 40
A-4	4 a 25	SC	5 a 20
A-5	Menos de 2 a 10	ML, CL, CH	15 a menos de 2
A-6 e A-7	Menos de 2 a 15	MH	10 a menos de 2
		OL, OH	5 a menos de 2

Fonte: DNIT (2006).

Observa-se no quadro acima uma variação nos valores de ISC de acordo com a classificação, e que materiais de granulometria mais graúda tendem a apresentar maiores valores de ISC do que os solos finos. Porém, essa correlação não se aplica para todos os solos, Klinsky e Fabbri (2009) obteve um valor de 28% para o ISC de um solo classificado como A-7-5 e ML, desse modo pode-se perceber que esse valor supera o valor provável apresentado no Quadro 2.2.

KlinskyeFabbri (2009) adicionaram areia de fundição nos teores de 20, 40, 60 e 70%, em relação ao peso do dolo. Os resultados demonstram um aumento no ISC com a adição de areia até o teor de 60%, cujo valor de ISC foi de 67%, a partir do qual o ISC decresceu.

Siswosoebrothoet *al.* (2005) estudaram a influência do teor de finos e da plasticidade na resistência de agregados para serem empregados em camadas de base. Aos agregados foram adicionados 0%, 4%, 8%, 12% e 16% de um solo fino que apresenta característica de plasticidade e outro não plástico. Os autores verificaram uma variação dos valores do ISC com um aumento no teor de finos, sendo encontrado o maior valor mistura contendo 8% de finos não plásticos, o maior ISC das misturas que contêm finos plásticos foi obtido na mistura com 4% de finos.

Alecrim (2009) determinou as características físicas e mecânicas de resíduos de mineração de quartzito misturado com solos para serem empregados em bases ou sub-bases de pavimentos flexíveis. O autor apresentou resultados acerca dos ensaios de ISC com misturas contendo 60% de agregados e 40% de solo. As misturas foram caracterizadas em contínuas (material integral da britagem com solo) e descontínuas (material granular classificado como brita 1 com solo). Os resultados constataram que o ISC variou 2%, em relação à granulometria do agregado, o que indica que não há influência significativa da distribuição granulométrica nas resistências das misturas.

Couto (2009) utilizou misturas granulométricas em um trecho experimental, sendo os materiais a pedra britada, brita graduada e argila laterítica. Neste estudo por meio dos resultados dos ensaios de caracterização verificou que a mistura de solo-agregado adequado deve conter 40% de argila laterítica e 60% de agregado pétreo, e apresentou ISC mínimo de 60%. Portanto, condições adequadas para construção de base e sub-base de pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego. Com a utilização de solo agregado, neste trabalho, houve uma economia entre 20 a 30% no custo por metro quadrado da base e sub-base, quando comparada com a brita graduada.

Nesse contexto, o teste de ISC é usualmente utilizado para determinar a resistência de uma camada estabilizada granulometricamente e mecanicamente. Porém, a resistência das camadas deve ser avaliada por ensaios triaxiais.

2.3.5 Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência (M_R) é uma importante propriedade na caracterização de materiais granulares empregados em camadas de base, sub-base e subleito de pavimentos e na concepção de estruturas de pavimentos.

O módulo de resiliência é experimentalmente determinado pela aplicação de uma carga axial repetida a uma amostra do material granular montada em uma célula triaxial. O ensaio simula as condições de um pavimento submetido a cargas de tráfego. Sendo em teste definida como a razão entre a tensão máxima de desvio (σ_d) e a deformação elástica recuperável (ε_r), como na equação 2.1:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.1)$$

Em que:

M_R = Módulo de resiliência, expresso em MPa ou Kgf/cm²;

σ_d = Tensão desvio, expresso em MPa ou Kgf/cm²;

ε_r = Deformação específica resiliente.

A deformação específica resiliente é definida como a razão entre a deformação resiliente (Δh) e a altura inicial do corpo de prova (h_0), como mostra a equação 2.2:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.2)$$

Dessa forma, o módulo resiliente é determinado a partir da razão da tensão de desvio aplicada à amostra e a deformação axial resiliente após a libertação da tensão de desvio. Mais simplesmente, o módulo resiliente de um material pode ser considerado como uma estimativa do seu módulo de elasticidade.

O módulo de resiliência apresenta um comportamento não linear diante da variação do estado tensão atuante no solo. Diante disso, o módulo de resiliência é representado por modelos matemáticos. Existem vários modelos que são utilizados para representar o comportamento resiliente de um material granular. Com o avanço da computação, têm surgido modelos mais sofisticados com mais componentes de tensão e maior número de constantes de regressão (VIANA, 2007).

Os modelos clássicos são usualmente utilizados para representar o M_R , na equação 2.3, o modelo baseia-se na tensão confinante, no qual, o módulo de resiliência depende da

tensão de confinamento. No modelo apresentado pela equação 2.4, leva-se em consideração apenas a tensão desvio para representar o módulo de resiliência. Klinsky *et al.* (2014) enfatiza que o primeiro modelo é utilizado principalmente para materiais granulares, enquanto, o segundo representa um desempenho para solos coesivos.

Outro modelo, bastante utilizado na literatura, que recebe a denominação de modelo composto (equação 2.5), considera que o módulo de resiliência depende da tensão de confinamento e da tensão desvio. Este modelo é bastante aceito por se adequar aos diversos materiais não tratados quimicamente, de granulometria diferentes, empregados camadas granulares de pavimentos. Um quarto modelo, equação 2.6, conhecido com o modelo universal não linear, também é utilizado para representar todos os tipos de solos. Este considera a pressão atmosférica e a primeira invariante de pressão.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2.3)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2.4)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.5)$$

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (2.6)$$

Em que,

σ_3 = Tensão de confinamento, expresso em MPa ou Kgf/cm²;

k_1, k_2, k_3 = Constantes determinadas experimentalmente;

P_a = Pressão atmosférica;

θ = primeiro invariante de tensões, soma das três tensões principais ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3 \cdot \sigma_3$), e;

τ = tensão de cisalhamento octaédrica ($\tau = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$).

O modelo representado pela equação 2.5 tem apresentado bons resultados quando comparados aos demais modelos convencionais para o uso de solos estabilizados granulometricamente. Como foi observado por Grubba (2009) ao estudar a estabilização granulométrica de 25% de um solo argiloso com 75% de resíduo da construção e demolição, verificou que o modelo composto foi o que melhor representou o módulo de resiliência das misturas, resultando em um R² de 0,99.

Kumar e Sharma (2012) estudaram a influência da granulometria no módulo de resiliência em misturas de macadame úmido com solo (argila siltosa), pó de pedra, e areia grossa, nas proporções de 5 e 10%, resultando em seis combinações. A tendência para o módulo de resiliência das misturas foi a seguinte, em ordem decrescente: macadame úmido com (1) solo, (2) areia grossa, e (3) pó de pedra. Os autores constataram que com o aumento da proporção do solo, o módulo de resiliência também aumentou seu valor, enquanto a areia grossa e o pó de pedra mostrou exatamente uma tendência oposta. Com o aumento do teor de finos os valores dos módulos elásticos dessas duas combinações diminuíram.

Ao realizar o comportamento resiliente de agregado dolomito com a adição de 4, 8, 12 e 16% de materiais finos não plásticos, Mishra e Tutumluer (2012) obtiveram melhor resultados com a adição de 8% de finos, esta mistura apresenta uma melhor resistência ao movimento das partículas, as quais estão melhores rearranjadas. À medida que o teor de finos aumenta para além de 8%, todos os espaços vazios na matriz são preenchidos, e começam os finos conduzir o comportamento do agregado, levando a uma maior deformação e valores de módulo inferior. Já na adição de 4% de finos ocorre uma menor estabilidade na matriz estrutural do agregado.

Bastos (2013) avaliou a influência da umidade no M_R de um solo bastante fino, com 99% passante na peneira de 2,0 mm, estabilizado com brita. O M_R da mistura contendo 65% de brita e 35% de solo foi analisado considerando a umidade ótima e sua variação em $\pm 2\%$. O autor observou que o valor médio do M_R aumentou de 363 Mpa para 506 Mpa com a redução de 2% da umidade, enquanto, que com o acréscimo de 2% da umidade reduziu para 317 Mpa. O autor menciona que assim com os autores citados anteriormente, o M_R é mais bem representado pelo modelo composto quando comparado aos demais modelos, tanto quanto pelo modelo universal.

Analisando os estudos citados, verifica-se a influência da composição granulométrica dos solos no módulo de resiliência. Além da granulometria, o módulo de resiliência depende de outras propriedades relacionadas à natureza do solo, como a constituição mineralógica, textura e plasticidade, bem como da umidade, densidade e do estado de tensões (MEDINA, 1997).

Estes estudos comprovam que a estabilização consiste em uma eficiente alternativa de tratamento para o uso de materiais granulares, até então inadequados para serem empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos. Nota-se também a importância de

realizar ensaios em laboratório antes da aplicação de qualquer material, para verificar se os mesmos estão de acordo com as especificações.

2.4 AGREGADO CALCÁRIO

As rochas calcárias são formadas a partir do mineral calcita, composta por carbonato de cálcio. A origem do carbonato varia desde fósseis de organismos vivos, até por precipitação química (DPM/Unesp, 2012). As reservas destas rochas são encontradas em todos os continentes, porém menos de 10% das reservas são compostas exclusivamente por carbonato de cálcio (SAMPAIO e ALMEIDA, 2009). Dessa forma, as características das rochas calcárias estão relacionadas com sua formação de origem.

As características das rochas influenciam nas propriedades dos agregados. Diante disso, a seguir serão apresentadas algumas exposições sobre as características das rochas calcárias, que irão dar suporte para compreensão dos agregados utilizados nesta pesquisa.

2.4.1 Características do calcário

As diversas aplicações dos calcários são direcionadas por suas características químicas e físicas, tornando essencial a definição da mineralogia para determinar a potencialidade de seu uso nos diferentes segmentos. A composição mineralógica das rochas calcárias apresenta grande variabilidade. Dessa forma determinar seus minerais é um fator fundamental para analisar o comportamento do calcário usado em projetos de engenharia.

2.4.2 Características químicas e mineralógicas

Os autores, KitounieHouari (2013), Nejadet *et al.* (2013), UzuneTerzi (2012), Barra *et al.* (2014), Moura *et al.* (2013), Cuiet *et al.* (2014) e Duarte (2012), indicam que as rochas calcárias apresentam em sua composição variações predominada por óxido de cálcio (CaO), contendo sílica (SiO₂), magnésia (MgO) entre outros compostos. Estes formam os principais minerais presentes nas rochas calcárias a calcita (CaCO₃), a dolomita (CaCO₃MgCO₃), argilominerais e outras impurezas.

Souza e Bragança (2013), por meio do método de fluorescência de raios X, observaram que na sua composição as maiores impurezas encontradas foram o magnésio e a

sílica. O calcário foi classificado com dolomita, uma vez que o magnésio em sua maioria estava distribuído como dolomita, principal mineral identificado no difratograma de raios x, seguindo de calcita. O DRXapresentou picos de argilominerais, muscovita, caulinita e quartzo. Os silícios encontram-se presentes nas composições dos argilominerais e quartzo.

Cuiet *al.* (2014) encontraram ao analisar agregados calcários de origem de rochas sedimentares, teores de calcita superiores a 98%. Moura (2014) verificou que dentro de uma mesma microrregião no estado da Paraíba existem calcário calcítico e dolomítico. No calcário do tipo calcita o teor de óxido de cálcio é na faixa de 52% e de magnésia de 1,3%, enquanto, no dolomito percentual foi de 32% e 20%, para estes compostos, respectivamente.

Mahrouset *al.* (2010) caracterizaram amostras de oito depósitos diferentes de calcário no Egito. Os autores perceberam que o percentual de calcita variou de 29,78% a 95,45% entre os depósitos. Os resultados da difração de raios x indicaram a presença de feldspato, calcita, quartzo, mica, pirita e argilominerais. Em cinco dos oito depósitos, o mineral que apresentou a maior concentração foi o quartzo. Além disso, a presença de dolomita não foi identificada.

De acordo com os autores supracitados, o calcário pode ser classificado como calcítico, aquele que apresenta maior concentração de óxido de cálcio e menor concentração de magnésia, e dolomítico constituído por maior concentração de óxido de cálcio e magnésia. A determinação dessas propriedades é essencial para qualquer estudo, assim como a determinação de algumas propriedades físicas do agregado.

2.4.3 Características físicas

Dentre as características físicas comuns nos diversos usos do agregado calcário pode-se destacar a massa específica, absorção e desgaste por atrito. De acordo com Mahrouset *al.* (2010) as propriedades físicas também variam de acordo com o tipo de calcário. A massa específica dos diversos depósitos analisados variaram de um mínimo de 2,25 g/cm³ a um máximo de 2,7 g/cm³.

A composição granulométrica dos agregados depende do processo ou equipamento de britagem da rocha. Por meio da britagem, pode-se obter agregados nas frações graúdas, miúdas e material de enchimento, a ser utilizada de acordo sua finalidade. Os finos resultantes da extração de calcário são bastante utilizados e sua granulometria é classificada como areia, segundo os sistemas de classificação dos solos (NAZZAL *et al.*, 2011).

Outra característica que varia de acordo com a fração do material é a absorção de água. Uzun e Terzi (2012) realizaram teste de absorção em agregados calcários na fração miúda e graúda. Para a absorção nos agregados de diâmetro maior que 4,0mm o valor da absorção foi inferior a 1%, enquanto que nas frações menores que 4,0mm obtiveram valor superior a 3%. Comportamento esperado, uma vez que os agregados miúdos possuem maior superfície específica do que a fração graúda.

Uma característica que merece atenção é o desgaste por atrito sofrido pelos agregados calcários. Nejad *et al.* (2013), Yilmaz e Karasahim (2010), Uzun e Terzi (2012), Sengoz *et al.* (2014), obtiveram perda ao desgaste acima de 20% para agregados calcários. Mahrouset *et al.* (2010) encontrou valores bastante superiores a esses, contatando um valor de 100%. Este resultado indica que todo o calcário submetido ao desgaste não resistiu ao atrito.

Baet *et al.* (2013) analisaram a resistência ao desgaste de dois tipos de calcários que apresentam proporções diferentes de finos. O autor observou que a granulometria pode influenciar nos resultados. O material de característica mais grosseira apresentou maior perda ao desgaste, portanto, gera mais finos durante o processo de compactação, do que o com maior percentual de finos em sua composição.

A determinação dessas propriedades é essencial para avaliar a potencialidade de uso dos calcários nas mais variadas áreas da engenharia. O calcário é um importante material de expressiva produção em todo o mundo, de múltiplos usos. Dentre os habituais usos destaca-se seu uso como matéria prima para a fabricação de cimento, de cal e de corretivos agrícolas, na construção civil, fundente em metalurgia, na pavimentação e entre outros e até como pedra ornamental. A seguir será apresentado o comportamento do calcário como material pétreo utilizado na pavimentação, objeto desse estudo.

2.5 USO DE CALCÁRIO EM PAVIMENTAÇÃO

Os agregados calcários podem ser empregados tanto nas camadas granulares quanto em revestimentos de um pavimento (LUZIA *et al.*, 2012; PUPPALA *et al.*, 2012; BA *et al.* 2013; MORENO E RUBIO, 2013; NEJAD *et al.*, 2013; GHABCHI *et al.*, 2014). Contudo neste tópico estão apresentadas as características mecânicas de agregados calcários para uso em camadas granulares, que é tema desta dissertação.

Para o emprego de um material em camadas de base e sub-base de pavimentos, além das características físicas do material, a caracterização de sua resistência mecânica deve ser analisada por meio dos ensaios de compactação, ISC, resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

Nazzalet *et al.* (2011) determinaram as características de compactação de calcários para serem empregados em camadas granulares de pavimentos. Os autores constataram que o teor de umidade ótima encontra-se em torno de 6,5% e densidade seca máxima de 2,23g/cm³. Yilmaz e Karasahim (2010) encontraram resultados semelhantes a estes para as características de compactação. Os autores ainda verificaram que esse material apresentou alta capacidade de suporte, com ISC de 103%.

Luzia *et al.* (2012) também obtiveram alta capacidade de suporte para um tipo de calcário português. Além disso, os autores realizaram a caracterização mecânica por meio de ensaios triaxiais cíclicos de dois tipos de calcários. Cada calcário foi submetido a um tipo diferente de metodologia, de acordo com as normas da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO TP 46 – 94) e do *Comité Européen de Normalization* (CEN EM 13286-7, 2004). Com base nos resultados obtidos, os pesquisadores concluíram que os módulos resilientes obtidos por meio da metodologia AASHTO obtiveram variação aproximada de 160 MPa a 600 MPa, para o primeiro e último par de tensões, respectivamente. Com a caracterização de acordo com o CEN, a mesma faixa foi obtida para o outro tipo de calcário.

Ao analisar as características de agregados calcários para serem empregados em camadas de base de pavimentos, Baet *et al.* (2013) determinaram o módulo de resiliência em torno da umidade ótima, com variações de $\pm 2\%$. Dessa forma, os autores observaram que à medida que houve o incremento no teor de água o módulo de resiliência diminuiu. Este comportamento foi observado nos dois tipos de calcário analisados, apresentando maior variação quando comparado a outros agregados como quartzito e basalto.

Em contrapartida, Behiry (2013) ao analisar agregado calcário, com predominância de frações graúdas, encontrou valor de umidade de 16%, massa específica seca máxima próximo de 1,8 g/cm³, baixo ISC de 14% e módulo de resiliência de 800MPa. Em função desses resultados, o autor adicionou diferentes proporções (40, 50, 60, 70 e 80%) de escória de aciaria, concluindo, que com o aumento da porcentagem de escória de aciaria na mistura com o calcário, acarretou em um aumento significativo nas propriedades mecânicas, tais como

ISC e módulo de resiliência. O valor máximo foi obtido com a adição de 70% de escória, apresentaram valores de ISC e módulo de resiliência de 370% e de 4000MPa, respectivamente.

Saghafiet *al.* (2013) analisaram o comportamento do módulo de resiliência sob influência do aumento da tensão desvio, para uma mistura granular de solo com calcário, na fração pó de pedra, nas proporções de 10 e 20% de pó. Ao adicionar na mistura 10% de pó calcário os níveis de módulo de resiliência foram melhorados com o aumento da tensão desvio. Isto é atribuído a um aumento da coesão e do rearranjo interno das partículas das amostras compactadas. Com o aumento da tensão, a mistura composta por 20% de pó de pedra calcária, o seu M_R reduziu. A esta última mistura, o autor acrescentou 5 e 10% de material granular de escória, onde verificou um aumento brusco no M_R das duas misturas com o incremento da tensão confinante.

O uso de calcário na fração pó de pedra em misturas granulares também foi feito por Brooks *et al.* (2011), para serem utilizados em camadas de sub-base. Os autores verificaram o aumento da resistência, com a adição de calcário (nas proporções de 3, 6 e 9%) a dois tipos de solos diferentes. Os resultados de resistência à compressão simples das misturas apresentam uma leve variação com o aumento do teor de pó calcário. O maior aumento da resistência foi observado nas misturas submetidas à cura, isto ocorre devido à hidratação do pó calcário na presença de água.

Para Mahrouset *al.* (2010), a resistência à compressão simples está relacionada às propriedades químicas e mineralógicas dos agregados. Os autores ao analisarem a resistência à compressão simples com suas propriedades químicas verificaram que esta propriedade reduziu à medida que o conteúdo de quartzo dos calcários analisados aumentou. Este fenômeno pode ser devido a uma diminuição correspondente no teor de quartzo. Observou-se que um aumento no teor de quartzo nos calcários pode causar um aumento na sua resistência.

As características dos agregados calcários apresentam variabilidade, fato que pode ser influenciado por suas características de formação. Dessa forma, é fundamental a determinação das características analisadas para prever seu comportamento antes de seu emprego em camada de pavimentos, ou ainda, para analisar seu desempenho.

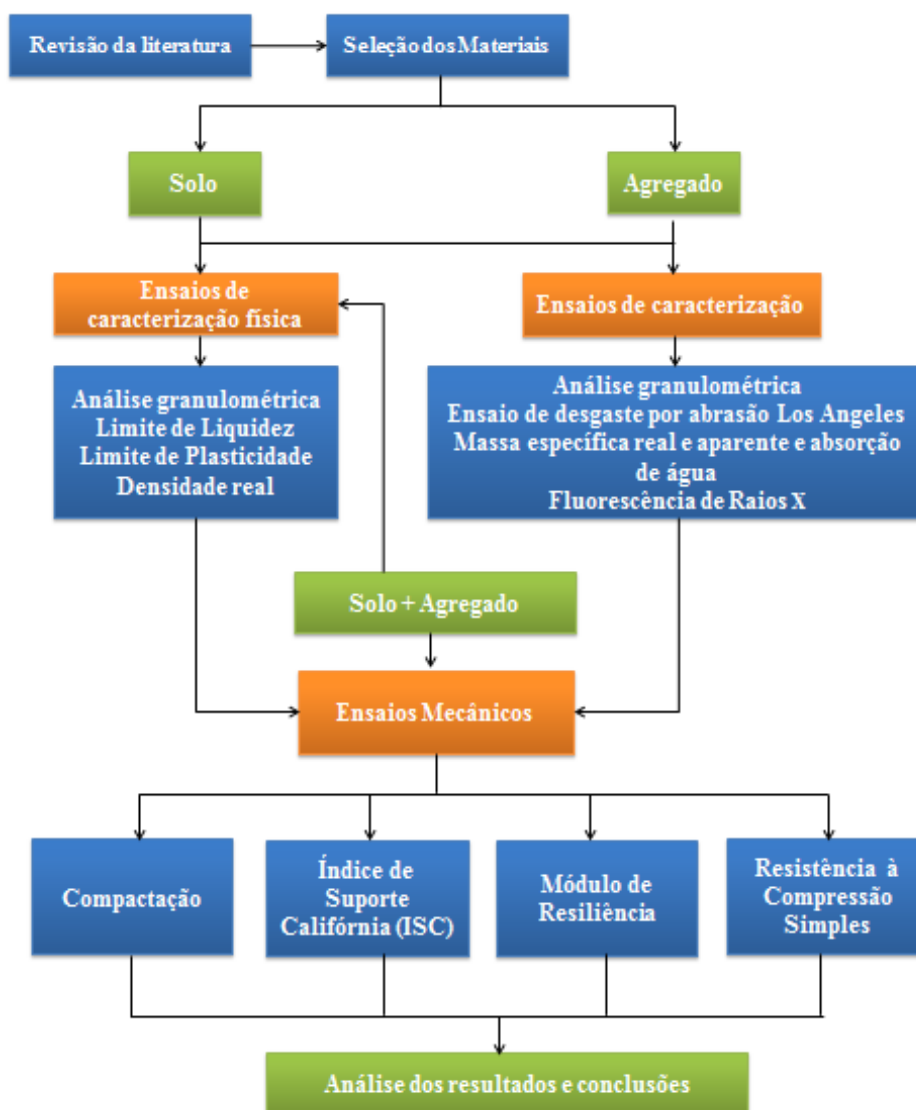
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a escolha dos materiais utilizados nesta pesquisa, bem como descreve os procedimentos experimentais necessários para caracterizar e analisar o comportamento dos materiais diante da estabilização granulométrica.

3.1 PROGRAMA DE ATIVIDADES

O Fluxograma da sequência de atividades realizadas durante a fase experimental desta pesquisa encontra-se apresentado na Figura 3.1.

FIGURA 3.1: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DE ATIVIDADES.



Fonte: Autor (2015)

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.1, o procedimento escolhido para realização desta pesquisa foi à adoção de um suporte teórico, baseado na revisão da literatura e na escolha dos métodos de ensaios que foram posteriormente utilizados para alcançar os resultados apresentados nos objetivos do trabalho.

A pesquisa bibliográfica estendeu-se por todo o estudo, buscou-se suporte acerca da estabilização granulométrica de solos e do emprego de agregado calcário na pavimentação. Assim como, as variáveis de interesse, no caso as propriedades do solo ao serem misturadas com outro material granular. A revisão serviu como base para a interpretação e análise dos resultados, e das conclusões.

Quanto à fase prática da pesquisa, inicialmente realizou-se a determinação dos materiais que seriam empregados na pesquisa e realizou-se a sua coleta. Na segunda etapa caracterizaram-se os materiais, solo e agregado, por meio de suas propriedades físicas. Com isso, determinaram-se as misturas granulométricas e realizou-se a caracterização física e mecânica das misturas por meio de ensaios de laboratório, todos na energia Proctor modificada. Por fim, realizou-se a análise dos resultados dos procedimentos experimentais realizados com os materiais e suas devidas conclusões.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a escolha do material, primeiramente, realizou-se um diagnóstico preliminar dos principais solos utilizados em projetos rodoviários elaborados pelo Departamento Estadual de Rodagem (DER) do estado da Paraíba. A partir desse diagnóstico definiu-se como agregado o uso do calcário, devido a sua disponibilidade na região. Com isso, buscou-se verificar a sua potencialidade no uso na pavimentação.

3.2.1 Coleta e preparação das amostras

Os materiais, solo e agregado de calcário, foram coletados em jazidas próximas à cidade de João Pessoa. Ambos os materiais, obtidos em jazidas de exploração, encontravam-se depositados em pilhas que estavam disponíveis para serem comercializados.

3.2.1.1 Solos

Para esta pesquisa foi coletada uma amostra de solo de aproximadamente uma tonelada. Este material foi depositado em recipientes e transportados para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV), na UFPB, local onde foi armazenado. A Figura 3.2 apresenta o aspecto geral do solo utilizado na pesquisa.

FIGURA 3.2: SOLO ESTUDADO.



Fonte: Autor (2014)

Nota-se na Figura 3.2 que o solo pode ser caracterizado visualmente pela presença de seixos rolados e torrões de materiais finos, além das frações arenosas, as quais também foram identificadas pelo tato.

3.2.1.2 Agregado Calcário

Os matacões das rochas calcárias coletadas na região de João Pessoa foram coletados, transportados e armazenados no LAPAV. Devido à ausência da comercialização de britas calcárias, fez-se necessário a britagem desses materiais. A Figura 3.3 apresenta o aspecto destes materiais antes de serem britadas e após a britagem.

FIGURA 3.3: ASPECTO DOS MATACÕES DE ROCHAS CALCÁRIAS: (A) ANTES DA BRITAGEM; (B) APÓS A BRITAGEM.



Fonte: Autor (2014).

Observa-se na Figura 3.3b que o material britado é composto principalmente por frações grosseiras, apresentando em sua composição partículas mais finas, de dimensões de

areia e silte. Porém, os diâmetros das partículas, devido o processo de britagem, não excederam 19,1 mm. As amostras dos agregados calcários britados foram homogeneizadas, secas e quarteadas, dessa forma, preparadas para determinação de suas propriedades.

3.2.1.3 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas para determinação de suas propriedades, como exposto na norma ME 041/94 do DNIT. Os solos coletados foram secos ao ar e em estufa, e homogeneizadas. Em seguida realizou-se o quarteamento para se obter uma amostra representativa de todo o material, como mostra a Figura 3.4.

FIGURA 3.4: PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS: QUARTEAMENTO.



Fonte: Autor (2015)

As propriedades do solo e das misturas foram determinadas por meio dos ensaios com base nas especificações, e estão descritas nos itens a seguir.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO CALCÁRIO

Nesta etapa da caracterização do agregado calcário foram realizados os ensaios básicos para determinar suas propriedades tecnológicas e sua composição química. Os ensaios realizados foram a análise granulométrica, massa específica, absorção de água e desgaste por abrasão *Los Angeles*. Estes ensaios foram executados no LAPAV, todos baseados nas especificações do DNIT.

3.3.1 Caracterização química

A composição química foi determinada por meio do método de fluorescência de raios X no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR), do Centro de Tecnologia (CT), também na UFPB. A determinação dos elementos constituintes dos materiais foi obtida utilizando-se um equipamento de fluorescência de raios X da marca SHIMADZU XRD 1800. Com este equipamento, realizou-se análise de amostras de granulometria inferior a 75µm, as quais foram prensadas em formato de pastilha.

3.3.2 Análise granulométrica

A determinação da análise granulométrica tem por finalidade determinar as proporções que compõe o agregado. Dessa forma, realizou-se este ensaio com base na DNIT-ME 083/98, utilizando-se as peneiras com diâmetros de 19,1; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,30; e 0,15mm.

3.3.3 Massa específica e absorção de água

A massa específica do agregado compreende a relação entre a massa dos grãos do agregado e o volume que estes ocupam. Experimentalmente este ensaio é realizado segundo preconiza as especificações do DNIT de acordo com as frações. Para o agregado miúdo, a massa específica foi determinada como indicado no item 3.4.2. Para o agregado graúdo, a massa específica aparente segue os procedimentos estabelecidos na DNIT ME 081/1998, que também apresenta os procedimentos para o ensaio de absorção de água.

A determinação da absorção de água visa analisar a quantidade de água absorvida pelo agregado verificando o aumento de sua massa, devido ao preenchimento de seus vazios permeáveis. Esta verificação é fundamental na caracterização dos agregados, pois agregados porosos tendem a absorver grande quantidade de água, o que influencia no comportamento desse material ao ser empregado em camadas de pavimentos.

3.3.4 Ensaio de desgaste por abrasão *Los Angeles*

A resistência ao desgaste está relacionada ao comportamento dos agregados sob a ação do tráfego. Esta característica é avaliada pelo ensaio *Los Angeles*, normalizado pela

DNIT ME 035/1998. Este ensaio estima o desgaste de um agregado por abrasão por meio do atrito entre os grãos agregados e esferas metálicas, além do contato com as paredes da máquina, enquanto esta gira. Para determinar a graduação da amostra a ser submetida ao ensaio, considera-se a faixa que melhor representa o material que será utilizado na avaliação. A Tabela 3.1 apresenta as granulometrias usadas para o ensaio de abrasão *Los Angeles*.

TABELA 3.1: GRADUAÇÃO PARA ENSAIO DE ABRASÃO *LOS ANGELES*.

Peneiras Abertura em mm		Amostra – massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNIT ME 035/1998.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

A caracterização foi realizada considerando as propriedades físicas do solo, determinadas pelos ensaios de análise granulométrica, limites de consistência e massa específica. Todos os ensaios foram realizados com base nas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

3.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das frações que compõem o solo. Usualmente as porcentagens do material são determinadas por peneiramento, no qual as partículas mais grosseiras são determinadas e as partículas finas são determinadas por sedimentação.

Nesse contexto, a granulometria das amostras de solos foi determinada de acordo com a DNIT-ME 051/94, sendo realizado por peneiramento e sedimentação. Realizou-se o peneiramento das partículas de diâmetro maior que 0,075 mm (peneira nº 200 da ASTM)

seguindo-se a série de peneiras de acordo com especificado na norma: diâmetro de 38,1; 25,4; 19,1; 9,5; 4,8; 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,30; 0,15; e 0,074 mm. Enquanto para a sedimentação, foi realizada com partículas menores que 2,0mm (peneira nº 10 da ASTM) com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, com concentração 45,7g/L. Com base no tamanho das partículas do solo determinou as porcentagens das frações pedregulho, areia, silte e argila.

3.4.2 Massa específica

A determinação da massa específica dos solos foi realizada baseando-se na norma DNIT: ME 93/1994. A amostra, de 10 g de solo, foi seca em estufa e colocada em um picnômetro de capacidade de 50 mL.

3.4.3 Limites de consistência

A determinação dos limites foi realizada conforme procedimentos do DNIT. O limite de liquidez (LL) foi realizado segundo a ME 122/1994 e o limite de plasticidade (LP) pela ME 082/1994, ambas do DNIT.

O ensaio do limite de liquidez foi realizado com o aparelho Casagrande, onde se realizou várias tentativas em diferentes umidades até a ranhura fechar-se quando submetidas aos golpes. O LL é definido como o teor de umidade na qual o solo se encontra ao fechar a ranhura com 25 golpes.

O LP é o teor de umidade na qual o solo é moldado nas dimensões de um cilindro de 3,0mm de diâmetro. Os limites de consistência são necessários para determinar a plasticidade do solo através do índice de plasticidade (IP), obtido pela diferença entre o LL e o LP.

3.4.4 Classificação dos solos

A classificação dos solos foi realizada considerando dois sistemas de classificação mais utilizados na pavimentação, sendo eles, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos e o *Transportation Research Board* (TRB). Para isso, são necessários os resultados dos limites de consistência e da análise granulométrica. Além desses, para o TRB, é imprescindível determinar o Índice de Grupo (IG).

O IG é um valor numérico, que varia de 0 a 20, que retrata o duplo aspecto de plasticidade e graduação das partículas do solo. O IG é calculado pela equação 3.1 (DNIT, 2006).

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (3.1)$$

Em que:

a : porcentagem de material que passa na peneira nº 200 menos 35. Se a porcentagem obtida for menor que 75, adota-se 75; se for maior que 75 adota-se 75;

b: porcentagem de material que passa na peneira nº 200 menos 15. Se a porcentagem obtida for menor que 55, adota-se 55; se for maior que 55 adota-se 55;

c= LL - 40. Se o LL for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40;

d=IP - 10. Se o LL for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10.

3.5 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

As proporções de solo e agregado calcário foram determinadas em função da caracterização física inicial dos materiais, da revisão bibliográfica e por métodos numéricos. Realizou-se o ensaio de análise granulométrica como preconiza o item 3.4.1 com o agregado calcário puro, para dessa forma, determinar as proporções de cada material na mistura. Com as porcentagens das granulometrias do solo e do agregado calcário, elaborou-se um conjunto de sistemas lineares considerando-se como referência a média dos limites das faixas granulométricas C e D, conforme apresentadas no Quadro 2.1. Essas composições são usualmente utilizadas para base estabilizada granulometricamente de pavimentos com tráfego pesado.

Definidas as composições das misturas, realizou-se a caracterização das propriedades físicas por meio dos ensaios de limites de consistência, massa específica, análise granulométrica e ainda sua classificação conforme os sistemas propostos, todos conforme os procedimentos experimentais apresentados no item 3.4.

3.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS

A caracterização do solo, do calcário e das misturas foi realizada por meio dos ensaios usualmente utilizados para materiais a serem empregados em camadas de base e sub-

base, ou seja, realizaram-se os ensaios Índice de Suporte Califórnia (ISC), módulo de resiliência e resistência à compressão simples. Para execução destes ensaios, inicialmente realizou-se o ensaio de compactação para definir os parâmetros de massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima, que podem influenciara resistência mecânica.

Com as determinações das características das misturas, pretendia-se identificar qual mistura apresentaria melhores resultados geotécnicos para fins rodoviários e analisar a viabilidade do seu emprego em camadas de pavimentos.

3.6.1 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para fins de determinação dos valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima do solo, calcário puro e das misturas solo-agregado. Para a realização dos ensaios, seguiu-se a metodologia descrita na norma DNIT: ME 164/2013, a qual estabelece o uso de amostras não trabalhadas. Por isso, cinco corpos de prova foram compactados com o teor de umidade crescente, na ordem de 2% de aumento entre as amostras, e dessa forma obteve-se a curva de compactação. Fez-se o uso de amostras não trabalhadas, pois o agregado poderia sofrer degradação no processo de compactação, e assim, alterar a curva de compactação.

O solo seco e homogeneizado foi peneirado nas peneiras de 19,1mm e 4,8mm. O material retido na peneira de 19,1 mm foi substituído por igual quantidade de material retido entre a peneira 19,1 e 4,8 mm. As amostras de 6.000 g foram novamente homogeneizadas e submetidas à compactação. Adotou-se a energia Proctor modificada na moldagem dos corpos de prova, a qual determina a aplicação de 55 golpes por camada, num total de cinco camadas. A energia modificada foi escolhida por ser indicada para avaliar solos empregados em camadas de base. Cabe ressaltar, que para cada amostra foram moldados dois corpos de provas nas mesmas condições, com a finalidade de se ter uma maior confiabilidade dos resultados.

Os resultados obtidos para todas as amostras, massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, serviram como base para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

3.6.2 Análise granulométrica antes e após a compactação

Para as misturas solo-agregado, as curvas granulométricas antes e após compactação foram determinadas. Para isso, as amostras foram compactadas na energia Proctor modificada. Após, os resultados antes e depois da compactação das amostras foram comparados, com o intuito de se analisar a fragmentação do agregado calcário com o impacto do soquete e entre as partículas. O ensaio foi executado, segundo os procedimentos determinados na norma DNIT: ME 398/99, a qual avalia o índice de degradação do agregado após ser submetido à compactação Proctor, conforme explicado no item 3.6.1.

3.6.3 Índice de suporte Califórnia (ISC) e expansão

A análise da resistência mecânica foi realizada através dos resultados dos ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia. A realização destes ensaios foi baseada na norma DNIT: ME 049/1994. As mostras foram preparadas nas mesmas condições do ensaio de compactação. Os corpos de provas foram moldados na umidade ótima e sob a energia de compactação modificada.

Os corpos de prova foram submersos, realizou-se a medição da pressão ao ser imersos e após as 96 horas de saturação, e com esses valores foram determinados a expansão. Após este período, de quatro dias, as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência na prensa, onde se penetra um pistão na amostra, aplicando-se cargas com velocidades conhecidas. Os ensaios para cada amostra foram realizados em triplicata, sob as mesmas condições. Na Figura 3.5 encontra-se a prensa utilizada para a realização do ensaio.

FIGURA 3.5: PRENSA PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ISC.



Fonte: Autor (2014).

3.6.4 Módulo de Resiliência

O M_R analisa comportamento elástico de materiais submetidos a cargas repetidas triaxiais, visando simular os efeitos no tráfego sob as camadas de pavimentos. A determinação do módulo de resiliência, do solo e das misturas, foi realizada experimentalmente segundo a norma DNIT: ME 131/94.

Os corpos de prova foram moldados utilizando-se um molde cilindro tripartido com 150mm de diâmetro e 300mm de altura, obedecendo a relação entre o diâmetro do cilindro e das partículas do material. A quantidade de água utilizada para moldar os corpos de prova foi baseada na umidade ótima, determinada no ensaio de compactação. Os corpos de prova foram compactados em 13 camadas e sob a energia de compactação Proctor modificada. A Figura 3.6 apresenta o cilindro utilizado para compactar o material e o corpo de prova moldado.

FIGURA 3.6: EQUIPAMENTO E CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE MR.



Fonte: Autor (2015)

Os ensaios foram realizados em duas etapas de aplicação de cargas, a primeira, para o condicionamento da amostra e, a segunda onde, onde foram medidos os deslocamentos resilientes. No condicionamento foram aplicados 300 ciclos de aplicações de cargas para os pares de tensões, conforme apresentado na Tabela 3.2.

TABELA 3.2. TENSÕES EMPREGADAS NA FASE DE CONDICIONAMENTO PARA O ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	Número de Ciclos
0,7	0,7	100
	2,1	
1,05	3,15	100

Fonte: DNIT ME 131/1994.

Após a fase de condicionamento iniciou-se a segunda fase, determinando-se o M_R com a aplicação de 18 pares de tensões, onde foram realizadas as leituras das deformações. Na Tabela 3.3 encontram-se as tensões-desvio determinada para cada tensão confinante.

TABELA 3.3. TENSÕES DE CARREGAMENTO EMPREGADAS NO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	Número de Ciclos
0,21	0,21	100
	0,42	
	0,63	
0,35	0,35	100
	0,70	
	1,05	
0,53	0,53	100
	1,05	
	1,58	
0,7	0,7	100
	1,4	
	2,1	
1,05	1,05	100
	2,1	
	3,15	
1,4	1,4	100
	2,8	
	4,2	

Fonte: DNIT ME 131/1994.

Para este experimento, foi utilizado o equipamento triaxial de carga repetida do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), da UFCG, apresentado na Figura 3.7. Os deslocamentos são medidos por dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) e a força aplicada por uma célula de carga. Com esses resultados, ao final do ensaio é obtido um valor de módulo para cada par de tensões.

FIGURA 3.7: EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.



Fonte: Autor (2015)

Com a finalidade de representar o comportamento do módulo de resiliência com o estado de tensão atuante no solo estudado, utilizaram-se os modelos usualmente usados para os materiais granulares, conforme as expressões de 2.3 a 2.6 no capítulo anterior.

3.6.5 Resistência à compressão simples

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), também denominado de resistência à compressão não confinada, submete um corpo de prova a um carregamento axial sem aplicação de confinamento. Neste ensaio determina-se a resistência à compressão pela pressão na qual ocorre a ruptura do corpo de prova. O ensaio de RCS é empregado, na engenharia de pavimentos, para solos coesivos estabilizados ou não com cal, cimento, entre outros estabilizantes químicos. Apesar disto, visando obter uma melhor análise dos parâmetros de resistência dos materiais, solo e das misturas com calcário, estudados nesta pesquisa, realizou-se este ensaio baseando-se nas normas DNIT 04/94 e NBR 12770/92.

Para moldar os corpos de prova utilizou-se um molde cilindro com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, obedecendo à relação que a altura deve ser duas vezes maior que o diâmetro, como preconiza as normas. Os cilindros utilizados foram os mesmos usados na moldagem de corpo de prova de concreto. A quantidade de água utilizada para moldar os corpos de prova foi determinada com base na umidade ótima, determinada no ensaio de compactação. Os corpos de prova foram compactados em cinco camadas e sob a energia de compactação Proctor modificada, sendo aplicados 36 golpes em cada camada.

Depois de compactados, os corpos de prova foram extraídos do molde com o auxílio de um macaco hidráulico. Em seguida, realizou-se a pesagem, e medição da altura e diâmetro duas vezes para cada amostra. Os corpos de prova foram embalados em saco plástico e esperou-se um tempo de espera de 24 horas para romper o corpo de prova. Para uma melhor análise dos resultados, foram realizadas para cada amostra três repetições, sob as mesmas condições de moldagem.

Na realização do ensaio utilizou-se a mesma prensa empregada no ensaio de ISC, pela facilidade de estabelecer uma velocidade constante e realizar as medições das pressões de acordo com as normas. Na Figura 3.8 está apresentado o corpo de prova moldado e a execução do ensaio de RCS.

FIGURA 3.8: CORPO DE PROVA E ENSAIO DE RCS.



Fonte: Autor (2015).

No topo do corpo de prova foi adicionado um disco de mesmo diâmetro, de forma a garantir a distribuição da carga por toda sua área. As leituras foram realizadas até três pontos após se observar a ruptura do corpo de prova, com esses valores determinou-se a tração pelo gráfico de tensão *versus* deformação. O valor final da RCS foi obtido a partir da média das três repetições.

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados com solo, agregado e misturas solo e agregado.

Para empregar um material em camadas de pavimentos é imprescindível o conhecimento de suas características, principalmente os aspectos determinados no comportamento mecânico. Inicialmente, foram apresentados os resultados das propriedades tecnológicas do agregado calcário. Na sequência foram expostas as características das propriedades físicas do solo, seguidas das do agregado calcário. Em seguida foram apresentadas as características mecânicas dos materiais puros e das misturas com os diferentes teores de calcário. Os resultados aqui apresentados são comparados com os valores estabelecidos nas especificações.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO CALCÁRIO

Nesta primeira etapa, a caracterização do agregado calcário foi determinada por meio de suas propriedades químicas. Foram caracterizadas ainda as suas propriedades físicas, que são análise granulométrica, massa específica, absorção de água e desgaste por abrasão *Los Angeles*.

4.1.1 Composição química

A caracterização química do agregado calcário foi realizada pelo ensaio de fluorescência de raios X. Os principais componentes químicos do calcário são apresentados, na Tabela 4.1.

TABELA 4.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO CALCÁRIO (%).

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Outros
71,65	16,04	6,25	1,67	1,55	1,50	0,67	0,31	0,29	0,08

Fonte: Autor (2015).

Na caracterização química, observa-se que o óxido de cálcio, ou seja, calcita é o principal constituinte do agregado calcário. O material é composto por impurezas, das quais se destacam a sílica e alumina, além de magnésio, ferro, entre outros, em menores quantidades. A predominância de calcita e a baixa proporção de magnésio faz com que o calcário possa ser classificado como calcítico. Com base nos principais componentes

químicos e nos estudos apresentados na revisão bibliográfica, os principais minerais do calcário são a calcita e em menor proporção quartzo.

4.1.2 Propriedades do agregado calcário

As amostras de agregado foram submetidas aos ensaios de granulometria por peneiramento para identificar como as partículas que compõe a amostra estão distribuídas e classificadas de acordo com o DNIT (2006). Na Tabela 4.2 encontra-se apresentada a composição granulométrica do agregado.

TABELA 4.2: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO CALCÁRIO (%).

Agregado graúdo ≥ 2,0mm	Agregado miúdo < 2,0mm e ≥ 0,075mm	Material de enchimento < 0,075mm
79,3	10,3	10,4

Fonte: Autor (2014)

Verificou-se a predominância de agregado graúdo, sendo que todas as partículas apresentam diâmetro menor que 19,0mm e maiores que 2,0mm. As demais composições, agregado miúdo e material de enchimento, apresentam proporções semelhantes. Ressaltando, o agregado foi utilizado sem nenhum preparo, ou seja, não houve separação granulométrica, o que de acordo com o DNIT (2006) se classifica como brita corrida.

Os resultados das demais propriedades físicas foram obtidos por Assis e Melo (2014). Os autores utilizaram o mesmo material empregado nesta pesquisa. Destaca-se que os autores realizaram o ensaio de Abrasão *Los Angeles* considerando a Faixa B, e para os ensaios de absorção e massa específica aparente foram consideradas as classificações 19 e 12 para britas. Na Tabela 4.3 estão apresentadas as principais propriedades do agregado calcário.

TABELA 4.3: PROPRIEDADES DO AGREGADO CALCÁRIO.

Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	Absorção (%)		Massa específica aparente (g/cm³)	
	19mm	12mm	19mm	12mm
62	7,4	9,1	2,20	2,19

Fonte: Adaptado Assis e Melo (2014).

O abrasão *Los Angeles* do calcário apresentou valor elevado, acima de 60%. Este resultado indica que o material não apresenta boa resistência ao desgaste por atrito, o que pode estar relacionado com a predominância do mineral calcita. Segundo Mahrouset *al.* (2010), quanto maior a porcentagem de calcita mais frágil é o calcário.

Ainda em relação ao ensaio de abrasão *Los Angeles*, verificou-se que o agregado calcário apresentou valor de abrasão superior ao limite máximo de 50% estabelecido pelo

DNIT (2006). Coêlho (1995), ao analisar agregados calcários da região de João Pessoa, também verificou que o calcário dessa região ficou fora dos limites de desgaste estabelecidos pelo DNIT. Dessa forma, o material não apresenta características adequadas para serem empregadas em pavimentação. Porém, Bernucciet *al.* (2008) enfatizam que dependendo da região e de fatores econômicos o agregado calcário pode ser utilizado, caso o valor de abrasão seja considerado menor ou igual a 65%.

Analisando a absorção, nota-se que o resultado para a brita 12 foi superior ao encontrado para a brita 19, concluindo-se que quanto menor as dimensões das partículas, maior o valor da absorção, comprovando o que foi verificado por Uzun e Terzi (2012). O resultado encontrado para a brita 19 foi bastante próximo ao encontrado por Coêlho (1995), a qual obteve um valor de 7,0% de absorção. Para esta propriedade o DNIT não estabelece limites para absorção nas suas especificações.

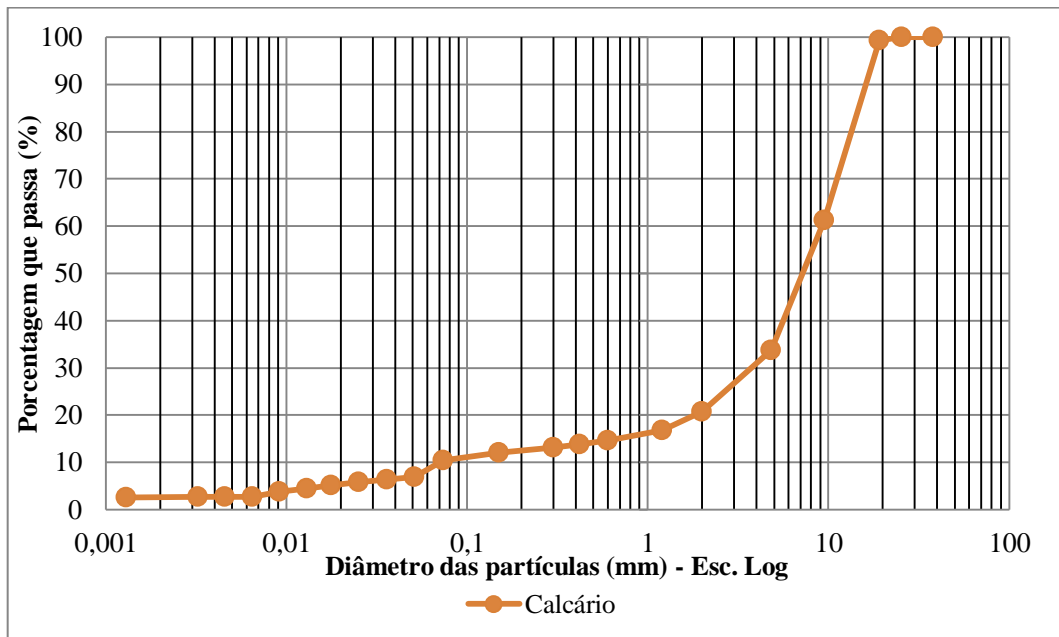
Quanto aos valores encontrados para massa específica aparente foram menores aos encontrados na literatura. Comparando os resultados de acordo com as dimensões das partículas, verificam-se valores muito próximos para os dois tamanhos.

A massa específica dos grãos finos apresentou um valor de 2,66 g/cm³, e está relacionada com a fração média e fina do material, e também com sua composição mineralógica. Quanto à plasticidade, o material não apresentou esta característica, logo classificado como não plástico NP. Apesar de o material apresentar partículas finas, este resultado era esperado, pois materiais provenientes diretamente de britagem de rochas não apresentam características de plasticidade. Embora estes ensaios não sejam indicados para agregados, decidiu-se fazê-los para realizar comparações com o solo e melhores análises dos resultados.

Na Figura 4.1 está apresentada a distribuição granulométrica do calcário obtida pelos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação.

De acordo com a Figura 4.1, observa-se na curva granulométrica uma boa graduação. Nota-se a predominância da fração pedregulho, considerando a classificação do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), que representa 79,13% da amostra. Porém, todas as frações granulométricas estão presentes na composição, sendo que as partículas finas, menores que 0,075mm, apresentam a mesma proporção das partículas arenosas.

FIGURA 4.1. CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO CALCÁRIO.



Fonte: Autor (2015).

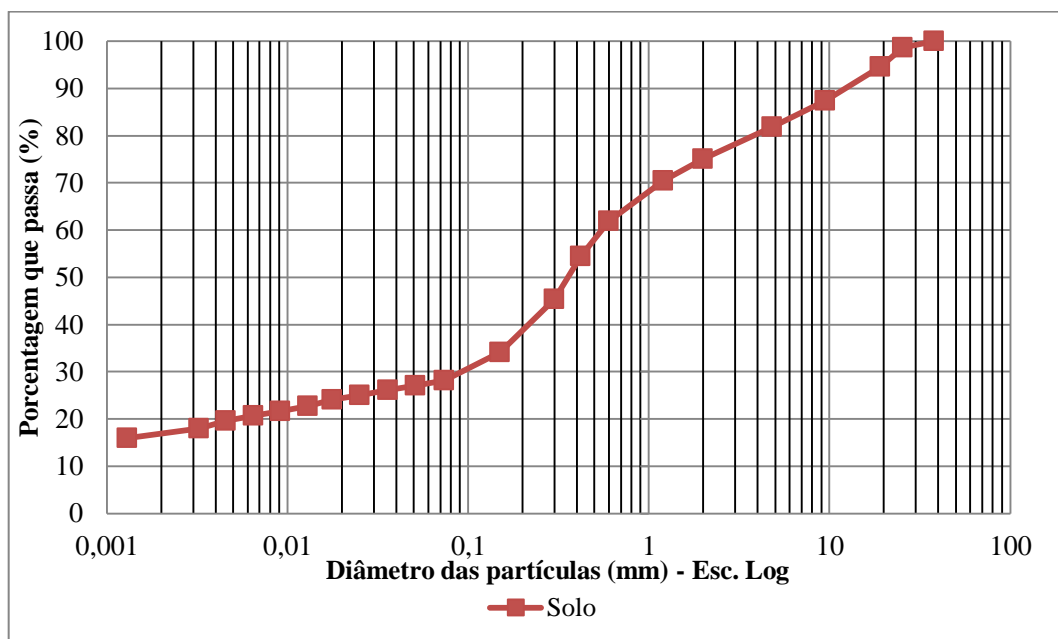
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

A caracterização do solo natural da região da grande João Pessoa foi determinada primeiramente por meio de suas propriedades físicas, que são a análise granulométrica, limites de consistência e massa específica, além da classificação do solo.

As amostras foram submetidas à caracterização física e com os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação foi possível identificar a distribuição das dimensões das partículas que compõem as amostras. Na Figura 4.2, está apresentada a distribuição granulométrica média do solo.

De acordo com a Figura 4.2, percebe-se que a curva granulométrica não apresenta uniformidade, sendo considerada mal graduada. Analisando-se a distribuição dos grãos, pode-se observar a ocorrência de todas as frações granulométricas, segundo a escala do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). A fração areia é predominante, com 46,83%, seguido das frações pedregulho, com 24,98%. Quanto às partículas menores que 0,074mm, o resultado mostra um material com percentual de argila de 19,65%, valor superior aos 8,54% da fração silte.

FIGURA 4.2. CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO.



Fonte: Autor (2014).

Na Tabela 4.4 estão apresentados os resultados de massa específica dos grãos, limites de consistência do solo, índice de grupo e a classificação segundo os métodos SUCS e TRB.

TABELA 4.4: PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.

Ensaio de Caracterização	Resultados
Limite de Liquidez – LL (%)	27
Limite de Plasticidade - LP (%)	20
Índice de Plasticidade – IP (%)	7
Massa específica (g/cm ³)	2,60
Índice de grupo (IG)	0
Classificação SUCS	SC
Classificação TRB	A-2-4

Fonte: Autor (2014).

De acordo com a Tabela 4.4, a massa específica dos grãos de 2,60g/cm³ está relacionada à composição granulométrica do solo. Este valor encontra-se compreendido entre 2,60 e 2,80g/cm³, valores geralmente encontrados para solo segundo o Manual de Pavimentação (DNIT,2006)

Com base nos limites de consistência, o uso do solo é inviável para ser utilizado em camadas de base de pavimentos, pois possui limite de liquidez e índice de plasticidade superiores aos limites de 25% e 6% estabelecidos pelo DNIT (2006), respectivamente. Pelo valor do IP de 7%, pode-se afirmar que o solo apresenta baixa plasticidade.

Com os valores da distribuição granulométrica e limites de consistência, determinou-se o índice de grupo (IG), e assim, classificou-se o solo como A-2-4, solo arenoso, segundo a

classificação TRB. Esta classificação explana que o solo apresenta boa qualidade para ser empregado em camadas de pavimento, principalmente em camada de subleito. Quanto à classificação SUCS, o solo apresenta-se como uma areia argilosa, classificando-se com SC.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO

Com base nos resultados da granulometria dos materiais puros, as composições das misturas foram determinadas. Após, realizou-se a caracterização das suas propriedades físicas: análise granulométrica, limites de consistência, massa específica, e a classificação das misturas solo-agregado.

4.3.1 Composição das misturas

Para definir a composição das misturas elaborou-se um conjunto de sistemas lineares, considerando-se a granulometria do solo, agregado e a média estabelecida para a Faixa C, está por apresentar bons resultados para serem empregados em camadas de base. Ao otimizar os sistemas, obteve-se um cenário no qual a amostra deveria ser composta por 79% de calcário e 21% de solo. Porém, de acordo com Balbo (2007), em misturas solo-agregado os critérios tradicionais limitam de 25% a quantidade de solo na mistura. Dessa forma, para este cenário, considerou-se 75% de calcário e 25% de solo. Na Tabela 4.5, comprova-se que estas proporções atendem as condições estabelecidas.

TABELA 4.5. PERCENTUAL DE AGREGADO E SOLO PARA AS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS (FAIXA C).

Peneiras	Limites Faixa C				Materiais		Resultados	Condição
	Inferior	Superior	Média	Tolerância	Calcário	Solo		
1"	100	100	100	7	100	98,6	100	Atendida
3/8"	50	85	87,5	7	61,26	87,35	68	Atendida
nº4	35	65	50	5	33,72	81,77	46	Atendida
nº10	25	50	37,5	5	20,67	75,02	34	Atendida
nº40	15	30	22,5	2	13,80	54,42	24	Atendida
nº200	5	15	10	2	12,00	28,19	16	Atendida
Proporções adotadas para cada material (%):					75	25		

Fonte: Autor (2015)

Os mesmos procedimentos foram realizados considerando-se a Faixa D, neste caso, obteve-se um resultado de 48% para o calcário e 52% para o solo. Visando melhorar a preparação das misturas adotou-se 50% para cada material. Está alteração não influenciou nos resultados, como pode ser observado na Tabela 4.6.

TABELA 4.6. PERCENTUAL DE AGREGADO E SOLO PARA AS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS (FAIXA D).

Peneiras	Limites Faixa C				Materiais		Resultados	Condição
	Inferior	Superior	Média	Tolerância	Calcário	Solo		
1"	100	100	100	7	100	98,6	99	Atendida
3/8"	60	100	80	7	61,26	87,35	74	Atendida
nº4	50	85	67,5	5	33,72	81,77	58	Atendida
nº10	40	70	55	5	20,67	75,02	48	Atendida
nº40	25	45	35	2	13,80	54,42	34	Atendida
nº200	10	25	17,5	2	12,00	28,19	20	Atendida
Proporções adotadas para cada material (%):					50	50		

Fonte: Autor (2015).

Na busca de ampliar a avaliação do comportamento da mistura de solo com agregado calcário, definiu-se outra amostra, composta por 25% de calcário em relação à massa do solo. Dessa forma, definiu-se pelas proporções de agregado calcário em 25, 50 e 75% em relação à massa do solo, as quais foram submetidas aos ensaios de caracterização, como apresentado nos itens a seguir.

Para uma melhor apresentação dos resultados, utilizaram-se simbologias paratodas as amostras, sendo duas referentes aos materiais puros, solo e agregado calcário, e três compostas pela mistura destes materiais. Os detalhes das abreviações das amostras estão mostrados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7. DENOMINAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS.

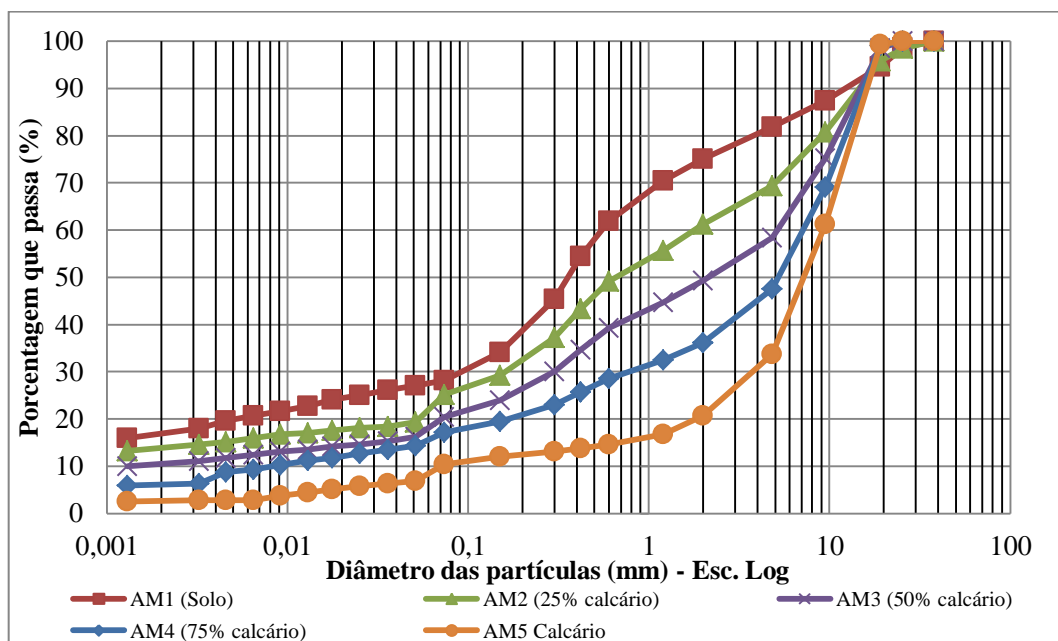
Amostra	Composição
AM1	Solo Puro (material de referência)
AM2	75% de Solo + 25% de agregado calcário
AM3	50% de Solo + 50% de agregado calcário
AM4	25% de Solo + 75% de agregado calcário
AM5	Agregado calcário puro (material de referência)

Fonte: Autor (2015).

4.3.2 Análise granulométrica

A granulometria das amostras foi determinada por peneiramento e sedimentação, o que permitiu analisar o comportamento da granulometria com os diferentes teores de calcário. Na Figura 4.3 estão apresentadas as distribuições granulométricas dos grãos das misturas solo-agregado.

FIGURA 4.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 4.3, verifica-se, partindo de AM1, uma redução no material passante na peneira de 2,0mm, com relação às demais amostras. Isto ocorre devido à predominância da fração pedregulho no agregado, que ao serem adicionadas ao solo reduz sua fração areia e aumenta as partículas de dimensões maiores que 2,0 mm. O mesmo comportamento ocorre com as frações finas, com uma leve alteração na fração argila da AM4. A distribuição das partículas passantes das amostras ensaiadas está apresentada na Tabela 4.8.

TABELA 4.8: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS.

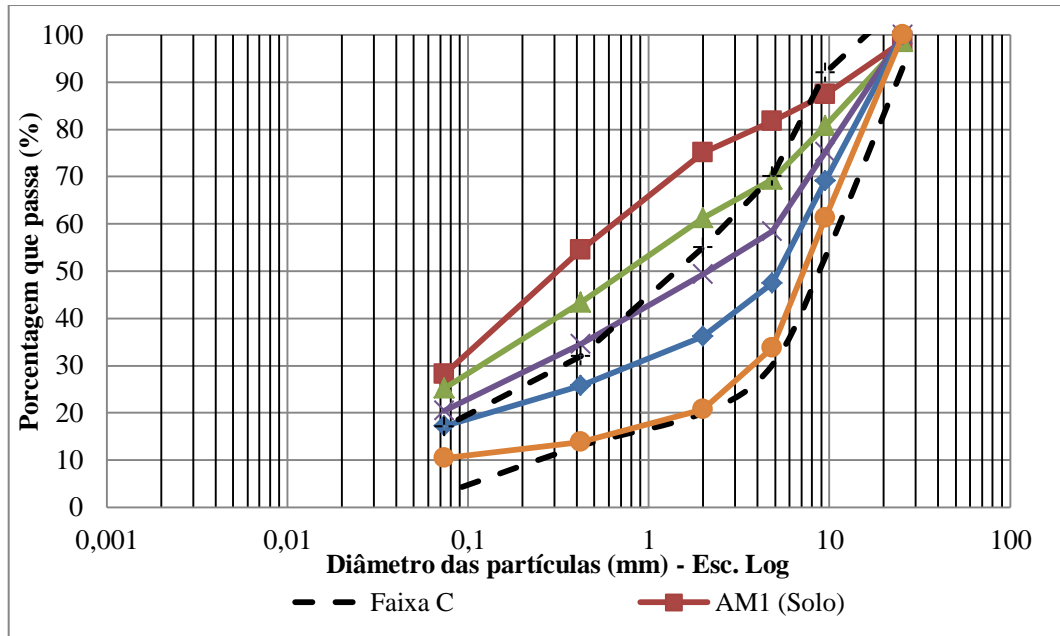
Diâmetro (mm)	Resultados				
	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5
38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	98,6	98,6	100,0	100,0	100,0
9,5	87,4	80,8	75,2	69,1	61,3
4,8	81,8	69,4	58,4	47,5	33,7
2	75,0	61,2	49,4	36,2	20,7
0,42	54,4	43,4	34,6	25,7	13,8
0,074	28,2	25,2	20,4	17,2	10,4

Fonte: Autor (2014)

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.8, pode-se verificar o comportamento da alteração na composição granulométrica das amostras. Para elaboração das misturas, considerou-se a porcentagem do solo e calcário, de forma a se enquadrarem nas faixas granulométricas para solos estabilizados granulometricamente. Diante disto, nas Figuras 4.4 e

4.5 estão apresentados o enquadramento dos resultados da granulometria para as Faixas C e D, respectivamente.

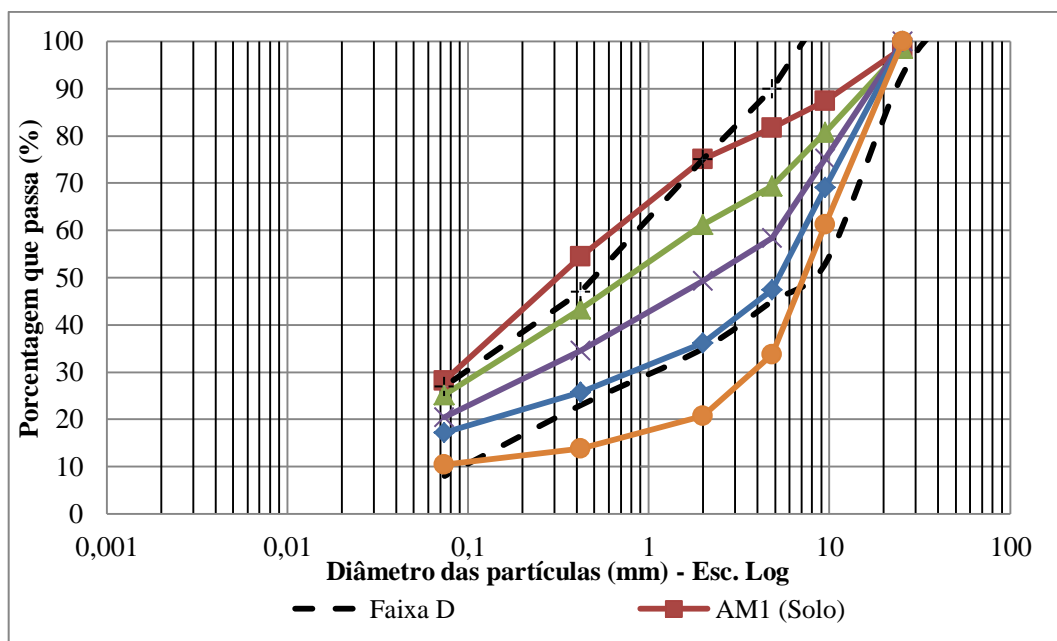
FIGURA 4.4. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM BASE NA FAIXA C.



Fonte: Autor (2015).

Observa-se na Figura 4.4, que de todas as amostras, apenas a mistura composta por 75% de calcário e o agregado puro se enquadraram na Faixa C do DNIT. AM4 foi melhor o resultado, apesar das partículas mais finas estarem próxima do limite, indicando uma maior variação nessas partículas com relação ao esperado na Tabela 4.4. A amostra AM4 também se enquadra na Faixa D, como pode ser observado na Figura 4.5.

FIGURA 4.5. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM BASE NA FAIXA D.



De acordo com a Figura 4.5, além da AM3, determinada com as especificações desta faixa, todas as misturas solo-calcário se enquadraram na Faixa D. As curvas dos materiais de referencia não se enquadram na faixa D. Sendo assim, considerando a granulometria todas as misturas podem ser empregadas em camadas de base e sub-base de pavimentos para volume de tráfego com N maior 5×10^6 .

4.3.3 Massa específica

Os resultados para a massa específica para todas as amostras estão na Tabela 4.9.

TABELA 4.9: MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DAS AMOSTRAS.

Ensaio	Resultados				
	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5
Massa específica	2,60	2,61	2,63	2,65	2,66

Fonte: Autor (2014).

De acordo com os resultados da Tabela 4.9, os valores das densidades encontram-se consideravelmente baixos, considerando os valores previstos pelo DNIT. Porém verifica-se um pequeno acréscimo, à medida que houve o aumento do teor do calcário na mistura. Este se aproxima da massa específica do calcário. Isto está relacionado com o aumento das partículas do calcário na composição granulométrica das misturas solo-agregado.

4.3.4 Limites de consistência

Os resultados obtidos nos ensaios de limites de liquidez e de plasticidade estão apresentados na Tabela 4.10, assim como o índice de plasticidade.

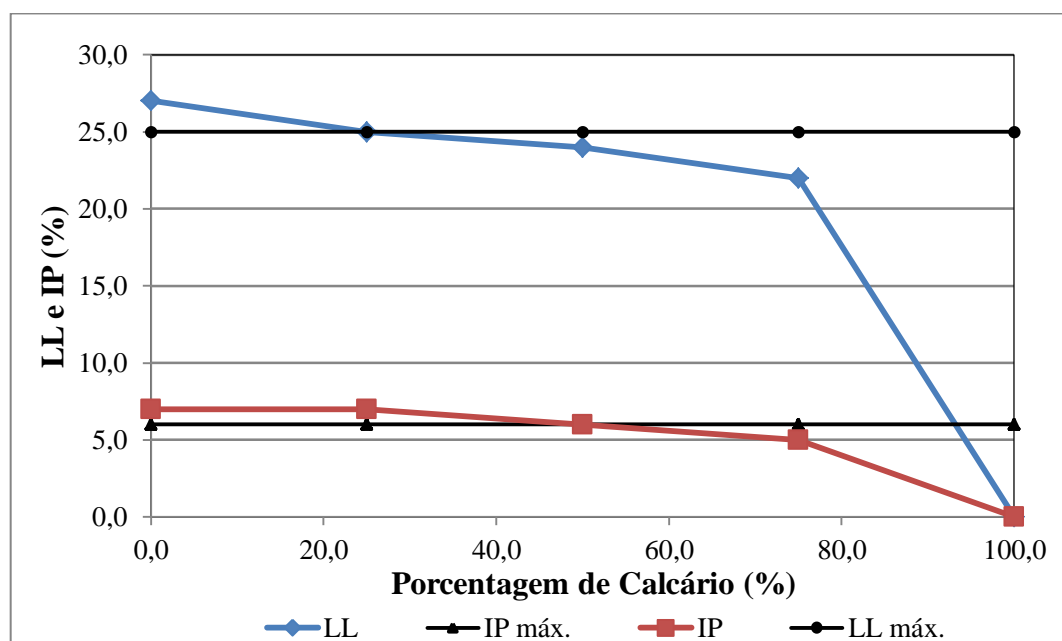
TABELA 4.10: PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS GRANULOMÉTRICAS.

Ensaio de Caracterização	Resultados				
	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5
Limite de Liquidez – LL (%)	27	25	24	22	NL
Limite de Plasticidade - LP (%)	20	18	18	17	NP
Índice de Plasticidade – IP (%)	7	7	6	5	NP

Fonte: Autor (2014).

Ao avaliar os limites de consistência verifica-se que todas as amostras apresentam baixa plasticidade. Observa-se também que à medida que o teor de calcário aumentou, o LL foi reduzido e o LP sofreu pequena variação. A redução é efeito das partículas não plásticas dos agregados de calcário misturados às partículas do solo. A Figura 4.6 apresenta a variação de LL e IP com o aumento da adição de calcário.

FIGURA 4.6. VARIAÇÃO DO LL E IP COM ADIÇÃO DE CALCÁRIO.



Fonte: Autor (2015).

Com relação aos resultados apresentados na Figura 4.6, as amostras podem ser utilizadas em camadas granulares de pavimentos, uma vez que os limites máximos para LL e IP estabelecidos pelo DNIT para camadas granulometricamente estabilizadas são atendidos ou estão muito próximo. Apesar da AM2 apresentar IP de 7%, considera-se este valor adequado por ter LL de 25%.

4.3.5 Classificação das misturas solo-agregado

Como base nos dados das frações granulométricas e dos limites de consistência, foi feita a classificação do solo segundo os métodos SUCS e TRB. Para todas as amostras, o índice de grupo necessário para a classificação TRB foi igual à zero. Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.11.

TABELA 4.11: CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO.

Classificação	Resultados			
	AM1	AM2	AM3	AM4
SUCS	SC	SC	SM - SC	GM - GC
TRB	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-1-b

Fonte: Autor (2014).

Como se pode constatar na Tabela 4.12, para a classificação SUCS, a amostra AM2 foi classificada como SC, uma areia argilosa. O aumento do teor de calcário alterou a classificação, sendo a AM3 classificado como SM – SC, um tipo intermediário, entre uma areia argilosa e siltosa. Com 75% de calcário, a AM4, a mistura solo-agregado passou de um material arenoso para solo grosso, composto predominantemente por pedregulho com silte e argila, sendo assim, foi classificado como GM – GC, a denominação dupla ocorre pela proximidade entre as frações argila e silte.

Quanto à classificação TRB, AM2 e AM3 foram classificadas segundo o TRB, como tipo A-2-4, o que as caracteriza como um material arenoso e pedregulhoso, idem a classificação do solo (AM1). A partir da adição de 75% de calcário, a amostra passa a ter característica de pedregulho, recebendo a classificação A-1-b, sendo assim, a AM4 caracteriza-se como um pedregulho fino com areia.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

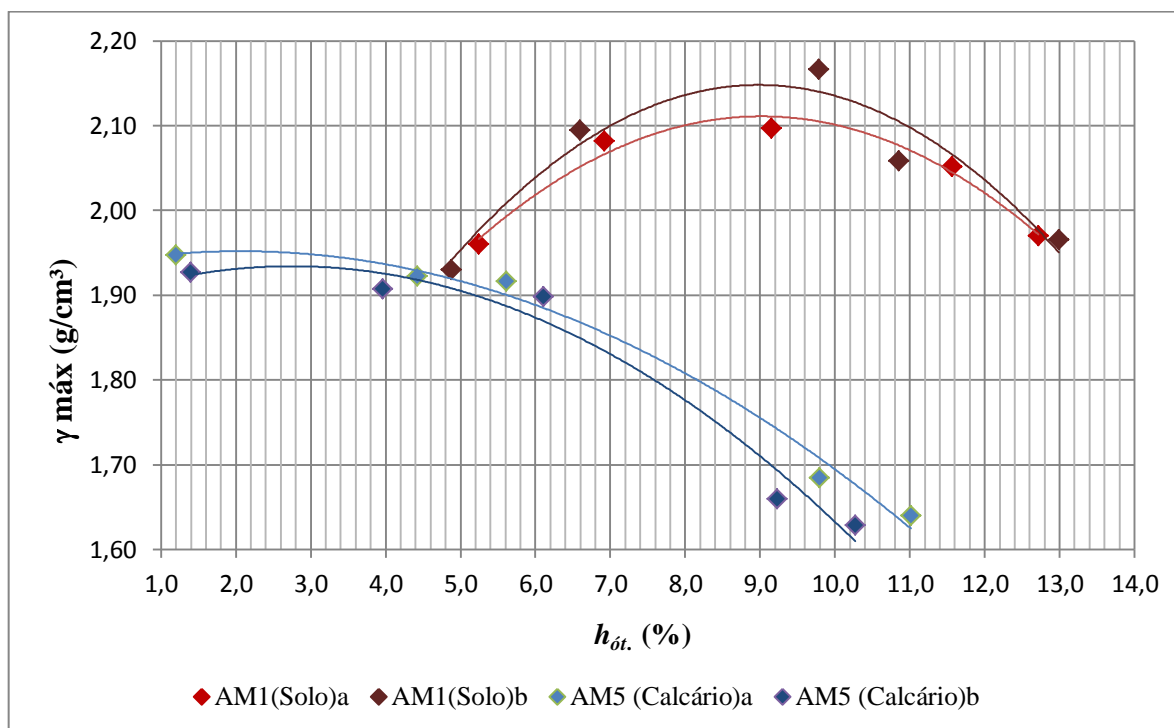
Neste item estão expostos os resultados dos ensaios de compactação e os relacionados à caracterização mecânica dos materiais puros e das misturas solo-agregado, determinadas pelos ensaios de ISC, módulo de resiliência e resistência à compressão simples.

4.4.1 Compactação

As amostras de solo, agregado calcário e misturas solo-agregado, foram submetidas a ensaios de compactação, sem o reuso do material e com aplicação de energia modificada, visando determinar a massa específica seca máxima ($\gamma_{s,máx}$) e a umidade ótima ($h_{ót.}$). Na figura 4.7, estão apresentadas as curvas de compactação obtidas para as amostras do solo e para o agregado calcário.

Com base nas curvas apresentadas na figura 4.7, é possível perceber uma pequena variação entre eles, apesar de terem sido compactadas nas mesmas condições. Isto está relacionado com a variação na granulometria do solo, por se tratar de um material arenoso com porcentagem de pedregulho considerável, o que dificulta a homogeneização das amostras. As mesmas constatações podem ser feitas para as curvas de compactação do agregado calcário.

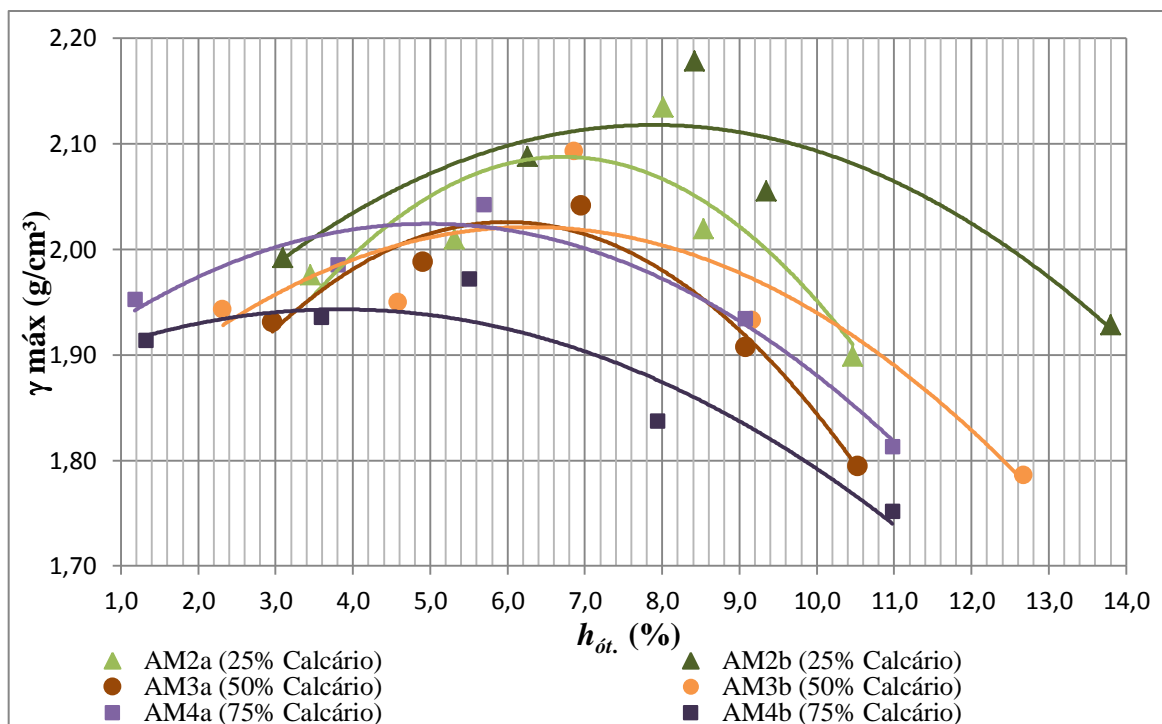
FIGURA 4.7. CURVAS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO AGREGADO CALCÁRIO.



Fonte: Autor (2015).

As curvas de compactação das amostras estão apresentadas na Figura 4.8, nas quais se observa a influência do aumento do teor de calcário na mistura.

FIGURA 4.8. CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 4.8, pode-se observar certa variabilidade em sua forma, isso ocorre devido a difícil homogeneização das misturas e porque as misturas não possuem granulometria absolutamente idênticas. Devido o comportamento irregular das curvas, o valor da massa específica seca máxima, obtida nos ensaios, não pode ser considerado o valor exato para esta propriedade. Verifica-se que com a adição de calcário ao solo, as curvas tendem a apresentar uma redução nas propriedades de compactação.

A partir das curvas de compactação, foram calculados os valores médios das massas específicas secas máximas ($\gamma_{s,máx}$) e das umidades ótimas ($h_{ót.}$) para cada uma das amostras com base nos valores máximos obtidos na linha de tendência. Os resultados extraídos obtidos estão expostos na Tabela 4.12.

TABELA 4.12: PROPRIEDADES DE COMPACTAÇÃO PARA AS AMOSTRAS.

Características	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5
$\gamma_{s,máx}(\text{g/cm}^3)$	2,13	2,07	2,02	1,98	1,94
$h_{ót.}(\%)$	9,0	7,1	6,1	4,4	2,4

Fonte: Autor (2015).

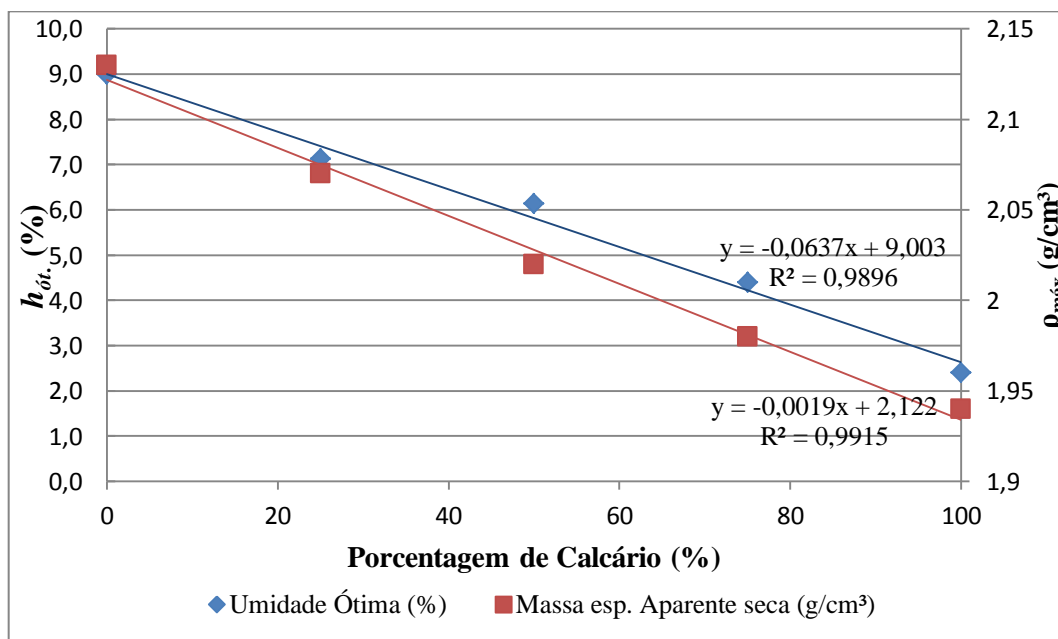
Nota-se na Tabela 4.12, que o solo apresentou a maior massa específica seca máxima e maior umidade ótima, enquanto o calcário os menores valores. Para o solo, a umidade ótima encontrada está relacionada com as frações finas, aos quais adsorvem uma maior quantidade de água. No calcário, o resultado baixo da umidade está associado às dimensões dos grãos dos agregados, que devido à sua baixa superfície específica requerem pouca água. Outro ponto importante a ser destacado, consiste em observações feitas no processo de execução da compactação. Notou-se que os agregados graúdos fraturavam-se com o impacto do soquete e consequentemente devido ao atrito das partículas, sendo visível o aumento de partículas menores, reduzindo a umidade do material. Com isso, ocorreu alteração nas propriedades do agregado, principalmente em sua granulometria, o que pode afetar as propriedades de compactação.

Quanto às misturas solo-agregado, o $\gamma_{s,máx}$ reduziu com o aumento da porcentagem de agregado na mistura. Isto é consequência do aumento dos agregados graúdos e miúdos nas misturas, e com a redução das partículas finas ocorre o aumento nos índices de vazios. A umidade ótima das misturas também reduziu com aumento do teor de agregado na mistura, o que está diretamente relacionado com a granulometria e com a superfície específica das partículas, uma vez que o agregado constitui em um material bem mais graúdo e

com superfície específica menor que a do solo. Dessa forma, com o aumento da adição do agregado as amostras absorvem menos água.

Para uma melhor análise do comportamento da massa específica seca máxima e a umidade ótima, foi elaborada a Figura 4.9, que correlaciona estas propriedades com a variação do teor de agregado das amostras.

FIGURA 4.9. . RESULTADOS DA MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA E UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE CALCÁRIO.



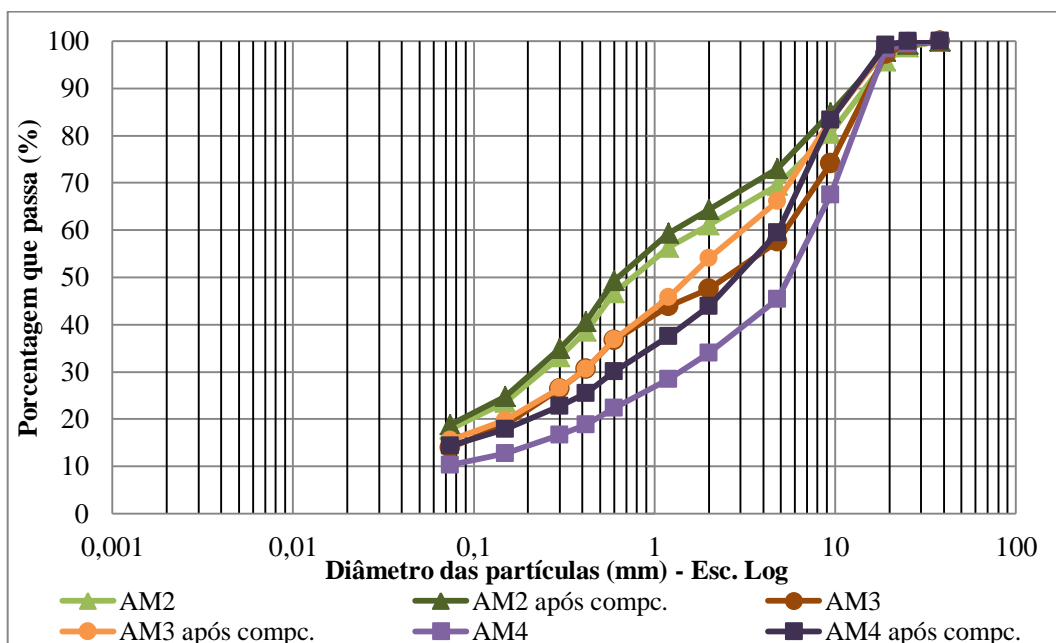
Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 4.9, nota-se que com o aumento do teor de agregado, a massa específica seca máxima tende a diminuir, observa-se também o mesmo comportamento para os resultados da umidade ótima. Destaca-se que em ambos os modelos o valor do coeficiente R^2 encontra-se próximo de 1, o que indica um comportamento estatístico satisfatório. Dessa forma, por meio desse gráfico é possível estimar os valores de $\gamma_{s,máx}$ e $h_{ót}$ em função da variação do teor de agregado na mistura.

4.4.2 Ensaio de granulometria após a compactação para as misturas solo-agregado

A granulometria das amostras foi determinada por peneiramento, antes e após serem compactadas. Dessa forma podem analisar o comportamento da granulometria com os diferentes teores de calcário, verificando os efeitos da compactação no rearranjo estrutural das misturas. Na Figura 4.10, estão apresentadas as distribuições dos grãos das misturas granulométricas antes e depois da compactação.

FIGURA 4.10. CURVAS GRANULOMÉTRICAS ANTES E APÓS COMPACTAÇÃO.



Pode-se observar, ao analisar as curvas na Figura 4.10, que em todas as amostras houve alteração na granulometria após a compactação. Nota-se que com a compactação, ocorre o aumento do material passante em todas as peneiras.

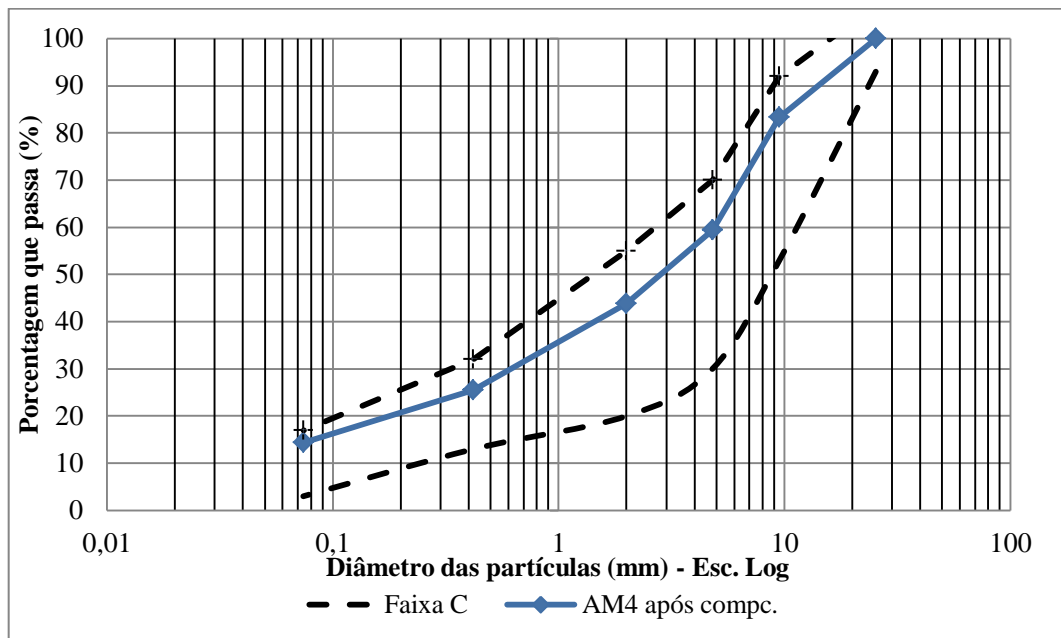
As amostras AM2 e AM4 apresentaram curvas granulométricas com comportamento semelhante antes e depois da compactação. Porém, a AM3 apresentou uma maior variação na curva nos pontos referentes às partículas de dimensões maiores que 1,2mm, ou seja, a fração mais grosseira do material, não causando alterações relevantes na composição das partículas menores a esta dimensão. Isto ocorre devido à fragmentação do pedregulho em partículas menores, as quais permanecem ainda na mesma classificação granulométrica.

A amostra composto por 25% de calcário teve uma leve alteração em sua curva causada pelo aumento das partículas mais finas. Diferentemente da amostra composta por 75% de calcário, onde observou uma redução de 10% na fração grosseira após a compactação, acarretando diretamente no aumento da fração areia e finas. As frações finas apresentam aumento em todas as amostras.

Contudo, a alteração nas curvas das amostras está relacionada com o teor de agregado calcário na mistura, quanto maior a porcentagem do agregado, maior foi a variação na curva granulométrica da amostra, este comportamento também foi verificado por Redivo (2011). Pode-se relacionar a baixa resistência à compactação do agregado, que durante o processo aumenta a porcentagem de partículas de dimensões menores que 2,0mm. Diante

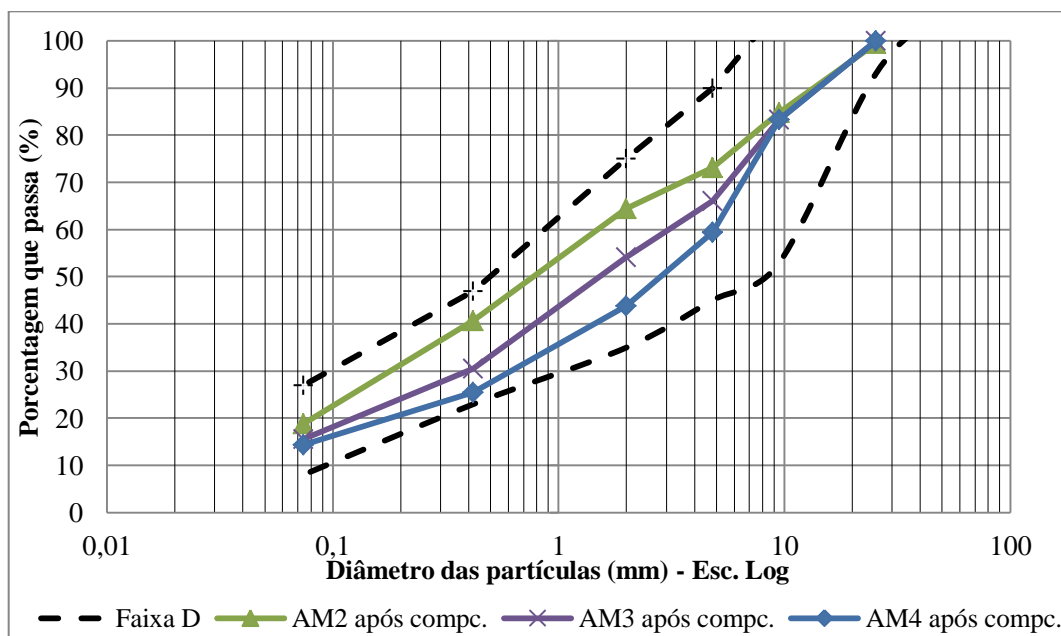
disto, nas Figuras 4.11 e 4.12, estão apresentadas as curvas granulométricas determinadas após a compactação comparada com os limites da Faixa C e D, respectivamente.

FIGURA 4.11. CURVAS GRANULOMÉTRICAS APÓS COMPACTAÇÃO COMPARADAS COM A FAIXA C.



Fonte: Autor (2015).

FIGURA 4.12. CURVAS GRANULOMÉTRICAS APÓS COMPACTAÇÃO COMPARADAS COM A FAIXA D.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com as figuras 4.11 e 4.12, pode-se constatar que as curvas após a compactação, se encontram dentro dos limites das faixas granulométricas estabelecidas pelo DNIT para bases granulometricamente estabilizadas, apesar da fragmentação do material.

4.4.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão

Os ensaios de ISC foram realizados com base na umidade ótima obtida na compactação. Para cada amostra, foram moldados três corpos de prova na energia de compactação modificada. Com isto, obteve-se o valor de ISC e de expansão para as amostras por meio da média entre os valores obtidos. Na Tabela 4.13 estão expostos os resultados médios de ISC para todas as amostras.

TABELA 4.13: RESULTADOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) (%).

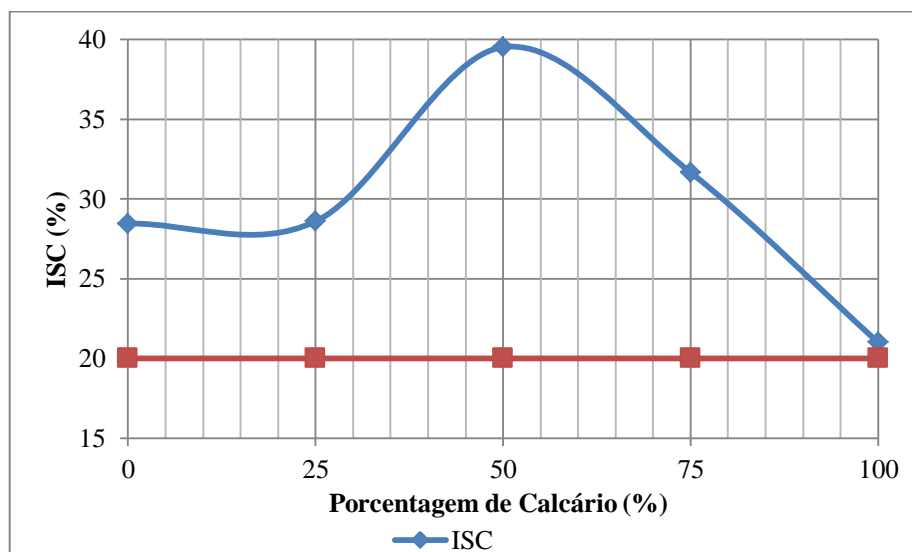
AM1 (Solo)	AM2 (25% calcário)	AM3 (50% calcário)	AM4 (75% calcário)	AM5 (Calcário)
28,5	28,6	39,5	31,7	21,0

Fonte: Autor (2014).

De acordo com a Tabela 4.13, verifica-se que o ISC em todas as amostras foi inferior a 40%, o melhor resultado foi obtido com a adição de 50% de calcário. Misturas solo-agregado são realizadas para melhorar a resistência do solo, como explanado na revisão da literatura. As misturas deveriam resultar em ISC na ordem de 60%, apresentando características para ser empregadas em camada de base. Para os resultados obtidos nesta pesquisa, considerados baixos, ocorre devido à baixa resistência dos materiais puros.

Com base no resultado final obtido pela média, verifica-se que as amostras não apresentaram aumento considerado no valor de ISC com a adição de calcário. A adição de 25% de calcário não alterou a capacidade de suporte do solo. O comportamento do ISC com a adição de calcário está exibido na Figura 4.13.

FIGURA 4.13. COMPORTAMENTO DO ISC EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.



Fonte: Autor (2015).

Na Figura 4.13, observa-se que com a adição do calcário o ISC permanece constante, em seguida atinge o ponto máximo e depois decresce. Esse mesmo comportamento foi observado pelos autores Klinsky e Fabbri (2009), e Cavalcante e Barroso (2009). O decréscimo no valor de ISC com a adição de calcário ocorre devido a uma tendência das misturas apresentarem comportamento semelhante ao agregado calcário.

Por meio da distribuição das partículas das amostras, na Tabela 4.9, verifica-se ainda que a AM3 apresentou proporções muito próximas de pedregulho e materiais de partículas menores que 2,0mm. A proporcionalidade entre as frações podem oferecer um maior arranjo entre as partículas, produzindo maior resistência ao solo, visto que as partículas menores preenchem os espaços entre as maiores.

Comparando com as especificações do DNIT (2006), as amostras podem ser empregadas em camadas de sub-base, visto que todas apresentaram ISC superior aos 20% mínimos recomendados. Observa-se que apesar das misturas apresentarem granulometria que se enquadram nas faixas granulométricas que suportam volume de tráfego com N maior 5×10^6 , elas apresentaram baixa capacidade de suporte.

Ao comparar os resultados de ISC, mostradas na Tabela 4.13, com os valores prováveis de ISC de acordo com a classificação do solo e das misturas (Quadro 2.2), nota-se que para a classificação TRB, as amostras AM1, AM2 e AM3 classificadas no grupo A-2-4, atendem os limites do valor de ISC para esta classificação. O mesmo acontece com a AM4, a qual o ISC foi superior a 20%, com esperado para o grupo A-1-b. Quanto à classificação SUCS, as amostras AM1, AM2 e AM3 apresentaram ISC superior ao previsto. A amostra AM3, que apresentou classificação composta, se enquadrou nos limites para o SM. O mesmo aconteceu com a amostra AM4, que atendeu ao ISC esperado, para os grupos GM e GC.

Na realização do ensaio de ISC foi determinada a expansão para todos os corpos de prova ensaiados. O valor final da expansão para cada amostra foi obtido pela média entre os três corpos de provas, todos os valores obtidos são considerados inferiores conforme as normas DNIT ES 139/10 e 141/10. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.14.

TABELA 4.14: RESULTADOS DA EXPANSÃO.

AM1 (Solo)	AM2 (25% calcário)	AM3 (50% calcário)	AM4 (75% calcário)	AM5 (Calcário)
0,14	0,24	0,20	0,30	0,14

Fonte: Autor (2014).

De acordo com a Tabela 4.14, os resultados da expansão do solo e do agregado calcário apresentaram o mesmo valor, sendo menores que os valores encontrados para as misturas solo-agregados. É possível analisar ainda que com o aumento do teor do calcário os resultados não seguiram um comportamento como aconteceu nas demais características analisadas. Além do mais, considerando a distribuição das partículas, na Tabela 4.8, a redução da porcentagem das frações finas nas amostras não influenciou explicitamente a expansão. Contudo, todos os valores são menores que o estabelecido para ser utilizado em camadas granulares, ou seja, menores de 0,5% para base e de 1% para sub-base, conforme as normas DNIT ES 141/10e 139/10, respectivamente.

Conforme os resultados apresentados, os materiais utilizados nesta pesquisa podem ser empregados em camadas granulares de pavimentos, porém, com restrições para emprego em camadas de sub-base.

4.4.4 Módulo de resiliência

A determinação do comportamento resiliente de um material granular é fundamental para uma analisar seu desempenho estrutural em camadas de pavimentos. Para isto, inicialmente foi realizada a comparação entre o desempenho dos modelos matemáticos apresentados no Capítulo 2. As expressões estão em função da tensão desvio (σ_d), tensão de confinamento (σ_3), do primeiro invariante de tensões (θ), da tensão de cisalhamento octaédrica (τ) e da pressão atmosférica.

Os valores de módulo de resiliência, das tensões de confinamento e das tensões de desvio obtidas no ensaio triaxial foram utilizados para realizar a modelagem. Para isso, utilizou-se o programa estatístico *LABFit*, onde o desempenho foi avaliado a partir da comparação do coeficiente de determinação (R^2) encontrado para cada modelo analisado.

Na Tabela 4.15, encontram-se apresentados os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de determinação (R^2) do corpo de prova, ensaiados sob a condição de umidade ótima e massa específica seca máxima na energia Proctor modificada. Exceto da amostra composta pelo calcário puro, a qual não foi possível moldar o corpo-de-prova.

TABELA 4.15: CONSTANTES DE REGRESSÃO E DOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) DAS AMOSTRAS.

AM1 (Solo)				
Modelo (Equação)	k_1	k_2	k_3	R^2
Tensão Confinante (2.4)	188837,7	0,1522	-	0,1578
Tensão desvio (2.5)	469274,0	-0,0616	-	0,0402
Composto (2.6)	248906,1	0,6183	-0,4705	0,9798
Universal (2.7)	3713,4	0,6346	-0,1605	0,6448
AM2 (25% calcário)				
Modelo (Equação)	k_1	k_2	k_3	R^2
Tensão Confinante (2.4)	295386,5	0,1962	-	0,6748
Tensão desvio (2.5)	402618,9	0,1051	-	0,2659
Composto (2.6)	316339,0	0,2629	-0,7321	0,7249
Universal (2.7)	5516,0	0,4169	-0,6131	0,8228
AM3 (50% calcário)				
Modelo (Equação)	k_1	k_2	k_3	R^2
Tensão Confinante (2.4)	20141,3	0,7668	-	0,9399
Tensão desvio (2.5)	51951,4	0,4762	-	0,5817
Composto (2.6)	19790,6	0,7462	0,2150	0,9405
Universal (2.7)	1968,7	1,1641	-0,9233	0,9578
AM4 (75% calcário)				
Modelo (Equação)	k_1	k_2	k_3	R^2
Tensão Confinante (2.4)	195822,4	0,1373	-	0,3293
Tensão desvio (2.5)	150923,2	0,1743	-	0,7644
Composto (2.6)	163881,2	-0,0875	0,2329	0,8099
Universal (2.7)	2690,2	-0,1321	0,7728	0,9359

Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Tabela 4.15, pode-se observar os valores de R^2 obtidos com o ajuste dos modelos, assim se constata que os dois primeiros modelos, os quais consideram apenas uma tensão, apresentaram em todas as amostras valores baixos, e até próximos de zero no caso do solo puro, e inferiores os que consideram a tensão confinante e a tensão de desvio. Sendo, com exceção da AM4, o modelo em função apenas da tensão de desvio o que apresenta os menores valores de R^2 , o que se justifica o fato deste modelo melhor representar solos coesivos.

Os melhores resultados foram apresentados pelos modelos que são em função da tensão confinante e da tensão de desvio. Este fato é comprovado pelos maiores valores de R^2 encontrados pelos modelos composto e universal, ambos consideram as duas tensões. Para o solo, o modelo composto apresentou R^2 próximo a um, ou seja, apresentou o melhor desempenho.

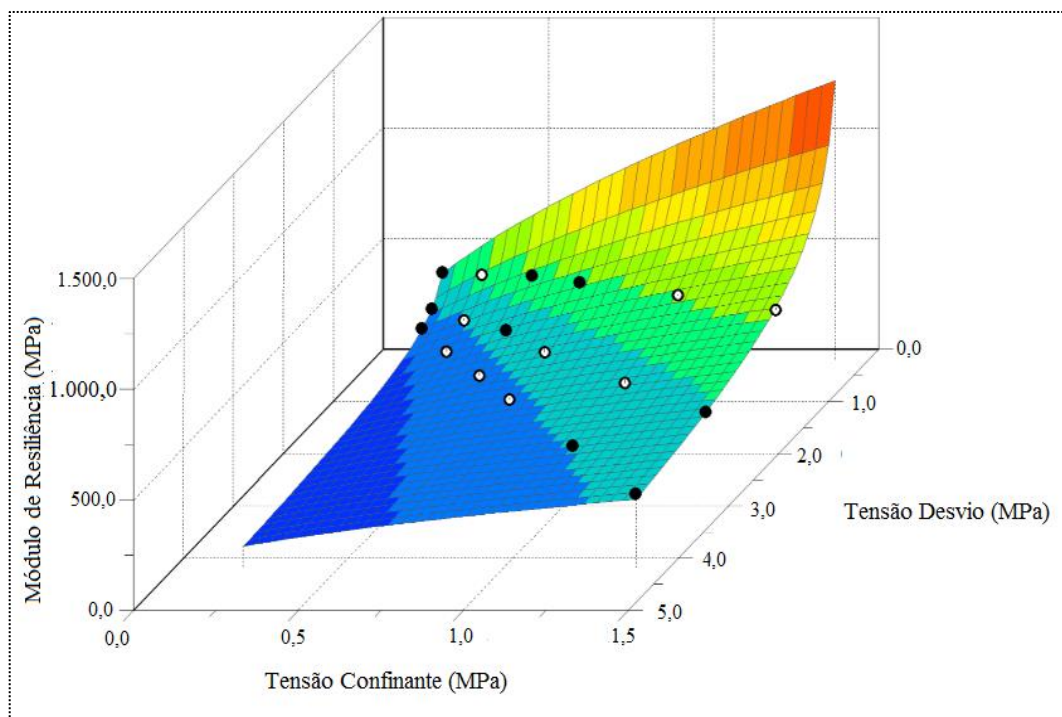
O modelo composto é bastante utilizado no Brasil para representar o comportamento resiliente de materiais granulares. Neste estudo, este modelo também apresentou bons resultados para representar o comportamento das misturas solo-agregado, assim como foi verificado por Bastos (2013) e Grubba (2009). Porém, nota-se que para todas as misturas o

modelo universal apresentou-se como o melhor para representar o M_R das amostras. Viana (2007) constatou, pelo maior valor de R^2 , que o modelo universal é o melhor para representar o módulo de resiliência dos solos tropicais grossos do interior de São Paulo, compactados na energia modificada.

Considerando o melhor desempenho como requisito para escolha do modelo, o modelo composto foi usado para representar o comportamento do módulo de resiliência do solo, enquanto o M_R das misturas foi representado pelo modelo universal.

A representação gráfica que considera apenas a tensão de confinamento e tensão de desvio está apresentada nos apêndices. Para uma melhor análise foi elaborado um gráfico tridimensional, que determina o módulo de resiliência em função da tensão de confinamento e da tensão de desvio. As Figuras 4.14 a 4.17 apresentam os gráficos obtidos.

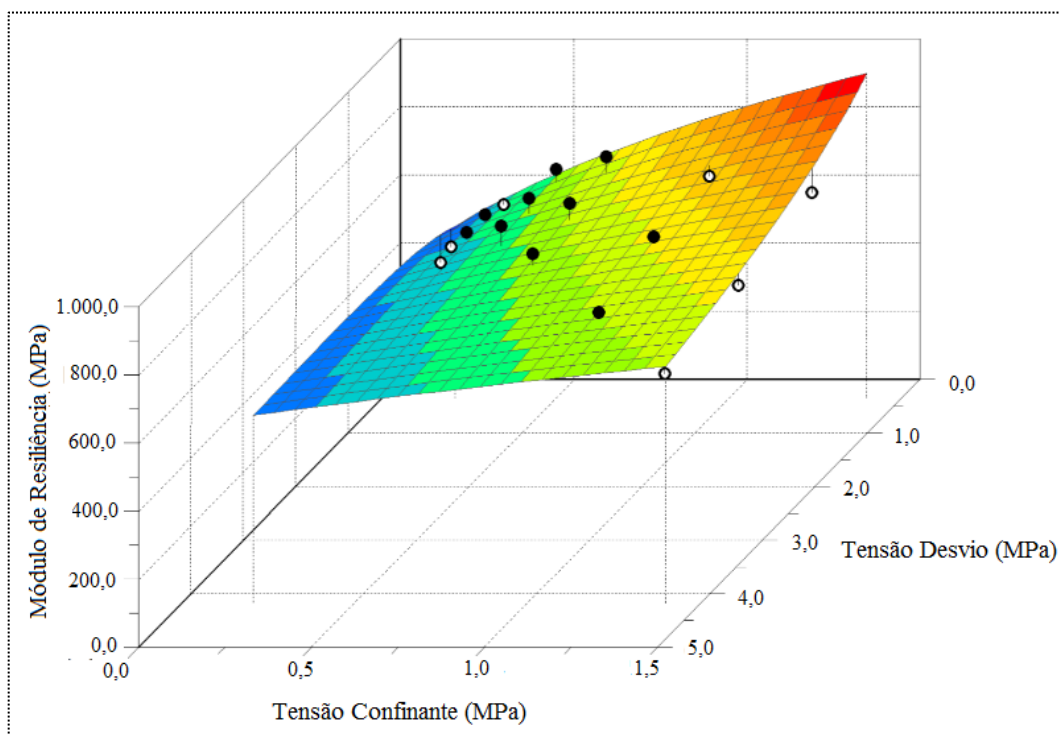
FIGURA 4.14. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM1 (SOLO).



Fonte: Autor (2015).

Pela Figura 4.14, pode-se observar uma tendência de um leve aumento do M_R com o aumento da tensão confinante, relacionando aos parâmetros de regressão do modelo, nota-se, na tabela 4.15, que a constante k_2 toma valor positivo. Com relação à tensão desvio, nota-se uma diminuição do M_R com o aumento desta tensão, vista pelo valor negativo assumido pela constante de regressão k_3 da variável (σ_d) . A sensibilidade do solo a tensão confinante está associado às suas características arenosas, uma vez que esta tensão seadequa melhor aos modelos que representam materiais granulares.

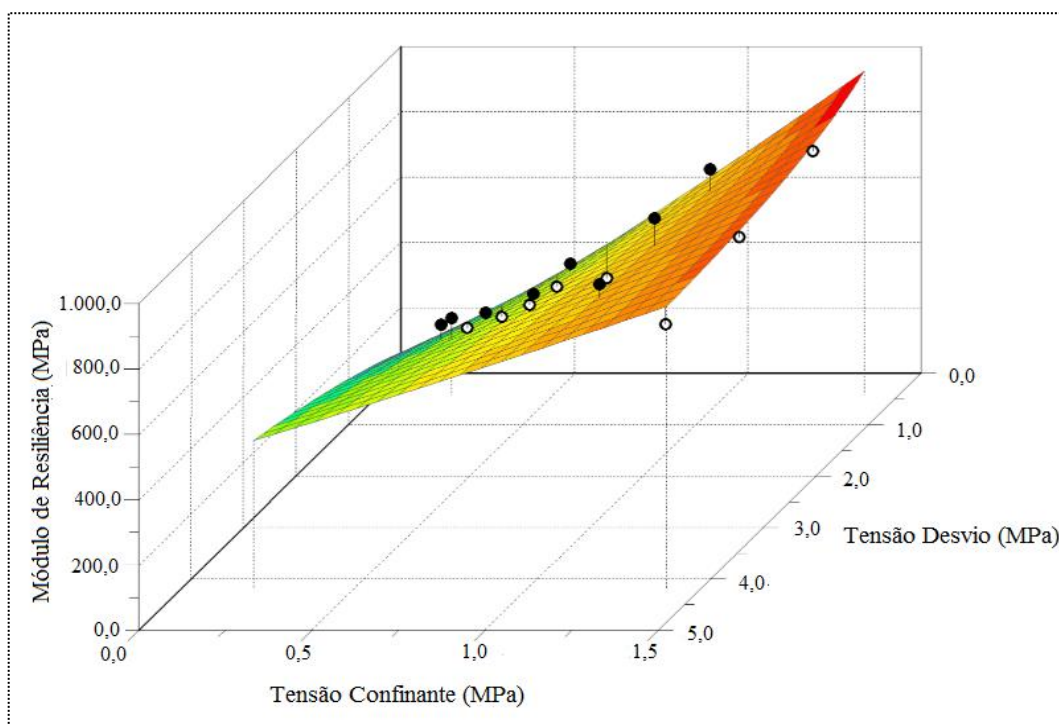
FIGURA 4.15. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM2 (25% CALCÁRIO).



Fonte: Autor (2015).

Verifica-se na Figura 4.15, com o aumento da tensão confinante um aumento sutil nos valores do M_R , sua diminuição com o aumento da tensão desvio. Nota-se também o aumento nos valores de M_R quando comparados com a Figura 4.14.

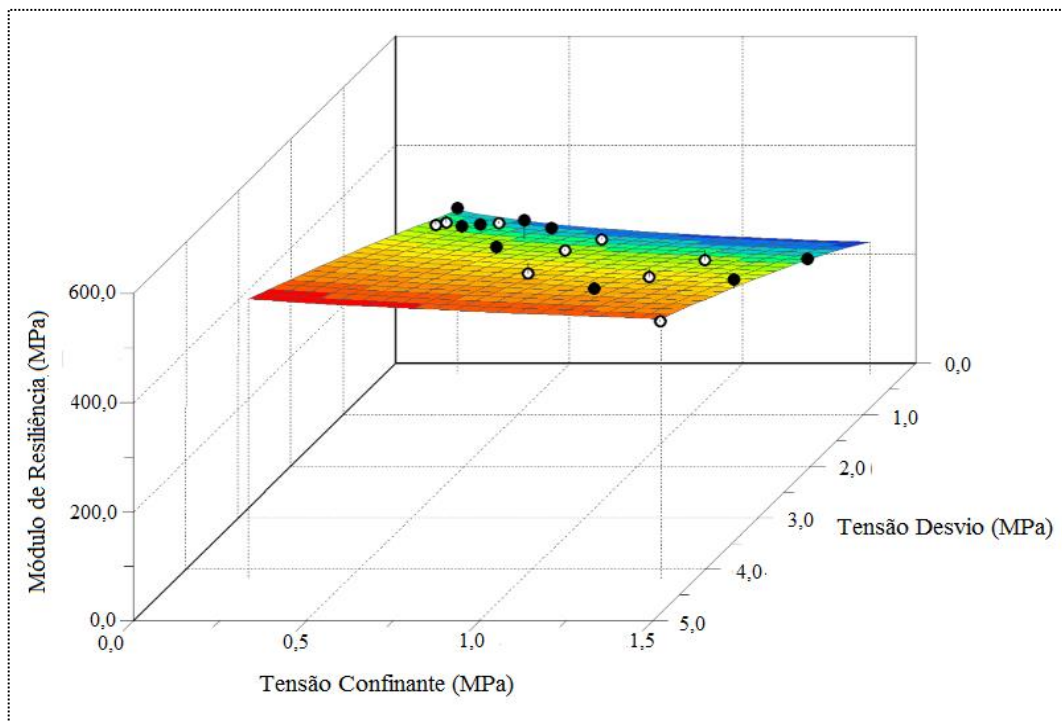
FIGURA 4.16. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM3 (50% CALCÁRIO).



Fonte: Autor (2015).

Observa na Figura 4.16, o mesmo comportamento dos resultados apresentados na Figura 4.15, ou seja, os valores de M_R aumentaram com incremento da tensão confinante e diminuíram com o aumento da tensão desvio, porém com uma variação nos valores de M_R mais brusca com a atuação dos pares de tensões. No caso da AM3, a aplicação das tensões obteve uma menor deformação, e consequentemente maior módulo, o que está associado ao melhor rearranjo das partículas diante do aumento das tensões.

FIGURA 4.17. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA AM4 (75% CALCÁRIO).



Fonte: Autor (2015).

Diferentemente, das figuras anteriores, nota-se na Figura 4.17, uma leve redução nos valores do M_R com aumento da tensão confinante, bem como um incremento nos seus valores com o aumento da tensão desvio. Geralmente espera-se este comportamento para solos com características mais finas. A baixa variação do M_R com incremento das tensões pode estar associada à estabilidade estrutural das partículas, apesar da baixa resistência do agregado calcário.

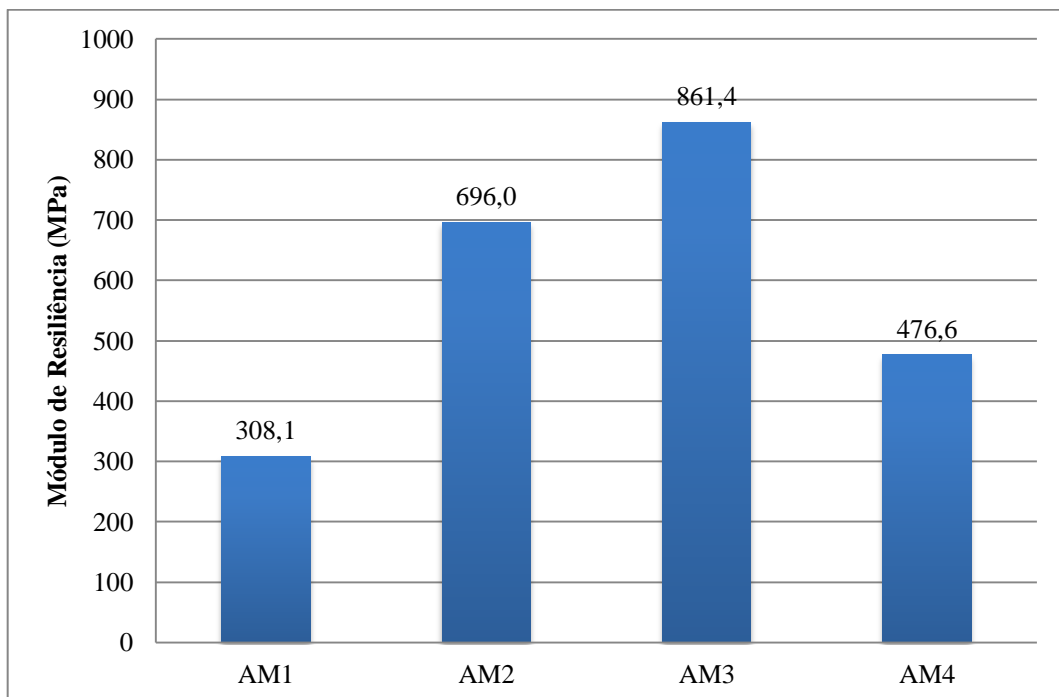
De acordo com as Figuras de 4.14 a 4.17, pode-se constatar que o incremento do módulo de resiliência com o aumento da tensão confinante, este comportamento ocorre até a amostra que é composta por 50% de calcário, visto que nestas amostras o parâmetro de regressão k_2 do modelo é positivo. Diferentemente, a amostra composta por 75% de calcário assumiu k_2 negativo, indicando uma redução no M_R com o aumento da tensão confinante.

Com relação ao comportamento resiliente sob a influência da tensão desvio, ocorreu uma redução do M_R com o aumento desta tensão, uma vez que o parâmetro de regressão k_3 assume valores negativos nas amostras com até 50% de calcário em sua composição. Em contrapartida, a AM4 apresentou comportamento contrário, ou seja, ocorreu o aumento do módulo de resiliência, e apresentou k_3 positivo.

Nota-se pela irregularidade da superfície, em todas as figuras um comportamento não linear dos valores de módulos de resiliência. Com exceção da mistura composta por 75% de calcário, que apresentou comportamento esperado para materiais de características mais finas, as amostras apresentaram aumento no M_R com aumento da tensão confinante, comportamento esperado para solos arenosos.

Ainda com base nos gráficos (Figuras de 4.14 a 4.17), é possível observar o aumento no M_R à medida que ocorre o incremento de agregado calcário, reduzindo com a 75% de calcário na mistura. Para realizar uma melhor análise do comportamento resiliente diante do aumento do teor de calcário, adotou-se como o valor do M_R o resultado obtido no último par de tensões por ser o mais brusco imposto ao corpo de prova. Dessa forma, na Figura 4.18 estão os valores de M_R para cada amostra.

FIGURA 4.18. COMPORTAMENTO DO M_R EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.



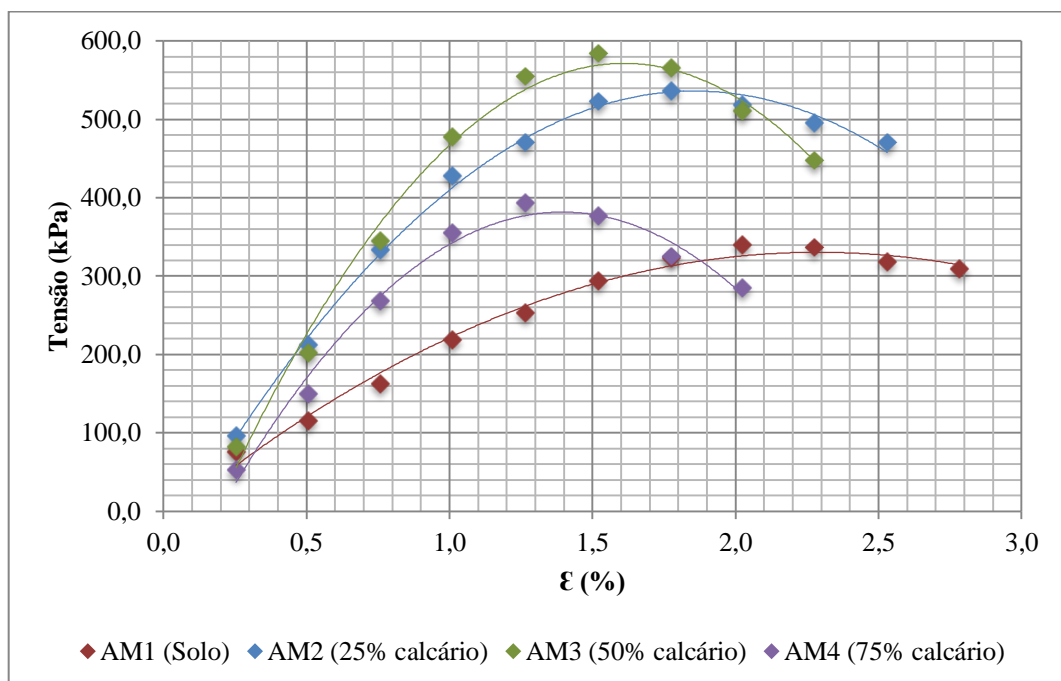
Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 4.18, pode-se constatar o aumento do módulo de resiliência com a adição de agregado calcário. A adição de 25% de agregado proporciona um acréscimo de 126% no valor de M_R . Verifica-se ainda que o maior M_R obtido pela AM3, composta por 50% de calcário, apresentou valor de 861,4 MPa, isto ocorre devido ao melhor rearranjo das partículas dos materiais. Contudo, com a adição de 75% de calcário, houve a redução do M_R em 45%, o que pode estar relacionado à grande porcentagem de agregado calcário presente na mistura, onde o comportamento da amostra tende a ser semelhante a dos agregados, baseando-se nos resultados apresentados por Luzia *et al.* (2012) e Behiry (2013). Comparando esse resultados com o obtido por Luzia *et al.* (2012) para agregados calcários, a AM4 apresenta valores dentro da variação, de 160 a 600MPa, encontrada pelos autores.

4.4.5 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os resultados de resistência à compressão simples foram obtidos por meio da média entre três corpos de prova, compactados na condição de umidade ótima e energia Proctor modificada. Os resultados para cada amostra estão apresentados no Apêndice B. Para uma melhor análise do comportamento das amostras, na Figura 4.19 estão apresentadas as curvas de tensão-deformação referente aos valores médios dos três corpos de prova moldados para cada amostra.

FIGURA 4.19. CURVAS DE RCS DAS AMOSTRAS.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 4.19, pode-se constatar que as deformações não ultrapassaram 3,0% no momento da ruptura. Por meio das curvas foram obtidos os valores para a resistência à compressão simples para as amostras. Observa-se nas curvas, que todas as amostras obtiveram resistência à compressão superior a 300 kPa. A Tabela 4.16 apresenta estes resultados.

TABELA 4.16: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (KPa).

AM1 (Solo)	AM2 (25% calcário)	AM3 (50% calcário)	AM4 (75% calcário)
334,6	541,7	570,2	417,0

Fonte: Autor (2015).

A RCS para o solo apresentou um valor de resistência de 334,6kPa, considerado baixo para ser utilizado em camadas de pavimentos. Segundo Baptista (1976), o Departamento de Estradas de Rodagem do Texas sugere resistências à compressão simples mínimas da ordem de 350kPa para sub-bases e 700kPa para bases. Desse modo, para todas as misturas o valor de resistência à compressão apresentou-se superior a 350 kPa, logo adequado para o emprego das misturas em camada de sub-base.

A maior resistência à compressão foi obtida pela AM3, composta por 50% de calcário, tendo um ganho na resistência de 70,4% em relação à AM1. As amostras AM2 e AM3 apresentaram valores próximos, como observado na Tabela 4.16, contudo a AM3 superou na média AM2. Entretanto, a adição de 75% de calcário reduziu a resistência, possivelmente pela dificuldade de acondicionamento das partículas pelo excesso da fração grosseira, onde a coesão resulta principalmente das frações finas, mesmo assim o valor superou a resistência à compressão do solo.

Na execução dos ensaios se verificou a diferença na ruptura entre as amostras compostas por diferentes teores de calcário. Na Figura 4.20 estão apresentadas como as amostras das misturas sofreram ruptura. Observa-se que em todas as rupturas apresentam o mesmo comportamento, iniciando na extremidade de sua base superior. Comprovando-se também a maior fragilidade da amostra contendo 75% de calcário, isso devido falta de coesão do agregado calcário, visto que a amostra composta apenas por calcário quebrava-se ao extraí-la do molde.

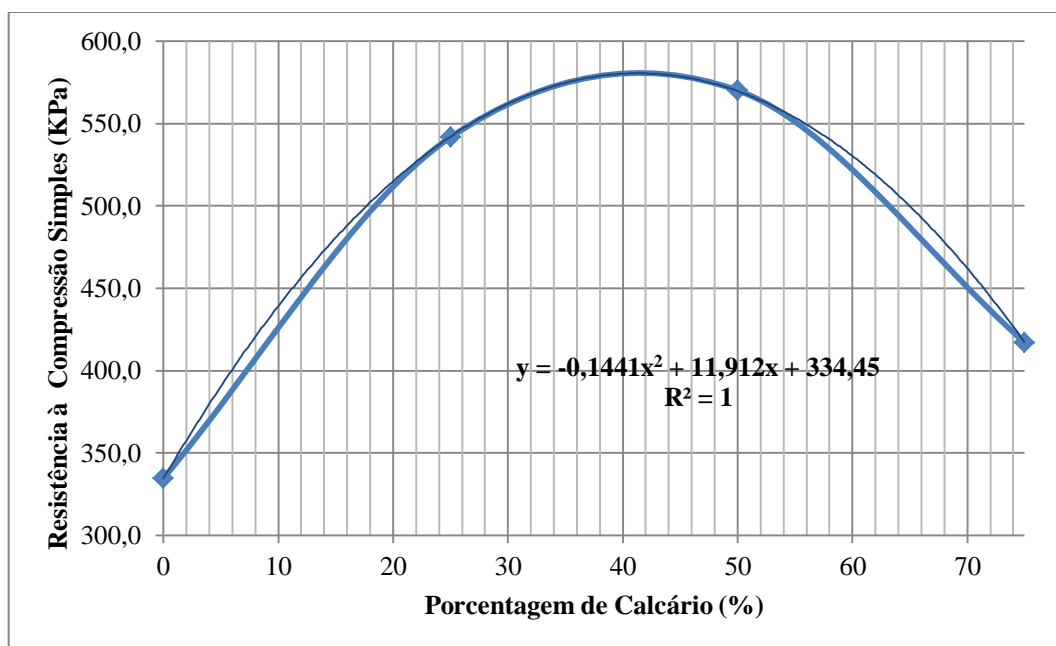
FIGURA 4.20. RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS O ENSAIO DE RCS.



Fonte: Autor (2015).

A incorporação de agregado calcário nas misturas influenciou na resistência à compressão simples. Dessa forma, para analisar este comportamento, foi elaborado um gráfico que correlaciona o teor de agregado calcário com a tensão de compressão, conforme pode ser visto na Figura 4.21.

FIGURA 4.21. COMPORTAMENTO DO RCS EM RELAÇÃO AO TEOR DE AGREGADO CALCÁRIO.



Fonte: Autor (2015).

Pela Figura 4.21, pode-se constatar que o acréscimo de agregado calcário, até 50%, proporciona um aumento no valor de resistência à compressão simples. A variação pode ser estimada pela equação de tendência, a qual apresenta uma confiança de 100%. Podemos também observar que todos os valores superam o valor do solo puro. Dessa forma, a adição de agregado calcário ao solo pode melhorar a sua resistência à compressão simples.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais considerações feitas para os resultados dos ensaios de caracterização física, compactação, ISC, módulo de resiliência e resistência à compressão simples. Dessa forma, foi analisada a influência da adição de agregado de rocha calcária, em diferentes proporções, em misturas com o solo. A partir desta análise são apresentadas as principais conclusões para esta pesquisa. Por fim, são propostas sugestões para futuras pesquisas, de forma que venham complementar este estudo.

5.1 CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os estudos realizados para esta pesquisa conduziram as seguintes considerações:

a) Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização física

O calcário calcítico britado empregado nas misturas apresenta todas as frações em sua composição, predominando as frações mais grosseiras, composta principalmente por óxido de cálcio. Este material apresenta baixa resistência, característica comprovada pelo elevado valor de abrasão, superior ao determinado nas especificações.

O solo utilizado nesta pesquisa consiste em um material arenoso, que apresenta baixa plasticidade com limites de *Atteberg*, superiores aos estabelecidos pelo DNIT para serem empregados em pavimentação. Porém, estas propriedades foram alteradas à medida que o calcário foi adicionado às misturas, fazendo com que a granulometria se tornasse mais graúda e com atendimento aos limites estabelecidos pelo DNIT.

b) Quanto aos resultados dos ensaios de compactação

Os ensaios de compactação mostraram que em todas as misturas analisadas ocorreu uma redução da massa específica seca máxima e umidade ótima com o aumento do teor de calcário na mistura, quando comparados com o solo.

c) Quanto aos resultados dos ensaios de ISC e expansão

A capacidade suporte determinada pelo ensaio de ISC, mostrou que o valor máximo foi observado nas amostras compostas por 50% de calcário, sendo que todas as misturas apresentaram valores superiores aos resultados do solo e do agregado puros. Em todos os casos, o ISC não superou 40%, o que faz com estes materiais sejam adequados para serem

empregados em camadas de sub-base de pavimentos. Quanto os resultados da expansão, todas as misturas atenderam as especificações.

d) Quanto aos resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência

O modelo matemático que melhor representou o solo puro foi o modelo composto, já para as amostras das misturas foi o universal. O módulo de resiliência aumentou com o acréscimo da tensão confinante e reduziu com o aumento da tensão desvio, em todos os casos, com exceção da amostra composta por 75% de agregado. Quanto aos valores dos módulos de resiliência, o solo puro apresentou resultados menores que as misturas. A amostra composta por 50% de cada material apresentou módulos de resiliência maiores em relação às demais misturas estudadas, semelhantes aos resultados de ISC.

e) Quanto aos resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples

As amostras contendo em sua composição 25 e 50% de agregado apresentaram resultados de RCS semelhantes, sendo superiores as demais amostras analisadas. As misturas apresentaram desempenho satisfatório para serem empregados em camada de sub-base de pavimentos.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das amostras, e determinadas a partir dos ensaios de ISC, módulo de resiliência e RCS, observou-se que as misturas compostas por 50% de calcário apresentaram os melhores resultados. Nesta composição, existe uma equivalência nas misturas das partículas de diâmetro superior e inferior a 2,0mm, proporcionando um melhor rearranjo das partículas.

Observa-se que todas as amostras não apresentaram características mecânicas que atendessem aos requisitos para serem empregadas em camadas de base. Apesar das curvas granulométricas se enquadrarem nas faixas granulométricas do DNIT para tráfego pesado, os ensaios apresentaram resultados baixos. Estes fatos estão associados à baixa resistência mecânica do agregado calcário, que devido à fragmentação das partículas aos serem expostas as forças durante a compactação, acarretaram alteração da granulometria.

As misturas solo-calcário apresentaram características de plasticidade, capacidade suporte, resistência à compressão simples e resiliência, adequadas para serem empregadas em

camadas de sub-base, uma vez que apresentou características dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT.

Portanto, o uso de agregado calcário para estabilização granulométrica de solos granulares apresentou-se como uma alternativa adequada para serem empregados em estruturas para pavimentos de tráfego leve. Entretanto, limita-se o teor de 50% de calcário na mistura, evitando o uso de maior quantidade de agregado, onde os resultados são inferiores aos obtidos por esta composição.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de melhorar o conhecimento sobre o comportamento geotécnico de misturas de solo com calcário e dando continuidade ao estudo realizado nesta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- verificar a variação de umidade ótima nas características mecânicas das misturas, tendo em vista a absorção do agregado;
- analisar a influência da energia de compactação no processo de degradação das misturas, por exemplo, na energia intermediária, onde provavelmente haverá uma menor degradação do agregado, com isso pode-se obter uma maior resistência;
- execução de um estudo similar com a adição de cimento, visando comparar o desempenho mecânico;
- realização de estudo nas mesmas proporções de agregados, porém com solos diferentes, visando estudo comparativo do comportamento em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

- ALECRIM, A. V.; *et al.*. Estudo de Quartzito Para Emprego em Sub-base e Base de Pavimentos. In: 16º RPU – Reunião de Pavimentação Urbana, 2009, Belo Horizonte/MG. **Anais** da 16º RPU, 2009. p.12.
- AMORIM, E.F. **Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT.** 2013. 151 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.
- AMU, O. O.; BAMISAYE, O. F.; KOMOLAFE, I. A.: The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement. **International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology**. v. 2, p. 29-46, 2011.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, M. W. B.; SIVAKUGAN, N.: Geotechnical characteristics of pavement sub-base applications. **Canadá Geotechnical Journal**, v. 49, p. 796-811, 2012.
- ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A.: Uso de calcário como agregado miúdo e filler em misturas asfálticas. In: XXVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014, Curitiba. **Anais** do XXVIII ANPET, 2014. v. 1. p. 1-4.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207/82**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR 12770**: Solo coesivo - determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.
- BA, M.; *et al.*; Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, issue 5, p. 1497–1510, 2013.
- BAGHINI, M. S. *et al.* The potentials of Portland cement and bitumen emulsion mixture on soil stabilization in road base construction. **Jurnal Teknologi**, v. 65, n. 2, p. 67-72, 2013.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BAN, H; PARK, SW.: Characteristics of Modified Soil-Aggregate System and Their Application in Pavements. **Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 6, p. 1672-1678, 2014.
- BAPTISTA, C. N. **Pavimentação**: compactação dos solos no campo, camadas de base e estabilização dos solos. 4. edição. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1976.
- BARRA, B.; *et al.* Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 86, n. 2, June, 2014.
- BARROS, E. H. C. ; SOUSA, J. S. ; AGUIAR, M. F. P. ; OLIVEIRA, F. H. L. . Análise experimental da influência da energia de compactação nas características mecânicas do solo. In: XVII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia - GO. **Anais** do XVII COBRAMSEG. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - ABMS, 2014.
- BASTOS, C. A. B. *et al.* . Caracterização Geotécnica do Solo de uma Jazida de Barrinho para uso como Material de Empréstimo na Construção de Acessos para Empreendimento de Mineração em São José do Norte/RS. In: VIII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GEORS

2015, 2015, São Leopoldo/RS. **Anais** do VIII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GEORS 2015. Porto Alegre/RS: ABMS-NRRS, 2015. v. 1. p. 319-329.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. 2013. 164p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

BEHIRY, A. E. A. E.: Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 4, p. 43–53, 2013.

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

BROOKS, R., UDOEYO, F., TAKKALAPPELLI, K. .Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia. **Journal Materials in Civil Enginnerring**, v. 23, n. 5, p. 711–716, 2011.

CALIK, U.; SADOGLU, E.: Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. **Nat Hazards**, v. 71, p. 1289–1303, 2014.

CAVALCANTE, F. C. I. T. ; BARROSO, S. H. A. . Influência da Energia de Compactação e do Teor de Areia na Estabilização Granulométrica de Bases e Sub-Bases de Pavimentos. In: XXIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2009, Vitória. **Anais** do XXIII ANPET, 2009. v. 1. p. 1-12.

COÊLHO, R. M. G.: **Uso de agregado calcário na fabricação de concreto asfáltico**. 1995. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1995.

COUTO, J.B. **Estudo de Misturas de Solo-Agregado em Bases e Sub-bases Rodoviárias do Rio Grande do Sul**: Caracterização de Laboratório e Execução de Trecho Experimental. 2009, 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio grande do Sul, 2009.

CUI, S.; *et al.*. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 54, p. 100–111, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2006. 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNIT **ES 139/10**. Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNIT ES 141/10**. Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNIT **ME 041/94**. Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

____ **DNIT ME 049/94.** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

____ **DNIT ME 051/94.** Solos – Análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

____ **DNIT ME 082/94.** Solos – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

____ **DNIT ME 093/94.** Solos – Determinação da densidade real – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

____ **DNIT ME 122/94.** Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

____ **DNIT ME 131/94.** Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

____ **DNIT ME 083/98.** Agregados – Análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

____ **DNIT ME 081/98.** Agregados – Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

____ **DNIT ME 035/98.** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

____ **DNIT ME 164/2013.** Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

DPM/UNESP. 2012. Departamento de Petrologia e Metalogenia da Universidade Estadual de São Paulo. Museu de Minerais e Rochas Heinz Ebert, Portal Campus Rio Claro. <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Acesso em março de 2015.

DUARTE, W. H. B. Aspectos da contaminação geoquímica ambiental da produção de calcários corretivos e cal na região de Santa Maria do Cambucá – Pernambuco: Considerações sobre a produção mineral regional. 2012. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2012.

EBEREMU, A. O.; AMADI, A. A.; OSINUBI, K. J. The use of compacted tropical clay treated with rice husk ash as a suitable hydraulic barrier material in waste containment applications. **WasteandBiomassValorization**, v. 4, n. 2, p. 309-323, 2013.

EMMERT, F. Avaliação do emprego de técnicas de estabilização de solos na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO. 2010. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

GHABCHI, R.; SINGH, D.; ZAMAN, M.: Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method. **ConstructionandBuildingMaterials**, v. 73, p. 479–489, 2014.

GONDIM, L. M. Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará. 2008. 213p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2008.

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

JOEL, M. and AGBEDI, I. Mechanical-Cement stabilization of laterite for use as flexible pavement material. **Journal of Material in Civil Engineering**, v.23, n.2, p.146-152, 2011.

KHOURY, N.; BROOKS, R.; BOENI, S. Y.; YADA, D.: Variation of Resilient Modulus, Strength, and Modulus of Elasticity of Stabilized Soils with Postcompaction Moisture Contents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, February, p. 160–166, 2013.

KITOUNI, S.; HOUARI, H. Lightweight concrete with Algerian limestone dust. Part I: Study on 30% replacement to normal aggregate at early age. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 352, p. 600-608, 2013.

KLINSKY, L. M. G; FABBRI, G. T. B. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Transportes**, v. 17, n. 2, p. 36-45, dezembro 2009.

KLINSKY, L. M. G; BARDINI, V. S. S.; FABBRI, G. T. B. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. **Transportes**, v. 22, n. 2, p. 1-10, 2014.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. 279p. Doutorado (Tese em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013.

KUMAR, P; SHARMA, S. K. Prediction of Equivalency Factors for Various Subbase and Base Courses. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1357-1365, 2012.

LUCENA, L. C. F. L. et al. Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 33, p. 210-219, 2014.

LUZIA, R. P. C.; et al.: Portuguese unbound granular materials characterisation using cyclic triaxial tests. **Transport**, v. 165, Issue TR2, p. 139–150, May 2012.

MAHROUS, A.M.; TANTAWI, M.; EL-SAGEER, H. Evaluation of the engineering properties of some Egyptian limestones as construction materials for highway pavements. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2598–2603, 2010.

MARQUES, G. L. O. Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação. 2009. 210p. Notas de Aula.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MEDRADO, A.W., **Caracterização geotécnica de solo da Região Norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. 2012. 124p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 2012.

MISHRA, D., TUTUMLUER, E. Aggregate Physical Properties Affecting Modulus and Deformation Characteristics of Unsurfaced Pavements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 9, p. 1144–1152, 2012.

MORENO, F.; RUBIO, M.C.; Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes. **Materials and Design**, v. 47, p. 61–67, 2013.

MOURA, R.D., **Classificação do calcário da região do Cariri Oriental paraibano usado na produção de carbonato de cálcio**. 2014. 57p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em

Química Industrial) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2014.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais. **AmbienteConstruído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 7-24, jan./mar. 2013.

NAZZAL, M. D.; MOHAMMAD, L. N.; AUSTIN, A. Evaluation of the Shakedown Behavior of Unbound Granular Base Materials. **Geo-Frontiers 2011**, American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 4752-4761, 2011.

NEJAD, F. M.; et al.. Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1523–1527, october, 2013.

NWAIWU, C.; MSHELIA, S.; DURKWA, J. Compactive effort influence on properties of quarry dust-black cotton soil mixtures. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 91-101, 2012.

OLIVEIRA, R. F. V. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. 2011. 148p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 2011.

ORIOLA, F.; MOSES, G.. Groundnut shell ash stabilization of black cotton soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, p. 415-428, 2010.

PINTO, S. S. S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos**. 2013. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

PUPPALA, A. J.; SARIDE, S.; WILLIAMMEE, R.. Sustainable reuse of limestone quarry fines and RAP in pavement base/subbase layers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, april, p. 418-429, 2011.

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

RIBEIRO, K. F. A.; RIBEIRO JÚNIOR, I. Influência da Expansão do Solo na Obtenção dos Parâmetros Geotécnicos Obtidos com Ensaio de Laboratório. In: XV COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2012, Porto de Galinhas, PE. **Anais do XVI COBRAMSEG**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - ABMS, 2012.

RIOS, A. A. C.; et al.: Análise da correlação linear entre a densidade máxima e o índice de suporte califórnia. Revista **GEINTEC**, São Cristóvão, SE, v. 3, n.3, p.022-029, 2013.

RUVER, C. A.; et al. Viabilidade técnico-econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, [S.I.], v. 13, n. 21, p. 13-24, Maio. 2013.

SAGHAFI, B. Use of waste limestone dust and steel slag in UK highways type 1 unbound mixtures. **Construction Materials**, v. 106, p. 99-107, april 2013.

SALTAN, M; FINDIK, F. S. Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. **Building and Environment**, v. 43, p. 415–421, 2008.

SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., 2009. **Calcário e Dolomito** – Capítulo 16, in Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações, Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins, 2009.

SANTANNA, J. A. **Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa**. 1998. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1988.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2001. v.2.

SENGOZ, B; ONSORI, A; TOPAL, A. Effect of Aggregate Shape on the Surface Properties of Flexible Pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18 , Issue 5, p 1364-1371, 2014.

SILVA, D. M.; SILVA, A. J.; QUEIROZ, O. Q. Análise de Estabilização Química de Solo Siltoso A-4 de Porto Velho-RO. **E&S - Engineering and Science**, v. 2, n. 4, p. 13-22, 2015.

SILVEIRA, R. N. P. O. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedreira para utilização em pavimentos rodoviários**. 2010. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

SISWOSOEBROTHO, B. I., WIDODO, P., AUGUSTA, E. The influence of fines content and plasticity on the strength and permeability of aggregate for base course material. **Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 5, pp. 845 - 856, 2005.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SOUZA ALMEIDA, M. S. et al. Correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da CENIBRA. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, 2010.

SOUZA, F.; BRAGANÇA, S. R.. Caracterização tecnológica de um calcário dolomítico in natura, calcinado e sulfatado como meio dessulfurante. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 350, p. 331-337, 2013.

SOUZA JUNIOR, J. D. **O Efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará**. 2005. 211p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2005.

TEIXEIRA, I. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

UZUN, I.; TERZI, S.. Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 284-288, 2012.

VIANA, H. M. F. 2007. 320p. **Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2007.

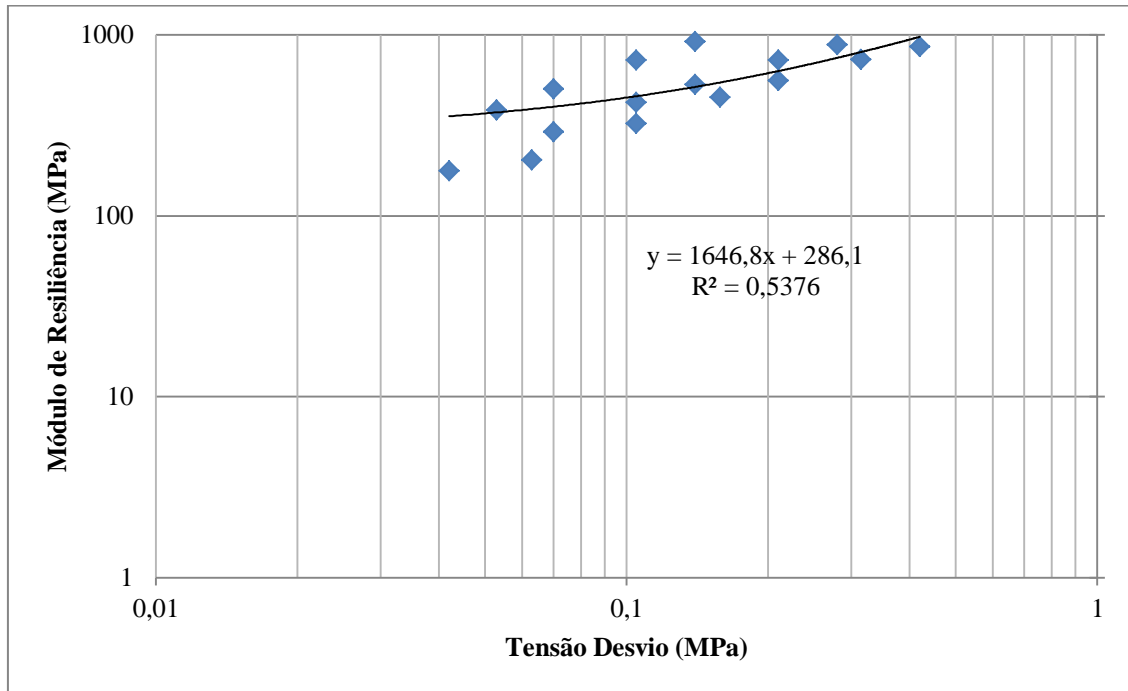
VILLIBOR, D. F. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 1982.

YADU, L.; TRIPATHI, R. K. Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behavior of stabilized soft soil. **Procedia Engineering**, v. 51, p. 125-131, 2013.

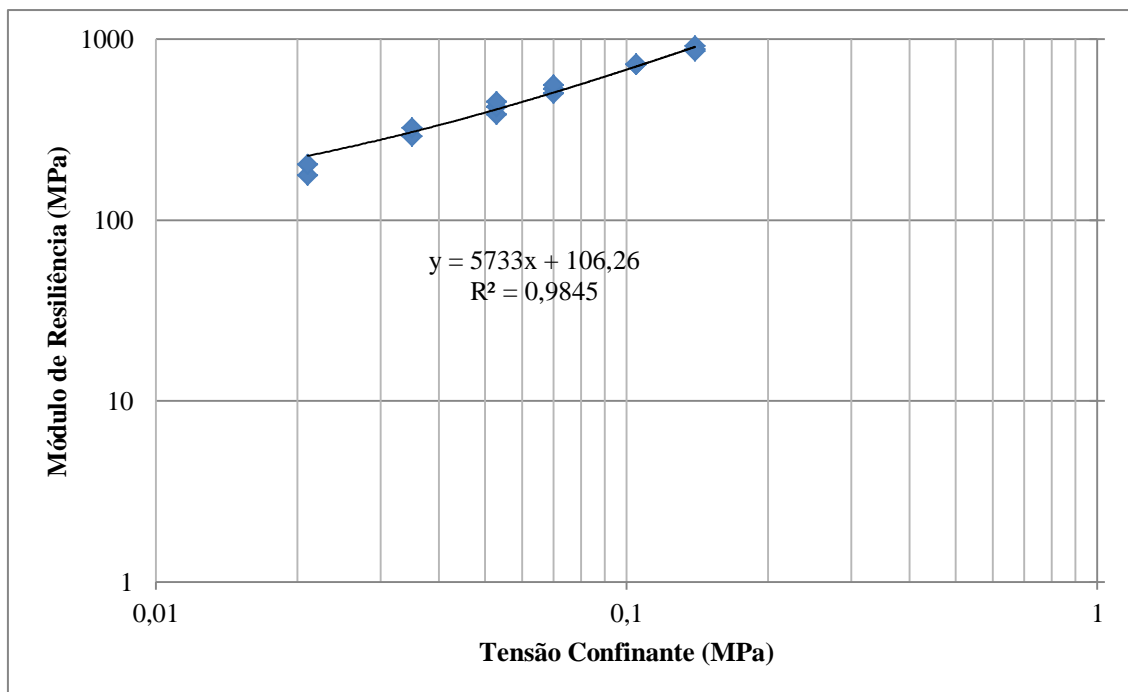
YANG, S.-R.; LIN, H.-D.; HUANG, W.-H. Variation of Initial Soil Suction with Compaction Conditions for Clayey Soils. **Journal of Mechanics**, v. 28, n. 03, p. 431-437, 2012.

YILMAZ, A.; KARASAHIN, M.; Mechanical properties of ferrochromium slag in granular layers of flexible pavements. **Materials and Structures**, v. 43, n. 3, p. 309–317, 2010.

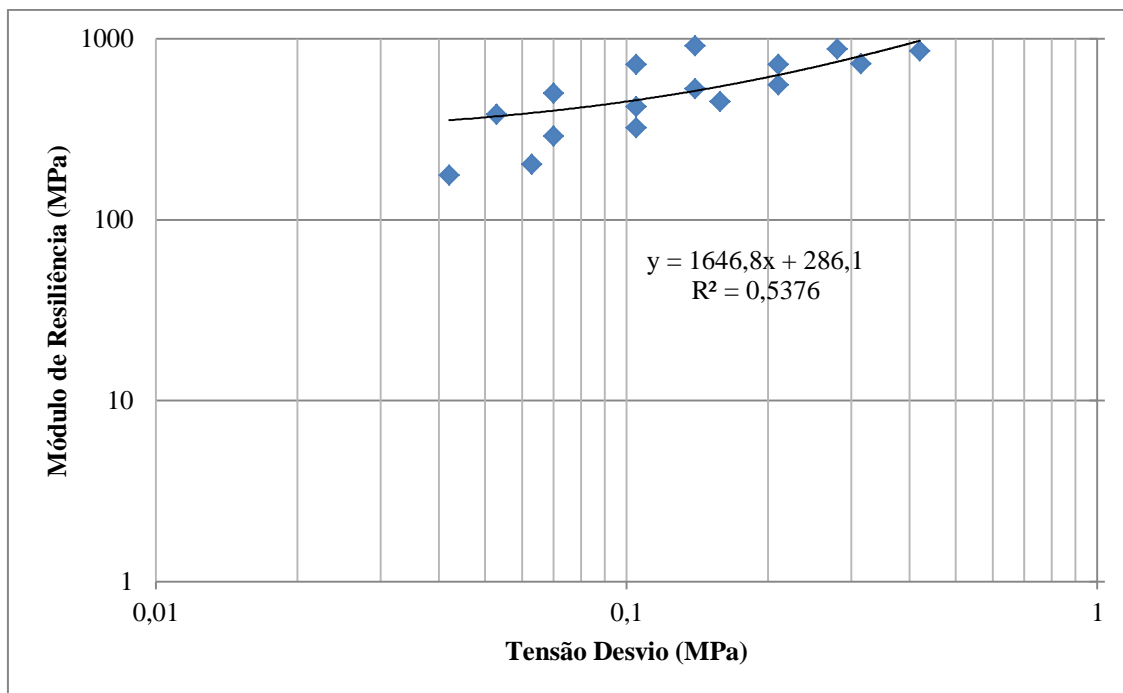
APÊNDICES A – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS AMOSTRAS EM FUNÇÃO DA TENSÃO DESVIO E DA TENSÃO CONFINANTE. Amostra - Solo: (a) Tensão Desvio e; (b) Tensão Confinante. Amostra - 75% Solo + 25% Agregado Calcário: (c) Tensão Desvio e; (d) Tensão Confinante. Amostra - 50% Solo + 50% Agregado Calcário: (e) Tensão Desvio e; (f) Tensão Confinante. Amostra - 25% Solo + 75% Agregado Calcário: (g) Tensão Desvio e; (h) Tensão Confinante.



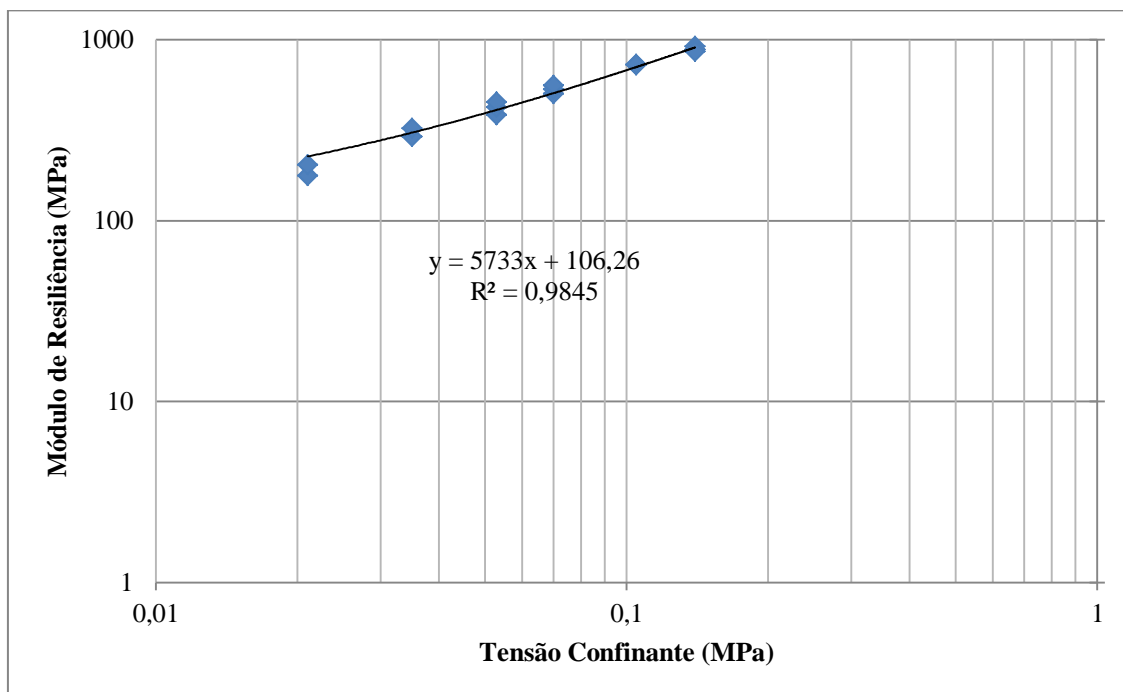
(a)



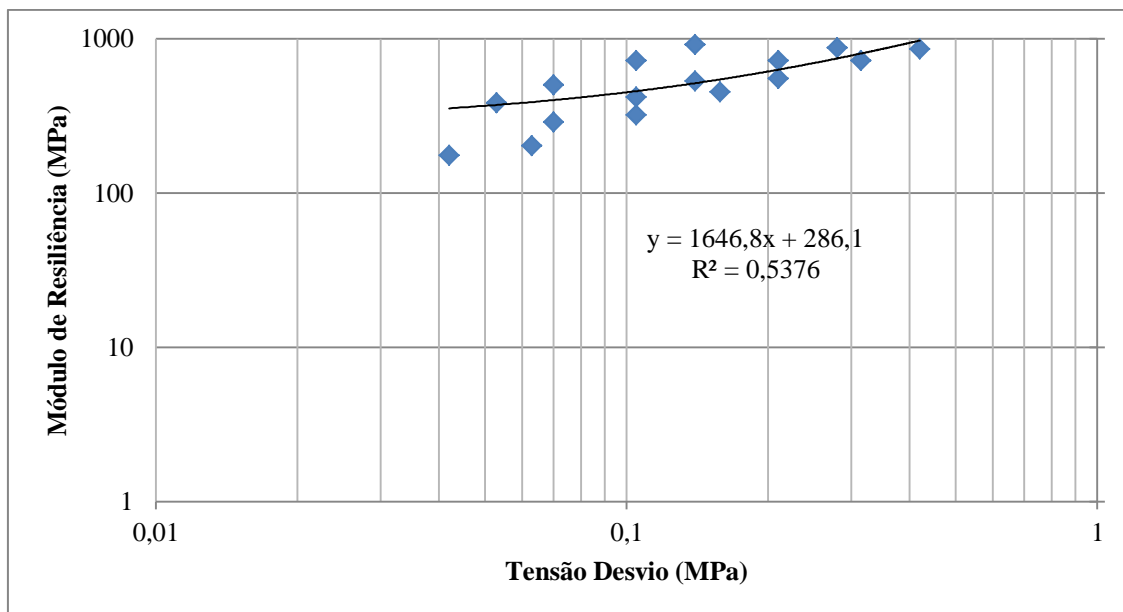
(b)



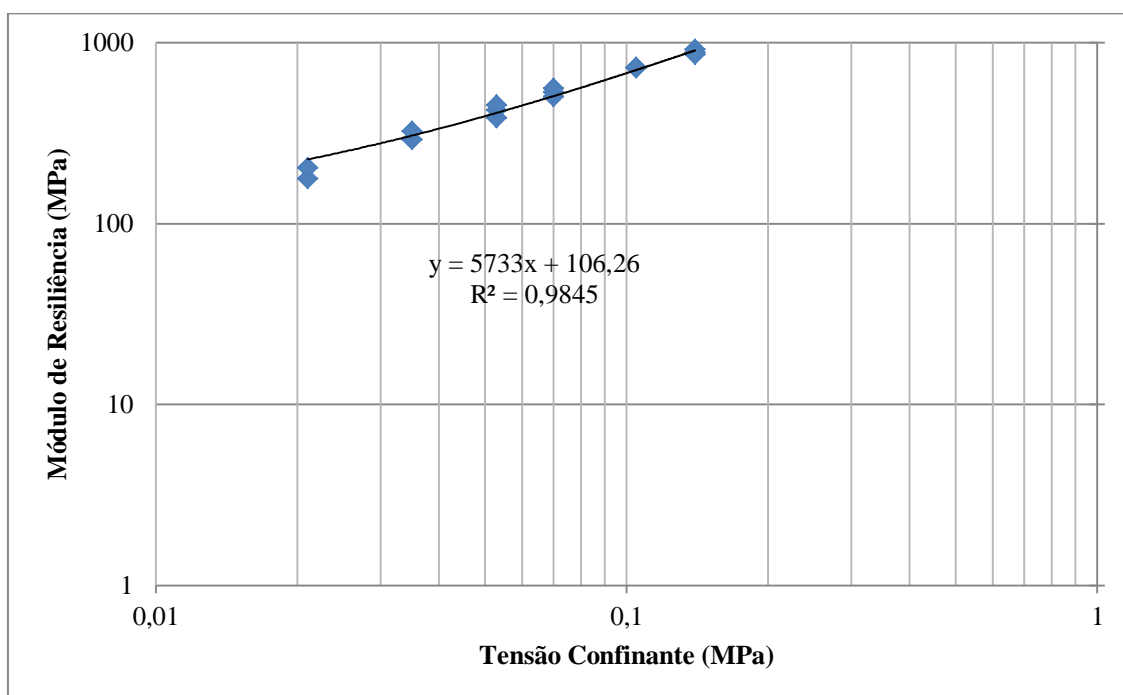
(c)



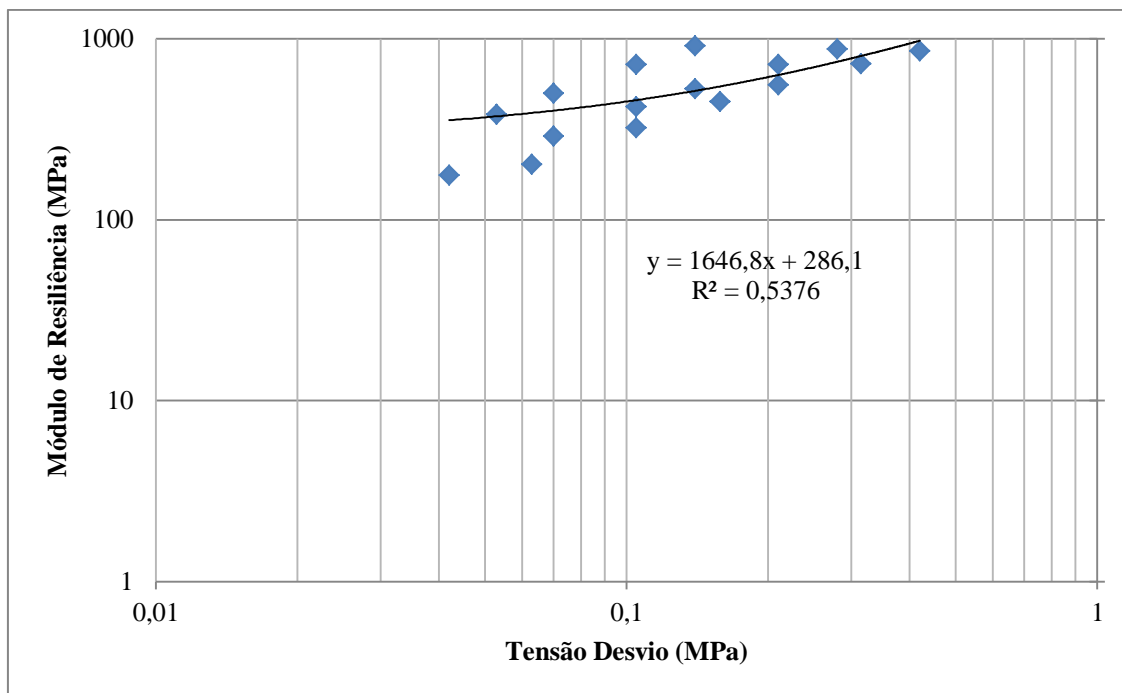
(d)



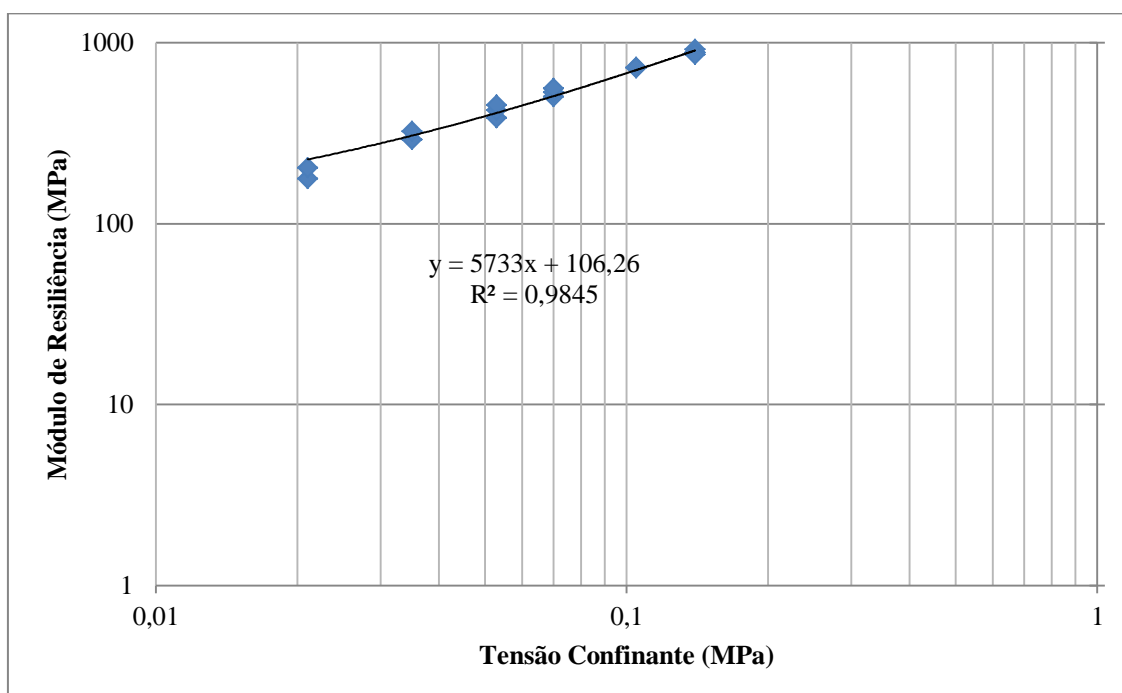
(e)



(f)

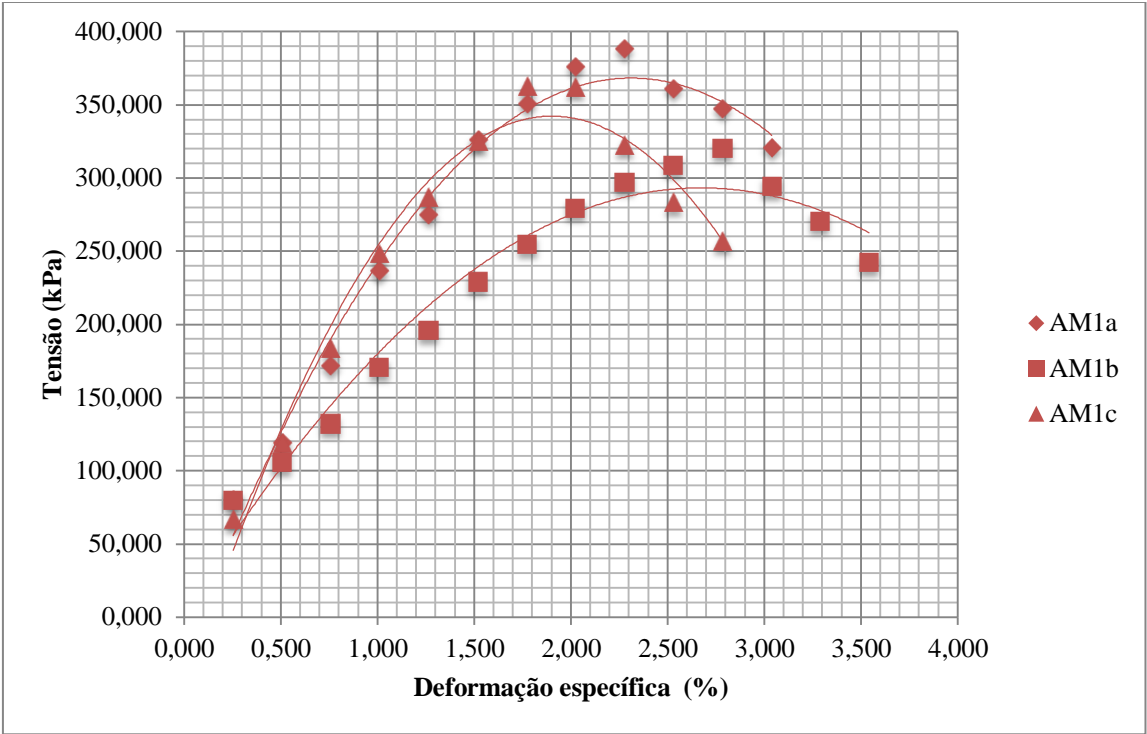


(g)

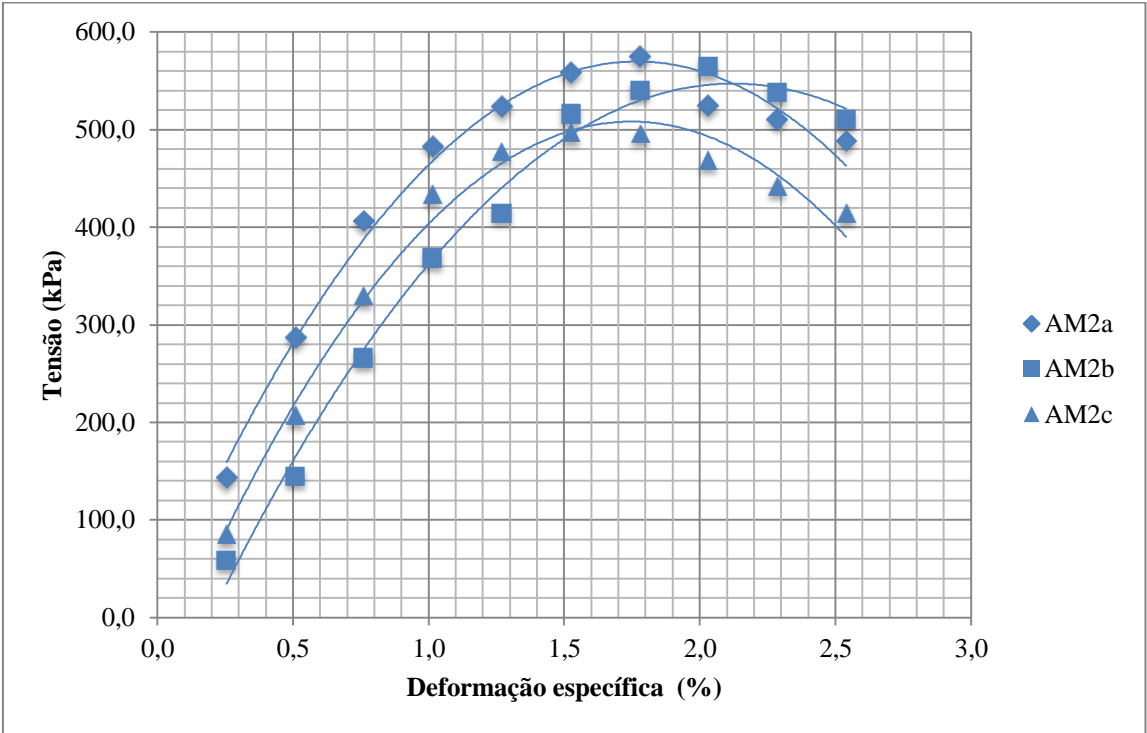


(h)

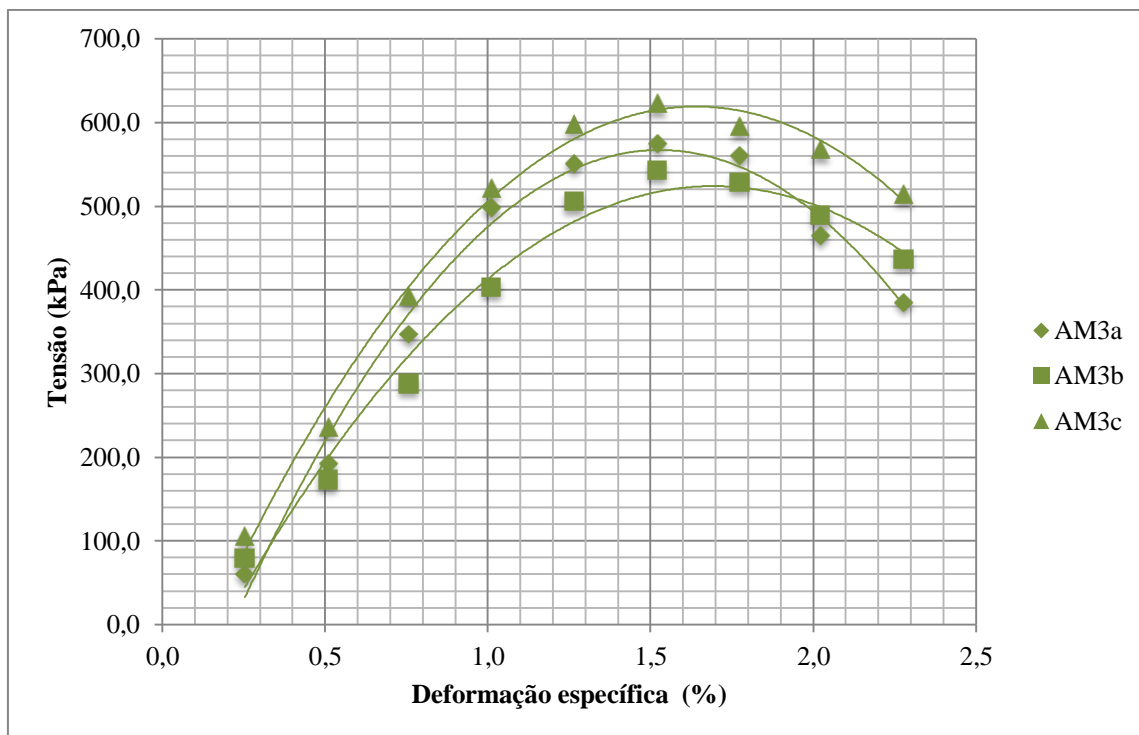
APÊNDICES B - CURVAS DE RCS DAS AMOSTRAS: (a) Solo Puro; (b) 75% Solo + 25% Agregado Calcário; (c) 50% Solo + 50% Agregado Calcário; (d) 25% Solo + 75% Agregado Calcário.



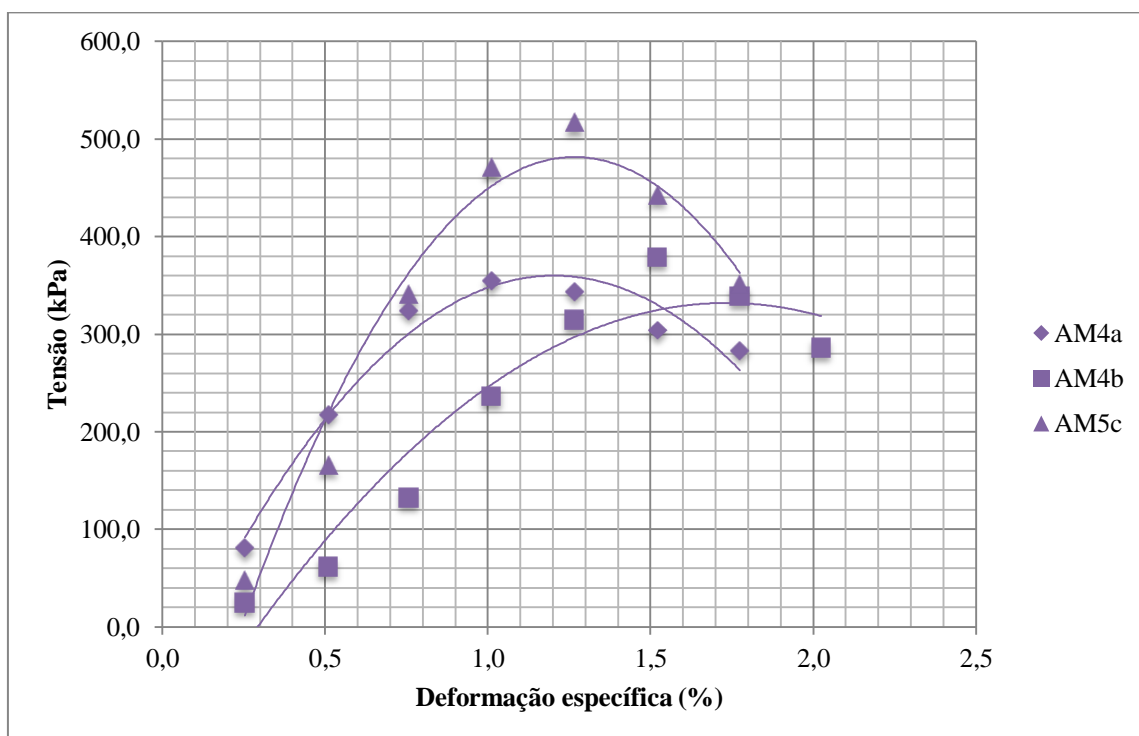
(a)



(b)



(c)



(d)