

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**WAGNER TEIXEIRA**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO, CAL E RCD**  
**PARA USO EM PAVIMENTOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**WAGNER TEIXEIRA**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO, CAL E RCD  
PARA USO EM PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de concentração – Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luís dos Santos Izzo

**CURITIBA  
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Teixeira, Wagner

Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos [recurso eletrônico] / Wagner Teixeira.-- 2019.

1 arquivo texto (99 f.): PDF; 2,11 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 16 maio 2019)

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 90-99

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Pavimentação. 3. Solos - Compactação. 4. Rodovias - Construção. 5. Cal - Aplicações industriais. 6. Resíduos de construção sólida - Reaproveitamento. 7. Mecânica do solo. I. Izzo, Ronaldo Luis dos Santos. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

---

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 166

A Dissertação de Mestrado intitulada Comportamento Mecânico de Solo Siltoso Misturado com Cal e Resíduos de Construção e Demolição para Uso em Pavimentos, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Wagner Teixeira**, no dia 29 de março de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

### BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Ronaldo Luis dos Santos Izzo – Presidente – UTFPR

Prof(a). Dr(a). Adauto José Miranda de Lima – UTFPR

Prof(a). Dr(a). Matheus David Inocente Domingos – UTFPR

Prof(a). Dr(a). Heraldo Luiz Giacheti – UNESP

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 29 de março de 2019.

*À minha família e aos brasileiros, onde  
em sua maioria lhe é negada o acesso  
à educação de qualidade.  
**Dedico***

## **AGRADECIMENTOS**

Em mais uma etapa da carreira acadêmica, inúmeras presenças me acompanharam e me ajudaram a concluí-la. Pessoas doaram seu tempo e fizeram que meus dias fossem fáceis e prazerosos.

Dentre todos os merecedores de meu agradecimento, cito brevemente os nomes em destaque. Gostaria de agradecer ao meu professor orientador, acompanhante de longa jornada, Ronaldo Luis dos Santos Izzo.

Ao professor Matheus David Inocente Domingos e seu meticoloso diagnóstico.

Ao professor Adauto José Miranda de Lima e suas exigências probabilísticas.

À professora Janine Nicolosi Correa e suas receitas maravilhosas em escrita acadêmica.

Ao professor Vsévolod Mymrine.

Ao professor João Elias Abdalla Filho e seus triângulos mirabolantes.

À todo o auxílio do professor Heraldo Luiz Giacheti.

Às distintas pessoas Rafael Benassi dos Santos, Kaio Dias Nery, Kássio Dias Nery, Eclesielter Moreira, João Luis Rissardi, Jair Jesus Baldovino, Érico Rafael da Silva, Adriana Teixeira, Thaisa Yumi Kataoka e Jenni Pauliina Elonen.

À instituição CAPES, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Por fim e ainda muito importante, pais e familiares.

## RESUMO

TEIXEIRA, Wagner. Comportamento mecânico de misturas solo, cal e rcd para uso em pavimentos. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A sustentabilidade na engenharia é um tópico complexo e em constante debate. No campo da pavimentação, exige-se cada vez mais das rodovias, sobretudo maior durabilidade e melhor qualidade. Para um solo misturado com cal, são vários os fatores que influenciam o seu comportamento mecânico, como: a quantidade de cal, a porosidade, o tempo de cura e o teor de umidade. Com as variáveis definidas e estudadas, metodologias de dosagem podem ser criadas e adaptadas. Para que a aplicabilidade de determinado resíduo seja vantajosa no melhoramento de um solo, ele deve ser submetido a diversos ensaios mecânicos para verificar o atendimento das exigências mínimas. O objetivo deste trabalho é estudar os fenômenos envolvidos na estabilização de um solo tropical através da adição de cal e no seu melhoramento com a adição de resíduos da construção e demolição. Optou-se por analisar as variáveis que, direta ou indiretamente, influenciam o comportamento do solo natural da Formação Geológica de Guabirota. As variáveis consideradas são: teor de cal, porosidade, teor de umidade de moldagem e tempo de cura. Os ensaios de caracterização realizados foram: granulometria, limites de *Atterberg*, pH, densidade real dos grãos e expansibilidade. Os ensaios de resistência realizados foram: compressão simples, tração por compressão diametral, índice de suporte Califórnia e módulo resiliente. A adição de cal reduziu a expansibilidade em 87,5%. Os ensaios de Módulo Resiliente apontaram que as misturas solo-cal e solo-cal-RCD se comportam como misturas argilo-arenosas, e os resultados aumentaram conforme a maior quantidade de cal e RCD. Foi observado que, para dimensionamento de um pavimento, é possível aplicar as seguintes misturas: energias intermediária e modificada da mistura solo-cal de 9% de cal e misturas solo-cal-RCD M1 e M2 para reforço de subleitos; energia modificada da mistura solo-cal-RCD M1 e energias intermediária e modificada da mistura solo-cal-RCD M2 para sub-bases e energia modificada da mistura solo-cal-RCD M2 para bases.

**Palavras-chave:** Formação Guabirota. Pavimentação. Resíduo. Cal. Solo Silteoso. Compressão Simples. Compressão Diametral. Módulo Resiliente.

## ABSTRACT

TEIXEIRA, Wagner. Mechanical behavior of soil, lime and CDW mixtures for paving. 2019. 99 p. Thesis (Civil Engineering Master's Degree) – Graduate Program in Civil Engineering, Technological Federal University of Paraná. Curitiba, 2019.

Sustainability in engineering is a complex topic and through continuous debate. In the field of paving, higher quality of highways are demanded, as well as greater durability. For a soil mixed with lime, several factors influence its mechanical behavior: lime content, porosity, aging and moisture content. With the variables defined and analysed, dosage methods can be established and adapted. In order to the applicability of a specific waste, to be adequate in the improvement of a soil, it is submitted to several mechanical tests, aiming at the minimum requirements. The goal is to study the stabilization of a tropical soil through addition of lime and its improvement through addition of construction and demolition waste. It was decided to study the variables that direct or indirectly effect the behavior of the natural soil of the Guabirota Geological Formation. The selected variables are: amount of lime, porosity, water content and aging. The characterization tests were: grain size, Atterberg limits, pH, specific gravity and expansion index. The resistance tests are: unconfined compression test, diametral compression, California bearing ratio and resilient modulus. The addition of lime reduced the expansion index by 87.5%. The Resilient Modulus assays indicated that the soil-lime and soil-lime-CDW mixtures behave as clay-sand mixtures, and the results increased as the amount of lime and CDW increased. It was observed that, for pavement design, the following mixtures can be applied: intermediate and modified efforts of the 9% soil-lime mixture and soil-lime-CDW mixtures M1 and M2 for reinforcement of subgrade; modified effort of the soil-lime-CDW M1 mixture and intermediate and modified efforts of the soil-lime-CDW M2 mixture for subbase and modified effort of the soil-lime-CDW M2 mixture for base.

**Key-words:** Guabirota Formation. Pavement. Waste. Lime. Silt soil. Unconfined compression. Diametral Compression. Resilient Modulus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação Geológica de Guabirota em Curitiba e municípios limítrofes .....	22
Figura 2 – Efeito da cal em limites de contração, plasticidade e liquidez.....	25
Figura 3 – Ensaio de compressão simples de solo silte e solo-cal, 6 meses de cura.....	28
Figura 4 – Evolução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento com o tempo, solo de Soumagne tratado com cal (ponto branco representa sem tratamento, cura de 0 dias).....	29
Figura 5 – Local da coleta do solo.....	39
Figura 6 – Talude exposto do local da coleta do solo .....	39
Figura 7 – Granulômetro à laser Microtrac S3500 .....	41
Figura 8 – Ensaio de limite de liquidez .....	41
Figura 9 – Ensaio de limite de plasticidade .....	41
Figura 10 – Ensaio de densidade real dos grãos .....	42
Figura 11 – Prensa hidráulica manual Bovenau 15 T.....	43
Figura 12 – Ensaio de compressão simples .....	45
Figura 13 – Correção da curva pressão-penetração do ISC.....	47
Figura 14 – Equipamento pórtico de ensaio de Módulo Resiliente.....	49
Figura 15 – Célula com amostra para o ensaio de Módulo Resiliente .....	49
Figura 16 – Curva granulométrica apenas do solo .....	52
Figura 17 – Curva granulométrica do solo puro, da areia e do pedrisco.....	53
Figura 18 – Classificação do solo conforme metodologia MCT.....	55
Figura 19 – PH do solo e das misturas com cal.....	55
Figura 20 – Curva de compactação apenas do solo nas energias normal, intermediária e modificada .....	57
Figura 21 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 3% de cal nas energias normal, intermediária e modificada .....	57
Figura 22 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 5% de cal nas energias normal, intermediária e modificada .....	58
Figura 23 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 7% de cal nas energias normal, intermediária e modificada .....	58
Figura 24 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 9% de cal nas energias normal, intermediária e modificada .....	59

Figura 25 – Curva de compactação da mistura solo-cal-RCD M1 nas energias normal, intermediária e modificada .....	59
Figura 26 – Curva de compactação da mistura solo-cal-RCD M2 nas energias normal, intermediária e modificada .....	60
Figura 27 – Linha ótima de compactação das misturas nas energias normal, intermediária e modificada .....	60
Figura 28 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia normal .....	62
Figura 29 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia intermediária .....	62
Figura 30 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia modificada..	63
Figura 31 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia normal .....	64
Figura 32 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia intermediária.....	64
Figura 33 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia modificada .....	65
Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia normal.....	66
Figura 35 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia intermediária.....	66
Figura 36 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia modificada .....	67
Figura 37 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia normal .....	68
Figura 38 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia intermediária .....	68
Figura 39 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia modificada .....	69
Figura 40 – Variação da porosidade com a resistência à compressão simples de amostras solo-cal .....	72
Figura 41 – Variação da porosidade com a resistência à tração por compressão diametral de amostras solo-cal .....	73

Figura 42 – Variação da relação porosidade por quantidade de cal com a resistência à compressão simples de amostras solo-cal .....	75
Figura 43 – Variação da relação porosidade por quantidade de cal com a resistência à tração por compressão diametral de amostras solo-cal .....	76
Figura 44 – Relação $q_t / q_u$ das misturas solo-cal em diferentes curas nas energias normal, intermediária e modificada .....	78
Figura 45 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 3% de cal nas três energias .....	80
Figura 46 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 5% de cal nas três energias .....	81
Figura 47 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 7% de cal nas três energias .....	81
Figura 48 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 9% de cal nas três energias .....	82
Figura 49 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal-RCD M1 nas três energias .	82
Figura 50 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal-RCD M2 nas três energias .	83
Figura 51 – Módulo resiliente de todas as misturas com 90 dias de cura em diferentes energias de compactação.....	83
Figura 52 – Índice de Suporte Califórnia do solo puro e das misturas solo-cal e solo-cal-RCD .....	85
Figura 53 – Expansão do solo puro e das misturas solo-cal e solo-cal-RCD.....	86

## LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 – Perfil típico da Formação Guabirota	23
Tabela 1 – Parâmetros de cisalhamento do solo compactado e solo com RCC	31
Tabela 2 – Valores mínimos de módulo resiliente por pavimento	35
Tabela 3 – Etapas e ensaios realizados	38
Tabela 4 – Expansão máxima permitida para cada camada do pavimento	48
Tabela 5 – ISC mínimo permitido para cada camada do pavimento	48
Tabela 6 – Sequência de tensões para fase de condicionamento	50
Tabela 7 – Sequência de tensões para obtenção do módulo de resiliência	51
Tabela 8 – Propriedades físicas do solo	53
Tabela 9 – Propriedades físicas das misturas solo-cal e solo-cal-RCD	54
Tabela 10 – Resumo dos resultados do ensaio de compactação	61
Tabela 11 – Análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal	70
Tabela 12 – Análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal	71
Tabela 13 – Análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal	71
Tabela 14 – Análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal	72
Tabela 15 – Equações de regressão da variação da porosidade com a resistência à compressão simples e com a resistência à compressão diametral das amostras solo-cal	74
Tabela 16 – Equações de controle da razão $q_t/q_u$ para diferentes tempos de cura	77
Tabela 17 – Módulo resiliente e coeficientes de regressão para amostras com 90 dias de cura em diferentes energias de moldagem	79
Tabela 18 – Resumo dos limites de módulo resiliente para pavimentos estabelecidos pela AASHTO (2008)	84

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$\gamma_{\text{máx}}$  – Peso específico aparente máximo;

$\gamma_{\text{dmáx}}$  – Peso específico aparente seco máximo;

$\epsilon_1$  – Deformação resiliente axial (vertical);

$\epsilon_r$  – Deformação específica vertical resiliente ou recuperável;

$\eta$  – Porosidade do corpo de prova (%);

$\sigma_d$  – Tensão desvio;

$\sigma_1$  – Tensão vertical total;

$\sigma_3$  – Tensão lateral;

$\phi'$  – Ângulo de atrito interno efetivo;

$\omega_{\text{ót}}$  – Umidade ótima;

$\emptyset$  – Diâmetro.

A – Área transversal do corpo de prova;

AASTHO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*;

ABPC – Associação Brasileira de Produtores de Cal;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública;

ASTM – *American Society for Testing and Materials*;

$c'$  – Intercepto de coesão efetivo;

$C_c$  – Coeficiente de curvatura;

CDW – *Construction Demolition Waste*;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

$C_u$  – Coeficiente de uniformidade;

D – Diâmetro do corpo de prova (cm);

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral;

F – Carga de ruptura máxima na curva tensão-deformação (N);

$G_s$  – Densidade real dos grãos;

$G_{SL}$  – Densidade real dos grãos da cal (adim.);

$G_{SS}$  – Densidade real dos grãos do solo (adim.);

H – Altura do corpo de prova (cm);

ICL – *Initial Consumption of Lime*;

IP – Índice de plasticidade;

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias;

ISC – Índice de suporte Califórnia;

ISSMFE – *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*;

K – Coeficiente de permeabilidade;

L – Teor de cal do corpo de prova (%);

L<sub>f</sub> – Leitura final do extensômetro;

L<sub>i</sub> – Leitura inicial do extensômetro;

LL – Limite de liquidez;

LP – Limite de plasticidade;

LVDT – *Linear variable differential transformer*;

MEPDG – *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*;

MR – Módulo resiliente;

M<sub>SL</sub> – Massa seca de cal em um corpo de prova (g);

M<sub>SS</sub> – Massa seca de solo em um corpo de prova (g);

P – Carga de ruptura máxima na curva tensão-deformação (N);

$P'$  – Pressão corrigida obtida na leitura da prensa;

$P_{\text{padrão}}$  – Pressão padrão, que é a correspondente a pedra britada específica de ISC igual à 100%;

$q_t$  – Resistência à tração (MPa);

$q_u$  – Resistência à compressão (MPa);

RCC – Resíduo de construção civil

RCD – Resíduo de Construção e Demolição;

USBR – *United States Bureau of Reclamation*;

$V_{\text{total}}$  – Volume total do corpo de prova;

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivo Geral .....	17
1.1.2 Objetivos Específicos .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	18
1.3 DELIMITAÇÃO .....	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 SOLOS TROPICAIS E CLASSIFICAÇÃO .....	21
2.1.1 Formação Guabirota .....	22
2.2 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS .....	23
2.2.1 Comportamento Mecânico e Químico de Solo-Cal.....	24
2.2.2 Características de Permeabilidade em Solos Estabilizados com Cal .....	26
2.2.3 Características de Resistência à Compressão em Solos Estabilizados com Cal.....	27
2.2.4 Características de Resistência ao Cisalhamento em Solos Estabilizados com Cal .....	28
2.2.5 Características de Resistência à Erosão e Sensibilidade à Água de Solos Estabilizados com Cal.....	29
2.2.6 Comportamento Mecânico de Solo-Resíduo.....	30
2.2.7 Características do Agregado de Concreto Reciclado .....	31
2.2.8 Aplicações de Solo-Cal em Grandes Obras.....	31
2.3 PAVIMENTAÇÃO .....	32
2.3.1 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas e Módulo Resiliente.....	32
2.3.2 Dimensionamento de Pavimento de Concreto Betuminoso .....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	37
3.2 MATERIAIS .....	39
3.2.1 Coleta do solo .....	39
3.2.2 Cal e Resíduos de Construção e Demolição.....	40
3.3 MÉTODOS .....	40
3.3.1 Caracterização do Solo .....	40
3.3.2 Dosagem das Misturas de Solo e Cal .....	42
3.3.3 Ensaio de Compactação .....	42
3.3.4 Moldagem dos Corpos de Prova.....	43
3.3.5 Análise da Relação Porosidade e Teor de Cal .....	44
3.3.6 Ensaio de Compressão Simples.....	44
3.3.7 Ensaio de Tração por Compressão Diametral .....	45
3.3.8 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia e Expansão.....	46
3.3.9 Ensaio de Módulo Resiliente.....	48
3.3.10 Análise Estatística dos Resultados .....	51
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	52
4.2 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E DAS MISTURAS .....	54
4.3 RESULTADOS DE PH DO SOLO E DAS MISTURAS .....	55
4.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....	56
4.4.1 Compactação do Solo Puro .....	56
4.4.2 Compactação das Misturas .....	57

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	62
4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	66
4.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA .....	70
4.7.1 Análise de Variância da Resistência à Compressão Simples .....	70
4.7.2 Análise de Variância da Resistência à Tração.....	71
4.8 EFEITOS DA POROSIDADE NAS AMOSTRAS DE SOLO-CAL .....	72
4.9 EFEITOS DA POROSIDADE POR QUANTIDADE DE CAL NAS AMOSTRAS DE SOLO-CAL .....	75
4.10 RELAÇÃO OBTIDA ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	77
4.11 MÓDULO RESILIENTE.....	78
4.12 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	84
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>87</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	87
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	89
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas abordagens procuram diminuir o impacto ambiental da engenharia. O assunto é pauta de discussões em âmbito de congressos e simpósios, bem como inúmeras publicações de relevância. O tema abrange desde certificações (Selo Casa Azul, *Leed*, Selo Procel Edifica) até reciclagem, do projeto à manutenção. Nenhum outro setor consome tamanha matéria-prima de fontes tão diversas como a engenharia civil. Nesse contexto, o profissional tem a difícil tarefa de propor ações que conduzam à redução de impactos ambientais, sem comprometer a competitividade econômica.

No campo da pavimentação, exige-se cada vez mais das rodovias: maior durabilidade, melhor qualidade e adequação às novas normas devido a um fluxo ascendente de veículos que transitam em menor velocidade e cargas mais altas. O engenheiro se encontra cada vez mais obrigado a racionalizar o emprego dos recursos disponíveis, o que nem sempre se encaixa nos requisitos de dimensionamento.

A adição da cal é conhecida no mundo, particularmente, como uma mistura com o solo e sobreposta a um subleito de baixa capacidade de suporte. Consoli *et al.* (2008, 2009) mostraram que uma camada superior cimentada garante a distribuição de tensões em uma área mais ampla, aumentando substancialmente a capacidade de suporte do pavimento.

Em pavimentos adequados, empregam-se preferencialmente materiais granulares (pedregulho, britas, areias grossas) para as camadas estruturais devido às boas qualidades de suporte (estabilidade e resistência mecânica) que esses materiais possuem. Entretanto, os materiais desejados nem sempre estão disponíveis para aplicação. Uma correta análise de viabilidade é necessária, considerando opções como a busca pelo material adequado em uma jazida, estabilização química e física do solo local ou a modificação do dimensionamento do projeto.

Buscar o material em uma jazida, geralmente, acarreta em transporte de grandes volumes e grandes distâncias, aumentando o custo e o tempo total da obra. Optando por estabilização do solo local, exige-se um estudo aprofundado entre testes laboratoriais e análises, a fim de se obter uma dosagem de solo-cal adequada para o solo em questão. Neste contexto, observa-se que há decisões em nível estratégico sobre qual opção é a mais adequada, inclusive pelo fato de uma alteração radical geralmente só ser considerada em última instância, tendo em vista a viabilidade econômica e de prazo do projeto.

Para um solo misturado com cal, são vários os fatores que influenciam o seu comportamento mecânico tais como: quantidade de cal, porosidade, tempo de cura e teor de umidade. Com as variáveis definidas e estudadas, metodologias de dosagem podem ser criadas e adaptadas. Há varios estudos que comprovam seu melhoramento da resistência (AZEVEDO, 2010; JOHANN, 2013; LOPES, 2011; LOVATO, 2004; NUNEZ, 1991;).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Coleta de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), a coleta de resíduos sólidos de construção e demolição no país era de 72.597 toneladas/dia no ano de 2007, chegando a 26,5 milhões de toneladas/ano. Isto representa 16% da geração de resíduos em todo o país. Esse número chegou a 126.619 toneladas/dia em 2016, representando 46,2 milhões de toneladas em um ano (um aumento de 74% em um período de cinco anos).

Para que a aplicabilidade de determinado resíduo seja aceitável no melhoramento de um solo, ele é submetido a diversos ensaios mecânicos, visando o atendimento das exigências mínimas estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT.

Conforme o Departamento Nacional de Produção Mineral (SUMÁRIO MINERAL, 2014) o Brasil está na quinta posição na produção mundial de cal e teve uma produção de 8,4 milhões de toneladas no ano de 2013. Desse montante, a cal virgem representa 76% e a cal hidratada, 24% da produção.

O objetivo da dissertação é estudar os fenômenos envolvidos na estabilização de um solo tropical através da adição de cal e no seu melhoramento através da adição de resíduos da construção e demolição. Optou-se por analisar as variáveis que, direta ou indiretamente, influenciam o comportamento do solo natural da Formação Geológica de Guabirota.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência da adição da cal e resíduos da construção e demolição, da relação de porosidade com o teor de cal e do teor de umidade de moldagem, sobre a resistência mecânica um solo tropical silto-arenoso natural da Formação Geológica de Guabirota, para uso em pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estabelecidos constituem em:

- Identificar e classificar o solo e as misturas solo-cal e solo-RCD (resíduo de construção e demolição), em ensaios de granulometria, limites de Atterberg, densidade real dos grãos e expansibilidade;
- Analisar a influência isolada de cada variável: quantidade de cal, porosidade da mistura compactada e tempo de cura, para quatro misturas de solo-cal e duas misturas de solo-cal-resíduos;
- Verificar, através de ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral, Índice de Suporte Califórnia e determinação do módulo de resiliência, quais misturas e resultados alcançam melhoras para uso em pavimentos;
- Verificar a influência de duas misturas de resíduos da construção civil e demolição, seus diferentes potenciais de reatividade e efeitos das adições na relação resíduos/cal/solo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Busca-se continuamente, na engenharia geotécnica, opções mais econômicas e ambientalmente menos incisivas. O solo brasileiro é um solo tropical, com as características frágeis de suporte de solos tropicais. A Formação Guabirotuba, localizada em Curitiba e em seus municípios vizinhos, está também incluída nas características do solo sedimentar tropical.

Os estudos acerca de melhoramento do solo local vêm de encontro à necessidade atual. O País possui uma alta geração de resíduos e não é possível descartá-los adequadamente. Ao determinar uma finalidade para o material, são trazidos benefícios ambientais e econômicos.

Existe uma aproximação política quanto ao uso de resíduos sólidos. A lei nº 13.305, de 2 de agosto de 2010, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos, como os da construção civil. Assim como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com a resolução nº 307, de 5 de julho de 2002 (CONAMA, 2002), também se preocupa com a sustentabilidade através de diretrizes acerca da gestão dos resíduos da construção civil. Como consequência, todas as obras são obrigadas a elaborar um plano de gerenciamento do resíduo da construção civil, um processo onde são definidos o manuseio e o destino final de cada tipo de resíduo gerado.

Tendo em vista que a cal é um material de baixo custo e que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais deste material, emplacando a quinta posição, admite-se que seu uso seja interessante na pavimentação porque sua reação cimentícia é eficaz no incremento de resistência, principalmente em solos argilosos.

Estudos geológicos-geotécnicos descrevem a Formação Guabirota e suas características (MINEROPAR, 2011; SALAMUNI, 1998), porém a literatura ainda carece de estudos da formação geológica aplicada em pavimentos, ensaios laboratoriais e estudos de caso no Paraná.

Desta forma, justifica-se a presente pesquisa como um acervo de ensaios laboratoriais e análises aplicadas a uma das camadas da Formação Geológica de Guabirota, com adição de cal e resíduos de demolição e construção para uso em pavimentos.

### 1.3 DELIMITAÇÃO

A pesquisa delimita-se com o solo característico da Formação Geológica de Guabirota, com sedimentos distribuídos desde o município de Campo Largo até o município de Quatro Barras, abrangendo Curitiba como um todo e parte de 6 municípios limítrofes (MINEROPAR, 2011).

O solo amarelo característico dessa camada não possui estudos aprofundados acerca de seu comportamento geotécnico, afirmando sua necessidade de análise. Desta forma, este tipo de solo foi definido e suas amostras coletadas no primeiro semestre de 2017, da formação geológica mencionada, especificamente em São José dos Pinhais, avenida Rui Barbosa 14500, Região Metropolitana de Curitiba – PR.

A cal utilizada na pesquisa é proveniente da região produtora e beneficiadora de calcário de Almirante Tamandaré, rua Jardim Bela, região metropolitana de Curitiba.

O resíduo de construção e demolição foi coletado na usina Usipar Usina de Recicláveis Sólidos do Paraná S/A, no endereço Jardim Naturama, Almirante Tamandaré, Paraná. A usina foi inaugurada em 2011 e atua na reciclagem de sobra de materiais de construção civil de Curitiba e Região Metropolitana, ocupando uma área de 54 mil metros quadrados em equipamentos e depósito de materiais.

Os ensaios laboratoriais foram executados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O segundo capítulo é a revisão bibliográfica. Primeiro, discute-se sobre o solo tropical e suas especificidades, sua classificação na sistemática MCT e mais especificamente a Formação Geológica de Guabirota.

Em seguida, a revisão bibliográfica engloba considerações acerca de melhoramento e estabilização de solo, seu comportamento e suas especificidades. Aprofundando em estabilização com solo cal e melhoramento com solo e resíduos da construção e demolição.

Por fim, a revisão bibliográfica explana o tópico pavimentação, adentra em módulo de resiliência aplicado em solos para pavimentação, fatores que influenciam no resultado e interpretações do resultado.

O terceiro capítulo é o programa experimental da pesquisa.

No quarto capítulo, encontram-se a apresentação dos resultados e suas análises.

No quinto e último capítulo, estão as considerações finais, concluindo os resultados obtidos e analisados e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLOS TROPICAIS E CLASSIFICAÇÃO

Solos tropicais são os que apresentam certas peculiaridades de propriedades e de comportamento, em decorrência de processos geológicos e pedológicos das regiões úmidas. Para que um solo possa ser considerado como tropical, não necessariamente é de uma região de clima tropical úmido<sup>1</sup>.

Os solos tropicais são divididos em duas grandes classes: saprolíticos e lateríticos. O solo saprolítico é uma estrutura remanescente da rocha de origem, a qual possibilita a identificação da rocha, razão pela qual é também designado de solo residual.

Godoy (1997) acrescenta que solo laterítico é o solo que, ao ser devidamente compactado, resulta em elevadas resistências e capacidade de suporte. Na presença de água, apresenta baixa permeabilidade e deformabilidade e perde pouca capacidade de suporte. Castro (2003) explica que um solo laterítico possui a fração argilosa constituída principalmente de minerais do grupo caulinita, óxidos de ferro e alumínio, além de estarem bem agregados.

Muitos profissionais que trabalham com pavimentação continuam utilizando procedimentos importados, não adequados às peculiaridades dos solos brasileiros, e ainda que percebendo as dificuldades causadas por estes procedimentos. Desta forma, pavimentos mais onerosos e de pior desempenho são obtidos (CASTRO, 2003).

Para modificar este panorama, Nogami e Villibor (1981) desenvolveram uma metodologia de classificação e escolha de materiais para pavimentação, baseada na utilização de ensaios que forneçam resultados mecânicos e hidráulicos. Esta sistemática caracteriza-se pela utilização de corpos de prova cilíndricos e de dimensões reduzidas – por isso designados de miniatura, abreviação (M) – com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. São basicamente obtidas por compactação (C) e a sistemática foi desenvolvida para solos tropicais (T). A metodologia ficou então conhecida como MCT. Os ensaios podem ser com amostras indeformadas ou *in situ* (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). Villibor e Nogami (2009) continuam afirmando que a sistemática MCT é recomendada para o estudo de solos tropicais que passam integralmente, ou têm pequena fração retida (menos de 10%), na peneira de malha quadrada de abertura de 2,0 mm (#10). Isso contrasta com a abundância de solos de granulação grosseira no hemisfério Norte, de onde provêm as classificações consideradas tradicionais.

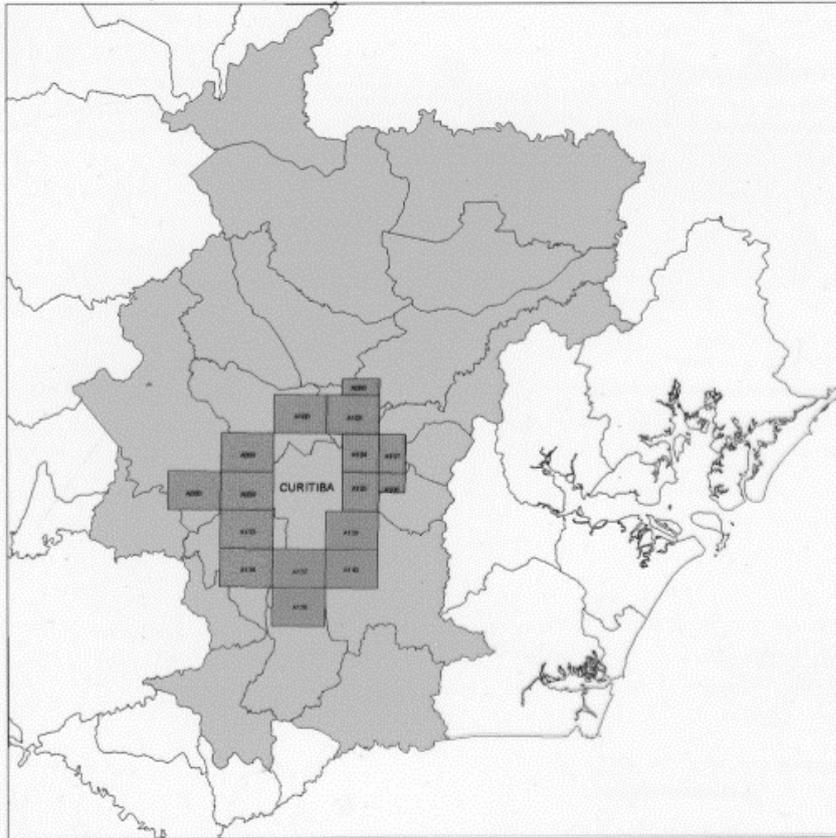
---

<sup>1</sup>1995 *Committee on Tropical Soils of ISSMFE*, 1985 *apud* NOGAMI E VILLIBOR, 1995.

### 2.1.1 Formação Guabirotuba

No ano de 2011, a Mineropar realizou um estudo geológico-geotécnico da região metropolitana de Curitiba e verificou que os sedimentos da Formação Guabirotuba abrangem Curitiba e parte de seis municípios limítrofes (Figura 1). A Formação atinge espessura na ordem de 60 a 80 metros e compreende sequências litológicas nas quais predominam as argilas e areias arcósiadas (20% a 40% de feldspato).

**Figura 1 – Formação Geológica de Guabirotuba em Curitiba e municípios limítrofes**



**Extraído em: MINEROPAR, 2011.**

Salamuni (1998) explica que os materiais constituintes desses sedimentos foram determinados como argilitos, seguindo-se os arcósios e depósitos ruáceos, além de pequenos horizontes de caliche (carbonato de cálcio). As litologias citadas são denominadas materiais inconsolidados (endurecidos por soluções de carbonato de cálcio), com coloração original cinza-esverdeada. O autor ainda cita que os carbonatos da bacia aparecem tanto como camadas margosas em meio aos argilitos como através de calcretes que estão em fissuras. Os principais elementos encontrados são o Nd (Neodímio), o La (Lantânio) e o Eu (Európio), concentrados sobre os calcretes.

Outra observação importante é que o perfil de alteração da Formação Guabirotuba, incluindo a laterização, não deve ter sido causado pelo intemperismo contemporâneo, dado que os limites dos diferentes horizontes estão truncados pela topografia.

O perfil típico de alteração da Formação Guabirotuba descrito qualitativamente em cada camada está no Quadro 1.

**Quadro 1 – Perfil típico da Formação Guabirotuba**

Camada	Descrição	Espessura (m)	Litotipo
1	Solo transportado, cor castanho negro	0,5 a 2,0	Laterítico
2	Solo residual maduro, cor vermelha, homogêneo, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Laterítico
3	Solo residual jovem, cor vermelha com manchas de argila, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Saprolítico
4	Argilas alteradas, cores variadas, argilo mineral principal: esmectita	1 a 5,0	Saprolítico
5	Argilas cinza esverdeadas, argilo mineral principal: esmectita	1 a 50,0	Saprolítico
6	Saprolito gnaisse-migmatito, argilo mineral principal: caulinita	-	Saprolítico

Extraído em: MINEROPAR, 2011.

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS

Um solo estabilizado é um solo cujas propriedades são parcialmente ou completamente modificadas por meio da adição de um material distinto antes da compactação ou inserindo o aditivo *in loco*. Dependendo das propriedades e da quantidade de aditivo, todas as características do solo podem mudar completamente e permanentemente (USBR, 1998).

O solo é usualmente obtido em uma área de exploração, onde se asseguram quantidade e uniformidade desejadas. Depósitos estratificados também podem ser usados através de seletiva escavação e quando são viáveis economicamente comparado a outras potenciais fontes. Escavação seletiva e mistura durante estocagem são necessários para obter uniformidade e umidade higroscópica adequadas. Equipamentos de terraplanagem são normalmente necessários para remoção de camada orgânica. Testes laboratoriais adequados definem a quantidade e o tipo de cimento ou cal a ser utilizado (USBR, 1998).

Fazzani (1993) explica que a fração mais fina do solo é a responsável pelo comportamento mecânico do solo, o que incluem características de plasticidade, expansão e contração. No entanto, não existe uma linearidade quanto à resistência desta fração do solo.

Nobrega (1985) revela em estudos que dois solos que contêm a mesma fração de argila podem apresentar comportamentos distintos em função do argilo-mineral predominante, o que mostra que a composição mineral do solo é fator determinante para sua estabilização.

### 2.2.1 Comportamento Mecânico e Químico de Solo-Cal

Estabilização de solos é uma técnica largamente usada desde meados de 1940 para estabilizar bases de argilas arenosas e fração fina de solos para pavimentação de rodovias, pistas de aeroporto e bases de trilhos ferroviários<sup>2</sup>.

Sendo um aditivo de solo, o uso da cal é o mais antigo método conhecido de estabilização química, tendo sido usado inclusive pelos romanos na construção da via Ápia. Solo-cal é uma mistura de solo (usualmente argila), cal e água, onde é compactado para formar uma massa densa. Experiências têm mostrado que misturas da maioria de solos argilosos com cal virgem ou hidratada e água formam produtos cimentícios em um curto período de tempo (USBR, 1998).

A técnica também tem sido usada por décadas na Europa para melhorar e estabilizar solos siltosos e argilosos para o uso de estruturas de terra como, por exemplo, estruturas completamente submersas, canais, diques, barragens e reservatórios. São conhecidas aplicações de cal também para fins de estruturas de terra nos Estados Unidos e na Austrália. O tratamento do solo com cal resolveu problemas com erosão devido aos solos expansivos, prevenindo o fenômeno de retração e inchamento comum em solos muito plásticos e, conseqüentemente, estabilizando taludes (HERRIER *et al.*, 2012b)

Conforme Mitchell e Soga (2005), quando o pH aumenta até 12,4, ocorre uma dissolução de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na mistura. Os compostos  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$  são então combinados com a cal para formar silicatos de cálcio hidratados (CSH) e aluminato de cálcio hidratados (CAH). A resistência de solos tratados com cal é dependente primeiramente da dissolução de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disponíveis das reações pozolânicas, como também da existência de  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$ . Uma vez que os íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$  são totalmente consumidos, o pH começa a cair e as reações pozolânicas cessam, a não ser que os íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$  são restaurados na mistura solo-cal-água. Como consequência, a quantidade de cal adicionada ao solo deve ser maior que a mínima quantidade necessária para alcançar o pH de 12,4.

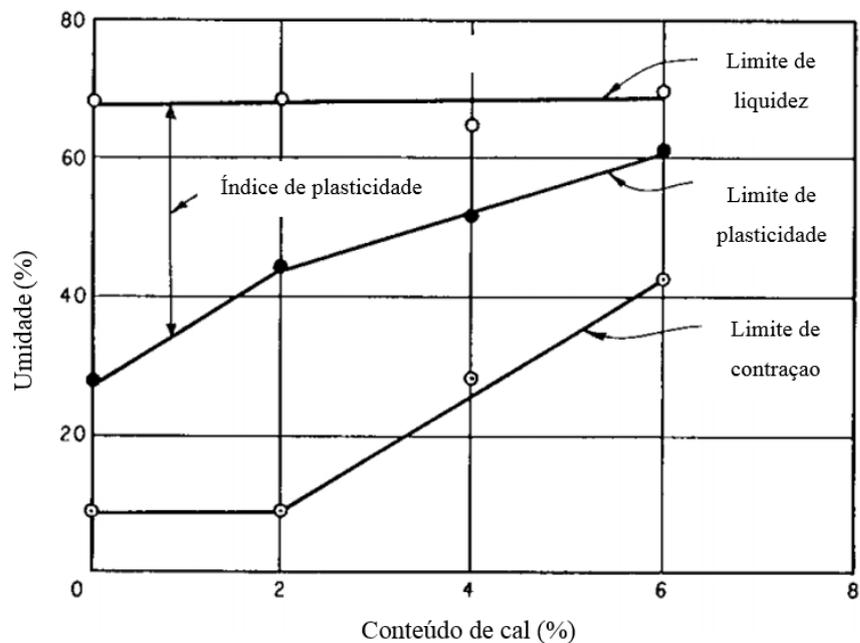
De acordo com Howard e Bara (1976) ao se adicionar cal hidratada no solo, obtêm-se os seguintes efeitos:

---

<sup>2</sup> (LITTLE, 1995 *apud* HERRIER *et al.*, 2012a).

- Aumento da trabalhabilidade e fragilidade;
- Aumento da resistência ao cisalhamento;
- Limite de liquidez muda sutilmente enquanto o limite de plasticidade aumenta consideravelmente, conseqüentemente o índice de plasticidade reduz, de forma imediata (Figura 2);
- A porção fina de argila (colóides) aglomera e forma partículas maiores;
- As partículas mais largas (torrões) desintegram e formam partículas menores;
- Aumento do intercepto de coesão (HERRIER *et al.*, 2012a) e;
- Um efeito de secagem causado pela absorção de água da hidratação da cal, de modo que a umidade higroscópica do solo é reduzida.

**Figura 2 – Efeito da cal em limites de contração, plasticidade e liquidez**



Extraído em: USBR, 1998.

O segundo efeito de adicionar cal no solo no processo de mistura solo-cal é o aumento de propriedades de resistência com o tempo de cura. A cal reage quimicamente com a sílica e alumina do solo para formar silicatos de cálcio e aluminatos. Para estabilização do solo, a porcentagem de cal pode ser baseada em (HOWARD; BARA, 1976):

- pH do solo;
- Redução do índice de plasticidade;
- Incremento de resistência e;
- Prevenção de expansibilidade.

Quando a mistura de solo-cal atinge um pH de 12,4, pode-se dizer que uma quantidade suficiente foi adicionada para reagir com todo o solo. A adequada adição de cal acarreta em um incremento das propriedades mecânicas conforme justificativa econômica. Se o mínimo de resistência precisa ser alcançado, somente o suficiente de cal deve ser adicionada, ou o suficiente para alcançar o limite de contração desejado, ou ainda prevenir mudança do volume durante os ciclos de umedecimento ou secagem (HOWARD; BARA, 1976).

O procedimento de dosagem de cal através do método de pH foi inicialmente proposto por Eades e Grim (1966), segundo o qual é possível alcançar o maior benefício da estabilização do solo. Este método de dosagem é chamado de ponto de fixação da cal, de modo que se quantidades de cal acima desse ponto são adicionadas, a estabilização através de reações pozolânicas cessam.

Usualmente, as misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente máximo ( $\gamma_{\text{máx}}$ ) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta, o  $\gamma_{\text{máx}}$  continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987). Quando a cal é adicionada ao solo, as partículas se tornam floculadas devido à substituição dos íons  $\text{Na}^+$  da argila por íons  $\text{Ca}^{++}$ . Devido à floculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam. A floculação é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo, portanto, o  $\gamma_{\text{máx}}$  do solo. Quanto maior o número de vazios, mais água será necessária para preenchê-los, o que resulta em um teor de umidade maior e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998). A cal, entretanto, tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila (INGLES; METCALF, 1972).

### 2.2.2 Características de Permeabilidade em Solos Estabilizados com Cal

Herrier *et al.* (2012b) realizaram um estudo experimental em influência do tratamento de cal e compactação de um solo siltoso e sua permeabilidade. O solo é proveniente de Laffaux, França, e possui as seguintes características: fração argilosa de 23% ( $<2\mu\text{m}$ ), fração silte de 59% (entre  $2\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$ ), índice de plasticidade igual a 12,7%, umidade ótima igual a 15,8% e densidade seca máxima de  $17,76 \text{ kN/m}^3$ . Duas diferentes umidades foram definidas para a compactação das amostras: a primeira é a umidade ótima conforme ensaio Normal de Proctor, e a segunda, uma umidade equivalente a 1,2 vezes acima da umidade ótima. Solo natural, solo-cal com 2% e 3% de cal virgem e 2,65% de cal hidratada foram compactados. As medições de permeabilidade foram realizadas depois de 28 dias de cura, depois de 28 dias de cura mais 2

meses de imersão, 28 dias de curas mais 5 meses de imersão; ou seja, 3 meses e 6 meses após preparação da amostra, respectivamente.

Dentre os resultados, o estado mais úmido resultou nos menores valores de  $k$  (coeficiente de permeabilidade). As melhores condições para alcançar menores valores de permeabilidade de solo silte tratado com 2% e 3% de cal são: alto teor de umidade e compactação por amassamento. Estes resultados são explicados através de porosimetria por intrusão de mercúrio, que destaca as mudanças na estrutura dos poros. Quando o solo é tratado com cal, surge uma classe de poros menores. Após o solo-cal ser umedecido e compactado por amassamento, o número de poros iniciais diminui com o aparecimento dos poros menores. Como conclusão o autor afirma que o aparecimento dos poros menores afetaram a permeabilidade.

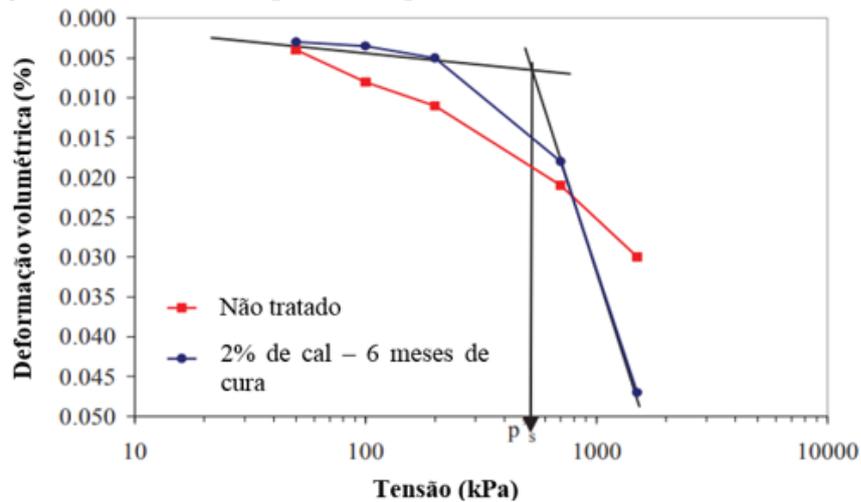
Tran *et al.* (2014) avaliaram a microestrutura e a condutividade hidráulica de uma argila de Héricourt, França. A argila de Héricourt analisada possui 78% dos grãos menores que  $2\ \mu\text{m}$  (fração argilosa), densidade real dos grãos de 2,70, limites de liquidez e plasticidade, 70% e 44%, respectivamente, índice de plasticidade de 26% e possui índice de vazios de 0,9. Os autores observaram um aumento da condutividade hidráulica para solos tratados com cal. A mudança da microestrutura caracterizada pelo aumento do tamanho dos poros, devido às reações de hidratação da cal, é a principal razão para o aumento da condutividade hidráulica. Os autores também confirmaram estabilização das reações após 7 dias de ensaio através de imagens de microscópio eletrônico.

### 2.2.3 Características de Resistência à Compressão em Solos Estabilizados com Cal

Baldovino (2018) realizou ensaios de compressão simples e compressão diametral em um solo argiloso da Formação Geológica de Guabirota, em amostras misturadas com cal nos teores de 0%, 3%, 5%, 7% e 9%. O solo utilizado possui uma densidade real dos grãos de 2,71, limites de liquidez e plasticidade, 53,1% e 31,8%, respectivamente, índice de plasticidade de 21,3% e é classificado como um silte elástico arenoso. As amostras ensaiadas foram moldadas com teor de umidade de 28,5% e um peso específico seco de  $13,80\ \text{kN/m}^3$ , correspondentes à energia normal de compactação. Após 180 dias de cura, os corpos de prova alcançaram resistências à compressão simples de 833, 1665, 2445, 3176 e 3750 kPa, com o emprego de 0, 3, 5, 7 e 9% de adição de cal, respectivamente. Para os ensaios de tração por compressão diametral, também com 180 dias de cura, os corpos de prova alcançaram resistências à tração por compressão diametral de 95, 269, 395, 533 e 626 kPa, com o emprego de 0, 3, 5, 7 e 9% de adição de cal, respectivamente.

Herrier *et al.* (2012b) também realizaram estudos experimentais de compressibilidade e adensamento com o mesmo solo silte usado para ensaios de permeabilidade. Em ensaios axiais de compressão, a deformação do solo silte natural está em constante tensão logarítmica (Figura 3). Isto significa que a resistência à deformação é menor quanto menor a tensão aplicada. O solo uma vez tratado com 2% cal e após 6 meses, apresenta duas inclinações distintas na Figura 3, separados pela tensão de 500 kPa.

Figura 3 – Ensaio de compressão simples de solo silte e solo-cal, 6 meses de cura

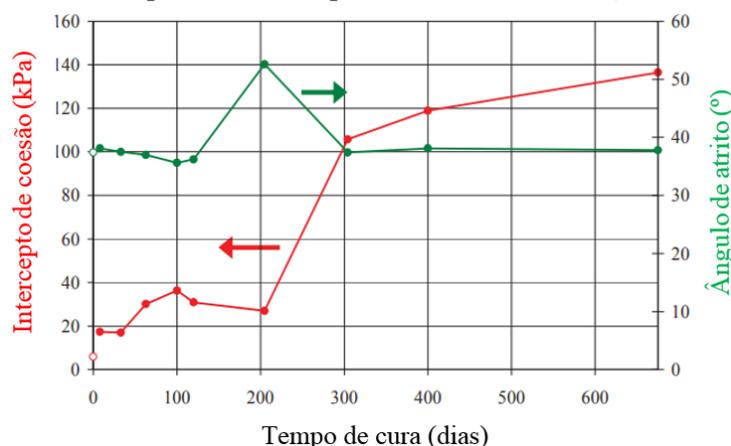


Extraído em: HERRIER *et al.*, 2012b.

#### 2.2.4 Características de Resistência ao Cisalhamento em Solos Estabilizados com Cal

Herrier *et al.* (2012b) também realizaram ensaios triaxiais não drenados em amostras de 3,6 cm de diâmetro e 7,2 cm de altura, saturadas. O objetivo de obter a resistência ao cisalhamento é quantificar o melhoramento da estabilidade mecânica em taludes, após tratamento com cal. Dois solos siltosos foram utilizados. O primeiro solo foi proveniente de Soumagne, com índice de plasticidade de 16%. O segundo solo proveniente de Marche-les-Dames, com índice de plasticidade de 11%. Ambas as cidades são da Bélgica. O solo de Soumagne, não tratado, possui os seguintes parâmetros: intercepto de coesão efetivo igual à 5,8 kPa e ângulo de atrito interno efetivo de 37,4°. Os valores obtidos após tratamento estão na Figura 4.

**Figura 4 – Evolução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento com o tempo, solo de Soumagne tratado com cal (ponto branco representa sem tratamento, cura de 0 dias)**



Extraído em: HERRIER *et al.*, 2012b.

Para o solo de Soumagne, o valor do ângulo de atrito interno se mantém estável com o tempo de cura. Entretanto, o intercepto de coesão aumenta significativamente: depois de 2 anos o valor é 25 vezes maior. Similares resultados são obtidos para o solo silte de Marche-les-Dames.

#### 2.2.5 Características de Resistência à Erosão e Sensibilidade à Água de Solos Estabilizados com Cal

Chevalier *et al.* (2012) realizaram ensaios laboratoriais com foco no comportamento de materiais tratados sob processos erosivos e efeitos da água. Foram usados solos siltosos e argilosos, estabilizados com 2% e 5% de cal, em curas de 7 e 90 dias. Os solos finos utilizados são provenientes de Héricourt, França. O solo silteoso possui 67% dos grãos menores que 80  $\mu\text{m}$ , limite de liquidez igual a 32,8%, limite de plasticidade igual a 21,6%, índice de plasticidade igual a 11%, umidade ótima de compactação igual a 18% e densidade seca máxima de 16,19  $\text{kN/m}^3$ . O solo argiloso possui 19% dos grãos entre 2  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ , 75% dos grãos menores que 2  $\mu\text{m}$ , limite de liquidez igual a 72%, limite de plasticidade igual a 35%, índice de plasticidade igual a 37%, umidade ótima de compactação igual a 23,5% e peso específico seco máximo de 15,89  $\text{kg/m}^3$ .

Os ensaios realizados foram o de erodibilidade por infiltração (simulando erosão interna), por jato (jato de água perpendicular à superfície de solo, análogo à erosão superficial) e por imersão em água (quantificando o potencial de desintegração da amostra). Os resultados mostraram considerável aumento em todos os aspectos de resistência à erosão nos solos tratados. O aumento de resistência é mantido com o tempo (confirmado nos testes de cura de

90 dias). A resistência crítica de cisalhamento (medida por erodibilidade por infiltração) em ambos os solos tratados é pelo menos 4 vezes maior que os solos não tratados. A massa de superfície erodida (medida por erodibilidade à jato) é pelo menos 80 vezes menor. Ambos os solos tratados tornaram-se praticamente insensíveis à água.

#### 2.2.6 Comportamento Mecânico de Solo-Resíduo

USBR (1998) define que um solo que foi modificado com adição de menores quantidades de uma mistura para compactação é chamado de solo modificado. O uso de solos modificados é viável em casos de solos pobres e não possuindo melhor opção em próximos acessos.

Pacheco-Torgal *et al.* (2013) explicam que a reciclagem de RCD é de primordial importância por ser sustentável e gerar vantagens econômicas. Previne o aumento de áreas utilizadas para disposição e também evita a exploração de materiais não-renováveis. Impactos causados pela exploração de materiais não-renováveis incluem extensivo desmatamento, dano à superfície do solo, poluição do ar e de recursos hídricos.

Arulrajah *et al.* (2013) avaliaram predominantes tipos de resíduos de construção e demolição (concreto reciclado, bloco cerâmico rompido, resíduos de rocha, asfalto reutilizado e vidro reciclado) através de caracterização, absorção de água, conteúdo orgânico, pH, condutividade hidráulica, ensaios Los Angeles de abrasão, Proctor modificado, índice de suporte Califórnia, cisalhamento e módulo resiliente. Em termos de aplicação para sub-base de pavimentos, o concreto reciclado e o resíduo de rocha se mostraram equivalentes ou superiores que o material típico granular de jazidas na Austrália, não misturados entre si ou com outro solo. Blocos cerâmicos rompidos obtiveram resultados típicos de material granular de sub-base da região, podendo ser, entretanto, melhorado com aditivos.

Macedo *et al.* (2016) analisaram o comportamento mecânico de um solo melhorado com resíduos de construção e demolição. Os autores utilizaram um solo proveniente da cidade de Recife, estado de Pernambuco. A distribuição granulométrica do solo consiste em 10% dos grãos menores que 2  $\mu\text{m}$  (fração argilosa), fração silte de 9% (entre 2  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ ), densidade real dos grãos de 2,66, limites de liquidez igual a 26,69%, limite de plasticidade igual a 32,83%, índice de plasticidade igual a 6,14%, umidade ótima igual a 14,90% e densidade seca máxima de 26,09  $\text{kN/m}^3$ . Ensaio de compactação e de cisalhamento direto foram executados nas misturas: solo natural e solo com 10%, 30% e 50% de resíduos, todos compactados na umidade ótima da energia normal. Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos melhores valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito para a mistura de 50% de solo e 50% de resíduos.

**Tabela 1 – Parâmetros de cisalhamento do solo compactado e solo com RCC**

	Deslocamento máx. hor. de 5 mm		Deslocamento máx. hor. de 10 mm	
	da amostra		da amostra	
	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo compactado	8,40	36,00	7,50	35,00
Solo 90% - RCC 10%	3,60	35,10	0,03	35,50
Solo 70% - RCC 30%	3,10	35,90	0,00	36,10
Solo 50% - RCC 50%	10,10	33,50	5,70	33,50

Extraído em: MACEDO *et al.*, 2016.

Todos os autores pesquisados relataram benefícios no melhoramento de solo com resíduos da construção e demolição, sendo uma boa opção de destino final deste tipo de resíduo.

### 2.2.7 Características do Agregado de Concreto Reciclado

Behiry (2013) afirma que, quando se usa agregado reciclado de concreto para base ou subbase de pavimentos, é necessário focar na granulometria, angularidade, consistência e solubilidade. Bases drenáveis requerem uma granulometria diferente de bases densas, pois bases drenáveis exigem cuidado adicional com os finos para aumentar porosidade. Já que a base fornece a estrutura de uma rodovia, a consistência do agregado reciclado de concreto compactado deve ser discernido com precisão a fim de assegurar o suporte de carga requisitados no início e a longo prazo. Para uma correta compactação, a angularidade do agregado reciclado de concreto deve ser considerada, uma maior angularidade exige maior energia de compactação.

Foster (1997) estudou que o agregado reciclado de concreto pode se dissolver com a água passante através do sistema do pavimento. O material dissolvido vai aumentar o pH do lençol freático e pode afetar vegetações vicinais. Quando essa água contendo concreto dissolvido entra em contato com o ar, o dióxido de carbono da atmosfera vai precipitar na forma de carbonato de cálcio, o que pode potencialmente entupir o sistema de drenagem.

### 2.2.8 Aplicações de Solo-Cal em Grandes Obras

Uma obra de terra de destaque é o canal de Friar-Kern, na Califórnia. A obra tem 245 km de extensão e 4.000 km<sup>2</sup> irrigados no sul da Califórnia. Aproximadamente um terço do canal possui uma argila expansiva (Formação Geológica de Porterville). O canal foi construído entre 1945 e 1951 e, após 3 anos de operação, a porção de argila expansiva do canal começou a se romper e desmoronar. Desde então sua manutenção foi de extensivo gasto.

Conforme o relatório do Escritório de Reivindicação dos Estados Unidos (Departamento Americano do Interior, 1976), em 1970 foram removidas as porções do canal danificadas e reconstruídos os taludes com solo-cal compactado, para assim obter estabilidade nos taludes. Para o trabalho, após ensaios laboratoriais, definiu-se que 4% de cal hidratada era o suficiente para o sucesso da empreitada.

Amostras de solo-cal compactadas resultaram 20 vezes mais resistentes nos ensaios de resistência à compressão simples do que amostras não tratadas. A média de resultados de resistência à compressão simples foi de 2000 kPa, após dois anos de construção. O índice de plasticidade do solo tratado reduziu de 40% para 10%.

## 2.3 PAVIMENTAÇÃO

Neste sub-capítulo explana-se o dimensionamento de um pavimento típico de concreto betuminoso, bem como algumas considerações sobre o ensaio triaxial de cargas repetidas e do módulo resiliente.

### 2.3.1 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas e Módulo Resiliente

Medina e Motta (2015) explicam que os ensaios de carga repetida são aqueles em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, desde zero até um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de tempo (fração de segundo). Os ensaios de carga repetida procuram simular as condições reais de solicitação no campo. Os autores definem MR (módulo de resiliência) de um solo determinado pelo ensaio triaxial de cargas repetidas pela equação 1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_d$  = tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ );

$\sigma_1$  = tensão vertical total;

$\sigma_3$  = tensão lateral;

$\varepsilon_1$  = deformação resiliente axial (vertical).

A norma ME 134 (DNIT, 2017) define como módulo de resiliência (MR) a relação entre as tensão desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical resiliente ou recuperável ( $\epsilon_r$ ).

Medina e Motta (2015) explanam que a deformação total tem um componente resiliente (recuperável) e outro permanente (irrecuperável) ou plástico. É a deformabilidade “elástica” ou resiliente das camadas do pavimento e do subleito que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas, como revestimento de concreto asfáltico e base de solo-cimento, sob sucessivas flexões.

Os autores concluem que a deformação resiliente pode ser vista no nível microscópico como deformação elástica das partículas do solo e dos aglomerados de partículas. A microestrutura floculada das argilas e baixos teores de umidade, principalmente no arranjo bordo-face da partícula (argila caulínica comum nos solos tropicais), pode dispersar-se parcial e reversivelmente para as pequenas deformações que se mantêm em níveis muito aquém da ruptura plástica. Minerais de solo em forma de plaqueta de solos saprolíticos também contribuem para a deformabilidade resiliente. A deformação plástica do sistema particulado com poros não saturados resulta de escorregamentos nos contatos dos grãos e acomodações irreversíveis de partículas pequenas nos poros de partículas maiores.

Os principais fatores que influenciam o módulo resiliente são: número de repetições da tensão desvio, histórico de tensões, duração e frequência do carregamento, nível de tensão aplicada, umidade, massa específica de moldagem e tixotropia em solos argilosos (DNIT, 2006). A seguir, explica-se brevemente cada possível efeito conforme o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

No caso de solos granulares, o valor do módulo resiliente pode aumentar ou diminuir com o número de repetições da tensão desvio, dependendo do índice de vazios, densidade, grau de saturação e o valor da tensão aplicada. Os solos coesivos têm deformações resilientes que diminuem com o número de repetições de cargas, produzindo um efeito de arranjo estrutural das partículas (DNIT, 2006).

Para a amostra ser ensaiada sob várias tensões, é necessário eliminar ao máximo o histórico de tensões. Quando um solo granular é submetido ao carregamento repetido, grandes deformações permanentes ocorrem durante os primeiros ciclos de carga, como consequência de movimentos relativos entre partículas ou fratura das mesmas nos pontos de contato. Com a repetição do carregamento, o material adquire rigidez e as deformações permanentes ao final de cada ciclo da carga aplicada diminuem até se tornarem muito pequenas ou nulas. A partir

deste instante, o solo apresenta um arranjo estável de partículas e um comportamento quase elástico, no sentido de que toda a deformação nele causada pelo carregamento é recuperável quando este é retirado. Nessas condições, o módulo do material torna-se aproximadamente constante. Os solos argilosos têm deformações resilientes que diminuem com o número de repetições de carga, produzindo um efeito de enrijecimento que pode ser atribuído a um acréscimo do peso específico devido ao carregamento repetido e a um provável rearranjo estrutural das partículas (DNIT, 2006).

O tempo de duração de carga repetida é estabelecido em função da velocidade dos veículos e do ponto no interior dos pavimentos onde se deseja calcular o módulo resiliente. A frequência de aplicação é em função das condições de tráfego da estrada em estudo. Os ensaios triaxiais dinâmicos em solos arenosos mostram pequena influência da frequência de aplicação da tensão desvio no valor do módulo resiliente em até 40 aplicações por minuto. Entretanto, para 60 aplicações por minuto, os módulos normalmente tornam-se bem maiores. A duração da tensão desvio tem influência apenas para níveis elevados de tensão, superiores aos comumente existentes nas camadas de um pavimento. Nos solos coesivos não se tem notado influência substancial para frequências de 20 a 60 aplicações por minuto, com duração de 0,86 a 2,86 segundos e umidade dos corpos de prova próxima à ótima (DNIT, 2006).

Estudos sobre o comportamento resiliente de solos não-coesivos submetido a tensões axiais repetidas indicam que o módulo resiliente aumenta muito com a pressão confinante e é relativamente pouco influenciado pelo valor da tensão desvio repetida, desde que esta tensão não cause deformação plástica excessiva. Nos solos coesivos o módulo depende da tensão desvio, sendo pouco atingido pela tensão confinante (DNIT, 2006).

As condições de compactação exercem grande influência no módulo resiliente, especificamente na deformação recuperável sob determinada tensão desvio. O módulo diminui muito com o aumento da umidade de compactação. A compactação na umidade ótima é, portanto, muito recomendável (DNIT, 2006).

### 2.3.2 Dimensionamento de Pavimento de Concreto Betuminoso

O manual da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2008) possui um guia chamado *Mechanistic-Empirical Pavement Design*, no qual é explicado o método de dimensionamento de pavimentos nos Estados Unidos baseado em princípios mecânico-empíricos (procedimento através de experiências e observações). O manual aborda o procedimento para pavimentos novos ou reabilitação de pavimentos danificados.

O método MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) exige primeiramente a consideração das condições do meio, como tráfego, clima, subleito e pavimento existente no caso de reabilitação, para propor um projeto piloto. O projeto é então avaliado para se adequar com outros dados, desempenho e fatores de segurança.

O manual MEPDG demonstra um quadro de valores mínimos recomendados de módulo resiliente para cada camada do pavimento, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 – Valores mínimos de módulo resiliente por pavimento**

Classificação do solo pela AASTHO	Módulo resiliente na umidade ótima recomendado (MPa)		
	Base/Sub-base de pavimentos flexíveis e rígidos	Reforço/sub-leito de pavimentos flexíveis	Reforço/sub-leito de pavimentos rígidos
A-1-a	276	203	124
A-1-b	262	183	124
A-2-4	221	169	114
A-2-5	193	148	110
A-2-6	179	145	110
A-2-7	165	141	110
A-3	200	114	110
A-4	165	114	103
A-5	1378	107	55
A-6	117	100	97
A-7-5	83	90	69
A-7-6	55	79	90

**Extraído em: AASHTO, 2008.**

Após as investigações de campo, com testes *in situ* e em laboratório, materiais de pavimento são selecionados conforme adequação da necessidade de projeto.

O método, portanto, traz um critério de desempenho para assegurar que o pavimento dimensionado irá responder adequadamente durante o tempo de uso. Essa análise é composta por ensaios em um trecho de teste, com respostas de esforço, deformação, deflexão e rugosidade. Por fim, se o projeto é considerado viável economicamente, executa-se a estratégia estudada (AASHTO, 2008).

O Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) traz um método baseado no trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, da

autoria de W. J. Turnbull e R. G. Ahlvin, do corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, onde no Brasil é denominado Método do DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagens) para pavimento flexível. O método do DNER é um método empírico também chamado de método do CBR, foi estabelecido pelo DNER em 1966 e desenvolvido pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza e tem grande importância no Brasil. O método do DNER adota coeficientes de equivalência estrutural e a capacidade de suporte é obtida pelo resultados do Índice de Suporte Califórnia (ISC). Parâmetros são exigidos como expansão mínima de 2% no subleito e índice de plasticidade máximo igual a 6%. No entanto, as condições de tráfego são muito diferentes da década de 1960-70.

Um novo método mecânico-empírico brasileiro está em desenvolvimento, com uma parceria entre IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), DNIT e COPPE (Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade do Rio de Janeiro), onde estão sendo estabelecidos os padrões de dimensionamento e de calibração. Os critérios de desempenho adotados se apóiam nos principais defeitos estruturais: trincamento por fadiga da camada asfáltica (flexível) e da camada tratada com cimento Portland e afundamento de trilha de roda. O novo método baseia-se no ensaio de cargas repetidas e busca substituir o antigo método do DNER. Considera-se hoje que se tem completa condição de implantação do método nacional (MOTTA, 2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa possui três grupos de variáveis, que são: variáveis independentes, variáveis fixas e variáveis dependentes. As variáveis independentes ou investigadas são:

- Porosidade: correspondente ao volume de espaços vazios sobre o volume total da amostra, em porcentagem;
- Teor de cal: massa de sobre a massa seca do solo, em porcentagem;
- Teor de resíduos: massa de resíduos sobre a massa seca do solo, em porcentagem e;
- Tempo de cura: tempo de cura das amostras em câmara úmida, expresso em dias. Nos ensaios de compressão simples e compressão diametral, a cura será de 0, 30, 60, 90 e 180 dias nas amostras com cal e de 0, 30, 60 e 90 nas amostras com resíduos. No ensaio de módulo resiliente será apenas de 90 dias para todas as misturas.

As variáveis fixas são:

- Solo: solo fino sedimentar da Formação Geológica de Guabirotuba;
- Agente cimentante: cal hidratada dolomítica do tipo CH-III e;
- Temperatura de moldagem e de câmara úmida:  $23^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ}$ .

As variáveis dependentes ou de resposta são:

- Resistência à compressão simples;
- Resistência à tração por compressão diametral e;
- Módulo Resiliente.

A Tabela 3 resume as etapas e os ensaios realizados, com o número de amostras ensaiadas em cada etapa.

**Tabela 3 – Etapas e ensaios realizados**

Ensaio de Caracterização			
Material	Ensaio	Norma	Nº
Solo	Granulometria c/ sedimentação	DNER – 051/1994	2 amostras
RCD	Granulometria	DNER – 093/1994	1 amostra
Solo e misturas	Limite de liquidez	DNER – 122/1994	8 amostras
Solo e misturas	Limite de plasticidade	DNER – 082/1994	6 amostras
Solo e misturas	Compactação (energias normal, int. e modificada)	DNER – 164/1994	7 curvas
Solo	Massa esp. Real dos grãos	DNER – 093/1994	8 amostras
Cal	Massa esp. Real dos grãos	DNER – 093/1994	6 amostras
RCD	Massa esp. Real dos grãos	DNER – 093/1994	6 amostras
Solo e misturas c/ cal	pH (Eades e Grim, 1996)	–	11 misturas
Ensaio de Resistência			
Material	Ensaio	Norma	Nº
Solo e misturas	Resistência à compressão simples	NBR 5739	207 corpos de prova
Solo e misturas	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222	207 corpos de prova
Solo e misturas	ISC (energias normal, int. e modificada)	DNIT – 172/2016	12 corpos de prova
Solo e misturas	Módulo resiliente (energias normal, int. e modificada)	DNIT – 134/2017	36 corpos de prova

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Coleta do solo

A coleta do solo foi realizada na data de 6 de junho de 2017, na avenida Rui Barbosa número 14800, no município de São José dos Pinhais (Figuras 5 e 6).

**Figura 5 – Local da coleta do solo**



**Figura 6 – Talude exposto do local da coleta do solo**



Foram coletados 6 tambores de amostra deformada com aproximadamente 330 quilos de solo em cada, a umidade higroscópica do solo é de 39,56% e o peso específico natural é igual a 16,176 kN/m<sup>3</sup>.

### 3.2.2 Cal e Resíduos de Construção e Demolição

A cal é do tipo CH3 hidratada e foi adquirida em lojas de materiais de construção, em uma embalagem de 20kg, sendo armazenada em recipientes de vidro, com volume de 5 litros cada, adequadamente vedados para evitar sua hidratação prematura em função da umidade do ar. A cal é proveniente da usina produtora e beneficiadora de calcário de Almirante Tamandaré, rua Jardim Bela, região metropolitana de Curitiba.

O RCD foi adquirido em uma usina de reciclagem localizada na cidade de Almirante Tamandaré (PR). A usina recicla resíduos classe A, que inclui caliça de obras da construção civil, como restos de material cerâmico, concreto e argamassa. Após separar os materiais de acordo com sua classificação, a usina tritura a caliça transformando-a em areia, brita, pedrisco e rachão, assim sendo possível comercializar na engenharia civil. Materiais que não servem para a construção civil (plástico e papelão) são separados na triagem e encaminhados ao destino correto destes produtos (REVISTA GERAÇÃO SUSTENTÁVEL, 2011).

## 3.3 MÉTODOS

### 3.3.1 Caracterização do Solo

A análise granulométrica por peneiramento foi realizada conforme a norma DNER – 093 (DNER, 1994). Para a análise granulométrica por sedimentação utilizou-se a norma DNER – 051 (DNER, 1994). Também foi realizada uma análise granulométrica a laser com o granulômetro Microtrac modelo S3500 (Figura 7).

Para a classificação MCT foi adotado o procedimento descrito na DNER – 256 (DNER, 1994) e DER – 196 (DER, 1989).

**Figura 7 – Granulômetro à laser Microtrac S3500**



Os limites de Atterberg foram realizados conforme DNER – 082 (DNER, 1994) e DNER – 122 (DNER, 1994) (Figuras 8 e 9).

**Figura 8 – Ensaio de limite de liquidez**



**Figura 9 – Ensaio de limite de plasticidade**



A densidade real dos grãos foi obtida conforme procedimento descrito na norma DNER – 093 (DNER, 1994). O material foi imerso em água destilada dentro de balões

volumétricos e para remover o ar dos poros, utilizou-se uma bomba de vácuo e uma câmara hermeticamente isolada (Figura 10).

**Figura 10 – Ensaio de densidade real dos grãos**



### 3.3.2 Dosagem das Misturas de Solo e Cal

Para a dosagem da mistura solo-cal foi utilizado o método proposto por Eades e Grim (1966), também chamado de método de pH. O método analisa o pH do solo mais a cal suspensos em água, indicando a quantidade de cal necessária para alcançar o maior benefício da mistura. A dosagem é chamada de ponto fixo de cal: quanto mais cal adicionada, mais reações pozolânicas ocorrem até um ponto limite de estabilidade da mistura. O método define que o menor teor de cal que atingir o valor de pH igual a 12,4 é o necessário para estabilizar o solo.

Foram colocados 20 gramas de material, solo puro passante na peneira de nº 40 mais cal dentro de copos plásticos de 250 ml, nas proporções 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9%, 11% de cal. Em seguida adicionou-se 100 ml de água destilada. Agitaram-se as misturas por 30 segundos a cada 10 minutos. Após 1 hora realizaram-se as medições de pH.

As medições foram realizadas em um peagâmetro modelo PHS-3E de bancada, com compensação automática de temperatura e eletrodo de vidro, calibrado com soluções tampão de pH igual a 7 e 10.

### 3.3.3 Ensaios de Compactação

A fim de se determinar os pesos específicos aparentes secos máximos ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e as umidades ótimas ( $w_{\acute{o}t}$ ), foram realizados ensaios de Proctor na energia normal, intermediária e modificada para o solo puro e suas misturas. Foram seguidos os processos normatizados na DNIT – 164 (DNIT, 2013).

### 3.3.4 Moldagem dos Corpos de Prova

A partir dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, foram moldados corpos de prova de diâmetro igual a  $5,00 \pm 0,05$  cm e altura igual a  $10,00 \pm 0,05$  cm, em moldes de aço inox. Este processo foi realizado de modo estático (sem vibração), com apenas uma camada e em uma prensa hidráulica manual (Figura 11).

A mistura foi feita na ordem solo e cal/resíduos. Primeiramente, foi obtida homogeneidade, para então adicionar e homogeneizar a água na mistura. A quantidade de cal ou resíduos da construção e demolição a ser adicionada era calculada de tal modo que, no final, a mistura tivesse as devidas porcentagens de cada material. A quantidade de água a ser adicionada era calculada sobre a massa total seca, incluindo a cal e os resíduos de construção e demolição.

**Figura 11 – Prensa hidráulica manual Bovenau 15 T**



Os corpos de prova foram moldados logo após a sua mistura, procurando-se obter o teor de umidade mais próximo do ótimo ( $\pm 0,5\%$ ) e um peso específico aparente seco não diferindo mais que 1% do obtido na curva de compactação. Em seguida, os corpos de prova foram embalados com papel filme, identificados e armazenados em câmara úmida para o

processo de cura. Os corpos de prova moldados foram usados para os ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e módulo resiliente.

### 3.3.5 Análise da Relação Porosidade e Teor de Cal

Uma análise da porosidade das amostras que sofreram ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral será realizada. A variável porosidade é a que se altera em cada energia de compactação. Para obter a porosidade, foram utilizados os seguintes dados: peso da amostra, umidade de moldagem, volume da amostra, densidade real dos grãos do solo e densidade real dos grãos da cal. A relação entre porosidade e o teor de cal é determinada pela equação (Equação 2) proposta por Johann (2013):

$$\eta / L = 100 - 100 x \left( \frac{M_{ss}/G_{S_s} + M_{sL}/G_{S_L}}{V_{total}} \right) / L \quad (2)$$

Onde:

$\eta$  = Porosidade do corpo de prova (%);

L = Teor de cal do corpo de prova (%);

$M_{ss}$  = Massa seca de solo em um corpo de prova (g);

$G_{S_s}$  = Densidade real dos grãos do solo (adim.);

$M_{sL}$  = Massa seca de cal em um corpo de prova (g);

$G_{S_L}$  = Densidade real dos grãos da cal (adim.);

$V_{total}$  = Volume total do corpo de prova.

### 3.3.6 Ensaio de Compressão Simples

A resistência à compressão simples (RCS) do solo e das misturas foram determinados conforme os métodos propostos na NBR 5739 (ABNT, 2007), do tipo não adensado, não drenado e com a pressão de confinamento igual a zero ( $\sigma_3=0$ ). Os ensaios foram realizados em três réplicas, obtendo sempre a umidade logo após o ensaio, para fins de conferência com a umidade ótima respectiva. Admitiram-se os valores de tensão de ruptura de  $\pm 10\%$  da média, se um dos valores se diferiu da faixa, utilizou-se a média dos outros dois. O ensaio ocorreu no modo de deformação controlada, com a prensa configurada em uma velocidade de 1,27

mm/min. Foi utilizada uma prensa universal Emic modelo DL 30000 (Instron do Brasil), com célula de carga TRD-29 calibrada (Figura 12).

**Figura 12 – Ensaio de compressão simples**



O resultado de resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) foi calculado a partir da equação (Equação 3):

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Onde:

$q_u$  = Resistência à compressão (MPa);

P = Carga de ruptura máxima na curva tensão-deformação (N);

A = Área transversal do corpo de prova ( $\text{mm}^2$ );

### 3.3.7 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

A resistência à compressão diametral (RCD) do solo e das misturas foram determinados conforme os processos propostos na NBR 7222 (ABNT, 2011). Para este ensaio, foi utilizado o mesmo equipamento do ensaio de resistência à compressão simples, porém com as amostras rompidas na horizontal. A velocidade da prensa para este ensaio foi de 1 mm/min.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada com a equação (Equação 4):

$$q_t = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (4)$$

Onde:

$q_t$  = Resistência à tração (MPa);

F = Carga de ruptura máxima na curva tensão-deformação (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm).

Os corpos de prova foram rompidos em três réplicas. Admitiu-se uma tolerância de  $\pm 10\%$  da média dos valores alcançados na ruptura. Caso um dos corpos de prova diferísse da tolerância, procedia-se à determinação de uma nova média com os dois corpos de prova restantes (NUNEZ, 1991).

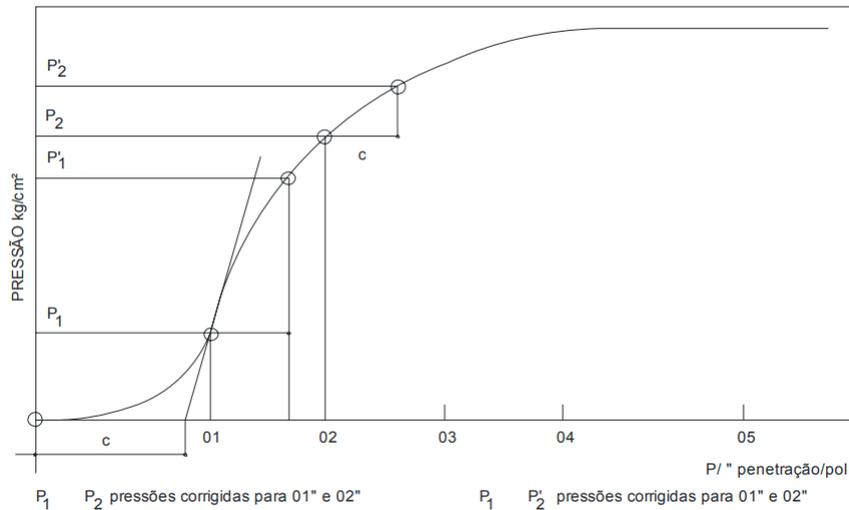
### 3.3.8 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia e Expansão

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão para amostras com e sem tratamento foram realizados conforme procedimento da ME 172 (DNIT, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura, com os pesos específicos aparente secos máximos ( $\gamma_{d_{máx}}$ ) e teores de umidade ótimas ( $\omega_{ót}$ ) obtidos no ensaio de compactação. Em seguida, os corpos de provas ficaram submersos em água por 96 horas, acompanhando-se a evolução da expansão de cada corpo de prova. Após o acompanhamento da expansão, as amostras foram levadas para ensaio de rompimento.

Para este ensaio foi utilizado uma prensa universal Emic modelo DL 30000 (Instron do Brasil), com célula de carga TRD-29 calibrada, com velocidade de deformação de 1,27 mm por minuto, capacidade máxima de carga de 30.000 Kgf. Com os resultados, obteve-se o gráfico penetração por pressão aplicada no pistão. Deve-se corrigir, se necessário, a curva pressão-penetração. Este processo, consiste no ajuste do ponto zero da curva a fim de corrigir efeitos provenientes da irregularidade da superfície do corpo de prova. Caso a curva apresente um ponto de inflexão, traça-se uma tangente à curva nesse ponto, até que a mesma intercepte os

eixos das abcissas. A curva corrigida será a tangente traçada mais a curva convexa original (Figura 13).

**Figura 13 – Correção da curva pressão-penetração do ISC**



**Extraído em: DNIT, 2006.**

Os valores de pressão para penetrações 0,1 e 0,2 polegadas são obtidos e se calcula o ISC, em porcentagem, com a equação (Equação 5):

$$ISC = \frac{P' \times 100}{P_{padr\tilde{a}o}} \quad (5)$$

Onde:

$P'$  = Pressão corrigida obtida na leitura da prensa;

$P_{padr\tilde{a}o}$  = Pressão padrão, que é a correspondente a pedra britada específica de ISC igual à 100%.

Foi adotado o maior valor entre os obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

Para calcular a expansão e a água absorvida durante a embebição, utilizou-se a equação (Equação 6):

$$Expans\tilde{a}o (\%) = \frac{(L_f - L_i) \times 100}{H} \quad (6)$$

Onde:

Lf = Leitura final do extensômetro;

Li = Leitura inicial do extensômetro;

H = Altura do corpo de prova.

A expansão máxima permitida para cada camada do pavimento é apresentada pelo DNIT (2006) conforme Tabela 4.

**Tabela 4 – Expansão máxima permitida para cada camada do pavimento**

Camada do pavimento	Expansão máxima (%)
Subleito	2,0
Reforço de subleito	1,0
Sub-base	1,0
Base	0,5

**Extraído em: DNIT, 2006.**

Os valores de ISC permitidos para cada camada do pavimento são apresentados por Souza (1981) conforme Tabela 5:

**Tabela 5 – ISC mínimo permitido para cada camada do pavimento**

Camada do pavimento	ISC mínimo (%)
Reforço de subleito	> ISC subleito
Sub-base	≥ 20
Base	≥ 80

**Extraído em: SOUZA, 1981.**

### 3.3.9 Ensaio de Módulo Resiliente

A realização dos ensaios para determinação do módulo de resiliência seguiu a orientação da norma ME 134 (DNIT, 2017), através do ensaio triaxial de cargas repetidas, na compressão triaxial. Esta norma especifica procedimentos de ensaio para determinação do comportamento resiliente de solo, com características que simulam as condições físicas e os estados de tensões que estes materiais estarão submetidos nas camadas do pavimento devidos às cargas móveis do tráfego.

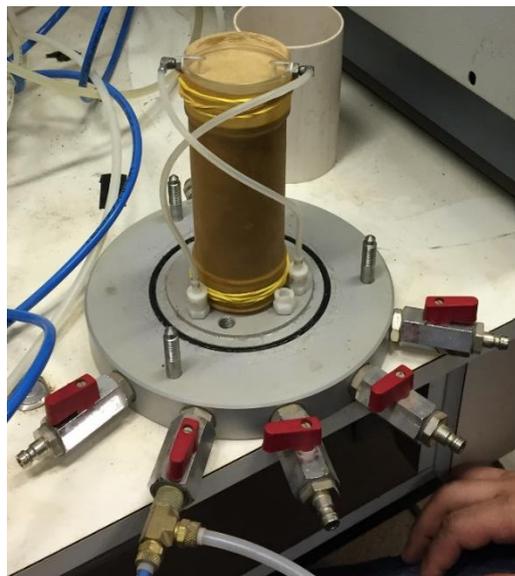
Utilizou-se um equipamento triaxial adaptado para cargas repetidas. O equipamento é composto por um pórtico metálico, suporte da célula triaxial, célula ou câmara, sistema pneumático de carregamento composto por válvulas reguladoras de pressão, sistema de vácuo

para verificar possíveis furos na membrana que envolve a amostra, cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga e um microcomputador (Figuras 14 e 15). O sistema é controlado por um dispositivo eletrônico, regulador de tempo e frequência de aplicação de carga (0,33 Hz). As deformações verticais da amostra são medidas por um LVDT (*linear variable differential transformer*) inserido em um anel dinamométrico.

**Figura 14 – Equipamento pórtico de ensaio de Módulo Resiliente**



**Figura 15 – Célula com amostra para o ensaio de Módulo Resiliente**



Adotou-se uma frequência de 0,33 Hz com duração de carga de 1,5 s pois o aquisitor de dados possui uma resolução mínima de leitura igual a 1,0 s, não computando aplicações de carga de 0,1 s, conforme norma. Essa adaptação está aceitável conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), onde se detalha que o resultado não tem influência substancial para frequências entre 0,33 Hz e 1 Hz, com duração de carga entre 0,86 s e 2,86 s.

Antes de se começar o ensaio, aplicou-se uma sequência de carregamentos cíclicos de 500 repetições para 3 pares de tensões (Tabela 6), com a finalidade de eliminar as deformações permanentes. Após a fase de condicionamento, iniciou-se efetivamente o ensaio, com a aplicação de 18 pares de tensões (Tabela 7) para obtenção das leituras das deformações específicas. Para cada par de tensões foram aplicados 10 ciclos de carga e fez-se a média de pelo menos 5 aquisições. Após o ensaio, determinou-se a umidade da amostra.

**Tabela 6 – Sequência de tensões para fase de condicionamento**

$\sigma_3$ (Mpa)	$\sigma_d$ (Mpa)	$\sigma_1 / \sigma_3$
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

**Extraído em: DNIT 134, 2017.**

**Tabela 7 – Sequência de tensões para obtenção do módulo de resiliência**

$\sigma_3$ (Mpa)	$\sigma_d$ (Mpa)	$\sigma_1 / \sigma_3$
	0,020	2
0,020	0,040	3
	0,060	4
	0,035	2
0,035	0,070	3
	0,105	4
	0,050	2
0,050	0,100	3
	0,150	4
	0,070	2
0,070	0,140	3
	0,210	4
	0,105	2
0,105	0,210	3
	0,315	4
	0,140	2
0,140	0,280	3
	0,420	4

**Extraído em: DNIT 134, 2017.**

### 3.3.10 Análise Estatística dos Resultados

Para analisar os resultados foi feita a suposição básica de que todos estão distribuídos em uma curva normal de distribuição e os erros são aleatórios. Para comprovar se as médias dos resultados, após alterar um fator de controle, realmente diferem entre si foi adotado o método de Análise da Variância (ANOVA). As regressões simples foram determinadas com o *software MS Excel*<sup>®</sup> e com o *software Origin*<sup>®</sup>. A análise de variância foi feita através do *software Past*<sup>®</sup> 3.24. Os gráficos de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral possuem a margem de erro de cada média, com 95% de confiança.

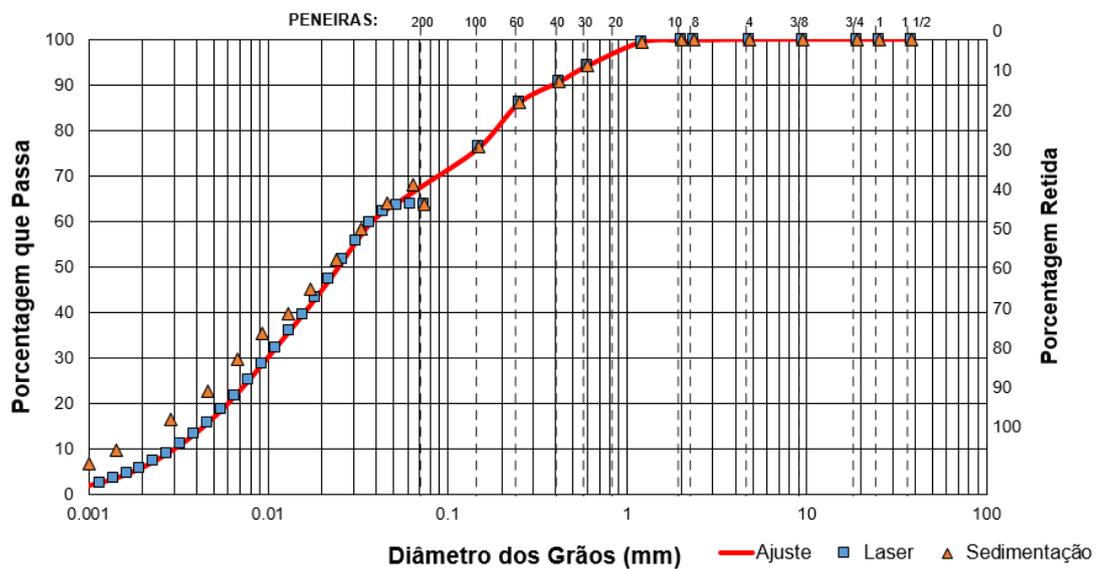
## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir são apresentados os dados obtidos a partir das execuções conforme capítulo anterior. Por fim é feita a análise e a discussão dos resultados.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

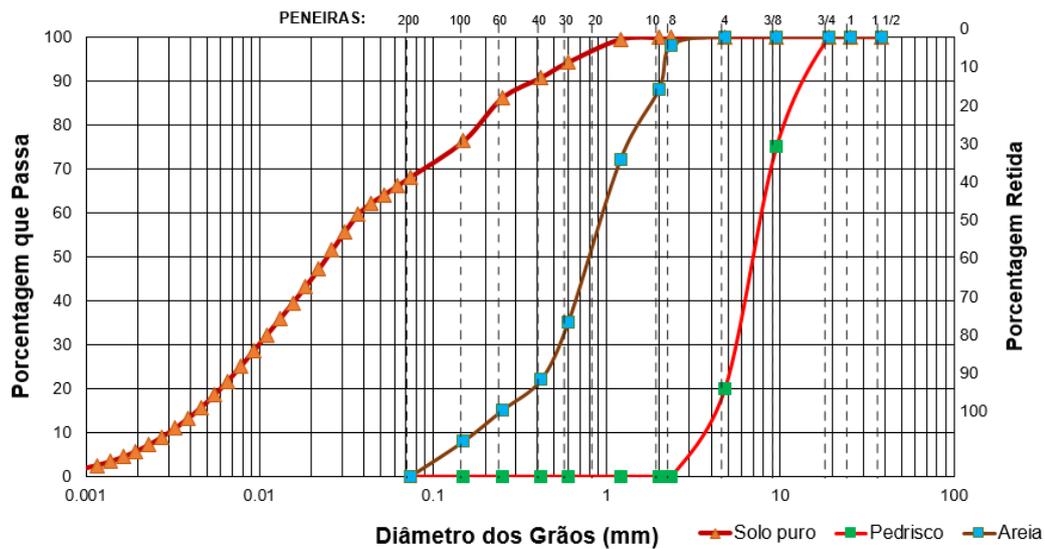
Os resultados do peneiramento com lavagem, sedimentação e granulometria a laser do solo puro são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Curva granulométrica apenas do solo



Os resultados da granulometria a *laser* apenas do solo, do peneiramento com lavagem da areia do RCD e do pedrisco do RCD são apresentados na Figura 17.

**Figura 17 – Curva granulométrica do solo puro, da areia e do pedrisco**



Através de uma estabilização granulométrica feita com o mesmo RCD para solos argilosos da Formação Geológica de Guabirota, foram estabelecidas duas misturas para a pesquisa: Mistura 1 (M1) contendo 45% de solo, 5% de cal, 30% de areia de RCD e 20% de pedrisco de RCD; Mistura 2 (M2) contendo 35% de solo, 5% de cal, 30% de areia de RCD e 30% de pedrisco de RCD. As misturas selecionadas foram as misturas que obtiveram melhores resultados no trabalho de Moreira (2018), porém nesta pesquisa foi acrescida a cal.

Outras propriedades do solo foram obtidas (massa específica real dos grãos, coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura, limites de *Atterberg*), a fim de se classificar o solo adequadamente (Tabela 8).

**Tabela 8 – Propriedades físicas do solo**

Propriedades	Resultados	CV (%)	Norma obedecida
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,63	0,082	DNER – ME 093/1994
% de Silte ( $0,002 < \varnothing > 0,06$ mm)	58%	-	-
% de Argila ( $\varnothing < 0,002$ mm)	7%	-	-
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	12,33	-	-
Coefficiente de Curvatura (Cc)	0,90	-	-
<i>Limites de Consistência</i>			-
Limite de Liquidez (LL)	50,37%	-	DNER – ME 122/1994
Limite de Plasticidade (LP)	35,96%	7,33	DNER – ME 082/1994
Índice de Plasticidade (IP)	14,41%	-	-

CV = Coeficiente de Variação

Os resultados de Limites de Atterberg da cal, das misturas de solo-cal e solo-resíduos são sintetizados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Propriedades físicas das misturas solo-cal e solo-cal-RCD**

Propriedades	Resultados						
	Cal	3%	5%	7%	9%	M1	M2
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,39	2,62	2,61	2,61	2,60	-	-
CV (%)	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	-	-
<i>Limites de Consistência</i>							
Limite de Liquidez (LL)(%)	-	52,8	52,00	52,60	51,90	46,44	48,15
Limite de Plasticidade (LP)(%)	-	36,11	37,35	38,49	42,30	39,57	46,23
CV (%)	-	8,31	5,25	6,13	5,20	8,12	7,79
Índice de Plasticidade (IP)(%)	-	16,69	14,65	14,11	9,60	6,87	1,92

CV = Coeficiente de Variação

Na tabela 9 encontra-se um aumento do valor de Limite de Plasticidade para todas as misturas, conseqüentemente, o Índice de Plasticidade diminui. Este comportamento é explicado pela capacidade de plasticidade que o solo possui. Quanto menor a quantidade de solo, menos plástica será a mistura.

#### 4.2 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E DAS MISTURAS

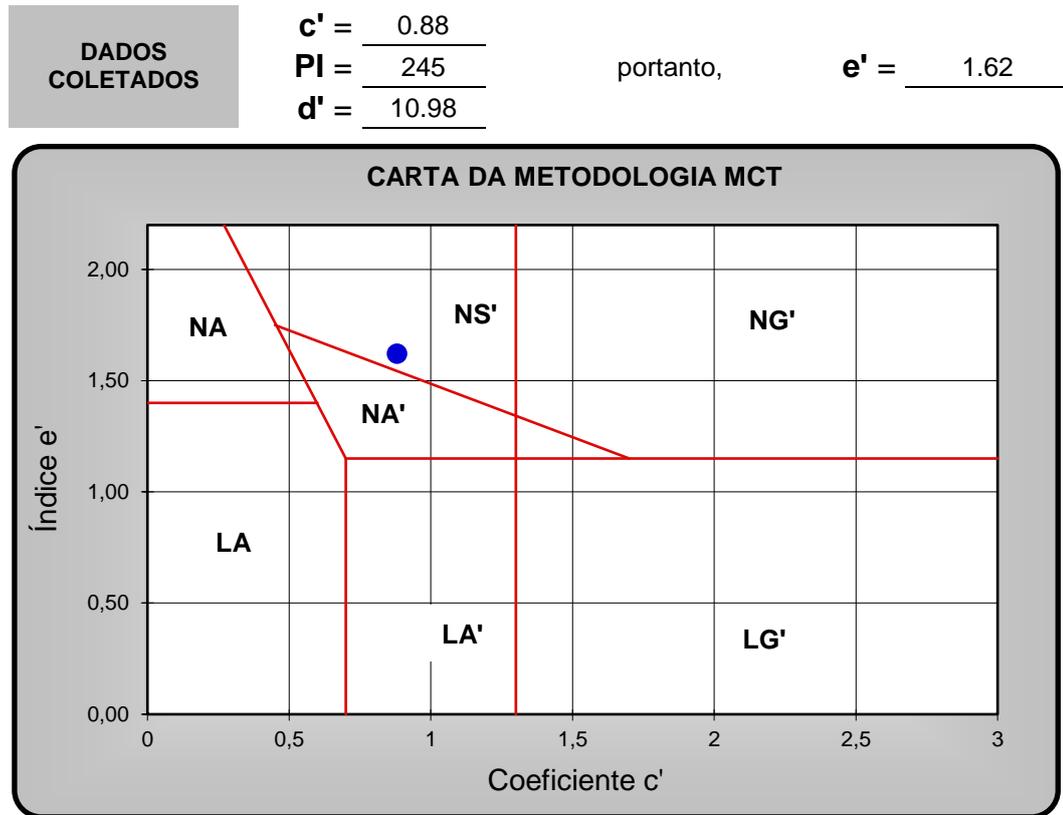
Através da classificação proposta pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para materiais de subleito de rodovias, designada TRB (Transportation Research Board), o solo desta pesquisa é designado A-7-5, índice de grupo igual a 10. Essa classificação define o material como deficiente para aplicação em subleitos de rodovias (ASTM D-3282, 2015).

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D-2487, 2017), proposto inicialmente por Casagrande em 1942, o solo analisado é designado MH, cuja nomenclatura é referente à silte arenoso de alta plasticidade.

O coeficiente de uniformidade e de curvatura indicam um solo bem graduado (DAS, 2013).

O resultado do ensaio conforme ábaco da metodologia MCT e respectivos coeficientes é apresentado na Figura 18. O solo é portanto classificado não laterítico siltoso, conforme metodologia MCT.

Figura 18 – Classificação do solo conforme metodologia MCT

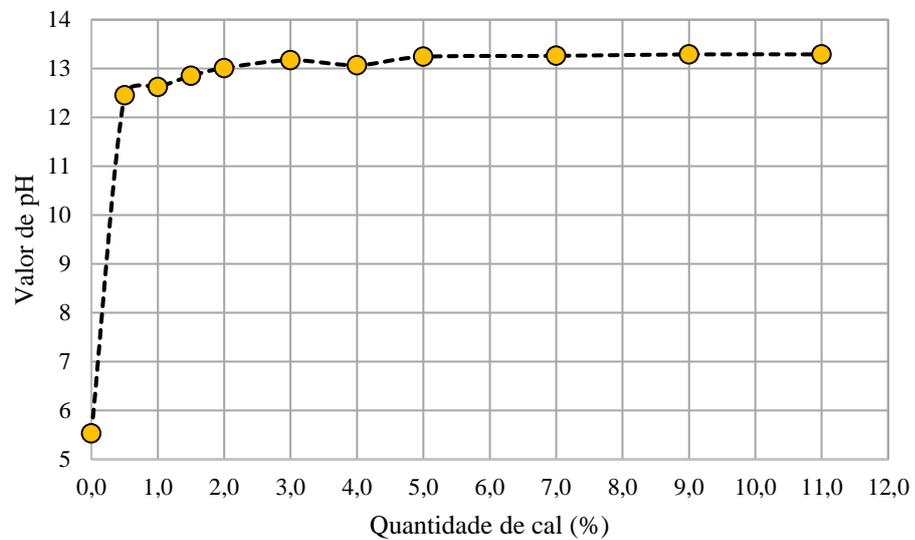


Cortesia do professor Heraldo Giacheti

#### 4.3 RESULTADOS DE PH DO SOLO E DAS MISTURAS

A Figura 19 apresenta os resultados de pH do solo e das misturas somente com cal.

Figura 19 – PH do solo e das misturas com cal



A Figura 19 apresenta um íngreme crescimento do valor de pH com mínimas quantidades de cal (primeira amostra com 0,5% de cal). Os resultados indicam o potencial reativo entre o solo e a cal, o qual deve-se confirmar nos resultados de resistência das misturas. A partir de 9% a reatividade entre água, solo e cal entrou em constância com o valor de pH igual a 13,29. Foram definidas as seguintes misturas para a pesquisa: 3%, 5%, 7% e 9% de cal.

Johann (2013) realizou ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e rigidez inicial em um solo siltoso estabilizado com cal. O solo utilizado é composto por 22% de argila ( $< 0,002$  mm) e 78% de silte (0,002 a 0,075 mm). O limite de liquidez é igual a 38,2%, limite de plasticidade igual a 34,5% e o índice de plasticidade é igual a 3,7%. As porcentagens de cal foram definidas a partir do método ICL (Rogers *et al.*, 1997) de dosagem para solo-cal e são 3%, 5%, 7% e 9%. A autora afirma que as porcentagens estão de acordo com a experiência brasileira e internacional, tanto em nível experimental quanto em aplicações diversas como, por exemplo, em rodovias.

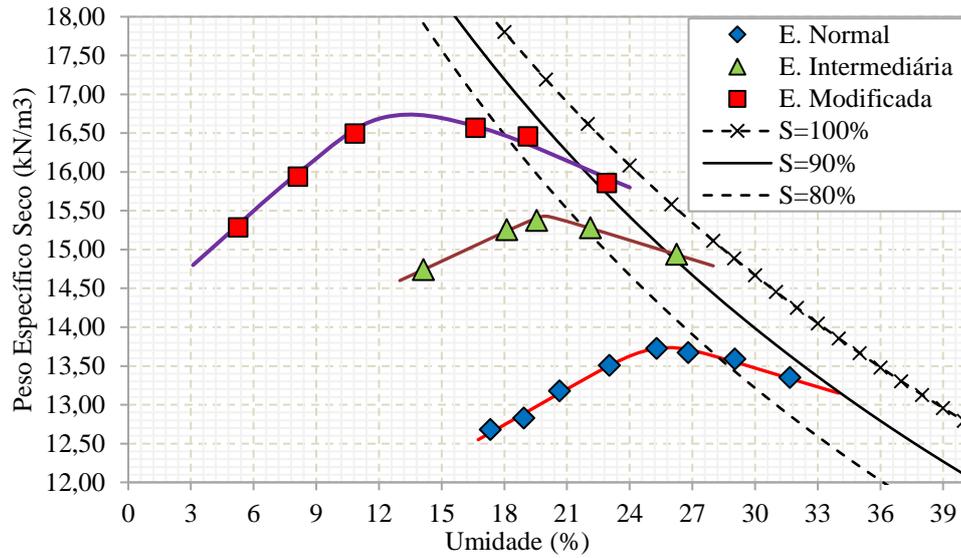
#### 4.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Foram realizados os ensaios de compactação do solo puro e das misturas solo-cal e solo-RCD, para assim determinar o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima de moldagem ( $\omega_{\acute{o}t}$ ). Os ensaios foram executados em três diferentes energias (normal, intermediária e modificada).

##### 4.4.1 Compactação do Solo Puro

Os resultados do ensaio de compactação do solo puro são apresentados na Figura 20, nas energias normal, intermediária e modificada.

**Figura 20 – Curva de compactação apenas do solo nas energias normal, intermediária e modificada**

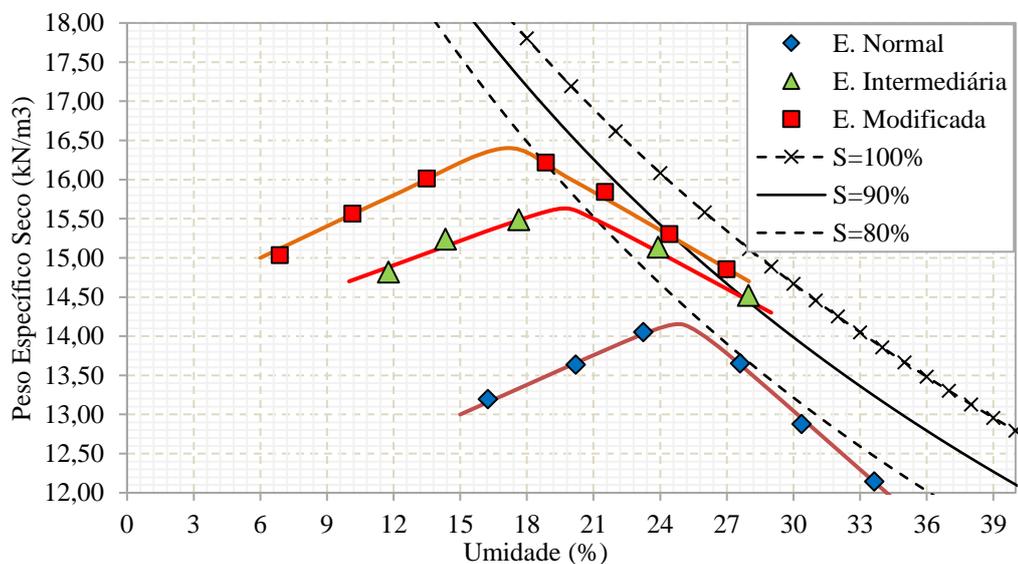


Observa-se na Figura 20 um aumento do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e a diminuição da umidade ótica ( $\omega_{\acute{o}t}$ ) conforme aumenta-se a energia aplicada.

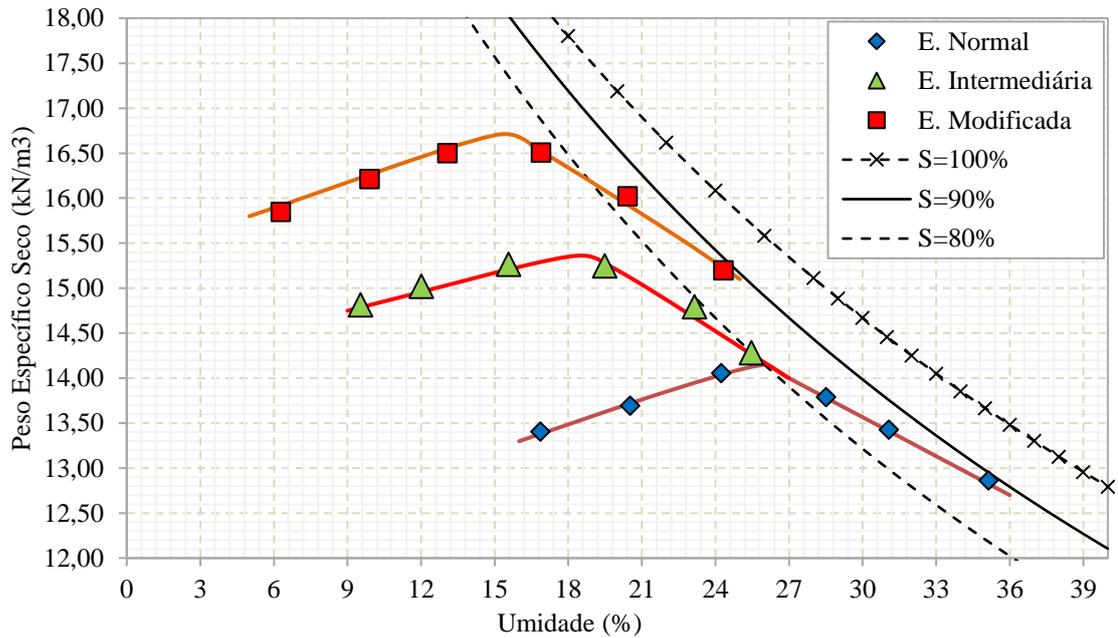
#### 4.4.2 Compactação das Misturas

Os resultados do ensaio de compactação das misturas solo-cal e das misturas solo-cal-RCD são apresentados nas Figuras 21 a 26. Um gráfico explicativo com as linhas ótimas de compactação é apresentado na Figura 27.

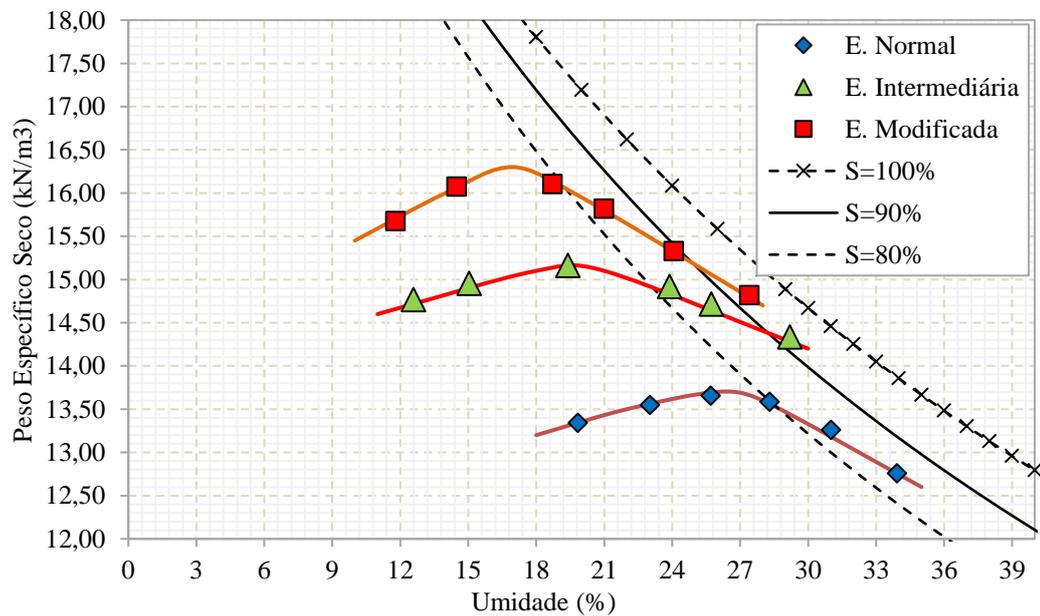
**Figura 21 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 3% de cal nas energias normal, intermediária e modificada**



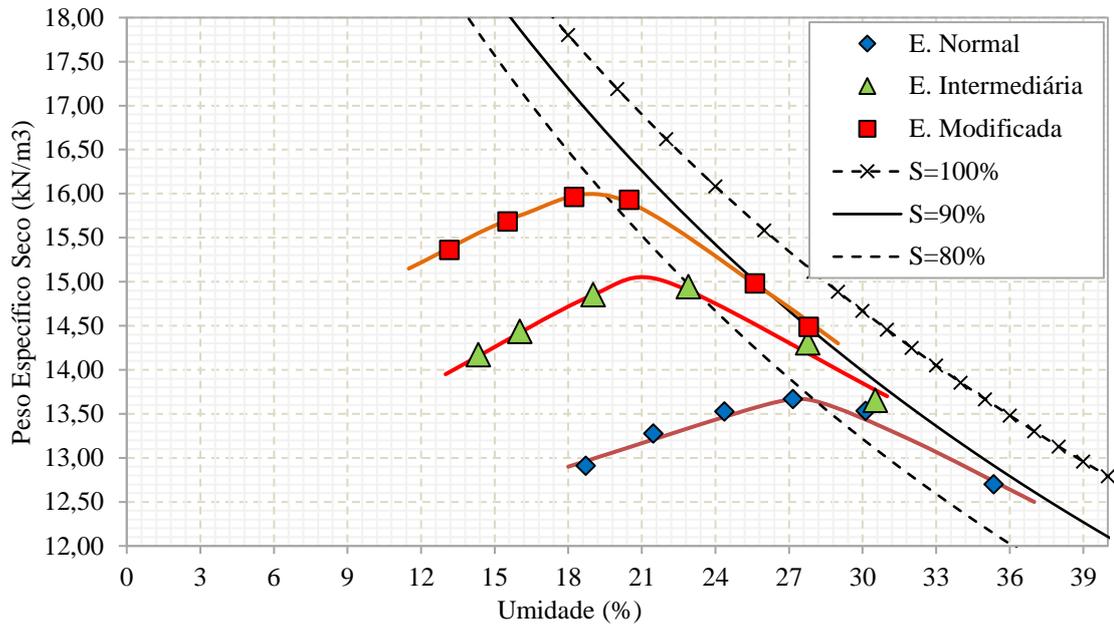
**Figura 22 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 5% de cal nas energias normal, intermediária e modificada**



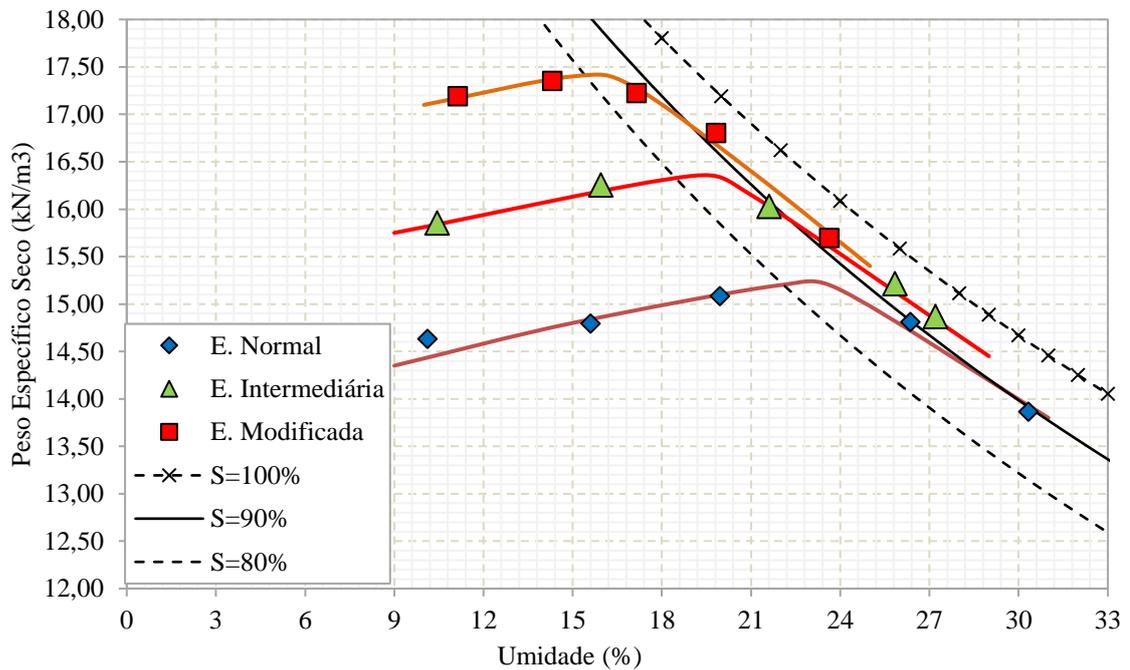
**Figura 23 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 7% de cal nas energias normal, intermediária e modificada**



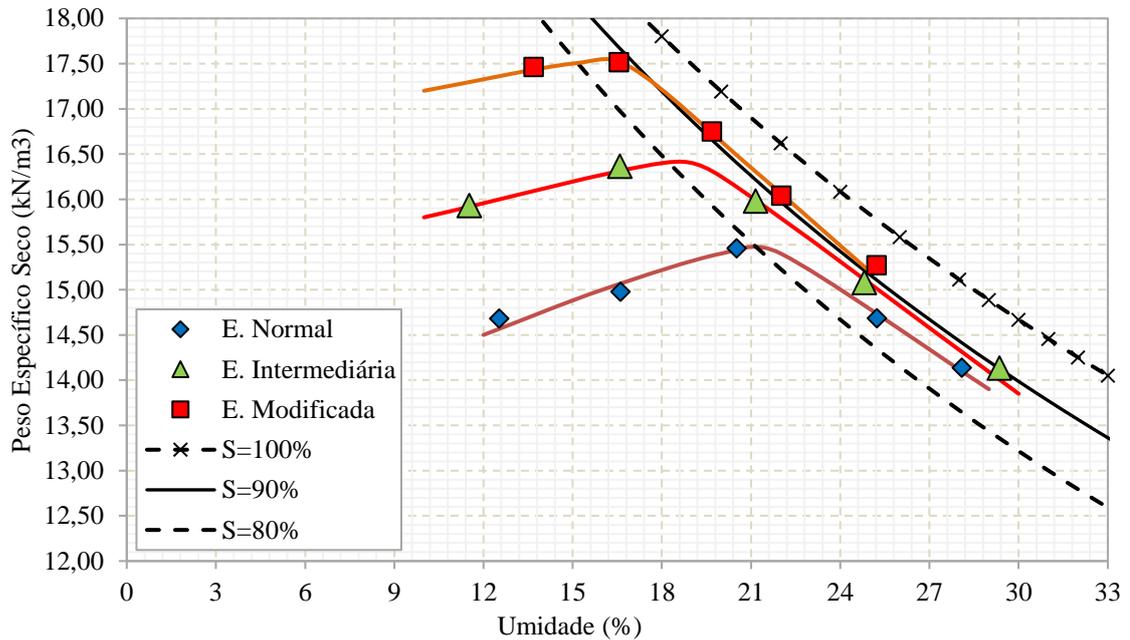
**Figura 24 – Curva de compactação da mistura solo-cal com 9% de cal nas energias normal, intermediária e modificada**



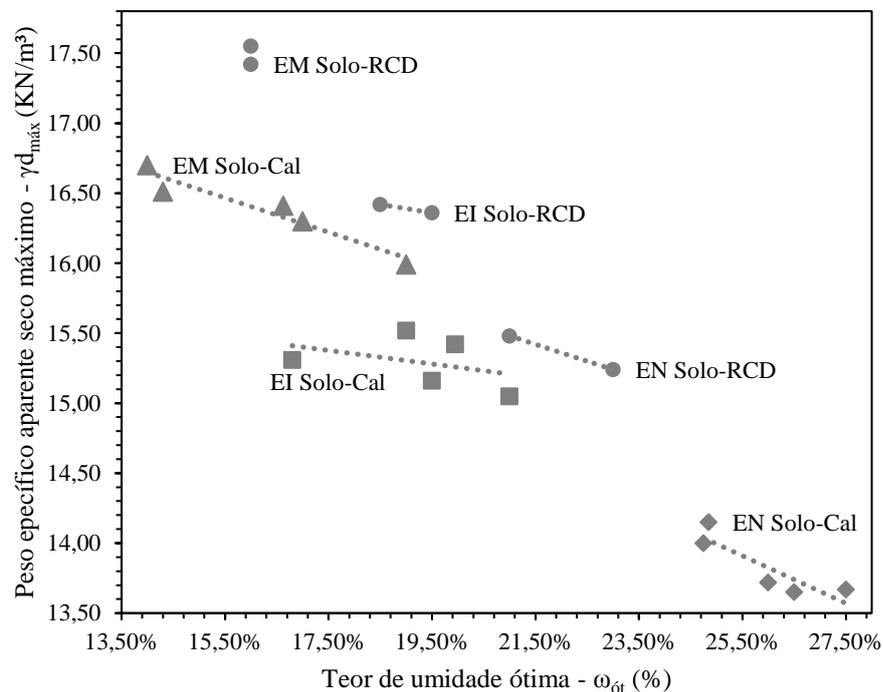
**Figura 25 – Curva de compactação da mistura solo-cal-RCD M1 nas energias normal, intermediária e modificada**



**Figura 26 – Curva de compactação da mistura solo-cal-RCD M2 nas energias normal, intermediária e modificada**



**Figura 27 – Linha ótima de compactação das misturas nas energias normal, intermediária e modificada**



A respeito das misturas de solo-cal, foi observado um aumento da umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) e uma redução do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d,máx}$ ) conforme cresce o teor de cal na mistura, para todas as energias. O comportamento é explicado pela flocculação, resistente o suficiente para a energia e aumentando o índice de vazios, reduzindo, portanto, o  $\gamma_{d,máx}$  do solo.

Quanto maior o número de vazios, mais água será necessária para preenchê-los, o que resulta em um teor de umidade maior (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998).

A respeito das misturas solo-cal-RCD, foi observada uma redução da umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) e um aumento do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) conforme cresce o teor de resíduos na mistura, para todas as energias. O comportamento é associado ao ganho de resistência mecânica em função da granulometria, uma vez que a resistência mecânica (compressão, tração e ISC) do solo é determinada pela quantidade de finos. Em outras palavras, quanto maior a quantidade de finos no solo, menor será sua resistência.

**Tabela 10 – Resumo dos resultados do ensaio de compactação**

Mistura	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> )			$\omega_{ót}$ (%)		
	EN	EI	EM	EN	EI	EM
Solo puro	13,72	15,42	16,70	26,00	20,00	14,00
3% cal	14,15	15,52	16,41	24,90	19,00	16,60
5% cal	14,00	15,31	16,51	24,80	16,80	14,30
7% cal	13,65	15,16	16,30	26,50	19,50	17,00
9% cal	13,67	15,05	15,99	27,50	21,00	19,00
45/5/30/20	15,24	16,36	17,42	23,00	19,50	16,00
35/5/30/30	15,48	16,42	17,55	21,00	18,50	16,00

Legenda: Solo / Cal / Areia / Pedrisco

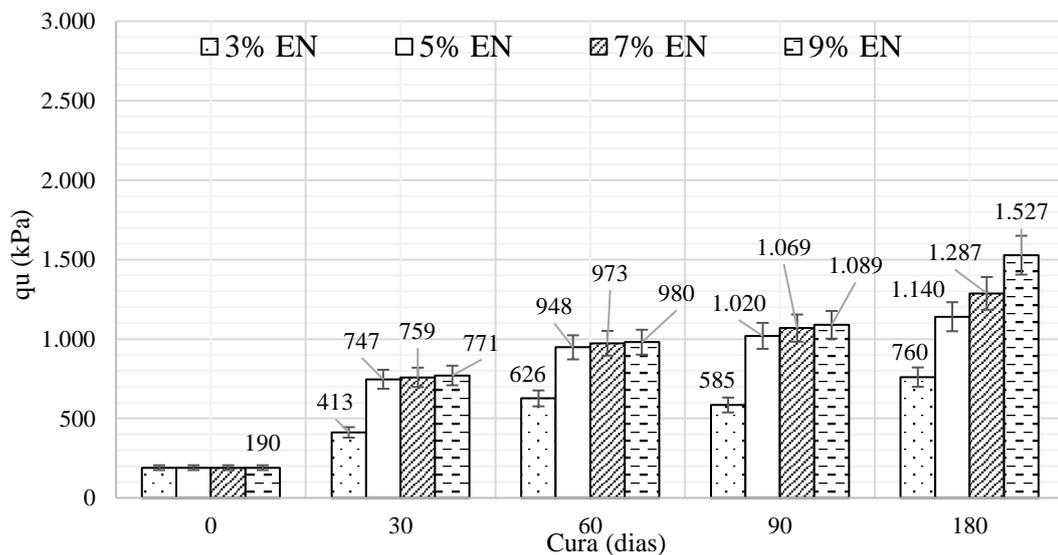
Moreira (2018) realizou ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral, índice de suporte Califórnia e módulo resiliente em um solo sedimentar argilo-siltoso da Formação Geológica de Guabirotuba. O solo utilizado possui uma densidade real dos grãos de 2,71, limites de liquidez e plasticidade, 53,1% e 31,8%, respectivamente, índice de plasticidade de 21,3%. Para moldar as amostras à serem ensaiadas, primeiramente foi realizado o ensaio de Proctor para obter os parâmetros de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) e umidade ótima de moldagem ( $\omega_{ót}$ ). O resíduo utilizado é proveniente do mesmo local do resíduo obtido neste trabalho. Para a mistura de 50% de solo, 30% de areia e 20% de pedrisco, o autor obteve um peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) de 15,70 kN/m<sup>3</sup>, 16,90 kN/m<sup>3</sup> e 17,90 kN/m<sup>3</sup> para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente. A umidade ótima de moldagem ( $\omega_{ót}$ ) para a mesma mistura foi 21,0%, 15% e 13,4% para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente. Para a mistura de 40% de solo, 30% de areia e 30% de pedrisco, o autor obteve um peso específico aparente seco

máximo ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ) de 16,00 kN/m<sup>3</sup>, 17,32 kN/m<sup>3</sup> e 18,30 kN/m<sup>3</sup> para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente. A umidade ótima de moldagem ( $\omega_{\text{ót}}$ ) para a mesma mistura foi 20,0%, 14,5% e 13,3% para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente.

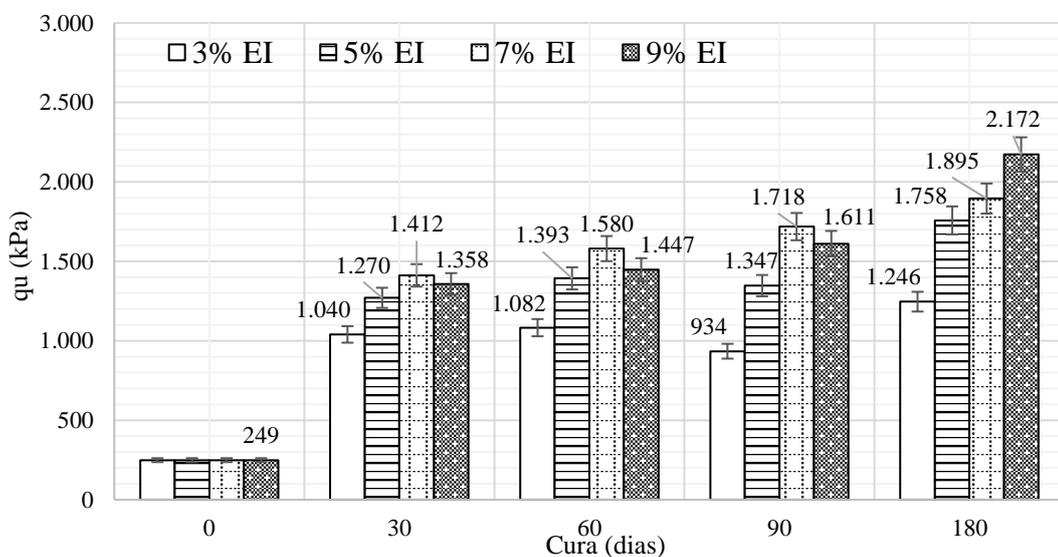
#### 4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples das misturas solo-cal é apresentada nas Figuras 28 a 30. As amostras foram moldadas nas energias normal, intermediária e modificada, com curas de 0, 30, 60, 90 e 180 dias.

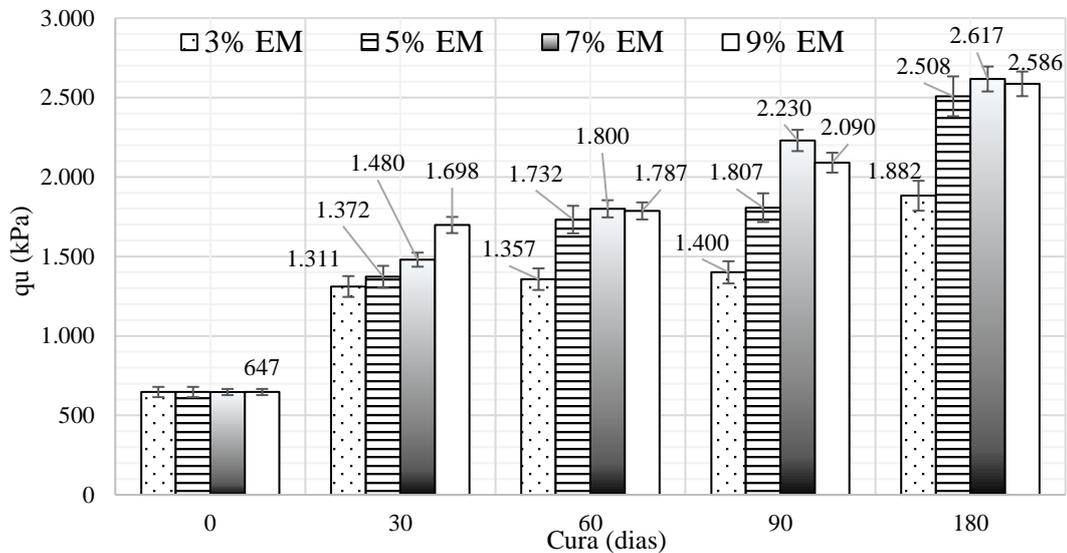
**Figura 28 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia normal**



**Figura 29 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia intermediária**



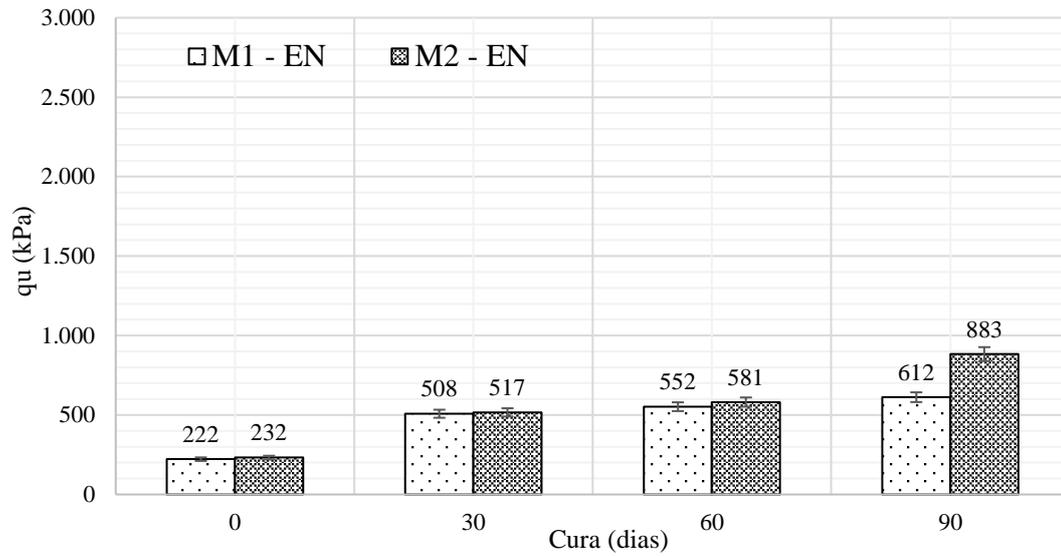
**Figura 30 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal na energia modificada**



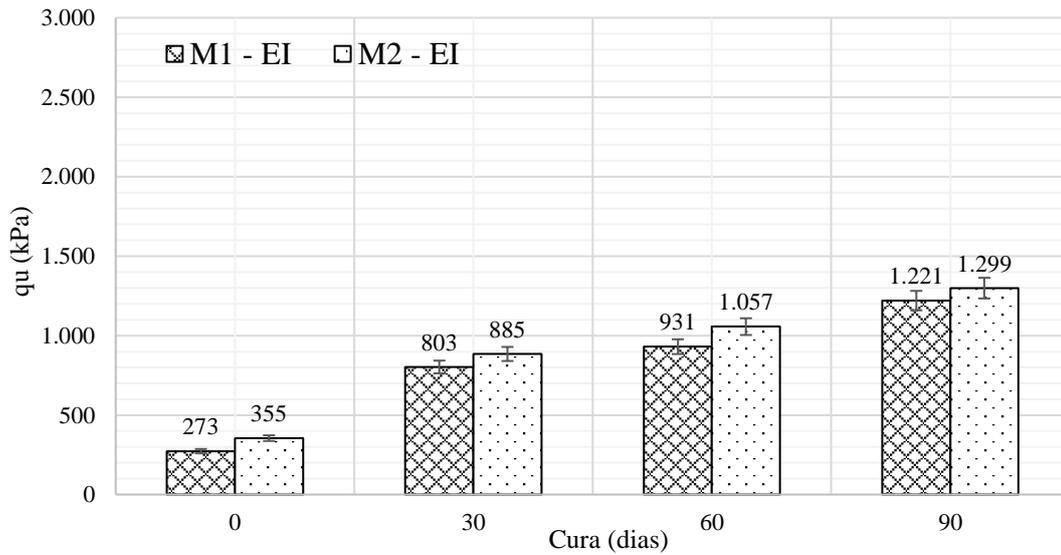
Através dos resultados de resistência à compressão de amostras de solo-cal foi encontrado um aumento de resistência em função do tempo para cada energia de moldagem. Com a adição de 9% de cal para um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 1527$  kPa para a energia normal,  $q_u = 2172$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 2586$  kPa para a energia modificada. Na energia normal, as resistências aumentaram de 190 kPa para 760 kPa na mistura de 3% de cal, de 190 kPa para 1140 kPa na mistura de 5% de cal, de 190 kPa para 1287 kPa na mistura de 7% de cal e de 190 kPa para 1527 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia intermediária, as resistências aumentaram de 249 kPa para 1246 kPa na mistura de 3% de cal, de 249 kPa para 1758 kPa na mistura de 5% de cal, de 249 kPa para 1895 kPa na mistura de 7% de cal e de 249 kPa para 2172 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia modificada, as resistências aumentaram de 249 kPa para 1882 kPa na mistura de 3% de cal, de 249 kPa para 2508 kPa na mistura de 5% de cal, de 249 kPa para 2617 kPa na mistura de 7% de cal e de 249 kPa para 2586 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura. Conforme os resultados o efeito de cimentação foi mais efetivo nas energias normal e intermediária.

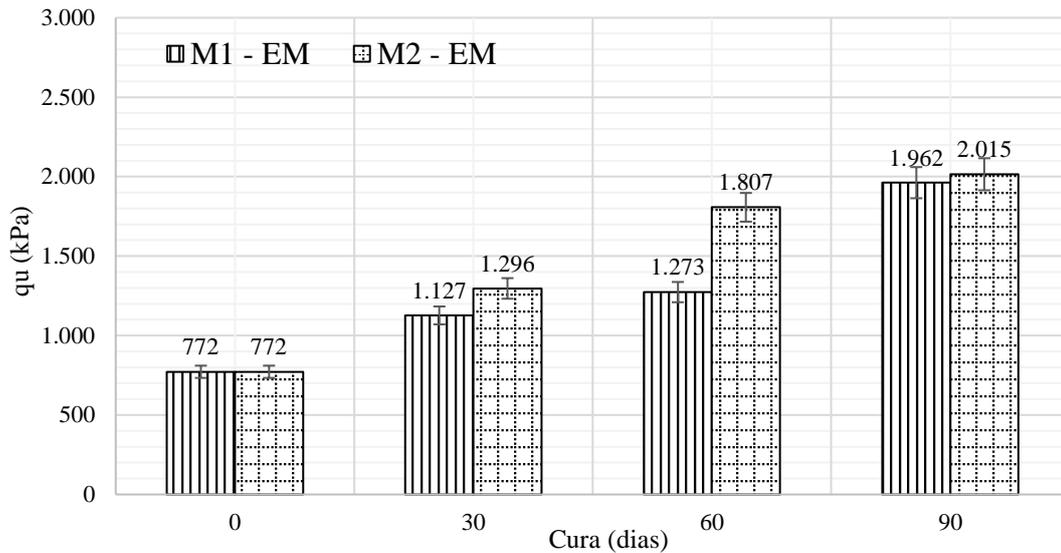
A resistência à compressão simples não confinada das misturas solo-cal-RCD é apresentada nas Figuras 31 a 33. As amostras foram moldadas nas energias normal, intermediária e modificada, com curas de 0, 30, 60 e 90 dias.

**Figura 31 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia normal**



**Figura 32 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia intermediária**



**Figura 33 – Resistência à compressão simples das misturas solo-cal-RCD na energia modificada**

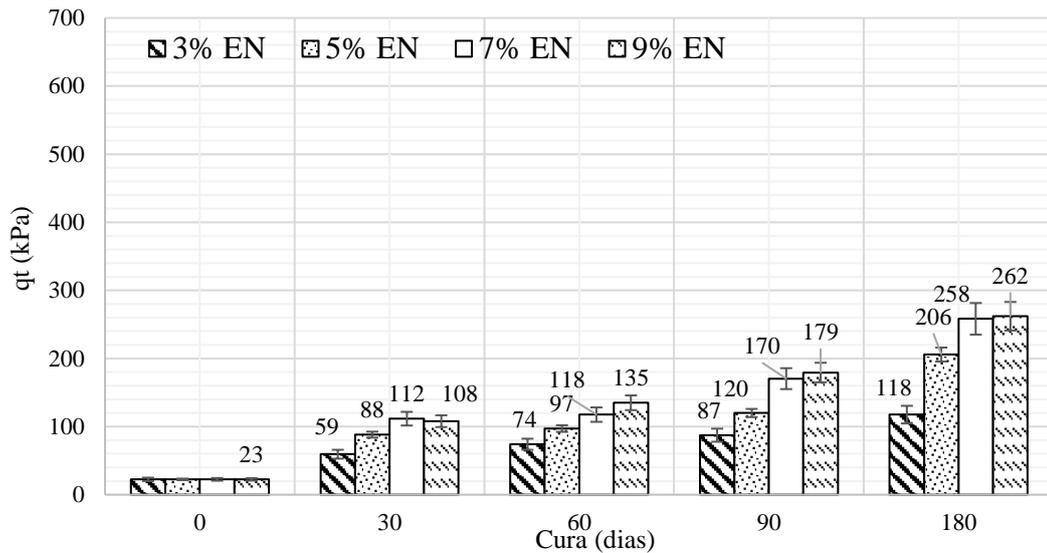
Através dos resultados de resistência à compressão de amostras de solo-cal-RCD foi observado um aumento de resistência em função do tempo para cada energia de moldagem. Na mistura M1 com um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 612$  kPa para a energia normal,  $q_u = 1221$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 1962$  kPa para a energia modificada. Na mistura M2 com um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 883$  kPa para a energia normal,  $q_u = 1299$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 2015$  kPa para a energia modificada. Na energia normal, as resistências aumentaram de 222 kPa para 612 kPa na mistura M1 e de 232 kPa para 883 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia intermediária, as resistências aumentaram de 273 kPa para 1221 kPa na mistura M1 e de 355 kPa para 1299 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia modificada, as resistências aumentaram de 772 kPa para 1962 kPa na mistura M1 e de 772 kPa para 2015 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Comparando as máximas obtidas entre solo-cal e solo-cal-RCD, obtém-se uma resistência 73% maior para o solo-cal na mistura de 9% com cura de 90 dias na energia normal, comparado à mistura M2, com cura de 90 dias na energia normal. Na energia intermediária, a mesma comparação é feita, e o solo-cal obteve uma resistência 67% maior. Na energia modificada, o solo-cal obteve uma resistência 28% maior na mesma comparação.

O efeito de cimentação provocado pela cal foi mais efetivo nas amostras somente do tipo solo-cal, tal fato ocorre por ter maior quantidade de solo fino e, conseqüentemente, maior o efeito provocado pela cal.

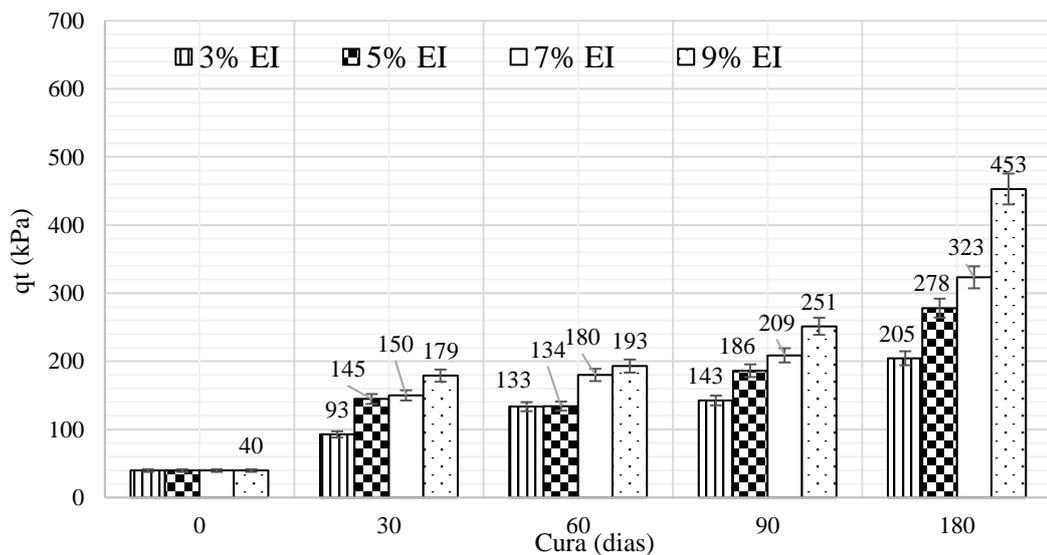
#### 4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal é apresentada nas Figuras 34 a 36. As amostras foram moldadas nas energias normal, intermediária e modificada, com curas de 0, 30, 60, 90 e 180 dias.

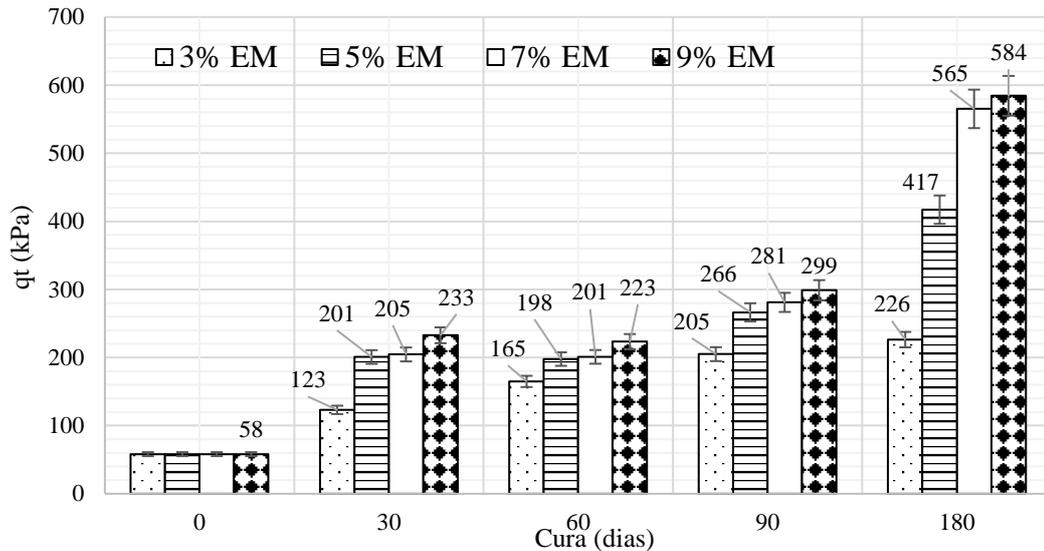
**Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia normal**



**Figura 35 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia intermediária**



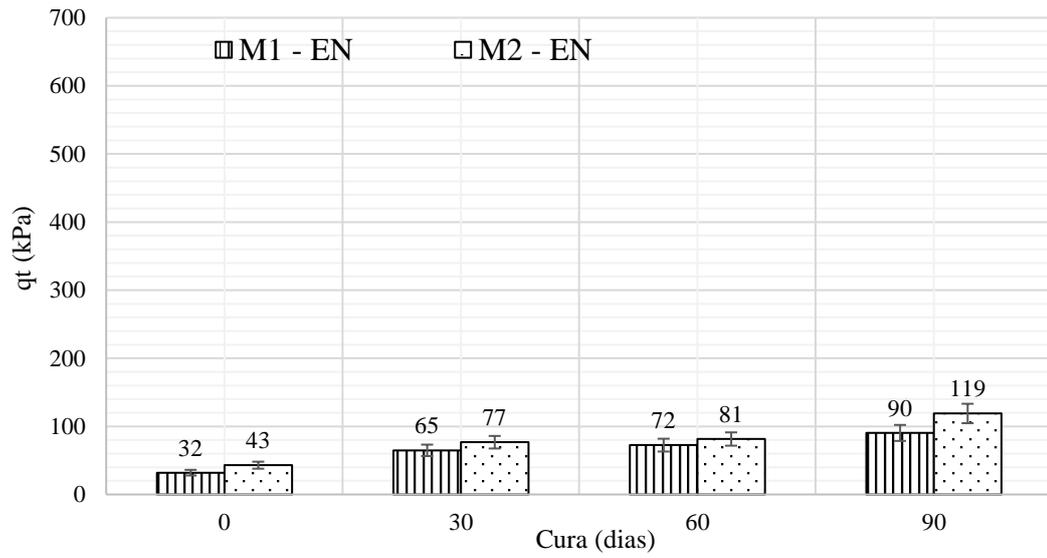
**Figura 36 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal na energia modificada**



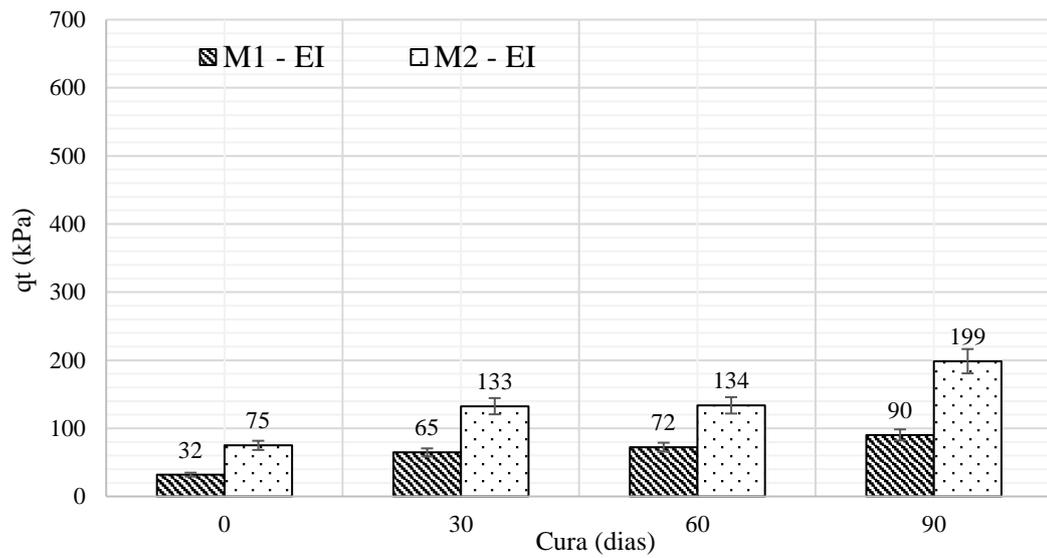
Através dos resultados de resistência à compressão de amostras de solo-cal foi observado um aumento de resistência em função do tempo para cada energia de moldagem. Com a adição de 9% de cal para um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 262$  kPa para a energia normal,  $q_u = 453$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 584$  kPa para a energia modificada. Na energia normal, as resistências aumentaram de 23 kPa para 118 kPa na mistura de 3% de cal, de 23 kPa para 206 kPa na mistura de 5% de cal, de 23 kPa para 258 kPa na mistura de 7% de cal e de 23 kPa para 262 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia intermediária, as resistências aumentaram de 40 kPa para 205 kPa na mistura de 3% de cal, de 40 kPa para 278 kPa na mistura de 5% de cal, de 40 kPa para 323 kPa na mistura de 7% de cal e de 40 kPa para 453 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia modificada, as resistências aumentaram de 58 kPa para 226 kPa na mistura de 3% de cal, de 58 kPa para 417 kPa na mistura de 5% de cal, de 58 kPa para 565 kPa na mistura de 7% de cal e de 58 kPa para 584 kPa na mistura de 9% de cal, entre 0 e 180 dias de cura.

A resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD é apresentada nas Figuras 37 a 39. As amostras foram igualmente moldadas nas energias normal, intermediária e modificada, com curas de 0, 30, 60 e 90 dias.

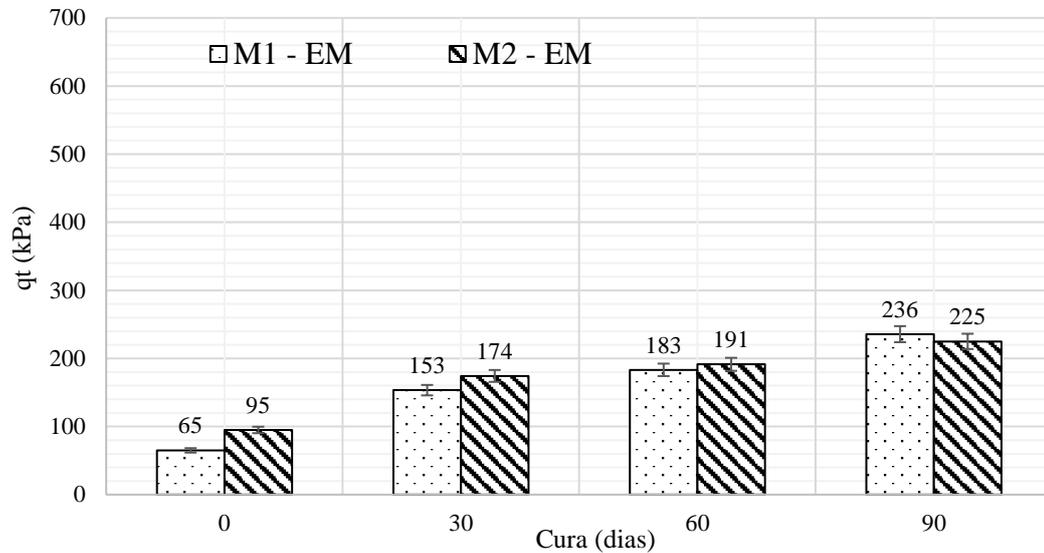
**Figura 37 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia normal**



**Figura 38 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia intermediária**



**Figura 39 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-cal-RCD na energia modificada**



Através dos resultados de resistência à tração por compressão diametral de amostras de solo-cal-RCD foi observado um aumento de resistência em função do tempo para cada energia de moldagem. Na mistura M1 com um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 90$  kPa para a energia normal,  $q_u = 90$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 236$  kPa para a energia modificada. Na mistura M2 com um tempo de cura de 180 dias foi obtido uma resistência média  $q_u = 119$  kPa para a energia normal,  $q_u = 199$  kPa para a energia intermediária e  $q_u = 225$  kPa para a energia modificada. Na energia normal, as resistências aumentaram de 32 kPa para 90 kPa na mistura M1 e de 43 kPa para 119 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia intermediária, as resistências aumentaram de 32 kPa para 90 kPa na mistura M1 e de 75 kPa para 199 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Na energia modificada, as resistências aumentaram de 65 kPa para 236 kPa na mistura M1 e de 95 kPa para 225 kPa na mistura M2, entre 0 e 180 dias de cura. Comparando as máximas obtidas entre solo-cal e solo-cal-RCD, obtém-se uma resistência 120% maior para o solo-cal na mistura de 9% com cura de 90 dias na energia normal, comparado à mistura 2, com cura de 90 dias na energia normal. Na energia intermediária, a mesma comparação é feita, e o solo-cal obteve uma resistência 128% maior. Na energia modificada, o solo-cal obteve uma resistência 160% maior na mesma comparação.

O efeito de cimentação provocado pela cal foi mais efetivo nas amostras somente do tipo solo-cal, tal fato ocorre por ter maior quantidade de solo fino e, conseqüentemente, maior o efeito provocado pela cal.

## 4.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

### 4.7.1 Análise de Variância da Resistência à Compressão Simples

A análise de variância dos resultados de resistência à compressão simples foi realizada com os fatores controláveis quantidade de cal e tempo de cura, apenas nas amostras de sol-cal, para um nível de significância de 95%. A Tabela 11 apresenta a análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal, foram analisadas somente as amostras da energia de compactação normal e com tempo de cura de 30 dias, pois possuem os menores aumentos de resistência. A coluna SQ é a soma dos quadrados correspondentes a variabilidade causada pelo fator quantidade de cal e o erro residual, QM é o quadrado médio, F é o valor da coordenada correspondente da distribuição F, dada por  $QM(\text{fator})/QM(\text{resíduo})$  e Valor p é o valor da probabilidade de que os resultados obtidos pertençam a uma mesma distribuição ao se modificar o nível do fator controlável. Probabilidades inferiores a 5% significam que os resultados pertencem a distribuições diferentes, ou seja, o fator controlável provoca alteração significativa nos resultados.

**Tabela 11 – Análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal**

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Valor p	Significância
Quantidade de cal	29416,4	3	9805,47	12,63	0,00327	Significante
Resíduo	5436,16	7	776,594			
Total	34852	10				

Ao analisar a Tabela 11 observa-se que o Valor p é inferior a 0,05, conseqüentemente, o fator de controle quantidade de cal é uma variável significativa nos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal.

A Tabela 12 apresenta a análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal, foram analisadas somente as amostras da energia de compactação normal e com 3% de adição de cal, pois possuem os menores aumentos de resistência.

**Tabela 12 – Análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal**

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Valor p	Significância
Tempo de cura	184117	3	61372,3	30,85	0,0002087	Significante
Resíduo	13926,8	7	1989,54			
Total	198044	10				

A Tabela 12 apresenta o Valor p inferior a 0,05, conseqüentemente, o fator de controle tempo de cura é uma variável significativa nos resultados de resistência à compressão simples das amostras de solo-cal.

#### 4.7.2 Análise de Variância da Resistência à Tração

A Tabela 13 apresenta a análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal, foram analisadas somente as amostras da energia de compactação normal e com tempo de cura de 30 dias, pois possuem os menores aumentos de resistência.

**Tabela 13 – Análise de variância da variável quantidade de cal dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal**

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Valor p	Significância
Quantidade de cal	4150,27	3	1383,42	7,343	0,01099	Significante
Resíduo	1507,16	8	188,395			
Total	5657,43	11				

Ao analisar a Tabela 13 observa-se que o Valor p é inferior a 0,05, conseqüentemente, o fator de controle quantidade de cal é uma variável significativa nos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal.

A Tabela 14 apresenta a análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal, foram analisadas somente as amostras da energia de compactação normal e com 3% de adição de cal, pois possuem os menores aumentos de resistência.

**Tabela 14 – Análise de variância da variável tempo de cura dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal**

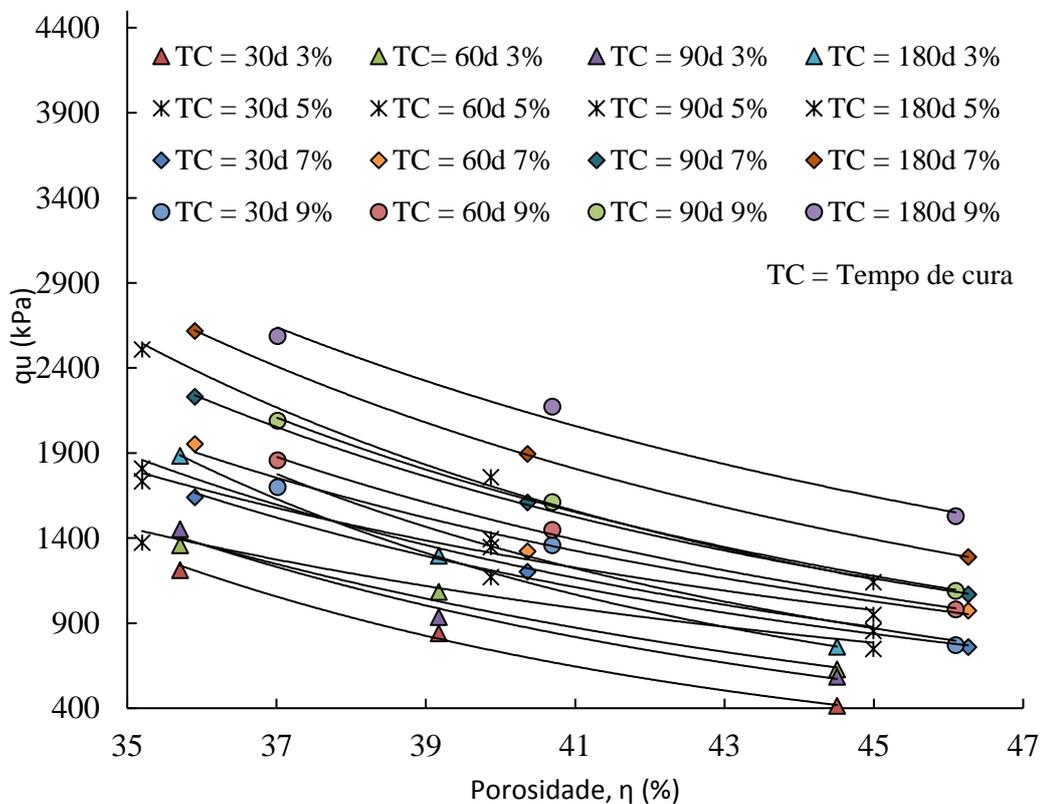
Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Valor p	Significância
Tempo de cura	4647,09	3	1549,03	66,75	$5,325 \times 10^{-5}$	Significante
Resíduo	139,23	6	23,2049			
Total	4786,32	9				

Ao analisar a Tabela 14 observa-se que o Valor p também é inferior a 0,05, conseqüentemente, o fator de controle quantidade de cal também é uma variável significativa nos resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo-cal.

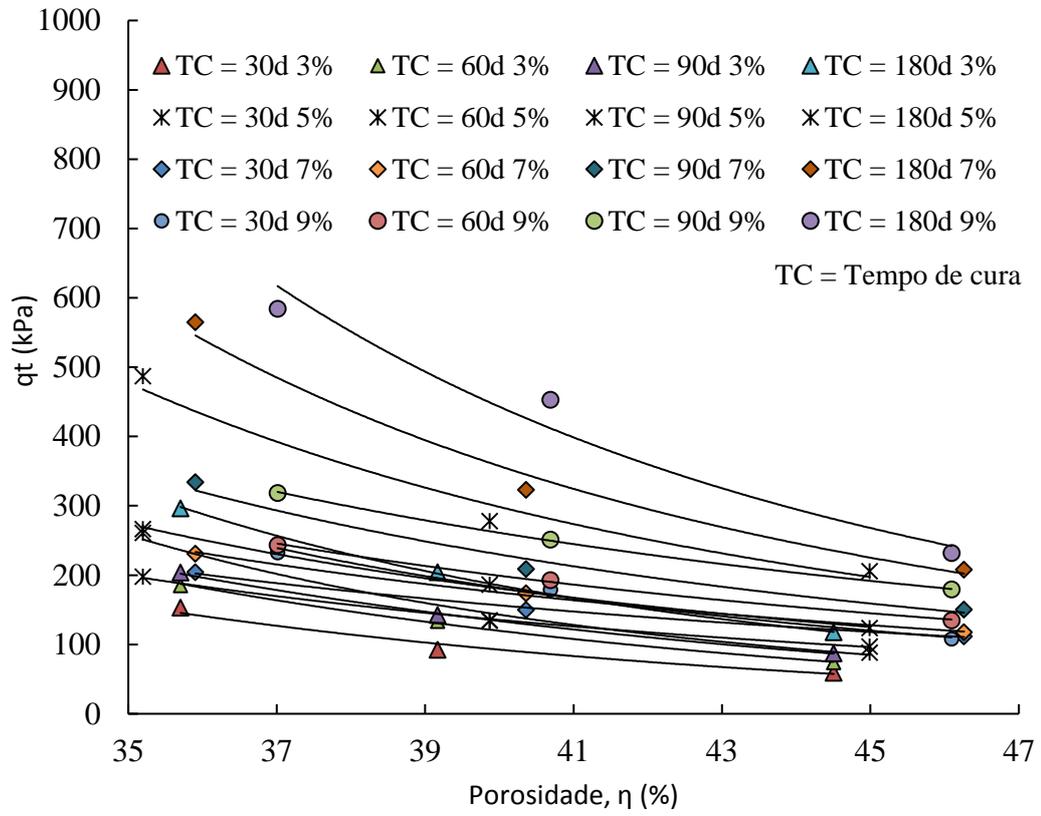
#### 4.8 EFEITOS DA POROSIDADE NAS AMOSTRAS DE SOLO-CAL

A variação da resistência à compressão simples nas amostras de solo-cal com a porosidade é apresentada na Figura 40. Como a porosidade afeta a resistência à tração por compressão diametral das amostras solo-cal é apresentado na Figura 41.

**Figura 40 – Variação da porosidade com a resistência à compressão simples de amostras solo-cal**



**Figura 41 – Variação da porosidade com a resistência à tração por compressão diametral de amostras solo-cal**



As equações de regressão para cada curva apresentada nos gráficos das Figuras 40 e 41 são apresentadas na Tabela 15, com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 15 – Equações de regressão da variação da porosidade com a resistência à compressão simples e com a resistência à compressão diametral das amostras solo-cal**

Tempo de cura (dias)	Mistura	$q_u$ ( $\eta$ )	$R^2$ (%)	$q_t$ ( $\eta$ )	$R^2$ (%)
30	3%	$q_u = 101069e^{-0,123\eta}$	99,63	$q_t = 6283,3e^{-0,105\eta}$	97,54
	5%	$q_u = 12988e^{-0,063\eta}$	94,27	$q_t = 2486,6e^{-0,072\eta}$	99,38
	7%	$q_u = 24075e^{-0,075\eta}$	99,91	$q_t = 1611,9e^{-0,058\eta}$	99,11
	9%	$q_u = 46341e^{-0,088\eta}$	98,15	$q_t = 5541,7e^{-0,085\eta}$	99,49
60	3%	$q_u = 33657e^{-0,089\eta}$	98,72	$q_t = 7784,3e^{-0,104\eta}$	99,83
	5%	$q_u = 27761e^{-0,077\eta}$	99,03	$q_t = 12020e^{-0,11\eta}$	97,70
	7%	$q_u = 20484e^{-0,066\eta}$	97,73	$q_t = 2409,3e^{-0,065\eta}$	99,99
	9%	$q_u = 25312e^{-0,07\eta}$	99,97	$q_t = 2701,5e^{-0,065\eta}$	99,98
90	3%	$q_u = 53672e^{-0,102\eta}$	98,91	$q_t = 6214,6e^{-0,096\eta}$	99,89
	5%	$q_u = 15612e^{-0,062\eta}$	98,27	$q_t = 4171,9e^{-0,078\eta}$	99,99
	7%	$q_u = 28329e^{-0,071\eta}$	99,97	$q_t = 4859,3e^{-0,076\eta}$	96,69
	9%	$q_u = 29839e^{-0,072\eta}$	1,00	$q_t = 3302,2e^{-0,063\eta}$	99,99
180	3%	$q_u = 73255e^{-0,103\eta}$	99,96	$q_t = 12492e^{-0,105\eta}$	99,99
	5%	$q_u = 42978e^{-0,081\eta}$	99,91	$q_t = 10057e^{-0,087\eta}$	96,09
	7%	$q_u = 30255e^{-0,068\eta}$	99,92	$q_t = 16444e^{-0,095\eta}$	97,80
	9%	$q_u = 22893e^{-0,059\eta}$	99,31	$q_t = 28014e^{-0,103\eta}$	97,93

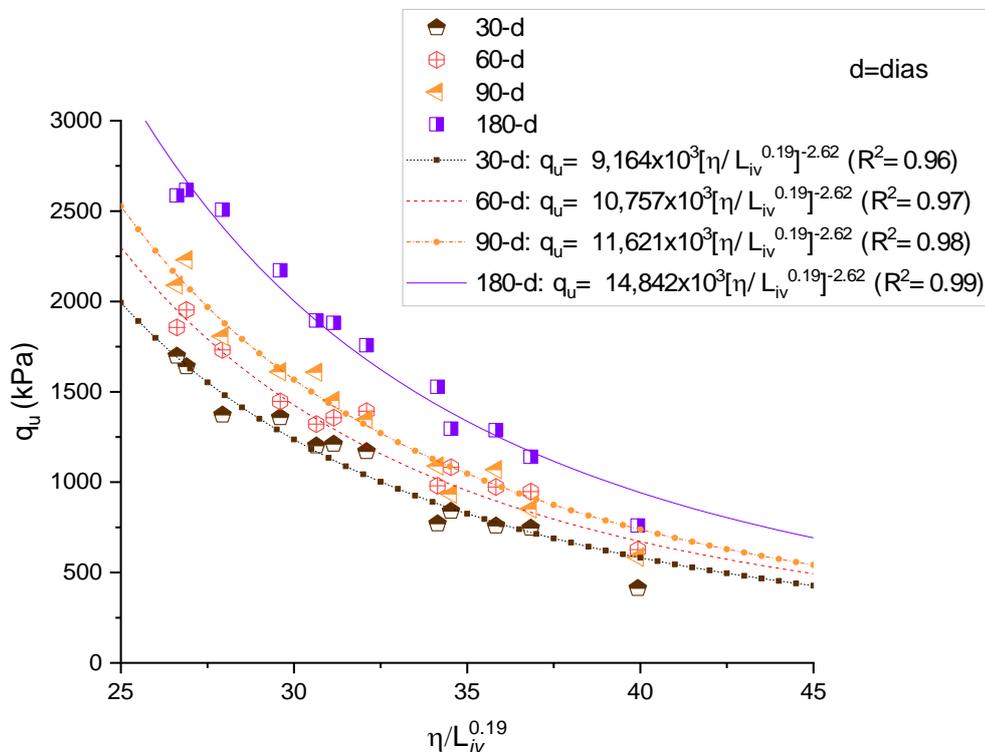
A resistência à compressão simples aumenta com a redução da porosidade de misturas compactadas de solo-cal. O mesmo comportamento é observado nas amostras submetidas à tração por compressão diametral, um claro aumento da resistência com a redução da porosidade. O efeito benéfico de redução de porosidade em amostras submetidas a ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foi inicialmente exposto por mais pesquisadores (MOORE *et al.*, 1970; CONSOLI *et al.*, 2012). Em particular, Chang e Woods (1992) mostram através de microscópio eletrônico em areias com diferentes materiais cimentantes que existe um grande contato entre partículas e, conseqüentemente, uma grande possibilidade de cimentação dos materiais para promover a ligação efetiva desse contato entre grãos, explicando o aumento da resistência à compressão simples.

#### 4.9 EFEITOS DA POROSIDADE POR QUANTIDADE DE CAL NAS AMOSTRAS DE SOLO-CAL

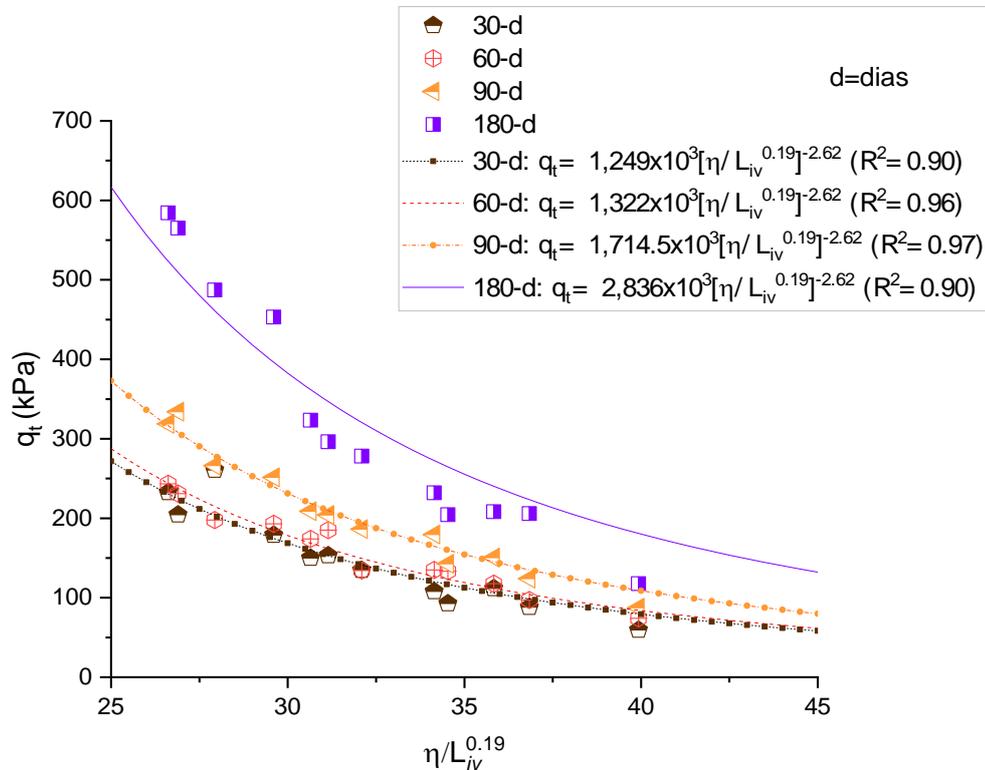
Em solos tratados com cal, uma importante relação é a de vazios por quantidade de cal, expressa anteriormente na Equação 2. De acordo com Consoli *et al.* (2012, 2016), a relação de vazios por quantidade de cal afeta diretamente e indiretamente as resistências à compressão simples e à tração, respectivamente. A tendência das resistências é crescer quanto maior for a quantidade de cal adicionada, conforme uma potência. Um expoente de 0,19 na variável L (quantidade de cal) fornece a melhor adequação para as misturas estudadas neste trabalho, considerando todas as combinações de expoentes variando entre 0,01 até 1,00 e todos os tempos de cura.

Os resultados da variação da resistência à compressão simples e da tração por compressão diametral, por diferentes tempos de cura e com a relação de porosidade por quantidade de cal, são apresentados nas Figuras 42 e 43, respectivamente.

**Figura 42 – Variação da relação porosidade por quantidade de cal com a resistência à compressão simples de amostras solo-cal**



**Figura 43 – Variação da relação porosidade por quantidade de cal com a resistência à tração por compressão diametral de amostras solo-cal**



Os valores de porosidade por quantidade de cal variam entre 27 e 40 para ambos  $q_u$  e  $q_t$ . Os resultados de resistência por compressão simples variam entre 400-1.650, 700-1.900, 650-2.225 e 760-2.617 kPa depois de 30, 60, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral variam entre 55-230, 65-240, 95-340 e 125-585 kPa depois de 30, 60, 90 e 180 dias de cura, respectivamente. O maior valor de  $q_u$  alcançado é de 2.617 kPa, com 180 dias de cura. Os resultados de  $q_u$  e  $q_t$  dependem principalmente do número de vazios, peso unitário seco e volume de cal adicionada na moldagem das amostras. Portanto, as razões de  $q_u$  por  $\eta/L$  e  $q_t$  por  $\eta/L$  podem ser usadas como parâmetros para avaliar as quantidades de cal adicionadas, para determinado tempo de cura, assim podendo obter uma resistência desejada.

#### 4.10 RELAÇÃO OBTIDA ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A partir dos resultados obtidos na compressão simples e na tração por compressão diametral, a relação  $q_t/q_u$  pode ser calculada para diferentes tempos de cura, como listado na Tabela 16.

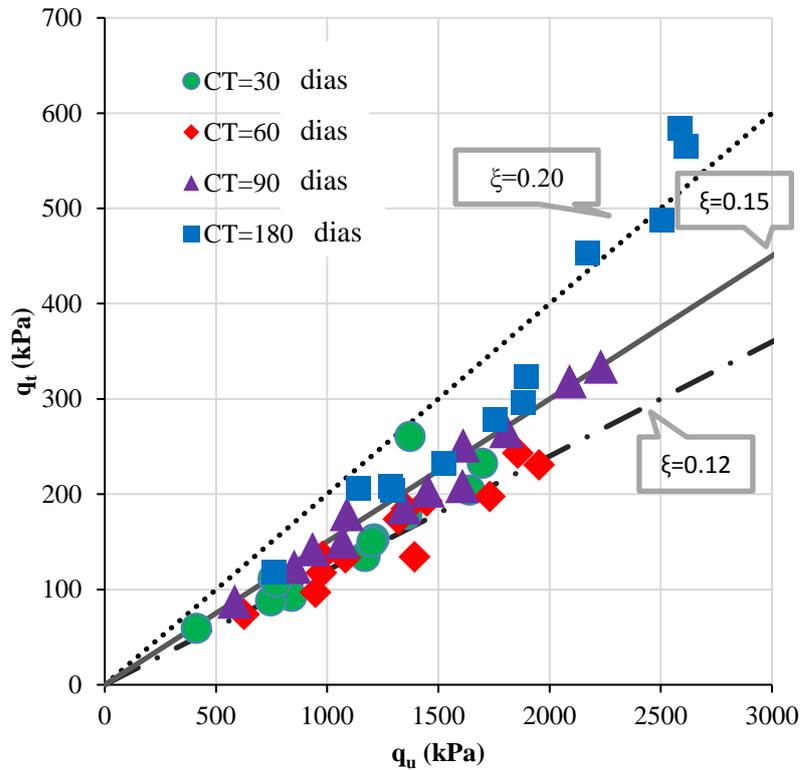
**Tabela 16 – Equações de controle da razão  $q_t/q_u$  para diferentes tempos de cura**

Tempo de cura	Equações para a razão $q_t/q_u$
30	$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{1,249 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}}{9,164 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}} = 0.136$
60	$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{1,322 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}}{10,757 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}} = 0.129$
90	$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{1,714.5 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}}{11,621 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}} = 0.147$
180	$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{2,836 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}}{14,842 \times 10^3 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.19}} \right]^{-2.62}} = 0.190$

**Nota:**  $\xi = q_t/q_u$

A relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples é apresentada na Figura 44, para todas as quantidades de cal, tempos de cura e diferentes energias de compactação.

**Figura 44 – Relação  $q_t / q_u$  das misturas solo-cal em diferentes curas nas energias normal, intermediária e modificada**



Nota:  $\xi = q_t/q_u$

Pode ser observado que a relação entre  $q_t$  e  $q_u$  não depende da relação porosidade por quantidade de cal, e segue uma tendência de crescimento, conforme observado na Tabela 16.

#### 4.11 MÓDULO RESILIENTE

O resultados obtidos através do ensaio de módulo resiliente e os coeficientes de regressão dos modelos de Aranovich (1985) estão resumidos e apresentados na Tabela 17. Foram ensaiadas as amostras com 90 dias de cura, de todas as misturas e nas energias normal, intermediária e modificada.

**Tabela 17 – Módulo resiliente e coeficientes de regressão para amostras com 90 dias de cura em diferentes energias de moldagem**

Energia de compactação	Mistura	MR (MPa)	k1 (MPa)	k2 (MPa)	R <sup>2</sup> (%)
Energia Normal	3%	69	83,67	0,2196	75,44
	5%	172	203,00	0,1849	91,14
	7%	200	223,18	0,1242	62,65
	9%	501	544,06	0,0927	81,04
	M1	622	751,40	0,2129	89,94
	M2	804	830,60	0,0371	87,28
Energia Intermediária	3%	128	134,06	0,1961	73,11
	5%	166	200,53	0,2130	89,22
	7%	294	322,80	0,0778	69,39
	9%	493	540,35	0,1114	87,81
	M1	594	738,50	0,2499	87,63
	M2	1008	1043,50	0,0267	63,44
Energia Modificada	3%	252	279,72	0,1528	64,51
	5%	558	632,50	0,1570	89,55
	7%	744	789,52	0,0641	70,86
	9%	800	844,80	0,0995	89,38
	M1	1220	1496,90	0,2460	86,38
	M2	2554	2581,10	0,0138	88,44

As envoltórias do módulo resiliente são apresentadas nas Figuras 45 a 50. Todas as misturas se comportaram como modelo arenoso-argilosos. A Figura 51 apresenta um resumo dos resultados de módulo resiliente de todas as misturas nas energias normal, intermediária e modificada. O valor do módulo resiliente é calculado com o último par de tensões do ensaio triaxial dinâmico, que representa o nível de tensão mais elevado:  $\sigma_d = 0,412$  MPa e  $\sigma_3 = 0,137$  Mpa. Estes níveis de tensões correspondem, aproximadamente, às condições em que os materiais são submetidos no topo da camada de base logo abaixo de um revestimento fino, entre 3 a 4 cm, sob um eixo padrão (MARANGON, 2004).

**Figura 45 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 3% de cal nas três energias**

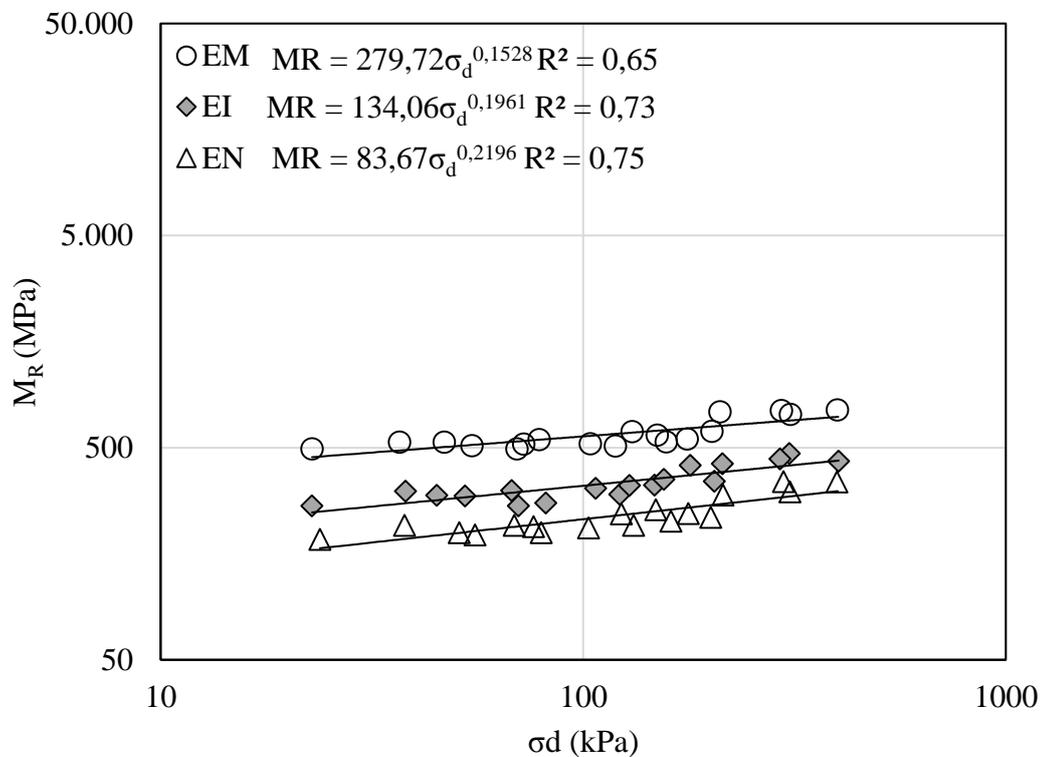


Figura 46 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 5% de cal nas três energias

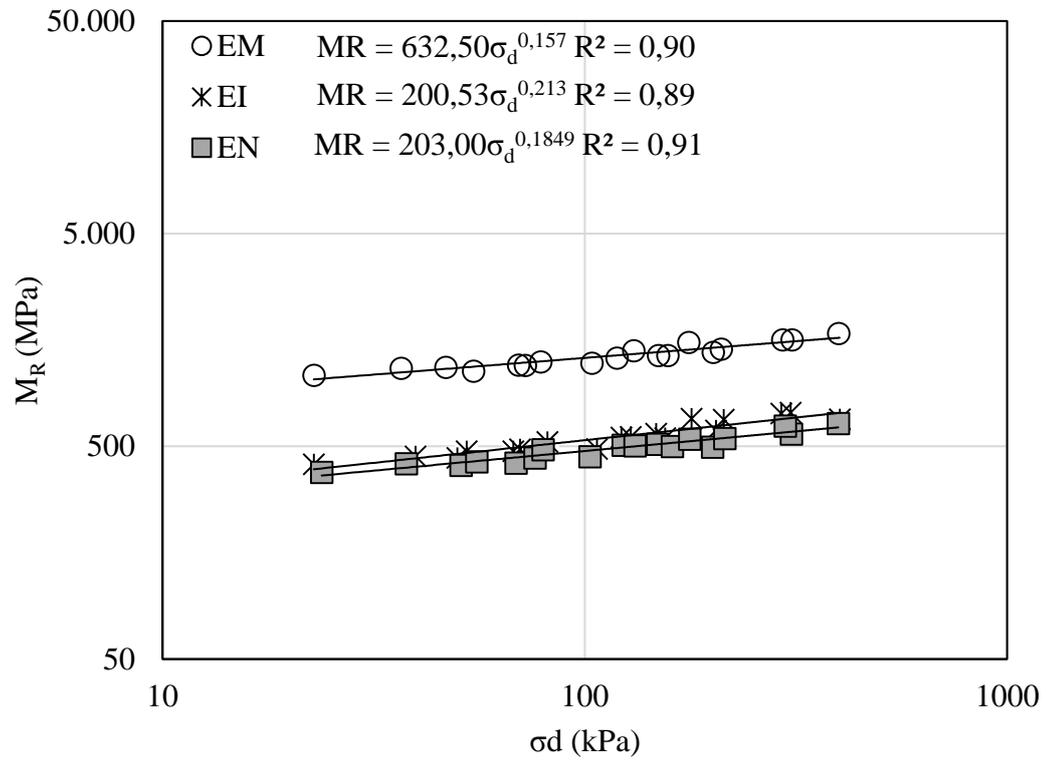


Figura 47 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 7% de cal nas três energias

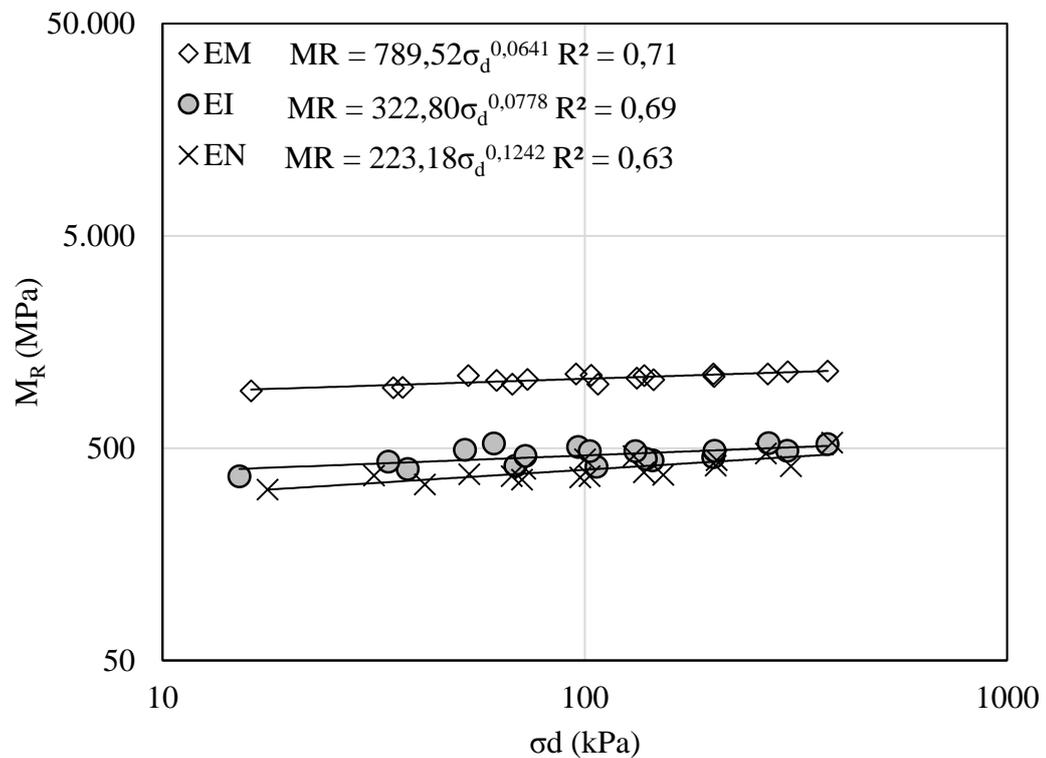


Figura 48 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal com 9% de cal nas três energias

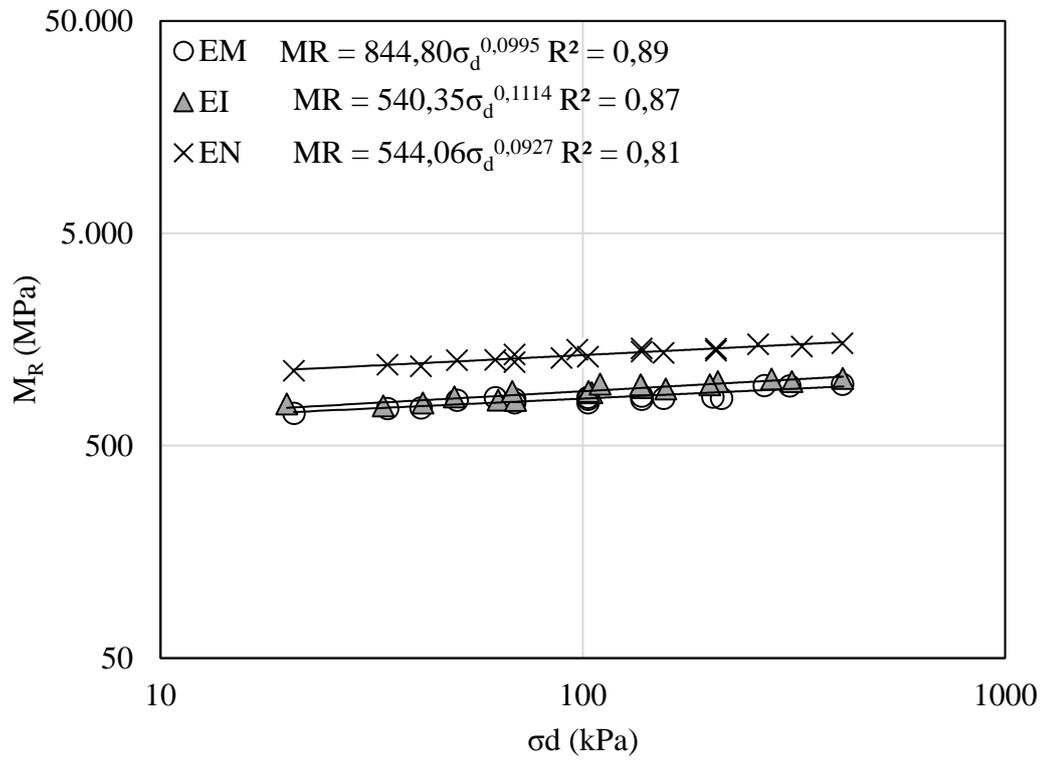


Figura 49 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal-RCD M1 nas três energias

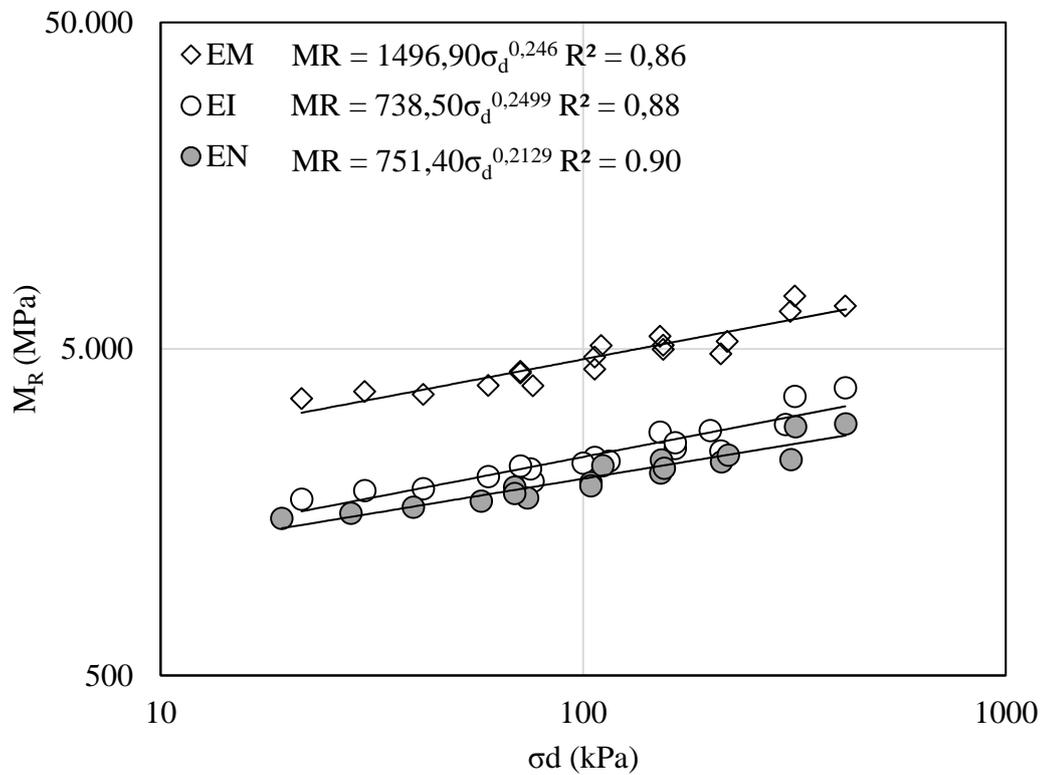


Figura 50 – Envoltória de módulo resiliente da mistura solo-cal-RCD M2 nas três energias

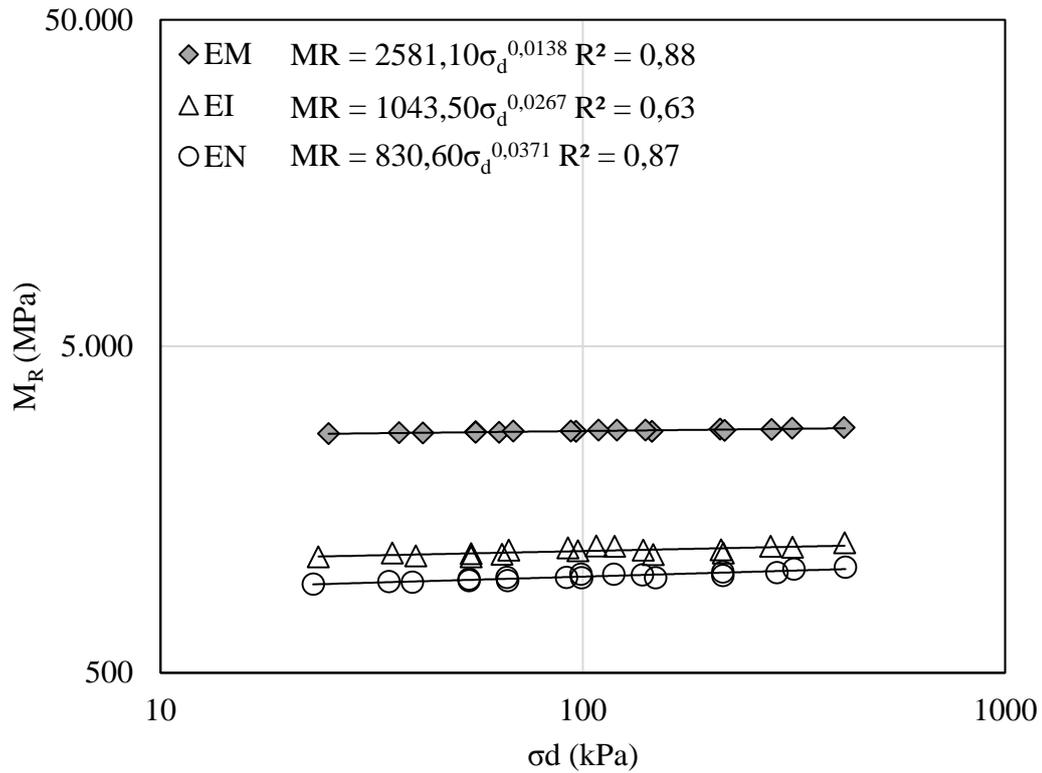
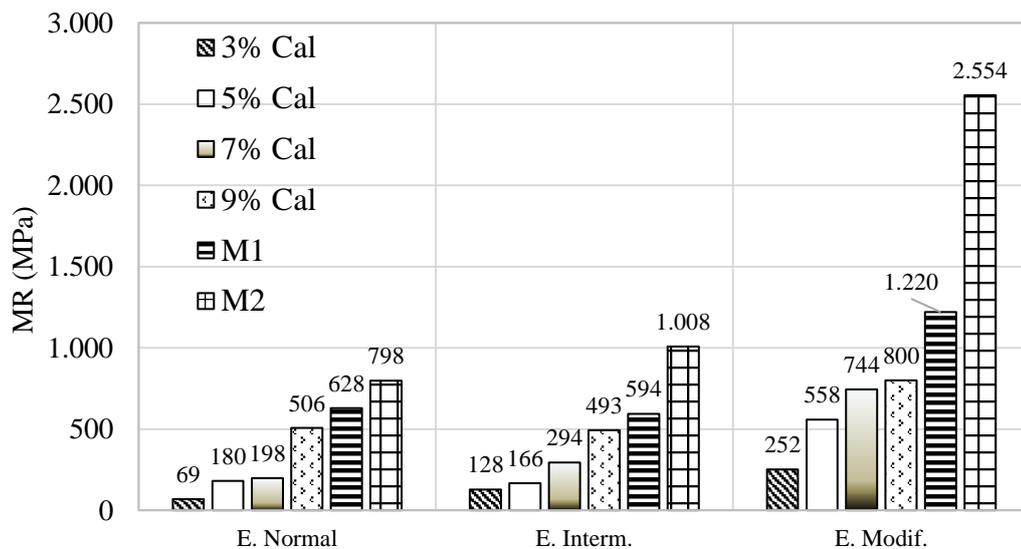


Figura 51 – Módulo resiliente de todas as misturas com 90 dias de cura em diferentes energias de compactação



Marangon (2004) obteve valores de módulo resiliente entre 104 MPa e 446 MPa, para amostras de apenas solo moldadas na energia intermediária, os valores encontrados nesta pesquisa estão entre 128 Mpa e 1008 Mpa, na mesma energia de moldagem. Bastos (2013)

através de ensaios de módulo resiliente em um solo arenoso, encontrou valores médios de 301 MPa. Araújo (2009) através de ensaios de módulo resiliente em um solo argiloso, encontrou, por fim, valores médios de 265 MPa.

A tabela 18 resume os limites estabelecidos pela AASHTO (2008) para aplicação em base e sub-base de pavimentos.

**Tabela 18 – Resumo dos limites de módulo resiliente para pavimentos estabelecidos pela AASHTO (2008)**

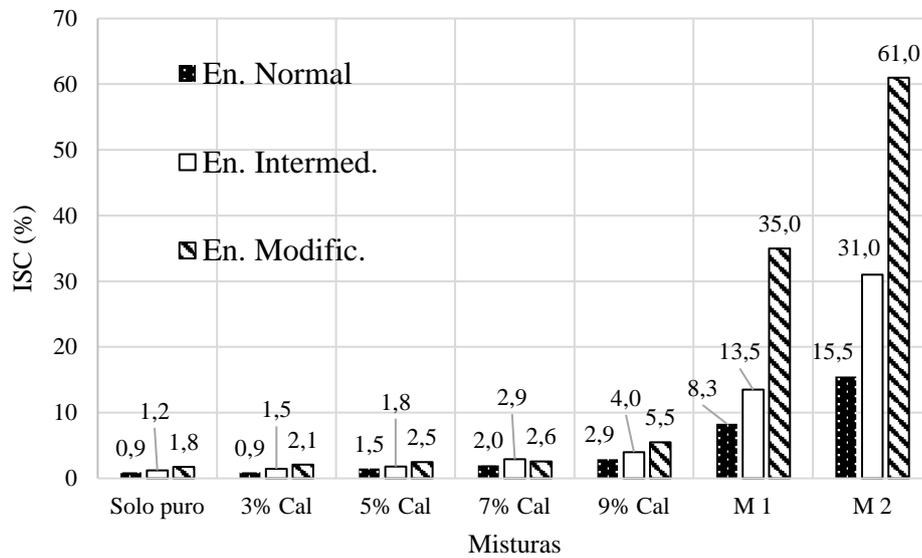
Classificação do solo	Camada	MR (MPa)
A-2-4	Base	220,64
A-2-5	Base	193,06
<b>A-7-5</b>	<b>Base</b>	<b>82,74</b>
A-7-6	Base	55,16
A-2-4	Sub-base	168,92
A-2-5	Sub-base	148,24
<b>A-7-5</b>	<b>Sub-base</b>	<b>89,64</b>
A-7-6	Sub-base	79,29

Comparando os resultados do ensaio de módulo resiliente com os valores estabelecidos pela norma AASHTO (2008) para solos classificados em A-7-5 pela TRB, pode ser observado que todas as energias e todas as misturas de solo-cal e de solo-cal-RCD atendem ao mínimo para uso em base e sub-base de pavimentos, após 90 dias de cura, exceto a mistura de 3% de solo-cal compactada na energia normal.

#### 4.12 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Os valores de Índice de Suporte Califórnia do solo, das misturas solo-cal e solo-cal-RCD moldados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em todas as energias são apresentados na Figura 52.

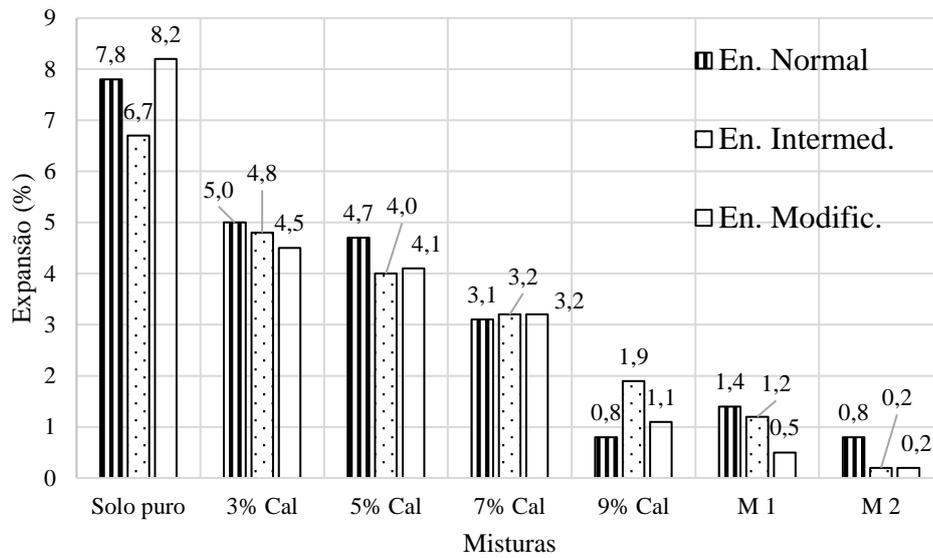
**Figura 52 – Índice de Suporte Califórnia do solo puro e das misturas solo-cal e solo-cal-RCD**



Somente as misturas solo-cal-RCD M1 de energias intermediária e modificada e solo-cal-RCD M2 em todas as energias podem ser usadas para reforço de subleitos, pois atingiram valores maiores que 12%, conforme NBR 15115 (ABNT, 2004). Somente as misturas solo-cal-RCD M1 de energia modificada e solo-cal-RCD M2 de energias intermediária e modificada atingiram o mínimo de 20% exigido para uso em sub-base, conforme NBR 15115 (ABNT, 2004). Somente a mistura solo-cal-RCD M2 de energia modificada pode ser aplicada para base de pavimentos, pois atingiu o mínimo de 60% exigido pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

O comportamento de expansão do solo e das misturas em todas as energias é apresentado na Figura 53.

**Figura 53 – Expansão do solo puro e das misturas solo-cal e solo-cal-RCD**



A adição de cal no solo reduziu a expansibilidade em 87,5% enquanto a adição de RCD no solo diminuiu sensivelmente a expansibilidade. Somente as misturas de solo-cal de 9% e de solo-cal-RCD M1 e M2 ficaram abaixo da expansão máxima permitida de 2% para aplicação em subleitos, exigida pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi o de analisar a influência da adição da cal e resíduos da construção e demolição, da relação de porosidade e do teor de umidade de moldagem, sobre a resistência de um solo tropical silto-arenoso natural da Formação Geológica de Guabirotuba, para uso em pavimentos. Para alcançar tais objetivos, foi obtida a classificação do solo segundo a SUCS, TRB e MCT, através de ensaios de caracterização, da umidade ótima de moldagem e do peso específico aparente seco máximo de todas as misturas através do ensaio de compactação. Prosseguiu-se com os seguintes ensaios de resistências para todas as misturas: resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral (em diferentes tempos de cura), módulo resiliente (apenas para o tempo de cura de 90 dias) e índice de suporte Califórnia. Em face do que foi alcançado, conclui-se que:

- Os resultados de caracterização do solo coletado na Formação Geológica de Guabirotuba, em Curitiba/PR, indicam um solo silte arenoso de alta plasticidade, não laterítico;
- A análise de pH do solo com quantidades variadas de cal resultou em potencial reativo entre o solo e cal, a reatividade entrou em constância a partir de 9% de cal;
- Os resultados de Limites de Atterberg mostram que o limite de liquidez cresceu 4% com a adição de cal, já o limite de plasticidade cresceu 16,7%, conseqüentemente o índice de plasticidade reduziu 28,5% com o efeito da adição de cal. Nas misturas com a adição de resíduos, o limite de liquidez reduziu 4% e 8%, o limite de plasticidade cresceu 11% e 28% e o índice de plasticidade resultou e uma queda de 50% e 86%, para M1 e M2, respectivamente;
- O ensaio de compactação demonstrou que nas misturas de solo-cal ocorre um aumento da umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) e uma redução do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) conforme cresce o teor de cal na mistura, para todas as energias. Em misturas de solo-cal-RCD, foi observada uma redução da umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) e um aumento do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) conforme cresce o teor de resíduos na mistura, para todas as energias;
- A adição de cal no solo reduziu a expansibilidade em 87,5% enquanto a adição de RCD no solo diminuiu sensivelmente a expansibilidade;
- Os resultados de resistência à compressão simples nas amostras de solo-cal demonstraram alto crescimento quando adicionado cal na mistura e submetidos a um processo

de cura, com valores entre 300% e 700% de crescimento entre curas de 0 e 180 dias. Ocorreu de fato, portanto, um processo de cimentação.

- Os resultados de resistência à tração por compressão diametral nas amostras de solo-cal também demonstraram alto crescimento quando adicionado cal na mistura e submetidos a um processo de cura, com valores entre 984% e 1062% de crescimento entre curas de 0 e 180 dias. Ocorreu, também, um processo de cimentação das amostras;

- Existe um efeito direto na relação entre a porosidade por quantidade de cal na resistência à compressão simples e na resistência à tração por compressão diametral, e é possível formular uma equação de dosagem para estimar resultados de  $q_u$  e  $q_t$  em tempos de cura, porosidade e quantidade de cal desejada. Cada tempo de cura se comporta como uma equação exponencial de expoente igual a -2,62, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 42 e 43;

- O uso do expoente 0,19 na quantidade de cal volumétrica permite estabelecer uma melhor determinação de pontos experimentais de amostras sujeitas à compressão simples ou à tração por compressão diametral, e, correlaciona todos os tempos de cura através da relação porosidade por quantidade de cal;

- Existe uma relação global entre  $q_t$  e  $q_u$  para o solo da pesquisa e esta cresce conforme o tempo de cura, sendo de 0,136; 0,129; 0,147 e 0,19 para os tempos de cura de 30, 60, 90 e 180 dias, respectivamente;

- Os ensaios de Módulo Resiliente apontaram que as misturas solo-cal e solo-cal-RCD se comportam como misturas argilo-arenosas, e os resultados aumentaram conforme a maior quantidade de cal e conforme maior quantidade de RCD, entre 58% e 265% nas misturas solo-cal, 94% e 220% nas misturas solo-cal-RCD, em 90 dias de cura, quando as misturas são comparadas entre si;

- Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia resultaram em um aumento entre 212% e 228% quando adicionado cal e um acentuado aumento entre 815% e 3366% quando adicionado RCD na mistura, quando comparados às misturas e o solo puro, respectivamente;

- Finalmente, foi observado que a adição de cal e/ou RCD em solos de baixa resistência mecânica resulta em uma eficiente técnica em engenharia geotécnica, sendo possível aplicar as seguintes misturas: energias intermediária e modificada da mistura solo-cal de 9% de cal e misturas solo-cal-RCD M1 e M2 para reforço de subleitos; energia modificada da mistura solo-cal-RCD M1 e energias intermediária e modificada da mistura solo-cal-RCD M2 para sub-bases e energia modificada da mistura solo-cal-RCD M2 para bases.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os resultados desta pesquisa estão limitados aos ensaios laboratoriais e análises de solo misturado com cal e solo misturado com cal e RCD, portanto, recomenda-se também:

- Analisar as mesmas misturas com outros horizontes da Formação Geológica de Guabirota;
- Executar o ensaio de Módulo de resiliência com um sistema de aquisição de dados onde as leituras sejam de 0,1 segundos de aplicação de carga e 0,9 segundos de alívio, conforme norma padronizada;
- Dimensionamento de um pavimento com os materiais da pesquisa seguindo o método da resiliência;
- Analisar o RCD com o microscópio de varredura eletrônica, para obter os componentes existentes no material;
- Executar um pavimento teste com base, sub-base e subleito com os materiais estudados nesta pesquisa, para comparar efetivamente resultados de laboratório com resultados de campo e;
- Realizar ensaios triaxiais nas mesmas amostras para obter outros parâmetros; Obter as curvas características de sucção das amostras.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 324**: Mechanistic–empirical pavement design guide – a manual of practice. Washington, DC, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, Estados Unidos, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM D-2487**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, Estados Unidos, 2017.

ARANOVICH, L. A. S. **Desempenho de pavimentos de baixo custo no Estado do Paraná**. 1985. 359 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement sub-base applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 25, n. 8, p. 1077-1088, ago. 2013. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2013. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_edicoes.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm)>, Acesso em: 07 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção de solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

AZEVEDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** 2010. 178 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALDOVINO, J. J. A. **Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica Guabirotuba tratado com cal em diferentes tempos de cura.** 2018. 174 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza.** 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BEHIRY, A. E. A. E. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. **Ain Shams Engineering Journal**, Egito, v. 4, n. 4, p. 661-673, dez. 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.02.005>.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**. Brasília, 02 ago. 2010.

CASTRO, C. A. A. **Estudo da Técnica de Anti-Pó com Emulsão de Xisto em Pavimentos para Baixo Volume de Tráfego**. 2003. 174 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, Reston, v. 118, n. 8, p. 1216–1233, aug. 1992.

CHAMECKI, P. R. **Metodologias de laboratório para o estudo da erosão hídrica em solos: aplicação a uma argila da Formação Guabirotuba**. 2002. 260 F. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

CHEVALIER, C.; HAGHIGHI, I.; HERRIER, G. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCOUR AND EROSION, 6., 2012, Paris. **Proceedings...** Paris: SHF, 2012, 10 p. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:c5d81b0a-6b94-4cb2-8211-44e9d97f80df/datastream/OBJ/download>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Publicada no DOU nº 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96. **Diário Oficial da União**. Brasília, 5 jul. 2002.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; FONINI, A. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 135, n.12, p. 1846-1856, dez. 2009. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000158.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; GAUER, E. A.; DOS SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. **Geotechnique Letters**, Londres, v. 2, n. 3, p. 81–85, dez. 2012. doi: 10.1680/geolett.12.00014.

CONSOLI, N. C.; QUIÑÓNEZ, R. A.; GONZÁLEZ, L. E.; LÓPEZ, R. A. Influence of molding moisture content and porosity/cement index on stiffness, strength, and failure envelopes of artificially cemented finegrained soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 29, n. 5, p. 1422-1426, mai. 2016. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001819](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819).

CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; DONATO, M.; GRAHAM, J. Loading tests on compacted soil, bottom ash and lime layers. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, Londres, v. 161, n. 1, p. 29-38, feb. 2008. doi: <https://doi.org/10.1680/geng.2008.161.1.29>.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 610 p. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DEGROOT, G. **Soil-Cement Protection on Bureau of Reclamation Features**. Denver: Bureau of Reclamation Report RECERC-71-20, 104 f., 1971.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DER – M 196**: Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT. Brasília, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 093**: Solos – determinação da densidade real – método de ensaio. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 080**: Solos – análise granulométrica por peneiramento – método de ensaio. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 051**: Solos – análise granulométrica por sedimentação – método de ensaio. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 122**: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 082:** Solos – determinação do limite de plasticidade – método de ensaio. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 081:** Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo – método de ensaio. Brasília, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 256:** Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão – método de ensaio. Brasília, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 172:** Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio. Brasília, 2016.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 164:** Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 134:** Pavimentação – Solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação.** Publicação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 3ª edição. Rio de Janeiro, 2006.

SUMÁRIO MINERAL. Brasília: DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/cal-sumario-mineral-2014>> Acesso em: 10 abr. 2018.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record**, Washington, DC, v. 139, p. 61–72, 1966.

FAZZANI, V. M. F. C. **Estudo comparativo de um solo laterítico e um saprolítico com cimento e cal.** 1993. 100 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FOSTER, S. W. A view on recycling concrete pavements. In: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION INTERNATIONAL CENTER FOR AGGREGATES RESEARCH SYMPOSIUM, 5., 1997, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC, 1997. 8 p.

GEORGE, S. Z.; PONNIAH, D. A.; LITTLE, J. A. Effect of temperature on lime-soil stabilization. **Construction & Building Materials**, Londres, v. 6, n. 4, p. 193–256, dec. 1992. doi: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(92\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0950-0618(92)90050-9).

GODOY, H. **Identificação e Classificação Geotécnica de Latossolos do Estado de São Paulo pelo Método das Pastilhas MCT**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

HERRIER, G.; BERGER, R.; BONELLI, S. The Friant-Kern canal: a forgotten example of lime-treated structure in hydraulic conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCOUR AND EROSION, 6., 2012, Paris. **Proceedings...** Paris: SHF, 2012. 8 p. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00756122/document>>. Acesso em: 04 mai. 2019. [a]

HERRIER, G.; CHEVALIER, C.; FROUMENTIN, M.; CUISINER, O.; BONELLI, S.; FRY, J. Lime Treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCOUR AND EROSION, 6., 2012, Paris. **Proceedings...** Paris: SHF, 2012. 8 p. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00757229/document>>. Acesso em: 04 mai. 2019. [b]

HOWARD, A. K.; BARA, J. P. **Lime stabilization on Friant-Kern canal**. Estados Unidos: Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, 1976.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 374 p., 1972.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2013. 271 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JUNIOR, L. S. L. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. 2011. 226 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

\_\_\_\_\_. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 148 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirota: estudos de campo e laboratório**. 2002. 448 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LOPES, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. 2011. 226 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, aplicado à Pavimentação**. 2004. 164 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MACEDO, C. M.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Geomechanical Behavior of Soil Mixtures with Tire Residues and Construction and Demolition Waste. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, Oklahoma, v. 21, n. 19, p. 6393-6410, 2016.

MARANGON, M. **Proposição de estruturas típicas de pavimentos para região de Minas Gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e resiliência**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MINEROPAR. **Características geológico-geotécnicas na formação Guabirotuba: Erosão – movimentos gravitacionais de massa**. Curitiba: Serviço Geológico do Paraná – Mineropar, 2011.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. Estados Unidos: Wiley, Hoboken, 3<sup>a</sup> ed., 2005.

MOORE, R. K.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. Factors affecting the tensile strength of cement-treated materials. **Highway Research Record**, Washington, DC, v. 315, p. 64–80, 1970.

MOREIRA, E. B. **Comportamento Mecânico de Solos Argilosos Misturados com Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Pavimentação**. 2018. 145 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MOTTA, L. M. G. Aspectos dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de alguns países comparados aos critérios propostos para o novo método brasileiro. **Estradas**, Rio Grande do Sul, ano 16, n. 22, p. 12-24, nov. 2017.

NOBREGA, M. T. As reações dos argilo-minerais com a cal. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 5., **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Cal, 1985.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ – CNPq, 1981.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 171 f. Dissertação (Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; BRITO, J. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Philadelphia: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2013.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavements Design and Materials**. Estados Unidos: John Wiley & Sonds, 2008.

REVISTA GERAÇÃO SUSTENTÁVEL. Curitiba: PSG Editora, ano 5, n. 24, jul.-ago. 2011. ISSN 1984-9699. Disponível em: <[https://issuu.com/revistageracaosustentavel/docs/gs\\_24\\_bx\\_site](https://issuu.com/revistageracaosustentavel/docs/gs_24_bx_site)>. Acesso em: 11 mai. 2019.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, Londres, v. 125, n. 3, p. 242-249, out. 1997. doi: <https://doi.org/10.1680/igeng.1997.29660>

SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba**. 1998. 233 fls. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1998.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, Londres, v. 2, n. 1, p. 27-32, jan. 1998. doi: <https://doi.org/10.1680/gi.1998.020105>.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, DNER, 1981.

TRAN, T. D.; CUI, Y.; TANG, A. M.; AUDIGUIER, M.; COJEAN, R. Effects of Lime Treatment on the Microstructure and Hydraulic Conductivity of Héricourt Clay. **Journal of Rock**

**Mechanics and Geotechnical Engineering**, França, v. 6, n. 5, p. 399–404, out. 2014. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.07.001

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington: TRB, 1987. 58 p. (State of the art report, 5).

USBR – U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. **Earth Manual**. 3. ed. Denver: Bureau of Reclamation, 1998.

VAN IMPE, W. F. **Soil improvement techniques and their evolution**. 1. ed. Estados Unidos: CRC Press, 1989.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2009.

WERK, S. M. S. **Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos**. 2000. 118 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.