

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO FRANCISCO JORDÃO AVILES

**VARIAÇÃO DO MÓDULO RESILIENTE EM UM SOLO VERMELHO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA APÓS A ADIÇÃO DE CAL PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

CURITIBA

2022

MARCELO FRANCISCO JORDÃO AVILES

**VARIAÇÃO DO MÓDULO RESILIENTE EM UM SOLO VERMELHO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA APÓS A ADIÇÃO DE CAL PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

**Variation in the resilient modulus of a red soil from the guabirotuba formation
due to the addition of lime for paving**

Trabalho de conclusão de curso apresentada como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Ronaldo Luis dos Santos Izzo

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARCELO FRANCISCO JORDÃO AVILES

**VARIAÇÃO DO MÓDULO RESILIENTE EM UM SOLO VERMELHO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA APÓS A ADIÇÃO DE CAL PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02/dezembro/2022

Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Matheus David Inocente Domingos
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adauto Jose Miranda de Lima
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vitor Reinaldo Bordignon
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todas as pessoas que de certa forma contribuíram para a realização deste estudo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ronaldo Izzo pelos conselhos e auxílio na realização do estudo.

Ao doutorando Vitor Bordignon pelos auxílios em laboratório e por sua dedicação em me auxiliar em todas as etapas do projeto.

A minha namorada pelos momentos em que ela me ajudou a permanecer focado em meus objetivos e pela paciência que teve, sabendo das dificuldades de disponibilidade de tempo que esta fase propõe.

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o auxílio que me deram para chegar até a universidade e para me manter durante ela. Agradeço a eles também, por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis que passei, vocês são incríveis.

RESUMO

Considerando as atuais práticas utilizadas para aumento módulo resiliente dos solos, que consistem em grande maioria na mistura solo-cimento e tendo em vista seu custo elevado, busca-se através deste estudo estimar a variação causada pela adição da cal no módulo resiliente em um solo vermelho da Formação Guabirota, solo bastante encontrado na região da cidade de Curitiba-PR. Baseado em tal premissa, este trabalho procedeu-se de ensaios laboratoriais, que consistiram na aplicação de cargas repetidas em diferentes pares de tensão através de prensa triaxial, para observar e analisar, com auxílio computacional, a variação causada pela mistura do solo em questão com a cal. Concluiu-se pelo trabalho realizado, através da comparação com os dados de módulo resiliente para o solo vermelho sem adição de outros componentes, que a adição da cal resulta em valores de MR na média de 179,02 MPa (64,72% de aumento) para 7 dias de cura e, 295,67 MPa (172,33% de aumento) para 28 dias de cura

Palavras-chave: módulo resiliente; solo vermelho; solo-cal; módulo de resiliência; formação guabirota.

ABSTRACT

Considering the current practices in use to increase the resilient modulus of soils, which consist mostly of soil-cement mixtures and in view of its high cost, this research aims to estimate the variation caused by the addition of lime in the resilient modulus of a red soil from the Guabirota Formation, soil widely found in the region of the city of Curitiba area, located in the state of Paraná, Brazil. Based on this premise, this research, which consisted of applying repeated loads in different stress pairs through a triaxial press, to observe and analyze, with computational assistance, the variation cause by the lime. It was concluded, through comparison with the resilient modulus data for the red soil without the addition of other components, that the addition of lime results in MR averaging values of 179,02 MPa (64,72% of increase) for 7 days of curing time and, 295,67 MPa (172,33% of increase) for 28 days of curing time.

Keywords: resilient modulus; red soil; soil-lime; guabirota formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil típico da Formação Guabirota	18
Figura 2 - Local de coleta do solo utilizado para a realização deste estudo	26

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Estufa do laboratório de Geotecnia da Sede Ecoville da UTFPR	28
Fotografia 2 - Peneira 4,8 mm utilizada	29
Fotografia 3 – Mão de gral e almofariz utilizados para destorroamento de solo	29
Fotografia 4 - Mistura do solo com a cal	30
Fotografia 5 - Mistura do solo-cal com a água	31
Fotografia 6 - Cilindro metálico de tamanho pequeno utilizado no ensaio de compactação	32
Fotografia 7 - Soquete pequeno utilizado para ensaio de compactação	32
Fotografia 8 - Amostra após o processo de extrusão.....	33
Fotografia 9 - Cilindro metálico tripartido utilizado para moldagem dos corpos de prova	35
Fotografia 10 - Soquete metálico de tamanho grande utilizado para moldagem dos corpos de prova	36
Fotografia 11 - Corpo de prova, pedras porosas e <i>top-cap posicionados</i>	38
Fotografia 12 - Encamisador e membrana de borracha com anéis elásticos de borracha.....	38
Fotografia 13 - Membrana de borracha posicionada	39
Fotografia 14 – Célula triaxial montada.....	39
Fotografia 15 - LVDT's posicionados	40
Fotografia 16 - LVDT's utilizados no ensaio	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de compactação para o solo	34
Gráfico 2 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos somente por solo vermelho	45
Gráfico 3 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos somente por solo vermelho	45
Gráfico 4 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 7 dias de cura	47
Gráfico 5 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 7 dias de cura.....	48
Gráfico 6 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 28 dias de cura	50
Gráfico 7 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 28 dias de cura.....	50
Gráfico 8 - Representação gráfica 3D das médias entre tensão confinante x tensão desvio x MR referentes aos ensaios dos CP's A, B, C, D, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.	52
Gráfico 9 - Relação entre aumento do MR em relação ao tempo de cura	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências químicas da cal hidratada segundo a NBR 7175	20
Tabela 2 - Exigências físicas da cal hidratada segundo a NBR 7175	20
Tabela 3 - Teores de umidade adotados para o ensaio de compactação	31
Tabela 4 - Massas resultantes do ensaio de compactação para cada ponto.....	33
Tabela 5 - Teores de umidade exatos obtidos através das amostras	34
Tabela 6 - Condições de compactação de corpo de prova em cilindro tripartido para ensaio de módulo de resiliência.....	36
Tabela 7 - Dados medidos após compactação dos corpos de prova	37
Tabela 8 - Sequência de tensões para fase de condicionamento.....	41
Tabela 9 - Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência	41
Tabela 10 - Teores de umidade de ensaio obtidos	42
Tabela 11 - Parâmetros adotados nos ensaios.....	42
Tabela 12 - Constantes de regressão utilizadas para determinação para cada corpo de prova	43
Tabela 13 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's compostos somente por solo vermelho.....	44
Tabela 14 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's moldados compostos por solo e cal hidratada com tempo de cura de 7 dias	46
Tabela 15 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's moldados compostos por solo e cal hidratada com tempo de cura de 28 dias	48
Tabela 16 - Valores médios de módulo resiliente.....	51
Tabela 17 - Aumento médio no MR para os CP's 5, 6, 7 e 8	51
Tabela 18 - Aumento médio no MR para os CP's 1, 2, 3 e 4	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	Califórnia Bearing Ratio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Hz	Hertz
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LDTV	Linear Variable Differential Transformer
MR	Módulo Resiliente
NBR	Normas Brasileiras
TED	Termo de Execução Descentralizada
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
CH	Cal Hidratada
H	Hidrogênio
Mg	Magnésio
O	Oxigênio
L	Teor de Cal
ϵ_r	Deformação Resiliente
σ_3	Tensão Confinante
σ_d	Tensão Desvio
ω	Teor de Umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	FORMAÇÃO GEOLÓGICA DO GUABIROTUBA	17
2.2	A CAL	19
2.3	SOLOS MELHORADOS COM CAL	20
2.3.1	Estabilização de solos	21
<u>2.3.1.1</u>	<u>A importância da estabilização do solo para pavimentação</u>	<u>22</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Estabilização de solos com cal</u>	<u>22</u>
2.4	MÓDULO RESILIENTE (MR)	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	26
3.2	MATERIAIS	26
3.2.1	Solo	26
3.2.2	Cal	27
3.2.3	Água	27
3.3	MÉTODOS	27
3.3.1	Coleta das amostras	27
3.3.2	Preparação das amostras	27
3.3.3	Teor de cal	29
3.3.4	Teor de umidade	29
3.3.5	Tempo de cura	30
3.3.6	Ensaio de compactação	30
3.3.7	Preparação dos corpos de prova	34
3.3.8	Montagem do ensaio	37
3.3.9	Aplicação das cargas repetidas	40
3.3.10	Cálculo do módulo resiliente	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	SOLO VERMELHO PURO	44
4.2	SOLO VERMELHO COM CAL E TEMPO DE CURA DE 7 DIAS	46
4.3	SOLO VERMELHO COM CAL E TEMPO DE CURA DE 28 DIAS	48
4.4	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	51

5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

O primeiro ensaio desenvolvido para avaliação de subleitos e dimensionamento de pavimentos foi o *California Bearing Ratio*, chamado comumente pela sigla CBR. Muito utilizado até os dias atuais, o CBR foi desenvolvido de forma empírica pelo engenheiro James Porter ainda na década de 1920 no estado da Califórnia nos Estados Unidos da América, voltado para o dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Este método conquistou seu espaço em diversos países pela facilidade em sua execução e pelo baixo custo demandado, porém quando feito um estudo mais aprofundado e criterioso, apresenta alguns problemas. Um destes problemas se dá pelo fato do ensaio CBR levar o material estudado à ruptura, ou seja, ele ultrapassa o regime elástico, gerando uma desconformidade com o real comportamento de deformação resiliente do material.

A tendência da substituição do ensaio CBR pelo Módulo de Resiliência se deve pelo fato do MR prever o comportamento da estrutura do pavimento e do solo de subleito durante sua vida útil de forma mais efetiva, já que estuda o material em regime elástico, representando de forma mais fiel a deformação do solo.

O Módulo de Resiliência (MR) foi reconhecido de forma oficial no ano de 1986, quando a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) incorporou o MR como um parâmetro a ser utilizado na caracterização dos materiais geotécnicos dos pavimentos.

O uso da cal para otimização das propriedades mecânicas de argilas se torna viável em grandes volumes de solo devido ao baixo custo da cal, quando comparado a outros materiais com o cimento Portland. Entre as propriedades mecânicas do solo argiloso que são melhoradas ao se adicionar cal estão a resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e ao cisalhamento direto, o índice CBR, assim como a redução da plasticidade do solo, aumento da trabalhabilidade e diminuição da expansão (BALDOVINO, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a alteração do módulo resiliente de um solo argiloso vermelho da Formação Guabirota em função da adição da cal hidratada em teor determinado e em variados tempos de cura, para estudar o efeito que diferentes períodos de cura causam no MR da mistura.

1.1.2 Objetivos Específicos

Avaliar a alteração causada pela cal hidratada no módulo resiliente de um solo argiloso vermelho da Formação Guabirota de acordo com o teor aplicado de 5%.

Comparar os resultados do módulo resiliente obtidos para tempos de cura variados.

Comparar os resultados do módulo resiliente deste estudo com o mesmo solo sem a aplicação de cal.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país onde há uma grande demanda de obras de infraestrutura em todo seu território, e quando o assunto é pavimentação, não é diferente. Gigante territorialmente, o país não apresenta uma estrutura rodoviária adequada para atender a necessidade que de fato existe. Além de uma alta demanda de vias pavimentadas, no geral, há uma qualidade não satisfatória na infraestrutura de pavimentações já executadas, seja rodoviária ou urbana.

O crescimento da infraestrutura na área de pavimentação é de extrema importância para o crescimento de um país. No entanto, deve haver um estudo individual e muito específico para cada projeto de execução de novas obras de pavimentação, uma vez que, um projeto não bem realizado pode causar grandes problemas na utilização dos pavimentos ao longo de sua vida útil.

As obras de pavimentação, em grande maioria, utilizam para a realização das camadas do subleito, o solo encontrado na região da obra. Diante disso, este estudo visa fornecer dados para o solo vermelho do Guabirota, solo típico da região da cidade de Curitiba, dados estes que podem vir a ser utilizados para dimensionamento de subleito de pavimentos.

Para isso, é muito importante a busca pela variação do módulo resiliente do solo em questão através da aplicação da cal, aumento esse, que é muito positivo principalmente para os solos utilizados em subleitos de pavimentos rodoviários e urbanos. Então, analisar a viabilidade do uso da cal como material cimentante para este tipo de aplicação, que é uma alternativa à bastante utilizada mistura solo-cimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMAÇÃO GEOLÓGICA DO GUABIROTUBA

A região metropolitana de Curitiba situa-se sobre a Bacia Sedimentar de Curitiba, que por sua vez tem como formação geológica a Formação Guabirota. Os sedimentos desta formação são encontrados no município de Curitiba e Região Metropolitana e constituem principalmente em argilas siltosas e siltes argilosos, que se encontram em repouso sobre rochas do Complexo Cristalino (BALDOVINO, 2018).

De acordo com Kormann (2002), a Formação Guabirota caracteriza-se por apresentar camadas pouco espessas, possuindo profundidades máximas de 85 metros, e os solos argilosos presentes têm como característica principal a elevada consistência. E. Salamuni e R. Salamuni (1999) dividem as litologias da Formação Guabirota em 4 grupos principais: argilas, arcósios e areias arcósias, depósitos conglomeráticos e depósitos carbonáticos; onde o grupo de argilas se constitui no principal grupo litofaciológico da Formação.

O grupo de argilas - ou argilitos, conforme terminologia empregada na geologia - caracteriza-se pela presença de esmectita como principal argilomineral da composição. Quanto à sua coloração o grupo de argilas tem como característica a presença de coloração cinza e marrom. Entretanto, quando exposta a uma intensa ação de intemperismo químico, o material pode apresentar tons de vermelho e amarelo em sua composição (geralmente em maiores profundidades) (KORMANN, 2002).

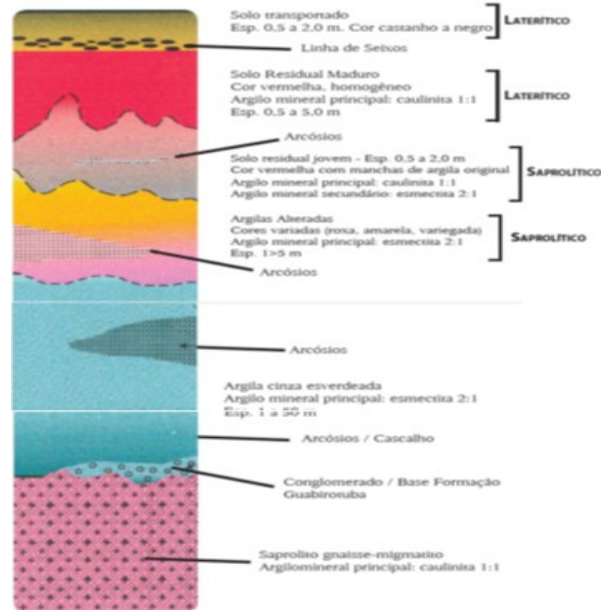
O segundo grupo citado anteriormente - os arcósios e areias arcósias - é encontrado de maneira dispersa e em diferentes profundidades e apresentam formas tabulares e lenticulares. As cores apresentadas dependem do nível de profundidade em que são encontrados, podendo variar desde uma cor avermelhada até uma coloração esbranquiçada (FELIPE, 1999).

O grupo de litotipo formado pelos depósitos conglomeráticos consiste em materiais granulares inseridos em uma matriz argilosa e podem ser encontrados em afloramentos nas bordas da bacia (KORMANN, 2002). Este material granular, encontra-se constituído de quartzo e quartzito nas bordas oeste e noroeste da bacia, enquanto nas bordas leste e sudeste os sedimentos são mais arcósias, podendo aparecer fragmentos de granitos e fragmentos ferruginosos (SALAMUNI ESALAMUNI, 1999).

Por último, Kormann (2002) apresenta que o grupo de sedimentos dos depósitos carbonáticos é constituído pelos caliches (depósito endurecido de carbonato de cálcio) e aparecem mais superficialmente, geralmente em camadas pouco espessas. Os caliches estão associados a mineiras do grupo das terras raras.

Diante disso, é possível se estabelecer o Perfil Típico de Alteração da Formação Guabirotuba composto, principalmente, por solos transportados, arcósios e argilas, como apresentado a seguir na Figura 1.

Figura 1 - Perfil típico da Formação Guabirotuba



Fonte: Felipe (1999)

As argilas da Formação Guabirotuba têm como uma de suas características uma elevada umidade natural, que é encontrada na média de 32%. Esta característica deve-se principalmente à fatores climáticos, podendo também ser atribuída em parte ao fenômeno de ascensão capilar encontrado nos materiais argilosos (KORMANN, 2002).

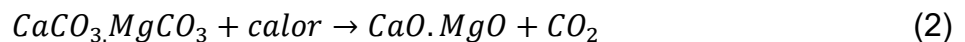
Com a alta umidade e um com um alto índice de chuva (características típicas da região de Curitiba), por consequência, o grau de saturação dos sedimentos também é alto. Diante disso, é muito comum se encontrar materiais argilosos com um alto grau de saturação, que na média se encontra por volta de 94,1%. Outro fator importante de se atentar, é que pela alta plasticidade característica dos solos argilosos da Formação Guabirotuba, pode-se haver grandes dificuldades ao se tentar compactar um solo composto pelo material argiloso (KORMANN, 2002).

Como já informado no presente estudo, as argilas da Formação Guabirotuba são caracterizadas pela ocorrência de esmectita, tendo assim, uma composição mineralógica típica de um material expansivo, tornando o solo muito retrativo. Esta característica, quando presente à variações de umidade na superfície fornecem ao solo uma alta suscetibilidade à erosão e movimento de massa (FELIPE, 1999).

2.2 A CAL

A cal está entre os dez produtos de origem mineral mais utilizados no mundo. Por possuir capacidade de ser reagente químico e material ligante, a cal está inserida em um amplo leque de setores industriais e sociais. Dito isso, junto ao histórico de desenvolvimento da humanidade, a cal é até o hoje o principal produto derivado dos calcários, dolomitos e conchas calcárias. É obtida através de uma reação química simples de calcinação em rochas carbonáticas (GUIMARÃES, 2002).

A cal viva tem em sua composição óxidos de cálcio ou cálcio-magnésio. O processo de calcinação do calcário consiste em um processo em que o carbonato de cálcio da rocha é reduzido a óxido de cálcio, assim como representado na Equação 1. Já o processo em que ocorre a calcinação do dolomito (ou calcário dolomítico), que contém carbonatos de cálcio e magnésio em sua composição, está representado na Equação 2 (GUIMARÃES, 2002).



Cada reação origina um produto com um nome diferente, sendo o produto da primeira equação denominado de Cal Calcítica e o produto da segunda equação sendo denominado de Cal Dolomítica (GUIMARÃES, 2002).

Após os processos descritos nos parágrafos anteriores, obtém-se a cal viva, que por sua vez se for hidratada, origina-se a cal hidratada. Sendo assim, a cal hidratada resulta do prosseguimento do processo industrial que dá origem à cal virgem (GUIMARÃES, 2002)

Segundo Guimarães (2002), o processo de hidratação da cal é uma clássica reação de fases sólido-líquida e os aspectos do produto final dependem do teor de água aplicado na fase de hidratação, podendo este produto ser seco, ou com aspecto

mais viscoso ou ainda um produto mais volátil. O processo que origina a cal hidratada está representado abaixo na Equação 3.



Os requisitos exigíveis da cal hidratada estão normatizados, e seguem a norma brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003), onde apresenta exigências químicas e físicas, que estão apresentadas abaixo na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Como pode se notar, as exigências, tanto químicas quanto físicas, são mais rígidas para o tipo de cal CH-I (Cal Hidratada I), que pode ser considerada uma cal mais pura, portanto apresenta um custo mais caro.

Tabela 1 - Exigências químicas da cal hidratada segundo a NBR 7175

Compostos	Limites			
	Cal Hidratada I	Cal Hidratada II	Cal Hidratada III	
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%	
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _{total} +MgO _{total})	≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%	

Fonte: ABNT (2003)

Tabela 2 - Exigências físicas da cal hidratada segundo a NBR 7175

Compostos	Limites			
	Cal Hidratada I	Cal Hidratada II	Cal Hidratada III	
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água	≤ 75%	≤ 75%	≤ 70%	
Incorporação de areia	≥ 3%	≥ 2,5%	≥ 2,2%	
Estabilidade	Ausência de cavidades ou protuberâncias			
Plasticidade	≥ 110%	≥ 110%	≥ 110%	

Fonte: ABNT (2003)

2.3 SOLOS MELHORADOS COM CAL

De acordo com a Especificação de Serviço 422 do DNIT (2019) um solo melhorado com cal consiste em um material proveniente de mistura de solo e cal em proporções previamente determinadas por processo de dosagem em laboratório, de forma a modificar as propriedades físicas do solo, como redução da umidade, redução da plasticidade, redução da expansão e otimização da compactação, a fim de melhorar a trabalhabilidade e as características gerais do solo em questão.

A utilização da cal hidratada para melhoria e estabilização de solos é basicamente um método físico-químico que tem o propósito de melhorar as características mecânicas, aumentar a resistência à ação da água e incrementar o valor de suporte do solo (BATISTA, 2007).

2.3.1 Estabilização de solos

Segundo Vargas (1978), a estabilização de solos é o processo pelo qual o solo adquire uma maior resistência a cargas e/ou à erosão, através da compactação, da correção granulométrica e de sua plasticidade ou ainda da adição de substâncias que possam permitir uma coesão proveniente da cimentação ou mesmo da aglutinação de suas partículas.

De acordo com Van Impe (1989), os processos de estabilização são classificados como: temporários, permanentes sem adição e permanentes com adição. A estabilização temporária consiste em processos realizados a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo em que ela é necessitada para a realização de alguma etapa da obra, sendo um exemplo deste tipo de estabilização o rebaixamento do nível do lençol freático através de drenos.

O segundo tipo de estabilização de solo, as permanentes sem adição, consiste basicamente em processos de compactação do solo, podendo ser realizada através de compactação superficial, compactação profunda e ainda compactação através do uso de explosivos (VAN IMPE, 1989).

Já a estabilização permanente com adição, consiste na união entre o processo de compactação com a adição de um novo material, podendo ser realizada através de reforço com tiras metálicas ou geossintéticos, estabilização com a cal e cimento e colunas de brita ou areia (VAN IMPE, 1989).

A estabilização de solos é um processo/tratamento aplicado ao solo com a intenção de alterar características do solo natural em questão, as quais são indesejáveis para a execução de certas obras de engenharia. Podem ocorrer por um processo mecânico, químico ou químico-mecânico (SOUZA, 2014).

A estabilização de solos por processos mecânicos consiste basicamente em uma compactação realizada em camadas, através da aplicação de uma energia de compressão no solo e com o controle de umidade, onde o controle tecnológico ocorre por meio de ensaios (SOUZA, 2014).

Esta melhoria causada pela cal em solos pode ser observada no estudo de Bordignon (2015), onde todas as amostras de solo estabilizado com cal hidratada apresentaram resultados de resistência à compressão simples superiores, na ordem de 16%, quando comparados aos obtidos ao mesmo solo natural.

Já a estabilização por meio de processos químicos ocorre através da adição de um agente químico que produz uma ação cimentada, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou outros materiais aditivos (SOUZA, 2014).

Por último, o processo químico-mecânico é apresentado por Souza (2014) como uma combinação das outras duas metodologias de estabilização de solos apresentadas acima.

A necessidade de estabilizar um solo se dá por alguns fatores apresentados pelo solo, como fraca capacidade de suporte de carga ou elevada permeabilidade de solos naturais, que acabam sendo inapropriados à execução de fundações superficiais, como é o caso de estradas e aeroportos (CRISTELO, 2001).

2.3.1.1 A importância da estabilização do solo para pavimentação

De acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006), o pavimento de uma rodovia consiste em uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um terreno ou fundação, o qual é denominado subleito.

Os pavimentos são destinados a resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pelo tráfego, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança dos usuários e a resistir aos esforços horizontais, tornando-o mais durável (MEDINA E MOTTA, 2015).

Sendo assim, é de extrema importância que o subleito que receberá o pavimento seja bem estabilizado, pois uma vez que estes solos não recebam os devidos tratamentos, problemas relacionados à recalque e erosões podem ocorrer.

2.3.1.2 Estabilização de solos com cal

DNIT (2019) define um solo estabilizado com cal como um material estabilizado proveniente de mistura de solo, cal e água em proporções previamente determinadas por processo de dosagem em laboratório, de forma a apresentar

determinadas características desejáveis de resistência, deformabilidade e durabilidade. A estabilização de solos através da adição da cal tem como objetivo o aumento do Índice de Suporte Califórnia (popularmente conhecido como CBR), da resistência a compressão simples ou do módulo resiliente em relação ao solo em estado natural, tudo isso a fim de se atingir os parâmetros requisitados para o solo.

De acordo com Klinsky, Bardini e Fabbri (2014), a adição da cal hidratada a solos reativos melhora substancialmente a resistência dos solos através das reações pozolânicas, e geralmente, esse incremento na resistência ocorre em sincronia com um enrijecimento do material, mudando sua relação tensão-deformação.

Azevêdo (2010) apresenta em seu estudo que ao se adicionar cal a qualquer tipo de solo que contenha argilominerais, ocorrerão então, as seguintes reações em presença de um teor adequado de umidade: troca de íons e floculação, reação cimentante pozolânica e carbonatação.

De acordo com Azevêdo (2010), a troca de íons e floculação são interdependentes e ocorrem logo após a mistura, causando uma redução na plasticidade do solo, pelo aumento do limite de plasticidade e diminuição do limite de liquidez. A contração e a expansão do solo diminuem, fazendo do solo um solo mais estável frente às variações da umidade. Quimicamente, ocorre uma troca de base e os cátions, de carga mais forte, derivados da cal substituem íons de carga mais fraca, como os de sódio, magnésio e hidrogênio, presentes na superfície das partículas de argila.

Como já é possível a presença de cátions de cálcio na superfície da partícula argilosa (devido à sua litologia), haverá uma predominância destes. Esta predominância de cátions de cálcio faz com que uma grande atração entre as partículas se gere, causando um agrupamento das partículas, portanto, fisicamente falando, o efeito físico gerado seria o aumento do diâmetro das partículas (floculação) (AZEVEDO, 2010).

Já as reações de cimentação pozolânica se devem à reação química entre a cal, a água e os elementos pozolânicos do solo. Estas reações dão origem a compostos de silicatos e alumínio hidratados de cálcio (AZEVEDO *et al*, 1998).

Ainda de acordo com Azevêdo (2010), os elementos pozolânicos se encontram na maioria dos solos com certo teor de argila e os solos que não os contenham podem ainda ser estabilizados com qual, se houver uma adição de uma pozolana natural ou artificial, como é o caso da cinza volante. O efeito cimentante

causado pela reação em questão, gera um aumento da capacidade de suporte do solo, podendo ser percebido no aumento do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou em ensaios de compressão simples.

Quanto a carbonatação, Azevêdo (2010) afirma que o processo consiste em uma reação entre a cal e o dióxido de carbono do ar, formando um agente cimentante (relativamente frágil) de carbonato de cálcio e magnésio. A carbonatação pode prejudicar e fragilizar significativamente a reação solo-cal, uma vez que a reação utiliza dos cátions de cálcio presentes na superfície das partículas argilosas para gerar a reação com o dióxido de carbono do ar, produzindo um composto com resistência muito inferior quando comparado à resistência dos compostos de silicatos e aluminatos gerados pela cimentação pozolânica.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), a mistura entre a cal e um solo é uma das práticas de estabilização de solos por meio de processos químicos e, pode ser realizada tanto com a adição da cal hidratada quanto com a adição da cal viva (ou cal virgem). O efeito da estabilização depende do desempenho que a cal tem ao atacar os argilominerais do solo, já que esse é o processo que origina os compostos cimentantes, como os silicatos de cálcio.

Ainda de acordo com Ingles e Metcalf (1972), a cal hidratada é a mais utilizada para a estabilização do solo, e isto se deve pela maior dificuldade em estocar e manipular a cal virgem em regiões que apresentem uma umidade mais alta.

De acordo com Corrêa (2008), a utilização da cal como agente estabilizante é mais eficaz quando adicionada a materiais finos (siltes ou argilas), quando o índice de plasticidade varia entre os 10% e 50%, e este processo de estabilização química se dá em duas fases: a fase inicial rápida, podendo durar horas ou dias, e a fase lenta, que poder levar de meses a anos.

2.4 MÓDULO RESILIENTE (MR)

A determinação do Módulo Resiliente permite analisar e prever estados de tensão-deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais (DNIT, 2006).

A importância do conhecimento da rigidez dos materiais adotados para revestimento e subcamadas é de grande importância para análise da estrutura global da estrutura do pavimento, que produz como resposta à aplicação de cargas as

tensões, as deformações e os deslocamentos do sistema em camadas (BERNUCCI *et al*, 2006).

O módulo de resiliência é um parâmetro de extrema importância quando o assunto são as análises mecânicas que torneiam a estimativa das tensões e deformações na estrutura do pavimento e no seu subleito (CUNTO, 1998). Tendo isso em vista, é correto dizer que quanto maior o valor de módulo resiliente de um solo, menos ele será deformado ao sofrer aplicação de uma carga. Portanto, o módulo resiliente é um parâmetro imprescindível para análise fiel à sistemas de aplicação de cargas cíclicas, como são o exemplo de solos de subleitos de rodovias.

É importante salientar que quando se avalia camadas que compõe pavimentos, o MR não tem valor constante durante toda a vida útil da estrutura, e a sua variação ao longo da operação da estrutura pode não proporcionar um desempenho satisfatório, assim como não garantir a vida útil prevista. Se o módulo resiliente obedecer a uma tendência muito decrescente nos anos iniciais de operação, pode haver uma perda de até 78% de sua vida útil. Porém, quando o MR obedecer a uma tendência muito crescente, a vida útil do pavimento pode receber um acréscimo que pode chegar à ordem de 170% (CAVALEIRO E OLIVEIRA, 2017).

A deformação total tem um componente resiliente (recuperável) e outro permanente (irrecuperável), este último também chamado de plástico. É esta deformabilidade resiliente das camadas do pavimento e do subleito que condicionam a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas e base de solo, e solos com adição (MEDINA E MOTTA, 2015).

O módulo de resiliência de um solo depende das propriedades naturais do solo, como constituição mineralógica, textura, plasticidade, umidade, densidade e estados de tensões, além das características de ensaio adotadas (MEDINA E MOTTA, 2015). Portanto, o estudo aprofundado do solo adotado, assim como as propriedades de materiais a serem inseridos nas misturas utilizadas nos ensaios é de extrema importância na determinação do parâmetro MR.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental tem o objetivo de estudar a variação do Módulo Resiliente de um solo vermelho da Formação Guabirotuba em função da adição da cal. Para identificar a alteração do Módulo Resiliente do solo proveniente da adição de um teor pré-estabelecido de cal diante dos diferentes tempos de cura programados.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Solo

O solo usado para estudo e para a moldagem dos corpos de prova foi coletado no dia 14 de fevereiro de 2022 em um terreno localizado nas proximidades da sede Ecoville da UTFPR, na rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi número 5140, no município de Curitiba, conforme mostrado na Figura 2.

O local foi escolhido tendo em vista que nele era encontrado solo que apresentava uma cor avermelhada, típico de um solo da formação em questão.

Figura 2 - Local de coleta do solo utilizado para a realização deste estudo



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2 Cal

A cal utilizada para estudo foi uma cal hidratada dolomítica CH-III, que é composta, basicamente, por hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2) e magnésio (Mg(OH)_2), produzida na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná. A escolha deste material como agente cimentante foi feita visto que o mesmo é o mais utilizado para a realização da mistura solo-cal e apresenta um baixo custo.

3.2.3 Água

A água utilizada em todos os ensaios foi uma água tratada pela companhia de abastecimento do Paraná, posteriormente passada por um processo de destilação, água destilada.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Coleta das amostras

As amostras de solo foram coletadas em estado deformado. Com o auxílio de uma retroescavadeira, foi escavado uma quantidade de material suficiente para a realização de todos os ensaios do trabalho. Essas amostras coletadas foram transportadas à UTFPR Sede Ecoville, onde foram armazenadas em tonéis plásticos de 250 litros.

3.3.2 Preparação das amostras

A metodologia utilizada para a preparação das amostras para ensaio de determinação de densidade real e de compactação, além dos procedimentos de secagem do solo, peneiramento, destorroamento e medida da umidade higroscópica seguiram a norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

O solo utilizado para a preparação das amostras foi despejado em bandejas metálicas e estas, por sua vez, foram colocadas na estufa do laboratório de Geotecnia da UTFPR, representada na Fotografia 1. Deu-se então, início ao processo de secagem, que consistiu em o solo ser submetido à uma temperatura de 100 °C durante um período de 72 horas.

Fotografia 1 - Estufa do laboratório de Geotecnia da Sede Ecoville da UTFPR



Fonte: Autoria própria (2022)

Após a etapa de secagem foi feito o peneiramento do solo através da peneira 4,8 mm (Fotografia 2), onde o material passante foi separado em um recipiente e o material não-passante foi destorroado com mão de gral em almofariz (Fotografia 3).

O solo destorroado foi novamente peneirado, e então, foi colocado no mesmo recipiente do solo que já havia passado na peneira. Este solo foi guardado em sacos plásticos, com o intuito de preservar a umidade da amostra, e a quantidade de solo foi separada de forma que suprisse a demanda de solo para o ensaio de compactação e a moldagem dos corpos de prova.

A fim de se determinar a umidade higroscópica (ou residual) do solo, foram coletadas 3 cápsulas de solo da amostra. Estas cápsulas foram pesadas enquanto vazias, e pesadas novamente quando preenchidas com solo. Então, as cápsulas foram levadas à estufa, onde ficaram cerca de 48 horas até serem retiradas, e então, pesadas novamente.

Realizando a divisão entre a quantidade de água que havia no solo úmido pela quantidade de solo seco, se obteve as umidades higroscópicas das cápsulas. E então, realizando a média entre as umidades higroscópicas de cada cápsula, foi determinada a umidade higroscópica da amostra de solo.

Fotografia 2 - Peneira 4,8 mm utilizada



Fonte: Aatoria própria (2022)

Fotografia 3 – Mão de gral e almofariz utilizados para destorroamento de solo



Fonte: Aatoria própria (2022)

3.3.3 Teor de cal

A porcentagem de cal utilizada para o estudo da variação do Módulo Resiliente do solo nesta pesquisa foi estabelecida como 5%. Este valor foi definido pensando em um valor de referência, auxiliando possíveis futuros trabalhos na mesma linha de estudo.

Neste presente estudo, o teor de cal foi determinado através da divisão da massa de cal pela massa seca do solo investigado, expressado em porcentagem.

3.3.4 Teor de umidade

O valor do teor de umidade que procurou-se atingir na realização dos ensaios neste estudo foi definido adotando-se o valor do teor de umidade ótimo dos solos

vermelhos da Formação Guabiro tuba adicionados de 5% de cal, que como determinado no ensaio de compactação, apresenta valor de 29,10%.

3.3.5 Tempo de cura

Os tempos de cura estabelecidos para a realização dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, foram determinados de forma que fosse possível avaliar a variação do Módulo Resiliente a curto e médio prazo.

Sendo assim, como tempos de cura do estudo foram definidos 7 e 28 dias.

3.3.6 Ensaio de compactação

Para a realização do ensaio de compactação foram seguidos os procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Este ensaio foi feito com o objetivo de se determinar a relação entre o teor de umidade com a massa específica do solo utilizado no presente estudo.

O primeiro passo para a realização deste ensaio foi a aplicação da quantidade de cal correspondente ao teor de 5% e então, foi realizada a mistura dos componentes com espátula metálica, como apresentado na Fotografia 4.

Fotografia 4 - Mistura do solo com a cal



Fonte: Autoria própria (2022)

O próximo passo foi a aplicação de água à mistura solo-cal. Para isso, foram adotados 6 pontos de estudo, onde cada um deles correspondia a um teor de umidade. Estes pontos estão apresentados abaixo na Tabela 3, e foram definidos de acordo com o que se era esperado para a umidade ótima deste solo.

Com os 6 pontos de estudos já definidos, a quantidade de água correspondente a cada ponto foi separada e, então, misturada ao solo-cal logo antes

à execução do ensaio para o determinado ponto, como mostrado a seguir na Fotografia 5.

Tabela 3 - Teores de umidade adotados para o ensaio de compactação

Ponto	Teor de umidade adotado (%)
1	22
2	24
3	26
4	28
5	30
6	32

Fonte: A autoria própria (2022)

Fotografia 5 - Mistura do solo-cal com a água



Fonte: A autoria própria (2022)

Para a execução do ensaio de compactação foi utilizado o cilindro de tamanho pequeno (Fotografia 6), que é composto pelo molde cilíndrico, sua base e o cilindro superior complementar (colarinho). Através de medição realizada com paquímetro, o cilindro apresentou medidas de 9,81 centímetros de diâmetro por 11,97 centímetros de altura.

Para aplicação de golpes foi utilizado o soquete de tamanho pequeno (Fotografia 7), que consiste em um soquete metálico com massa de 2500 gramas e, acoplado a ele, um dispositivo de controle de altura de queda. A energia utilizada para a realização do ensaio foi a energia de compactação normal.

Fotografia 6 - Cilindro metálico de tamanho pequeno utilizado no ensaio de compactação



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 7 - Soquete pequeno utilizado para ensaio de compactação



Fonte: Autoria própria (2022)

Previamente à montagem do cilindro metálico foi realizada a pesagem do molde cilíndrico, informação esta, que foi utilizada posteriormente para auxiliar a determinação dos pesos específicos correspondentes a cada ponto de estudo.

Antes do início da compactação, foi realizada montagem do cilindro metálico e, com a utilização de pincel, foi aplicada vaselina nas paredes internas do cilindro, a fim de evitar problemas na hora da realização da extrusão do corpo de prova que ainda seria realizada.

A compactação seguiu as determinações da NBR 7182 (ABNT, 2016), que determina que para o ensaio através da energia normal e utilizando o cilindro e soquete de tamanhos pequenos, a compactação deve ser feita em 3 camadas através de 26 golpes em cada.

Seguindo a realização da etapa de compactação foi realizado o desmonte do cilindro, onde o colarinho e a base do cilindro foram retirados e então, foi executado o

arrasamento na parte superior do molde cilíndrico. Este conjunto formado pelo solo compactado e o molde cilíndrico foi pesado, e os resultados obtidos para cada ponto de estudo estão apresentados abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 - Massas resultantes do ensaio de compactação para cada ponto

Ponto	Teor de Umidade (%)	Massa molde cilíndrico (g)	Massa molde cilíndrico + solo compactado (g)	Massa de solo compactado (g)
1	22	1903,94	3425	1521,06
2	24	1903,94	3465	1561,06
3	26	1903,94	3570	1666,06
4	28	1903,94	3605	1671,06
5	30	1903,94	3620	1701,06
6	32	1903,94	3495	1716,06

Fonte: Autoria própria (2022)

Após a realização da pesagem do conjunto formado pelo molde cilíndrico e o solo compactado, foi executada a extrusão deste solo com auxílio de um extrator hidráulico. Um exemplo de amostra após a extrusão é mostrado na Fotografia 8.

A partir desta amostra foram retiradas 3 amostras, que foram colocadas em cápsulas metálicas e levadas à estufa, onde passaram por processo de secagem à 105 °C durante um período de 24 horas. Este processo foi realizado com o intuito de se obter o exato teor de umidade presente em cada amostra compactada, e os teores obtidos estão apresentado na Tabela 5.

Para a execução dos 6 pontos de estudo foi utilizado o mesmo cilindro metálico. Portanto, ao final de cada realização do ensaio para determinado ponto foi realizada a limpeza do cilindro metálico.

Fotografia 8 - Amostra após o processo de extrusão



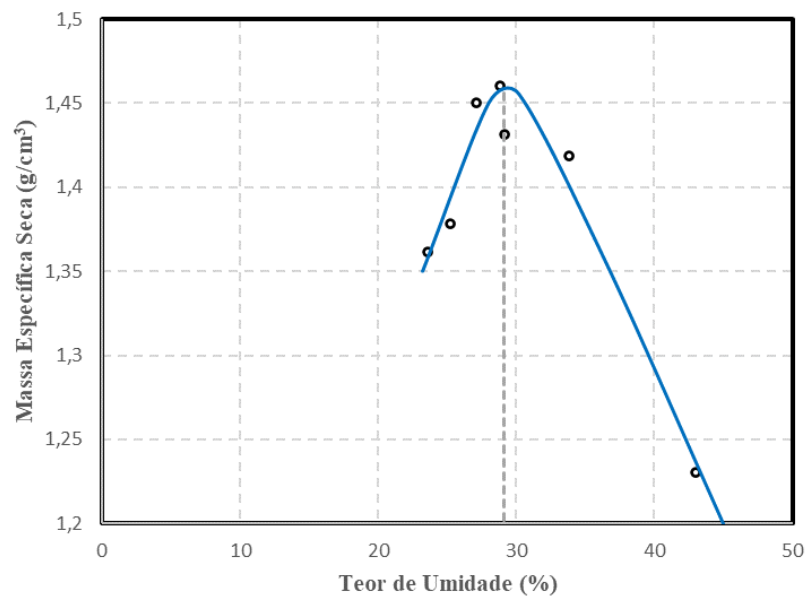
Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 5 - Teores de umidade exatos obtidos através das amostras

Ponto	Teor de Umidade Exato (%)
1	23,63
2	25,29
3	27,12
4	28,29
5	33,83
6	43,06

Fonte: Aatoria própria (2022)

Pode se notar que houve uma diferença entre os teores de umidade de ensaio com os teores de umidade exatos. Esta diferença se dá por motivos da umidade higroscópica (residual) que o solo apresentava. Com o teor de umidade exato e a massa de solo compactado, para cada ponto de moldagem deste estudo, já obtidos, foi possível traçar a curva de compactação, apresentada abaixo no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva de compactação para o solo

Fonte: Aatoria própria (2022)

Após a curva de compactação ser traçada pode se obter o teor de umidade ótima do solo do estudo, que foi resultada em 29,1%. Este valor indica a porcentagem de água em cima da massa de solo seco que deve ser aplicada para obtenção do maior grau de compactação do solo.

3.3.7 Preparação dos corpos de prova

A etapa da preparação dos corpos de prova seguiu as determinações da norma de método de ensaio 134 do DNIT (2018). Esta etapa consistiu na moldagem

de 8 corpos de prova, 4 para ensaio a 7 dias de cura e os outros 4 para ensaio a 28 dias de cura.

Previamente à etapa de preparação dos corpos de prova, cápsulas contendo solo da amostra que foi utilizada foram levadas à estufa, onde passaram 24 horas a uma temperatura de 105 °C. Este processo foi feito a fim de se obter a umidade higroscópica da amostra, e seguiu as determinações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

Com o valor da umidade higroscópica da amostra obtido, foi possível calcular a quantidade de água que deveria ser adicionada à mistura solo-cal a fim de se atingir o teor de umidade deste estudo, que como já dito anteriormente é correspondente a 29,10 %. Então, foi separada uma quantidade de solo desta amostra suficiente para a realização dos todos os corpos de prova necessários para o estudo.

Foi utilizado um recipiente plástico para cada corpo de prova a ser moldado, onde seria realizada a mistura entre os materiais. A primeira mistura a ser realizada foi a mistura entre o solo e a cal e então, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir o teor de umidade do estudo.

Para a moldagem dos corpos de prova, foi utilizado um cilindro metálico tripartido (Fotografia 9), conforme o DNIT (2018) determina. Este cilindro apresenta dimensões internas de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura.

Já para a aplicação dos golpes foi utilizado um soquete metálico de tamanho grande (Fotografia 10), que consiste em um soquete metálico com massa de 4530 gramas e acoplado a ele, um controlador de queda que limita a altura de queda do soquete a 45,7 centímetros.

Fotografia 9 - Cilindro metálico tripartido utilizado para moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 10 - Soquete metálico de tamanho grande utilizado para moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2022)

As amostras utilizadas para a moldagem dos corpos de prova foram compactadas estaticamente em 10 camadas por 5 golpes à energia normal com um molde cilíndrico tripartido de aço, untado internamente com vaselina.

A determinação do número de camadas e dos números de golpes foram definidos seguindo as determinações, que para este caso está apresentado abaixo na Tabela 6. A energia utilizada para a realização da moldagem dos corpos de prova foi a energia de compactação normal.

Tabela 6 - Condições de compactação de corpo de prova em cilindro tripartido para ensaio de módulo de resiliência

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)	Energia (kgf.cm/cm³)	Nº de camadas	Altura de queda (cm)	Peso do soquete (kgf)	Nº de golpes por camada
10	20	1570,8	Normal 6	10	45,7	4,53	5

Fonte: Adaptado de DNIT (2018)

Como pode se observar, para esta combinação de condições, o DNIT (2018) determina que a compactação dos corpos de prova deve ser realizada em 10 camadas através de 5 golpes em cada.

Sendo assim, para cada corpo de prova foi realizada a divisão do solo em 10 sacos plásticos, onde cada saco plástico recebeu a quantidade correspondente a 10% do volume do cilindro tripartido. A massa depositada em cada saco plástico foi pesada em balança de precisão de 0,01 grama, a fim de se obter massas iguais para cada camada.

Então foi realizada a montagem do cilindro tripartido, conectando as três partes do cilindro à base de suporte do equipamento através dos parafusos fixadores, e depois a coroa (peça metálica superior) foi conectada ao conjunto. O cilindro foi internamente untado com vaselina, a fim de se evitar perda de material e problemas na etapa de desmolde do corpo de prova.

Foi dado início então à compactação dos corpos de prova, onde para 8 corpos de prova foi utilizado o mesmo cilindro metálico tripartido.

Após o processo de compactação, foi realizado o processo de desmontagem do cilindro tripartido, processo este que foi realizado com muito cuidado para evitar degradação do corpo de prova.

Então, o próximo passo desta etapa seria a obtenção de medidas e da massa dos corpos de prova executados. As dimensões dos corpos de prova foram obtidas através de medição com uso de paquímetro metálico, e a obtenção da massa de cada corpo de prova foi realizada através de balança com precisão de 0,05 gramas. Estes dados obtidos estão representados abaixo na Tabela 7.

Os corpos de provas extraídos foram envolvidos com plástico filme transparente a fim de se evitar a perda da umidade.

Tabela 7 - Dados medidos após compactação dos corpos de prova

CP	Tempo de cura (dias)	Diâmetro medido (cm)	Altura medida (cm)	Massa (g)
1	28	10,11	20,03	2855
2	28	10,07	20,03	2725
3	28	10,04	20,01	2865
4	28	10,03	20,02	2850
5	7	10,03	20,04	2935
6	7	10,03	20,04	2915
7	7	10,04	20,01	2905
8	7	10,02	20,06	2905

Fonte: Autoria própria (2022)

3.3.8 Montagem do ensaio

A montagem dos ensaios seguiu as determinações da norma de método de ensaio DNIT 134 (2018) e a primeira etapa realizada consistiu em colocar uma pedra porosa com papel filtro sobre a base de apoio do equipamento. Em seguida foi realizado o posicionamento do corpo de prova em cima desta pedra porosa, e então, foi colocada outra pedra porosa com papel filtro na parte superior do corpo de prova (Fotografia 11).

Dando sequência a etapa de montagem, foi posicionado, em cima da pedra porosa superior, o *Top-cap* (Cabeçote).

A próxima etapa consistiu em, com auxílio de um encamisador (Fotografia 12), colocar uma membrana de borracha, de forma que esta, envolvesse toda a lateral do corpo de prova e as pedras porosas já posicionadas, como mostrado na Fotografia 13. Com o intuito de prender efetivamente a membrana de borracha ao corpo de prova, foram utilizados anéis elásticos de borracha.

Fotografia 11 - Corpo de prova, pedras porosas e *top-cap* posicionados



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 12 - Encamisador e membrana de borracha com anéis elásticos de borracha



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 13 - Membrana de borracha posicionada



Fonte: Autoria própria (2022)

Com a membrana de borracha fixada de maneira correta, foi colocado a câmara envoltória de acrílico, e então posicionado a parte superior da célula triaxial (Fotografia 14).

Fotografia 14 – Célula triaxial montada



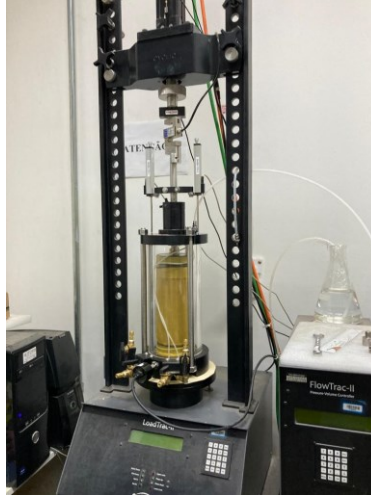
Fonte: Autoria própria (2022)

Então com a célula triaxial já montada, esta, foi posicionada na prensa triaxial (máquina de ensaio aplicadora de cargas cíclicas), onde os tubos que aplicam a tensão confinante foram conectados à câmara de acrílico.

Foi feito então, o posicionamento dos transdutores LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*) (Fotografia 15), que são os responsáveis por registrar os deslocamentos utilizados no cálculo do módulo resiliente. Os LVDT's utilizados estão mostrados na Fotografia 16.

Com os LVDT's corretamente posicionados, a aplicação de cargas cíclicas pode ser iniciada.

Fotografia 15 - LVDT's posicionados



Fonte: Aatoria própria (2022)

Fotografia 16 - LVDT's utilizados no ensaio



Fonte: Aatoria própria (2022)

3.3.9 Aplicação das cargas repetidas

A etapa de aplicação das cargas repetidas é a fase final do ensaio, e é a etapa do estudo onde o módulo resiliente do corpo de prova foi determinado. Esta etapa seguiu as determinações da norma de método de ensaio DNIT 134 (2018), que determina que antes do início do ensaio propriamente dito, deve ser realizado a etapa de condicionamento.

Este condicionamento consistiu na aplicação de cargas cíclicas, onde foram aplicadas cargas cíclicas (tensão desvio), com frequência de 1Hz (60 ciclos por minuto), onde o pulso de carga teve duração de 0,1 segundo, seguido de 0,9 segundo

de repouso. Durante todo o ensaio a tensão confinante foi mantida constante (não cíclica).

As cargas cíclicas foram aplicadas 500 vezes para cada par de tensão confinante-tensão desvio, pares estes, que estão apresentados abaixo na Tabela 8.

Tabela 8 - Sequência de tensões para fase de condicionamento

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)
0,070	0,070
0,070	0,210
0,105	0,315

Fonte: Adaptado de DNIT (2018)

Seguindo a fase de condicionamento, foi iniciado o procedimento para determinação do módulo resiliente. Este procedimento consistiu na aplicação de uma sequência de 18 pares de tensões, conforme determinado pelo DNIT (2018) e apresentado na Tabela 9.

Para cada par de tensão foram aplicados 10 ciclos de carga, com a mesma frequência utilizada para a fase de condicionamento.

Ao fim do ensaio, a fim de se obter a umidade do corpo de prova ensaiado, foram retiradas 3 amostras de cada CP. As amostras foram inseridas em cápsulas metálicas e levadas à estufa, onde passaram 48 horas à uma temperatura de 105 °C. As umidades obtidas para cada corpo de prova estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 9 - Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,310	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: DNIT (2018)

Tabela 10 - Teores de umidade de ensaio obtidos

CP	Teor de umidade (%)
1	25,35
2	26,38
3	26,56
4	26,71
5	28,34
6	28,32
7	28,33
8	28,18

Fonte: Autoria própria (2022)

3.3.10 Cálculo do módulo resiliente

Para determinação do módulo resiliente foram seguidas as determinações do TED 682 do DNIT (2014), que apresenta o modelo composto para determinação do módulo resiliente.

Este modelo determina o módulo resiliente através da tensão confinante (σ_3), da tensão desvio (σ_d) e das constantes (k_1 , k_2 e k_3), como mostrado na Equação 4.

$$MR = k_1 \cdot (\sigma_3^{k_3}) \cdot (\sigma_d^{k_2}) \quad (4)$$

Para determinação do módulo resiliente e tensões de ensaio, foi utilizado o próprio *software* da prensa triaxial, *software* este, que necessita de algumas informações relacionadas à caracterização do solo que será ensaiado, como limite de liquidez, limite de plasticidade e peso específico. Os valores adotados para estes parâmetros estão apresentados na Tabela 11, e foram fornecidos pelo professor orientador Izzo (2022) (Informação verbal)¹.

Foram adotados estes valores, por se tratar de resultados obtidos em ensaios de caracterização de um solo de mesma origem e coleta do que o solo do presente trabalho.

Já para auxílio na interpretação e montagem dos gráficos, e determinação das constantes de regressão foi utilizado o *software* *SigmaPlot*[®].

Tabela 11 - Parâmetros adotados nos ensaios

Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Peso específico (g/cm ³)
54	46	2,56

Fonte: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para seguir o objetivo do estudo, de comparar a variação do módulo resiliente, dados de um estudo realizado e fornecido por comunicação pessoal, foram utilizados.

O estudo utilizado para comparação obteve valores do módulo resiliente de um solo vermelho da Formação Guabirotuba, sem adição de outros componentes. Este estudo de comparação utilizou um solo de mesma origem e coleta do solo do presente trabalho, e os métodos adotados foram os mesmos deste estudo.

As constantes de regressão utilizadas para determinação do módulo resiliente para cada corpo de prova estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Constantes de regressão utilizadas para determinação para cada corpo de prova

CP	Tempo de cura (dias)	k1	k2	k3
A	-	102,0218	-0,210	0,1437
B	-	77,5910	-0,2933	0,1186
C	-	138,7935	-0,1949	0,2317
D	-	105,1607	-0,2964	0,2345
1	28	277,9383	-0,2194	0,0743
2	28	288,9881	-0,1254	0,1604
3	28	609,0394	-0,0121	0,2833
4	28	343,8173	-0,0261	0,0754
5	7	143,3223	-0,1641	0,1127
6	7	80,3307	-0,4314	0,0372
7	7	126,4332	-0,3727	0,1744
8	7	140,7370	-0,3201	0,1475

Notas: Os corpos de prova A, B, C e D são os corpos de prova ensaiados no estudo de comparação, e os respectivos dados foram fornecidos pelo Professor Izzo (2022) (Informação verbal)¹.

Fonte: Autoria própria (2022)

Como é possível observar, os corpos de prova referentes ao estudo de comparação (CP's A, B, C e D) não apresentam a informação de tempo de cura, já que se tratava de corpos de prova compostos somente por solo vermelho.

A média formada pelos resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova compostos somente por solo vermelho (CP's A, B, C e D) para cada par de tensão estão apresentados na Tabela 13. Estes resultados foram fornecidos pelo professor Izzo (2022) (Informação verbal)¹.

Tabela 13 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's compostos somente por solo vermelho

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)
0,02	0,02	133,42
0,02	0,04	110,15
0,02	0,06	98,98
0,03	0,04	73,35
0,03	0,06	110,14
0,03	0,11	96,59
0,05	0,04	131,04
0,05	0,11	103,30
0,05	0,15	94,87
0,07	0,06	126,24
0,07	0,13	105,73
0,07	0,20	95,49
0,11	0,11	119,68
0,11	0,20	103,23
0,11	0,31	92,49
0,14	0,13	119,54
0,14	0,27	100,52
0,14	0,38	92,23

Fonte: Izzo (2022)

Diante dos resultados para o solo vermelho sem adição de outro componente, é possível analisar que para a mesma tensão confinante (σ_3), o aumento da tensão desvio (σ_d) resulta em um módulo resiliente de menor valor.

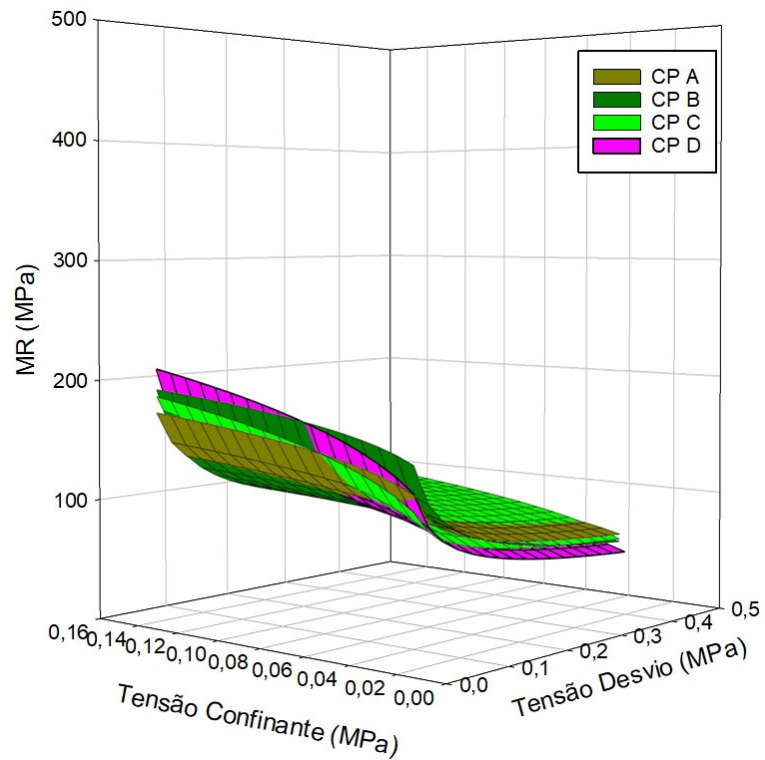
4.1 SOLO VERMELHO PURO

A representação gráfica destes resultados para os corpos de prova compostos somente por solo vermelho está apresentada no Gráfico 2, onde é possível notar o comportamento descrito no parágrafo anterior.

A representação gráfica da média entre os corpos de prova A, B, C e D (compostos somente por solo vermelho) está apresentada no Gráfico 3.

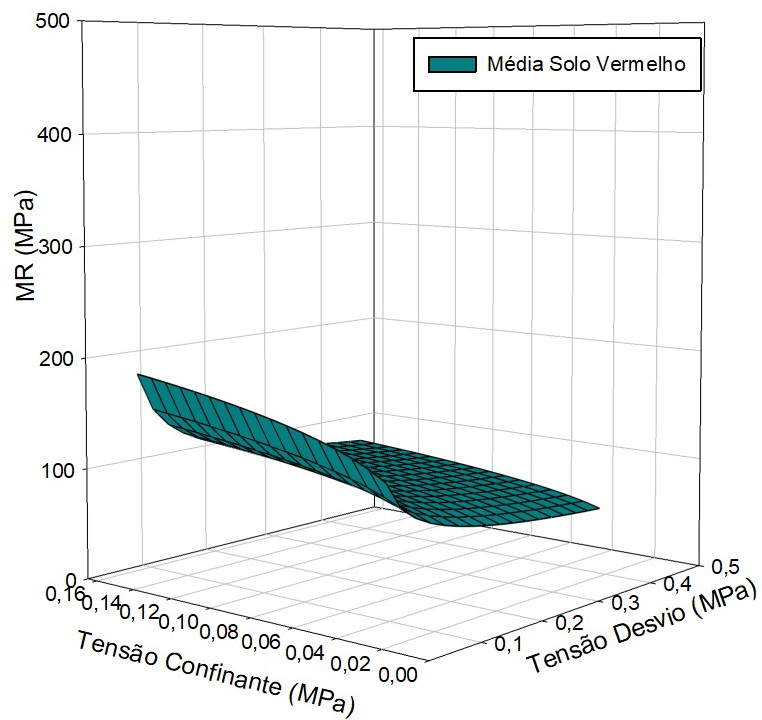
É possível notar em ambos os gráficos, os maiores valores de módulo resiliente são obtidos para os pares de tensão compostos pelos maiores valores de tensão confinante e pelos menores valores de tensão desvio.

Gráfico 2 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos somente por solo vermelho



Fonte: Izzo (2022)

Gráfico 3 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos somente por solo vermelho



Fonte: Izzo (2022)

4.2 SOLO VERMELHO COM CAL E TEMPO DE CURA DE 7 DIAS

A média formada pelos resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, com tempo de cura de 7 dias (CP's 5, 6, 7 e 8), estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's moldados compostos por solo e cal hidratada com tempo de cura de 7 dias

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)
0,02	0,02	266,03
0,02	0,04	205,19
0,02	0,07	177,67
0,03	0,04	112,09
0,03	0,07	191,89
0,03	0,11	161,03
0,05	0,04	231,88
0,05	0,11	168,69
0,05	0,16	150,72
0,07	0,07	210,57
0,07	0,14	166,34
0,07	0,21	145,45
0,11	0,11	186,26
0,11	0,21	153,27
0,11	0,32	132,81
0,14	0,14	180,56
0,14	0,27	143,85
0,14	0,39	128,63

Fonte: Aatoria própria (2022)

É possível notar, que como ocorrido para o solo vermelho puro, para a mesma tensão confinante, o aumento da tensão desvio resulta em um módulo resiliente de menor valor.

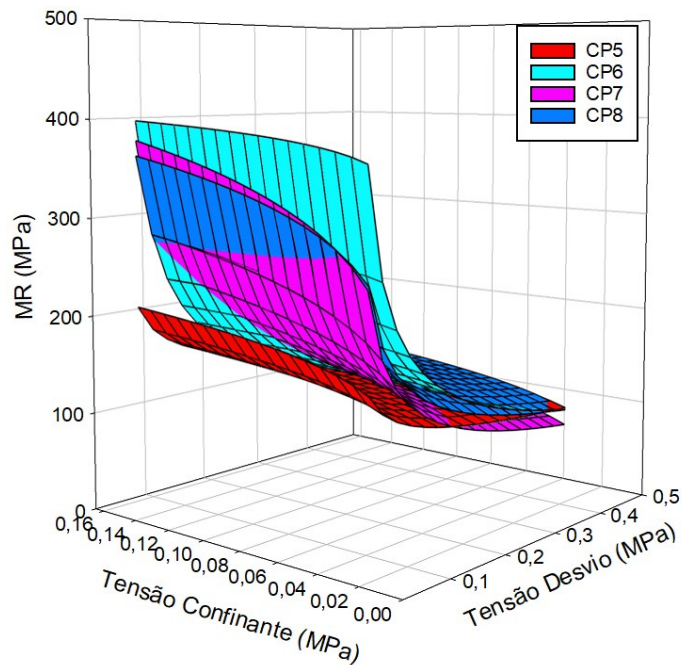
Destaca-se que ao se comparar os valores de módulo resiliente obtidos para os corpos de prova compostos somente por solo vermelho com os obtidos para os corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, pode se observar que para um mesmo valor de tensão confinante, o aumento percentual do módulo resiliente causado pela cal é inversamente proporcional ao aumento da tensão desvio aplicada.

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova 5, 6, 7 e 8 foram representados graficamente e estão apresentados no Gráfico 4, onde é possível observar um aumento dos valores de módulo resiliente em relação aos corpos de prova ensaios compostos somente por solo vermelho. Este aumento é observado em todos os pares de tensão avaliados.

A representação gráfica da média entre os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, com tempo de cura de 7 dias, está apresentada no Gráfico 5.

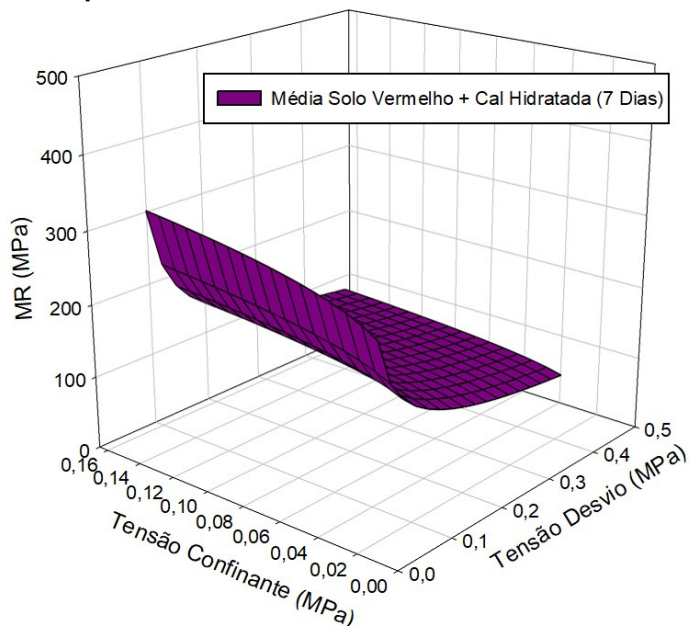
Assim como para os resultados dos ensaios dos corpos de prova compostos somente por solo vermelho, também é possível observar em ambos os gráficos que os maiores valores de módulo resiliente são obtidos para os pares de tensão compostos pelos maiores valores de tensão confinante e pelos menores valores de tensão desvio.

Gráfico 4 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 7 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 5 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 7 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 SOLO VERMELHO COM CAL E TEMPO DE CURA DE 28 DIAS

A média formada pelos resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, com tempo de cura de 28 dias (CP's 1, 2, 3 e 4), estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Média dos resultados obtidos nos ensaios dos CP's moldados compostos por solo e cal hidratada com tempo de cura de 28 dias

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Módulo resiliente (MPa)
0,02	0,02	304,53
0,02	0,04	278,15
0,02	0,07	265,01
0,03	0,04	301,00
0,03	0,07	287,02
0,03	0,12	271,24
0,05	0,04	316,48
0,05	0,12	285,56
0,05	0,16	275,71
0,07	0,07	318,47
0,07	0,14	295,77
0,07	0,21	283,94
0,11	0,12	320,48
0,11	0,21	302,22
0,11	0,33	289,81
0,14	0,14	326,16
0,14	0,28	305,06
0,14	0,40	295,46

Fonte: Autoria própria (2022)

Pode se observar que as variações no módulo resiliente ocorrer de forma mais expressiva quando comparado aos corpos de prova ensaiados aos 7 dias, o que é compatível com o esperado para o estudo.

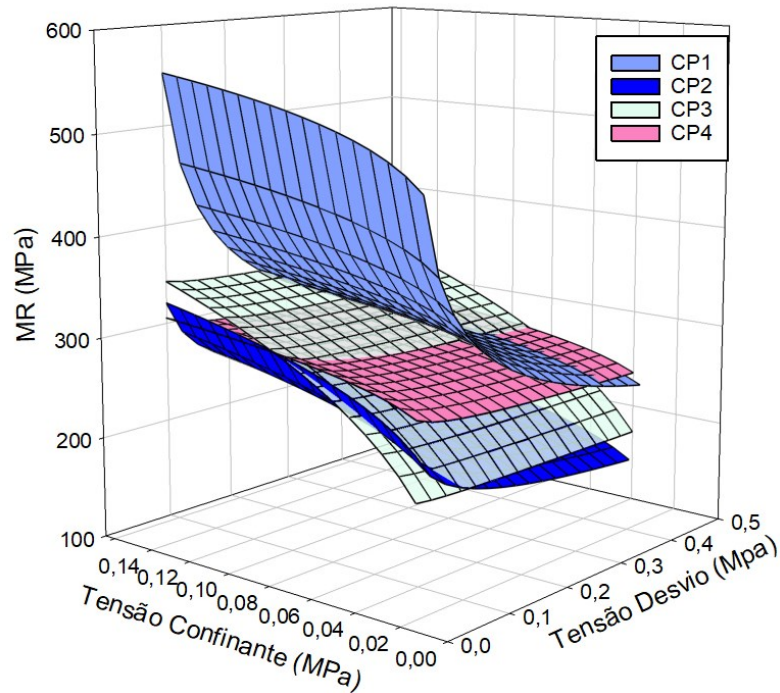
Realizando a mesma comparação anterior, feita entre os valores de módulo resiliente obtidos para os corpos de prova A, B, C e D com os valores obtidos para os corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, a um tempo de cura de 28 dias, pode se observar que para um mesmo valor de tensão confinante, o aumento percentual do módulo resiliente causado pela cal é diretamente proporcional ao aumento da tensão desvio aplicada.

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova 5, 6, 7 e 8 foram representados graficamente e estão apresentados no Gráfico 6, onde é possível observar um aumento dos valores de módulo resiliente em relação aos corpos de prova ensaios compostos somente por solo vermelho e em relação aos corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiado a um tempo de cura de 7 dias.

A representação gráfica da média entre os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova compostos por solo vermelho e cal hidratada, com tempo de cura de 28 dias, está apresentada no Gráfico 7.

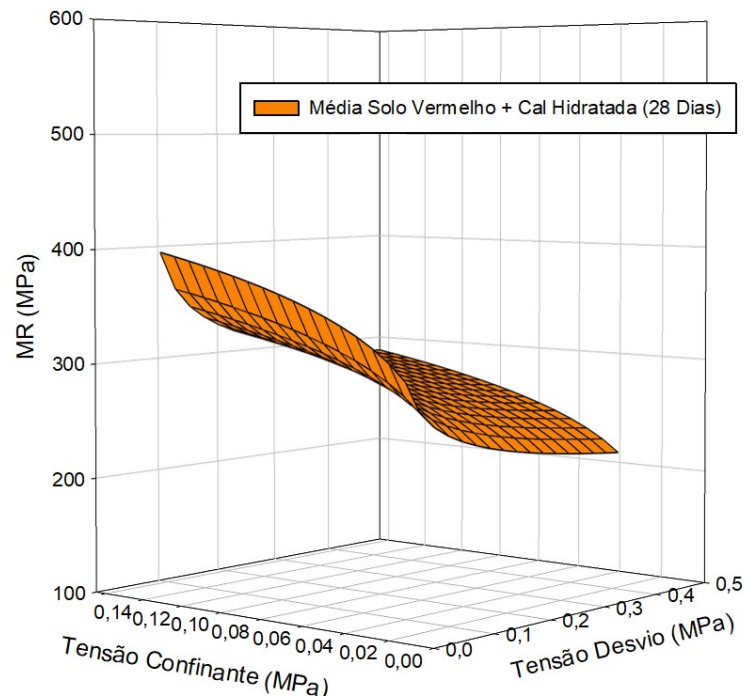
Assim como para os resultados dos ensaios dos outros corpos de prova já apresentados neste estudo, também é possível observar em ambos os gráficos que os maiores valores de módulo resiliente são obtidos para os pares de tensão compostos pelos maiores valores de tensão confinante e pelos menores valores de tensão desvio.

Gráfico 6 - Representação gráfica 3D tensão confinante x tensão desvio x MR para os CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 28 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 7 - Representação gráfica 3D da média entre tensão confinante x tensão desvio x MR dos CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada ensaiados aos 28 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2022)

4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Para comparação dos resultados obtidos nos ensaios que compõe a análise do trabalho, foram determinados valores médios de módulo resiliente. Estes valores foram determinados realizando a média aritmética entre os MR's obtidos para cada caso, e estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores médios de módulo resiliente

Teor de cal (%)	Tempo de cura (dias)	MR Médio (MPa)
0	-	108,68
5	7	179,02
5	28	295,67

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se que para o solo vermelho puro, a média entre os valores de MR ultrapassam a casa dos 100 MPa. Já em um estudo realizado com solo argiloso com coloração marrom avermelhada e comportamento laterítico natural da cidade de Maringá, Rudnick *et al* (2020) apresenta resultados de Módulo Resiliente na casa dos 80 MPa.

O aumento percentual causado pela cal no valor do módulo resiliente do solo vermelho para tempos de cura de 7 e 28 dias em relação ao MR dos corpos de prova compostos somente por solo vermelho (CP's A, B, C e D) estão apresentados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17 - Aumento médio no MR para os CP's 5, 6, 7 e 8

Módulo resiliente médio para os CP's (A, B, C e D) (MPa)	Módulo resiliente médio para os CP's (5, 6, 7 e 8) (MPa)	Aumento do módulo resiliente em relação aos CP's (A, B, C e D) (%)
108,68	179,02	64,72

Fonte: Autoria própria (2022)

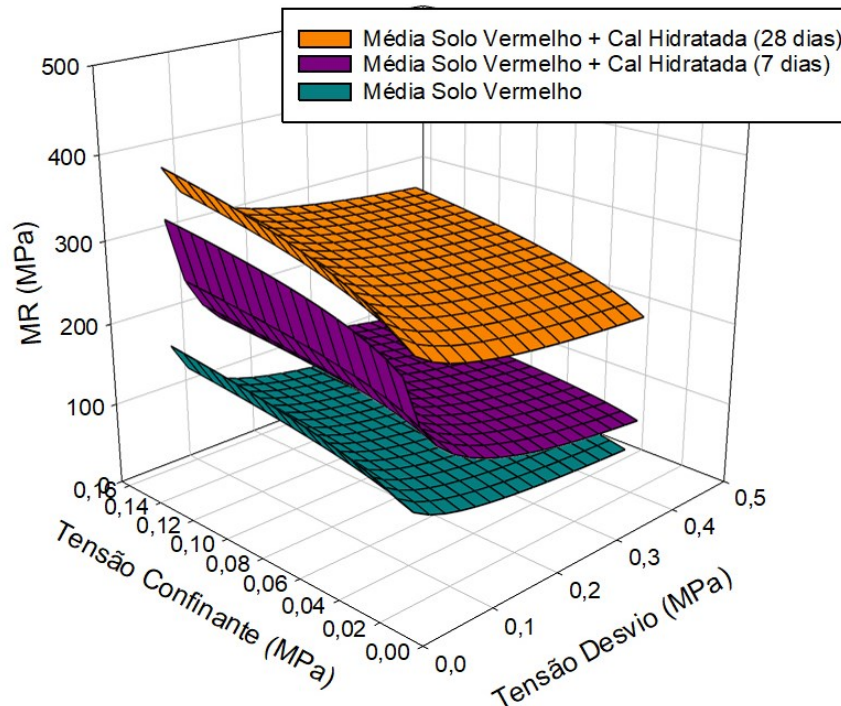
Tabela 18 - Aumento médio no MR para os CP's 1, 2, 3 e 4

Módulo resiliente médio para os CP's (A, B, C e D) (MPa)	Módulo resiliente médio para os CP's (1, 2, 3 e 4) (MPa)	Aumento do módulo resiliente em relação aos CP's (A, B, C e D) (%)
108,68	295,67	172,33

Fonte: Autoria própria (2022)

De forma resumida, a fim de facilitar a visualização, o Gráfico 8 apresenta os resultados obtidos nos 3 ensaios abordados no presente trabalho.

Gráfico 8 - Representação gráfica 3D das médias entre tensão confinante x tensão desvio x MR referentes aos ensaios dos CP's A, B, C, D, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.



Fonte: Autoria própria (2022)

É possível observar o aumento do módulo resiliente causado pela adição de cal em teor de 5%, tanto para 7, quanto para 28 dias de cura. No entanto, é notável que o aumento no MR é consideravelmente maior no segundo caso. Isto também pode ser notado no estudo de Klinsky, Bardini e Fabbri (2014), onde ao se aplicar um teor de cal de 3% a um solo argiloso, também houve aumento no valor do MR, principalmente em tempos de cura mais elevados.

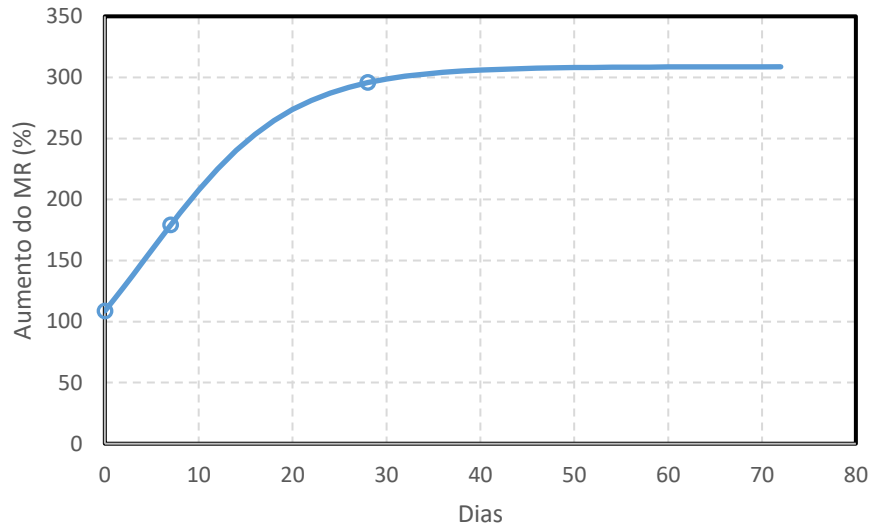
Comparando a curva gráfica formada pelos resultados obtidos nos ensaios de CP's compostos somente por solo vermelho, com os resultados obtidos pelos CP's compostos por solo vermelho e cal hidratada, com tempo de cura de 7 dias, é possível perceber que o maior aumento do módulo resiliente é obtido para os menores valores de tensão desvio adotados no ensaio.

Destaca-se que para o tempo de cura de 28 dias, a curva gráfica formada é mais uniforme quando comparada à curva gráfica para o tempo de cura de 7 dias. O fato disso ocorrer é justificado pelos valores de módulo resiliente que são obtidos para valores baixos de tensão desvio.

Outra análise possível de ser feita com os resultados obtidos, é em relação ao aumento dos valores de MR para o solo vermelho adicionado de cal comparado ao

solo vermelho sem adição de outros componentes de acordo com o tempo de cura aplicado, como apresentado abaixo no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Relação entre aumento do MR em relação ao tempo de cura



Fonte: Autoria própria (2022)

Como já discutido neste trabalho, o aumento analisado tem valores bem expressivos nos primeiros dias, e apresenta um decaimento percentual a partir dos 30 dias de cura, de forma que tende a estabilizar a curva que relaciona o aumento do MR com os dias de tempo de cura aplicados à mistura ensaiada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho estudou a variação do módulo resiliente causada pela adição da cal hidratada em um solo vermelho da Formação Guabirotuba, através do uso da metodologia da norma de método de ensaio 134 do DNIT (2018).

A partir dos resultados dos ensaios de módulo resiliente para as misturas de solo vermelho e cal hidratada, realizadas em prensa triaxial, concluiu-se que a presença de 5% de cal hidratada gerou valores de MR superiores, onde para 28 dias de cura, foram obtidos valores até 172% maiores, quando comparado aos valores obtidos para ensaios realizados em corpos de prova compostos somente por solo vermelho.

Os resultados indicam que os valores de MR da mistura solo vermelho com a cal aumentam de acordo com o tempo de cura aplicado, tornando a mistura mais rígida e estabilizada.

Foi possível concluir também, que assim como para o solo vermelho puro, o MR obtidos em ensaio para os solos da mistura solo vermelho com cal apresentam variação de acordo com às tensões confinantes e às tensões desvio aplicadas. Além disso, foi possível concluir que o tempo de cura de 28 dias, ocasionou em maiores aumentos percentuais do MR em todos os pares de tensão quando comparado ao tempo de cura de 7 dias, sendo este aumento mais intenso para os pares de tensão de maiores valores.

Diante disso, é recomendada a continuação deste estudo considerando diferentes teores de cal e tempos de cura superiores a 28 dias, além da utilização de porcentagens de teor de cal diferentes de 5% para verificar o quanto este valor interfere nos resultados de MR.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AZEVEDO, A.L.C.; OLIVEIRA, A.J.; PEDROSA, R.A; RAMALHO, R.W.

Estabilização de solos com adição de cal. 1998. Dissertação (Pós-graduação) - IPC, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 1998.

AZEVEDO, A.L.C. **Estabilização de solos com adição de cal**: um estudo sobre a reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

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

BATISTA, L.C.M. **Determinação de parâmetros de deformabilidade de camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BERNUCCI, L.B.; *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2006.

BORDIGNON, V.R. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CAVALEIRO, E.A; OLIVEIRA, F.H.L. A interferência do módulo de resiliência do concreto asfáltico no período de projeto de pavimentos rodoviários. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 84-93, abr. 2018.

CORRÊA, J.F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade de Minho, Braga, 2001.

CUNTO, F.J.C. **Determinação do módulo de resiliência de ensaios triaxiais dinâmicos e sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples:** um estudo de três solos do nordeste brasileiro. 1998. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134:** pavimentação: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172:** solos: determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 179:** pavimentação: solo-cal: adição de cal para melhoria de subleito: especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 422:** pavimentação: solos: determinação da deformação permanente: instrução de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT TED 682:** execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro: DNIT, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR 719:** manual de pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

FELIPE, R.S. A erodibilidade da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba. In: MESA REDONDA CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA, 1999, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba: ABMS/UFPR, 1999. p. 53-63.

FELIPE, R.S. Características geológico-geotécnicas na Formação Guabirotuba. **Mineropar**, Curitiba, v.1, 2011.

GUÉRIOS, E.M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para seu uso em pavimento urbano.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal:** fundamentos e aplicações na Engenharia Civil. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2002.

INGLES, O.G; METCALF, J.B. **Soil stabilization:** principles and practice. Melbourne: Butterworths, 1972.

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

KORMANN, A. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba:** estudos de campo e laboratório. 2002. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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

RUDNICK, R.C.; *et al.* Avaliação do módulo de resiliência em misturas alternativas estabilizadas quimicamente com cimento portland. *In: ENCONTRO ANNUAL DA INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. 29. 2020, Maringá. **Anais [...]** Maringá: UEM, 2020.

VAN IMPE, W.F.V. **Soil improvement techniques and their evolution**. Roterdão: Balkema, 1989.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R. Contexto geológico da Formação Guabirota, Bacia de Curitiba. *In: MESA REDONDA CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA*, 1999, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba: ABMS/UFPR, 1999. p. 7-15.

SOUZA, A.N.S. **Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2014.