

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LAUDERI MARONEZI JUNIOR**

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO BOTUCATU COM  
ADIÇÃO DE CAL E CINZA VOLANTE**

**Alegrete  
2017**

**LAUDERI MARONEZI JUNIOR**

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO BOTUCATU COM  
ADIÇÃO DE CAL E CINZA VOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M. Sc. Jaelson Budny

**Alegrete  
2017**

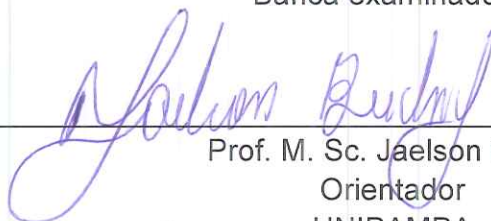
LAUDERI MARONEZI JUNIOR

ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO BOTUCATU  
COM ADIÇÃO DE CAL E CINZA VOLANTE

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito  
parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 23/06/2017

Banca examinadora:



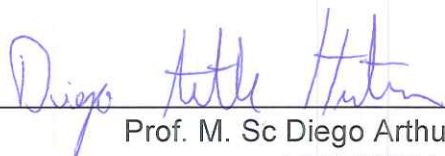
---

Prof. M. Sc. Jaelson Budny  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos  
UNIPAMPA



---

Prof. M. Sc Diego Arthur Hartmann  
UNIPAMPA

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, a estabilização de um solo de formação Botucatu com a utilização de cal (CH-II Dolomítica) e cinza volante proveniente da cidade de Candiota – RS, pela Usina Termelétrica Presidente Médici. O solo residual tem como origem uma jazida localizada no município de Alegrete – RS. Foram realizados ensaios de caracterização do solo; segundo a classificação Unificada o solo pertence ao grupo ML, de acordo com a classificação Rodoviária se enquadrou como A – 4, já no experimento MCT classificou-se no grupo NA'; pelo ensaios Físico-químicos foi determinado o teor de 92% de solo e 8% + Cal ou CV, ou usando 92% de solo + 4% de CV + 4% de Cal; ensaios Mini-Proctor com o objetivo de encontrar a umidade ótima e massa específica de cada mistura. Para o ensaio de Compressão Simples foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 onde foram colocados para curar por 28 dias, esperando de encontrar a resistência de 2,1 MPa. Foram realizados ensaios de tração por compressão diametral no qual tiveram os corpos-de-prova moldados pelo compactador Marshall com diâmetro de 10 cm e altura de 5,6 cm ( $\pm 0,2$ cm). Verificou-se o comportamento das misturas quando encontradas em um ambiente de total saturação, as misturas contendo cal foram as únicas que apresentaram característica de resistência para esse meio. A pesquisa não alcançou a meta dos 2,1 MPa conforme a NBR 12253/2012 de solo-cimento, mas o uso da cal e cinza volante apresentaram um aumento no módulo de elasticidade, diminuindo assim as suas deformações, além de tornar possível o seu uso em saturação.

**Palavra chave:** cinza volante; estabilização de solos; solo da formação Botucatu.

## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate, through laboratory tests, the stabilization of a Botucatu formation soil by verifying the feasibility of using lime (CH-II Dolomítica) and fly ash from the city of Candiota - RS by Presidente Médici Thermoelectric Power Plant. The residual soil has its origin a localized reservoir in Alegrete-RS. Soil characterization tests were conducted; according to the Unified classification the soil belongs to ML group, according to the Road classification fits as A - 4, already in the MCT experiment entered the NA' group, Physical-chemical tests being determined the content of 92% of soil + 8% of Cal or CV, or using 92% of soil + 4% of CV + 4% of Cal; Mini-Proctor assay was found to optimum moisture and specific mass of each mixture. For the Simple Compression Test were molded 5x10 cylindrical specimens where they were placed to cure for 28 days, has been resistance of 2.1 MPa. Diametral Compression tensile tests were carried out in which the specimens were molded by the Marshall compactor with a diameter of 10 cm and a height of 5.6 cm ( $\pm 0.2$  cm). It was verified the behavior of the mixtures, when found in an environment of total saturation, mixtures containing lime were the only ones that presented resistance characteristic for this medium. The research did not reach the goal of 2.1 MPa according to NBR 12253/2012 of soil-cement. However, the use of lime and fly ash showed increase in the modulus of Elasticity, thus reducing its deformations, besides possiblite its use in saturation.

**Keywords:** fly ash; soil stabilization; soil Botucatu formation.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Contextualização.....	7
1.2	Objetivos.....	9
1.2.1	Objetivo Geral.....	9
1.2.1	Objetivos Específicos.....	9
1.3	Justificativa.....	9
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1	Mecânica dos Solos para a Engenharia Civil.....	10
2.2	Solos.....	10
2.3	Cinza Volante.....	10
2.4	Cal Hidratada.....	11
2.5	Classificação do Solo.....	12
2.5.1	Classificação Unificada.....	12
2.5.1.1	Solos Granulares.....	13
2.5.1.2	Solos de Granulação Fina.....	13
2.5.2	Sistema Rodoviário de Classificação.....	14
2.5.3	Classificação MCT.....	15
2.6	Estabilização do Solo.....	16
2.6.1	Estabilização do Solo com Cal.....	17
2.6.2	Estabilização do Solo com Cinza Volante.....	18
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	Materiais.....	21
3.1.1	Solo.....	21
3.1.2	Cal.....	22
3.1.3	Cinza Volante.....	22
3.1.4	Água Destilada.....	23
3.2	Ensaio de Caracterização.....	23
3.2.1	Classificação Granulométrica.....	23
3.2.2	Massa Específica do Solo.....	26
3.2.3	Massa Específica da Cal e da Cinza Volante.....	27
3.2.4	Limite de Liquidez.....	28
3.2.5	Limite de Plasticidade.....	29
3.2.6	Ensaio de Compactação Mini-MCV.....	30
3.2.7	Classificação MCT.....	31
3.3	Ensaio Físico-Químico.....	31
3.4	Ensaio de Compactação Mini-Proctor.....	34

3.5 Misturas e Dosagem .....	36
3.6 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova .....	36
3.6.1 Corpos de Prova para Ensaio de Compressão .....	36
3.6.2 Corpos de Prova para Ensaio de Tração or Compressão Diametral.....	38
3.7 Imersão das Amostras .....	40
3.8 Ensaio de Compressão Simples .....	41
3.9 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	43
4 RESULTADOS.....	46
4.1 Granulometria.....	46
4.2 Massa Específica .....	47
4.3 Limites de Atterberg .....	47
4.3.1 Limite de Liquidez .....	47
4.3.2 Limite de Plasticidade.....	48
4.3.3 Índice de Plasticidade.....	48
4.4 Classificação do Solo .....	49
4.5 Definição dos Teores de Cal e Cinza Volante.....	50
4.6 Definição da Massa Específica e Umidade Ótima.....	52
4.7 Dosagens .....	54
4.8 Submersão dos CP's.....	54
4.9 Resistência à Compressão Simples.....	55
4.10 Módulo de Elasticidade das Misturas .....	59
4.11 Ensaio à Tração por Compressão Diametral.....	60
5 CONCLUSÃO .....	66
5.1 Sugestão Para Trabalhos Futuros.....	67
REFERÊNCIAS.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Métodos de Estabilização de Solo – Diagrama Esquemático .....	7
Figura 2– Classificação do Sistema Unificado. ....	14
Figura 3 – Esquema para a Classificação pelo Sistema Rodoviário. ....	14
Figura 4 – Ábaco para Classificação MCT .....	16
Figura 5 – Fluxograma dos Procedimentos.....	20
Figura 6 – Localização da Jazida .....	21
Figura 7 – Modo de Secagem do Solo .....	22
Figura 8 – Cal (CH-II Dolomítica) e Cinza Volante .....	23
Figura 9 – Execução do ensaio de Massa Específica do Solo .....	27
Figura 10 – Execução do Ensaio de Limite de Liquidez .....	28
Figura 11 – Execução do Ensaio de Limite de Plasticidade .....	29
Figura 12 – Ensaio Físico-Químico: Mistura Solo + Cal .....	32
Figura 13 – Preparação das Misturas do Ensaio Físico-químico .....	33
Figura 14 – Execução do Ensaio de Mini-Proctor .....	35
Figura 15 – Moldagem dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão Simples	37
Figura 16 – Moldagem dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	40
Figura 17 – Imersão dos Corpos de Prova.....	41
Figura 18 – Ensaio de Compressão Simples .....	42
Figura 19 – Ensaio de Compressão Diametral de Corpo de Prova Cilíndrico .....	43
Figura 20 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral .....	45
Figura 21 – Submersão das Amostras de Solo e Solo+CV .....	55



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica.....	46
Gráfico 2 – Limite de Liquidez .....	48
Gráfico 3 – Sistema de Classificação MCT .....	50
Gráfico 4 – Ensaio Físico-químico: Mistura Solo + Cal .....	51
Gráfico 5 – Ensaio Físico-químico: Mistura CV + Cal .....	51
Gráfico 6 – Curva de Compactação – Mini-Proctor .....	53
Gráfico 7 – Tensão versus Deformação- Ensaio de Compressão Simples .....	56
Gráfico 8 – Tensão versus Deformação- Ensaio de Compressão Simples para CP's Submersos .....	57
Gráfico 9 – Resistência à Compressão das Misturas .....	58
Gráfico 10 – Módulo de Elasticidade das Misturas.....	60
Gráfico 11 – Resistência a Tração versus Deformação- Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	61
Gráfico 12 – Resistência à Tração versus Deformação para Amostras Submersas .	62
Gráfico 13 – Resistência à Tração das Misturas .....	63
Gráfico 14 – Análise das Resistências de Todas as Misturas .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do Ensaio de Mini-Proctor .....	39
Tabela 2 – Massa Específica .....	47
Tabela 3 – Limites de Consistência.....	49
Tabela 4 – Classificação do Solo .....	49
Tabela 5 – Porcentagens das Misturas .....	52
Tabela 6 – Massa Específica e Umidade Ótima.....	53
Tabela 7 – Dosagens Realizadas.....	54
Tabela 8 – Relação RCS/RTCD.....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MCT – Miniatura Compactado Tropical

MEAS – Massa Específica Aparente Seca

MEASmáx – Massa Específica Aparente Seca Máxima

CV – Cinza Volante

CP – Corpo de prova

RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RCS – Resistência à Compressão Simples

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

# 1 INTRODUÇÃO

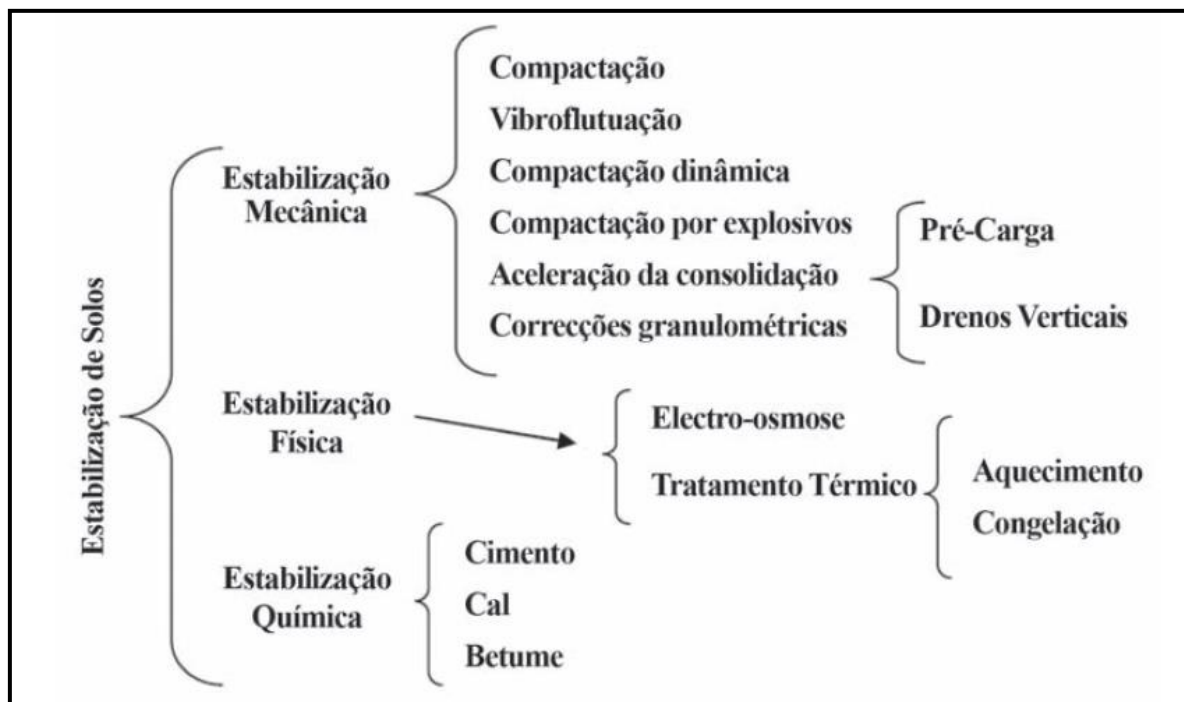
## 1.1 Contextualização

Na engenharia o solo tem um papel fundamental, sendo utilizado como material de construção, desse modo nota-se a importância das considerações de seu comportamento, estudando sua reação perante as tensões e deformações sofridas nas obras em que são usados, sendo fundações, escavações, estruturas de pavimento, entre outros. Todo esse ramo de análises da Mecânica dos Solos compõe-se numa Ciência de Engenharia, no qual o engenheiro civil faz a interação para a elaboração de seus projetos.

Quando os solos naturais não possuem as características necessárias para efetivar adequadamente as funções que são destinadas, existe como possível solução a modificação de suas propriedades dessa forma melhorando o seu comportamento, sendo essa modificação o que denominamos estabilização de solos (CRUZ, 2010).

Os métodos conhecidos atualmente para a estabilização de solos podem ser divididos em três grupos, de acordo com os meios que são utilizados (FIGURA 1).

Figura 1 – Métodos de Estabilização de solo- diagrama esquemático



Fonte: Cruz (2010, p. 50)

A estabilização mecânica tem como objetivo melhorar as propriedades do solo, tais como a resistência, rigidez e impermeabilidade por meio da organização das partículas sólidas e de sua correção granulométrica. Por sua vez, a estabilização física é o método utilizado para a alteração de suas propriedades com uso do calor ou da aplicação de um potencial elétrico. Quando se faz a adição de substâncias que melhoram as propriedades do solo, empregando-se normalmente a cal ou o cimento, chamamos de estabilização química, sendo uma técnica muito prática pela sua facilidade de aplicação, pela versatilidade e pelos resultados apresentados.

O Brasil apresenta uma vasta diversidade de solos, no qual muitas vezes se deparam com jazidas que não possuem um solo que se enquadrem nas especificações técnicas para os tipos de obras em que são propostos, ou se deparam com jazidas localizadas a grandes distâncias do local da obra, a solução desses problemas pode ser o emprego de materiais alternativos ou usar o método de estabilização do solo, sendo o mais usual a melhoria que utiliza o processo de estabilização (PINTO, 2006).

A adição de cal por sua vez, é recomendada para a estabilização de solos coesivos. A cal interage com as partículas e promove uma série de modificações físico-químicas, o que aumenta sua estabilidade face à ação da água. Ela promove uma melhoria significativa na textura e na estrutura do solo, diminuindo a plasticidade e ocasionando ganho na resistência mecânica. Além disso, se verifica um aumento considerável da resistência a longo prazo. Por outro lado, o aumento de resistência na mistura solo-cal resulta na redução substancial do seu potencial de deformação (GUTIERREZ, 1998; CRISTELO, 2001).

A busca constante da redução de custos nas obras atrelado à preservação ambiental, torna dessa forma o aproveitamento das cinzas provenientes da queima de carvão em termoelétricas uma possível alternativa eficiente. Tal resíduo substitui uma parcela da cal utilizada para estabilização do solo, reduzindo dessa maneira ainda mais o custo final da obra.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Estudar o desempenho mecânico de um solo natural do município de Alegrete- RS, verificando seu comportamento quando introduzido cinza volante e cal, abordando o seu uso para estabilização do solo.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Verificar o melhor traço de cinza volante e cal a fim de tornar viável a sua utilização, priorizando os requisitos básicos para o tipo de obra em que for solicitado;
- fazer a caracterização do solo da região de Alegrete, cidade pertencente ao estado do Rio Grande do Sul;
- estudar o comportamento no ganho de resistência introduzindo na mistura apenas cinza volante, sem a presença da cal, assim como a cal sem a presença da cinza;
  - verificar as resistências à compressão, tração e Modulo elástico para cada mistura;
  - fazer um estudo sobre a influência nas resistências das misturas submetido à submersão;
  - conforme os resultados obtidos, fazer uma análise quanto aos benefícios de se aplicar ou não o resíduo no solo.

## **1.3 Justificativa**

A cinza volante trata-se de um detrito da queima de carvão mineral em indústrias e termoelétricas, nas quais, muitas vezes não se encontra um aproveitamento sustentável, sendo descartadas na natureza. Dessa forma, o estudo procura desenvolver uma forma economicamente viável para a aplicação desse resíduo na estabilização do solo. Buscando verificar o ganho na resistência mecânica em suas propriedades, analisando as vantagens de empregar esse método em obras envolvendo movimentação de terra. Com o intuito de procurar uma

forma econômica, por se tratar de um material de fácil acesso e barato, optou-se pelo uso da cal junto com a cinza volante.

## **2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Mecânica dos Solos para a Engenharia Civil**

É de grande importância considerar o comportamento dos solos nas obras de Engenharia Civil, pois sua grande maioria é assentada sobre o terreno. A Mecânica dos Solos estuda o comportamento dos solos quando tensões são aplicadas, sendo através das fundações ou aliviadas em casos de escavações, como também analisam seu comportamento sobre a percolação de água nos seus vazios, isso constitui uma Ciência de Engenharia, onde o engenheiro Civil considera para elaborar seus projetos (PINTO, 2006).

### **2.2 Solos**

Solo é um material resultante da decomposição das rochas através da ação de agentes físicos e químicos, podendo ou não ter matéria orgânica, vindos do produto da decomposição e desintegração da rocha pelas ações da água, temperatura, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias), e, em condições especiais, as argilas (partículas finas). O estudo do solo é de grande importância, visto que a maior parte das obras de engenharia são construídas sobre ele (CAPUTO, 1988; NBR 6502, 1993).

### **2.3 Cinza Volante**

A cinza volante é um pó mineral fino, resultado da fusão e calcinação das impurezas encontradas no carvão, quando esse é submetido a uma elevada temperatura e pressão. Suas partículas têm formato esférico, tendo em sua maioria dimensões que variam entre 0,5  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  (HOPPE, 2008).

A primeira análise publicada sobre as propriedades da cinza volante teve sua divulgação na edição de 11 de junho de 1914 da revista *Engineering News nos*

Estados Unidos, onde foi verificado que as composições das pozolanas naturais e da cinza volante são semelhantes. Depois dessa data, várias pesquisas foram realizadas com o objetivo de compreender melhor as propriedades desta cinza. O primeiro trabalho referente ao uso da cinza em concreto foi publicado por DAVIS *et al*, em 1937. Tal trabalho mostrou a capacidade do desenvolvimento de reações pozolânicas, ou seja, a capacidade da cinza volante em reagir com hidróxido de cálcio e formar compostos cimentastes semelhantes as formadas pela hidratação do cimento Portland. Neste estudo foram baseadas as primeiras especificações, metodologias de testes e as recomendações de utilização da cinza volante (DHIR, 1986; GAVA, 1999).

De acordo com Núñez (2007) a cinza volante é produzida, geralmente, em termoelétricas que queimam o carvão mineral ou a matéria orgânica, sendo uma pozolana artificial. A pozolana é definida como um material silicoso ou silício-alumínio, que por si só possui pouca, ou nenhuma capacidade de cimentação, mas em forma finamente dividida e, na presença de umidade reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para a formação de compostos e, possui propriedades cimentantes. Sabe-se que a cinza volante desenvolve reações pozolânicas e que sua mistura com cal tem as mesmas características de solo-cal (DALLA, 2009).

Segundo Dalla (2009), solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não apresentam uma reação satisfatória com a presença da cal. Para que ocorra a estabilização desse solo, quando se torna economicamente inviável fazer a correção com cimento ou quando a correção da granulometria não é possível, a adição de cinza volante pode torna-lo reativos à cal. Logo a cinza volante tem a função de substituir a fração fina (argila) do solo, uma vez que pode reagir com a cal, embora a dimensão da cinza seja diferente da argila.

## **2.4 Cal Hidratada**

Existem dois grandes grupos de ligantes, os ligantes hidráulicos, os quais fazem presa em contato com a água e os ligantes aéreos, que quando em contato com o ar fazem presa. A cal hidráulica e os cimentos estão inclusos no primeiro grupo, já no segundo grupo faz parte o hidróxido de cálcio resultante da reação do óxido de cálcio com a água (CRISTELO, 2001).



Cal é um aglomerante obtido pela calcinação de rochas calcárias, a temperatura de 850°C a 900°C, constituídas por carbonato de cálcio e carbonato magnésio. Dando origem ao óxido de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO – MgO) também chamado de cal virgem. Essa cal virgem quando em contato com água, produz sua hidratação, liberando grande quantidade de calor, resultando na cal hidratada (Ca (OH)<sub>2</sub>) (KATZ, 2007).

## 2.5 Classificação do Solo

Atualmente pode se encontrar diversas classificações do solo, como pela sua origem, evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, por sua estrutura, pela verificação dos índices de vazios, entre outras. Entretanto as classificações que apresentam valores de interesse para a Engenharia Civil são as que se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos. Nesses sistemas, os índices analisados são a composição granulométrica e os índices de Atterberg (PINTO, 2006).

Pelo ponto de vista da engenharia, a classificação do solo tem como função estimar suas características comportamentais, desse modo, orientando o programa de investigação necessário para conseguir a adequada análise de um problema (PINTO, 2006)

### 2.5.1 Classificação Unificada

Elaborado pelo Professor Arthur Casagrande, no início da década de 40, com o intuito de emprega-lo para obras de aeroportos, sendo atualmente generalizado e utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra. Foi a primeira vez que os solos orgânicos foram considerados como um grupo de características e comportamento próprio (PINTO, 2006).

Nesse sistema, todos os solos são classificados pelo conjunto de duas letras (como mostrado no Quadro 1), a primeira propriedade considerada é a porcentagem de finos presentes no solo, adotando como finos o material que passa na peneira n°200 (0,075mm). No qual quando se observa uma quantidade menor que 50%, considera-se com granulometria grossa, **G** ou **S**. Já quando o material passante for

maior que 50%, o solo é classificado com granulometria fina, identificado com a letra **M, C** ou **O** (PINTO, 2006).

Quadro 1 – Terminologia do Sistema Unificado de Classificação

G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
-	-
O	Solo orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
H	Alta compressibilidade
L	Baixa compressibilidade
-	-
Pt	Turfas

Fonte: PINTO (2006, p.64)

### 2.5.1.1 Solos Granulares

Solos granulares podem ser classificados como areia ou pedregulho, sendo necessário verificar qual a maior das duas porcentagens prevalecer. A segunda característica depende de sua organização granulométrica, podendo categorizar como “bem-graduados”, onde possui uma boa distribuição de partículas ao longo de uma faixa de diâmetros, ou “mal-graduada”, no qual se tem uma predominância de grãos com certo diâmetro (PINTO, 2006).

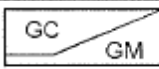
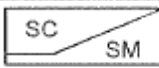
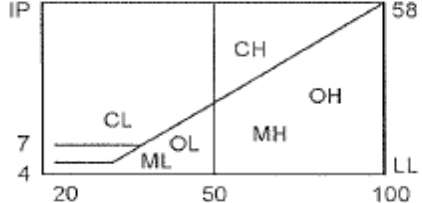
### 2.5.1.2 Solos de Granulação Fina

A classificação do solo é feita como sendo argila, silte ou solo orgânico, quando esses tiverem a predominância de fração fina. A distinção do solo orgânico para o silte refere-se ao seu aspecto visual, onde apresenta uma coloração escura típica – marrom-escuro, cinza-escuro ou preto (PINTO, 2006).

Solos finos possuem como característica sua compressibilidade, observando que quanto maior seu limite de liquidez mais compressível é o solo. O sistema secundário de classificação refere-se a amostras de elevada compressibilidade (H)

ou baixa compressibilidade (L) (PINTO, 2006). Com a obtenção de informações necessárias obtidas por ensaios específicos, a classificação pode ser feita de acordo com a Figura 2.

Figura 2 – Classificação do sistema unificado.

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

Fonte: Pinto (2006, p.69).

### 2.5.2 Sistema Rodoviário de Classificação

A Figura 3 refere-se a classificação pelo sistema rodoviário, onde divide as características do solo observando sua granulometria e nos limites de Atterberg.

Figura 3 – Esquema para a classificação pelo Sistema Rodoviário.

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

Fonte: Pinto (2006, p.70)

De acordo com Pinto (2006), o sistema de classificação separa o solo com granulometria grosseira em grupos A-1, A-2 e A-3 sendo os grupos que apresentaram mais de 35% de material retido na peneira #200, já os com porcentagem maior de 35% passante pela peneira formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, como mostrado na Figura 3.

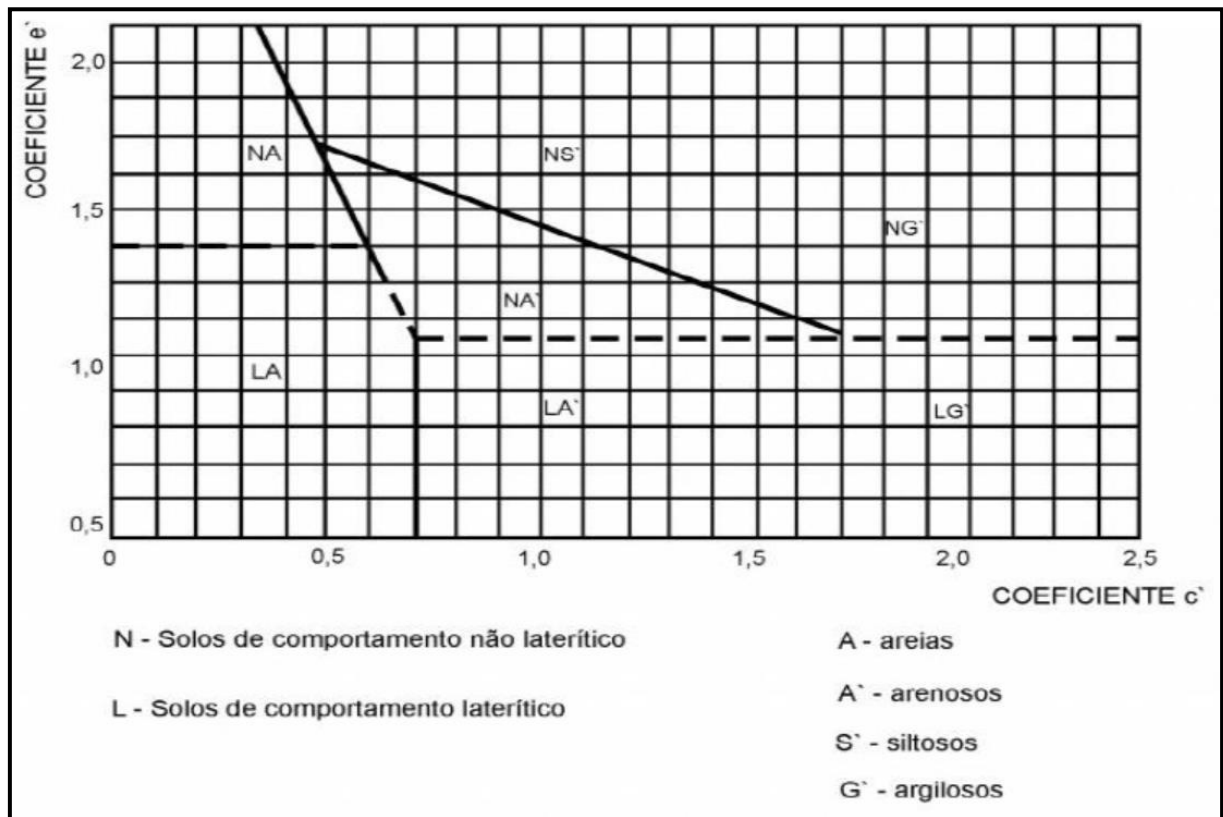
Observa-se a semelhança nos métodos de classificação unificada e pelo sistema rodoviário, já que utilizam a curva granulométrica em solos graúdos e índices de Atterberg para solos finos.

### **2.5.3 Classificação MCT**

Criado por Nogami e Villibor em 1981 o sistema de classificação MCT que significa “Miniatura Compactado Tropical”, foi desenvolvida especialmente para o estudo de solos tropicais, baseando-se nas propriedades mecânicas e hídricas encontradas através de corpos de prova moldados em dimensões reduzidas. Esse método se diferencia dos outros que utilizam como critérios avaliativos os resultados encontrados nos ensaios de granulometria, limite de liquidez e o índice de plasticidade.

A classificação divide os solos em 2 classes, sendo o grupo dos solos lateríticos e outro dos solos não-lateríticos, dentro dessas classes o sistema se divide em 7 subclasses, tratando-se do tipo de solo, se é arenoso, argiloso, siltoso ou areias. Para se classificar o solo através da metodologia MCT, utiliza-se o gráfico mostrado na Figura 4, no qual a linha tracejada separa os solos lateríticos dos não-lateríticos.

Figura 4 – Ábaco para Classificação MCT



Fonte: DNIT (2006, p.68)

## 2.6 Estabilização do Solo

Segundo Medina (1987), o solo é o material mais comum na construção civil e o de maior abundância na crosta terrestre. Para a terraplanagem e para a pavimentação pode fazer parte da sub-base, subleito, até às vezes da base e revestimento primário. Quando os engenheiros não encontrarem as características do solo requeridas para o projeto poderão ser tomadas as seguintes soluções:

- evitar ou contornar o terreno inadequado;
- remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- projetar a obra para situação de terreno com fundação de baixa qualidade;
- estabilizar o solo existente.

De acordo com Medina e Motta (2004), a estabilização procura modificar as seguintes propriedades do solo:

- resistência ao cisalhamento, aumentando a capacidade de resistir às mudanças ambientais, principalmente umidade, além de aumentar a capacidade de suportar as cargas que forem aplicadas;
- aumento ou diminuição da permeabilidade;
- aumento do módulo de elasticidade.

Existem vários métodos de estabilização de solos utilizados no mundo. Os mais usados são a estabilização mecânica, estabilização granulométrica, estabilização química, estabilização elétrica e estabilização térmica. Como exemplo das estabilizações podem ser citados os solos reforçados com geossintéticos, solos grampeados, colunas Solo-Cal, colunas Solo-Brita, compactação dinâmica, drenos verticais de areia, micro estacas, estabilização via fenômenos de condução em solo (MARQUES 2004).

De acordo com Cristelo (2001), existem três grupos de métodos que são mais utilizados para a estabilização de solos: **método de estabilização mecânica** que usa a organização das partículas do solo para melhorar suas características, recorrendo ou não de correções granulométricas; **método de estabilização física**, que consiste no uso de calor, eletricidade, entre outros, para alterar as propriedades do solo; **métodos de estabilização química** através de aditivos químicos que modificam permanentemente as propriedades do solo.

### 2.6.1 Estabilização do Solo com Cal

Quando adicionado cal a um solo fino em presença de água, ocorrem quatro reações químicas principais, que são: a troca catiônica; floculação-aglomeração; reações pozolânicas; e carbonatação. A troca catiônica e a floculação-aglomeração iniciam imediatamente após a cal entrar em contato com a água, estas reações modificam as propriedades físicas do solo (plasticidade, textura, trabalhabilidade, estabilidade volumétrica), sem alteração considerável de resistência (BHATTACHAJA, 2003; BEHAK, 2007).

As reações pozolânicas e a carbonatação iniciam-se algumas semanas após a cal entrar em contato com a água e, desenvolvem-se durante um longo período de tempo, vários anos em alguns casos. As reações pozolânicas causam a formação de produtos cimentantes e é a responsável pelo aumento da resistência e durabilidade das misturas solo-cal. A carbonatação é a reação não desejada, pois produz cimentos fracos, prejudicando o processo de estabilização (BHATTACHAJA, 2003; BEHAK, 2007).

A compactação deve ser feita imediatamente após a mistura solo-cal, para evitar a carbonatação. Uma adequada compactação reduz a porosidade do material, diminuindo a circulação interna de ar (CHAUVEL e NÓBREGA, 1980).

De acordo com Behak (2007), a adição de cal em solos argilosos altera suas propriedades físicas e mecânicas, resultando em melhorias nas resistências, comportamento tensão-deformação, plasticidade, estabilidade volumétrica, trabalhabilidade e condutividade hidráulica. Essas modificações dependem de diversos fatores, tais como tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, tempo e condições de cura.

### **2.6.2 Estabilização do Solo com Cinza Volante**

Conforme Rohde (2006), o uso para a estabilização do solo com adição de cinza volante em sua mistura solo-cinza-cal, teve sua primeira aplicação que se tem conhecimento em 1920 e 1930. Já no Brasil, segundo Dalla (2009), teve sua primeira utilização na obra hidrelétrica de Jupia, no ano de 1964, onde foi empregado na mistura do concreto, com intuito de diminuir o calor de hidratação.

Para as propriedades da cinza volante, ela possui uma capacidade de cimentação quase nula, mas quando em contato com a água, reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para formar ou auxiliar na formação de compostos com propriedades cimentantes (DALLA, 2009). As partículas de solo juntamente com a cal e parte do dióxido de carbono presente na água, combinadas com a cinza volante, dão origem a reação de natureza pozolânica (MATEOS, 1961).

Em misturas contendo solo, cinza volante e cal hidratada, com o aumento de teor de cinza, observa-se uma redução no peso específico aparente seco máximo e

um aumento da umidade ótima, fixado a energia de compactação. Comportamento similar também é constatado em misturas solo-cal (KANIRAJ, 1996; DALLA, 2009).

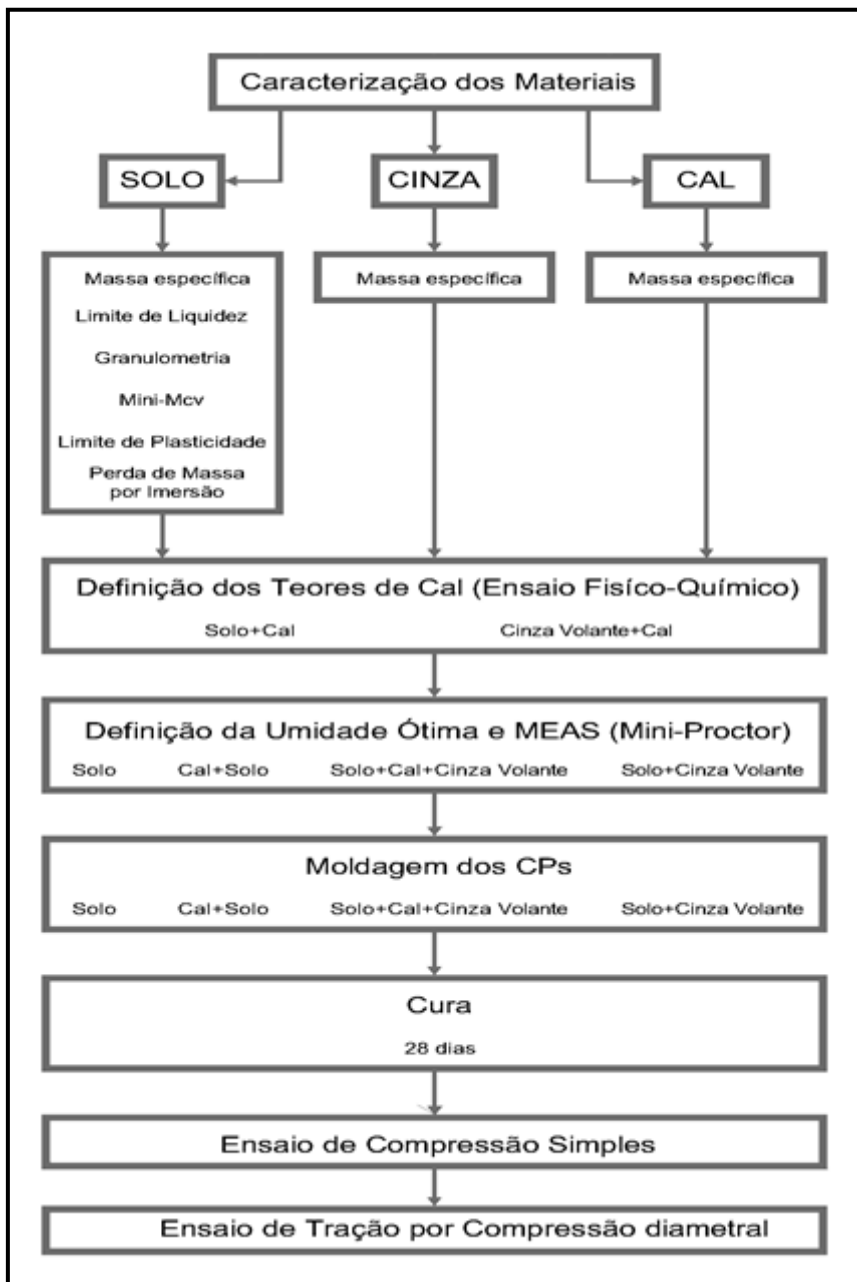
Segundo Kaniraj (1996), o aumento da quantidade de cinza volante contribui para a redução do peso específico real dos grãos das misturas. Amostras compactadas nas condições de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, com uma energia de compactação, apresentam uma diminuição da porosidade e do índice de vazios. Tais características tornam interessante a utilização de processos de estabilização de solos com adição de cinza volante na construção de aterros, principalmente solos moles (DALLA, 2009).



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos a serem utilizados durante a fase experimental da pesquisa. A Figura 5 apresenta o fluxograma com as seqüências das atividades propostas.

Figura 5 – Fluxograma dos Procedimentos.



Fonte: Elaboração própria

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa, foi coletado na jazida localizada na VRS 306, distante 03 km do bairro Balneário Caverá, no município de Alegrete do estado do Rio Grande do Sul. A localização da jazida pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Localização da Jazida



Fonte: Google Earth

O solo foi coletado e optou-se pela sua secagem ao ar, conforme mostra a Figura 7, posteriormente a amostra foi destorroada e armazenada para utilização nos ensaios futuros.

Figura 7 – Modo de Secagem do Solo



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2 Cal

A cal hidratada que foi usada nos experimentos é comercializada na cidade de Alegrete – RS, sendo classificada como CH-II Dolomítica, atendendo os requisitos da NBR 7175 (ABNT, 2003). A cal utilizada nos ensaios pode ser verificada na Figura 8 (a).

### 3.1.3 Cinza Volante

Foi utilizada nos ensaios a cinza volante (CV) que é produzida na cidade de Candiota – RS pela Usina Termelétrica Presidente Médici. A Figura 8 (b) apresenta a cinza usada.

Figura 8 – (a) - Cal (CH-II Dolomítica) e (b) - Cinza Volante



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.4 Água Destilada

A água que foi utilizada para a produção das misturas e realização dos ensaios foi água destilada. A água é proveniente do abastecimento urbano do município de Alegrete- RS, sendo feita a destilação no Laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa – Campus Alegrete.

## 3.2 Ensaio de Caracterização

### 3.2.1 Classificação Granulométrica

O método utilizado para a verificação da granulometria foi conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016), no qual especifica o mínimo de 1 kg, com umidade próxima à

higroscópica, destorroada e quarteada. A classificação do solo seguiu NBR 7181 (ABNT, 2016).

Os procedimentos para tal experimento se iniciaram com peneiramento do material na peneira de 2 mm. A parte retida foi lavada e colocada para secagem em estufa, até a constância de massa. O material foi pesado e tomando sua massa como  $M_g$ . Novamente o solo foi submetido nas peneiras de aberturas 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm. Tomando anotação das porcentagens retidas em cada malha.

O material fino passante na peneira de 2 mm teve a massa anotada como  $M_h$ . Separando-se 100 g para determinação da umidade higroscópica ( $h$ ).

O procedimento para o ensaio de sedimentação consistiu em submeter 120g de solo que passar na peneira 2,0 mm para um béquer de 250 cm<sup>3</sup>, juntamente com 125 cm<sup>3</sup> de solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 cm<sup>3</sup> de solução. O béquer foi agitado e então colocado em repouso por 12 horas. Após esse procedimento, a mistura foi submetida ao parelho dispersor durante 15 minutos.

O solo foi transferido para uma proveta, adicionando 1.000 cm<sup>3</sup> de água, realizando uma agitação enérgica com o intuito de manter as partículas em suspensão. Tomando a anotação da hora em que a sedimentação iniciou mergulhando o densímetro na dispersão, efetuando as leituras nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a contar do início da sedimentação.

A massa total da amostra seca foi calculada pela Equação 1.

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \cdot 100 + M_g \quad (1)$$

Onde:

$M_s$  – massa total da amostra seca;

$M_t$  – massa da amostra seca ao ar;

$M_g$  – massa do material retido na peneira de 2mm;

$h$  – umidade higroscópica.

A Equação 2 refere-se ao cálculo da percentagem de material que passa em cada peneira do peneiramento grosso.

$$Qg = \frac{(Ms - Mi)}{Ms} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

$Q_g$  – percentagem do material passante em cada peneira;

$M_s$  – massa total da amostra seca;

$M_i$  – massa do material retido em cada peneira.

A Equação 3 calcula a percentagem de solo em suspensão correspondente a cada leitura do densímetro.

$$Qs = N \cdot \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \cdot \frac{V \cdot \delta_c \cdot (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100+h)} \cdot 100} \quad (3)$$

Onde:

$Q_s$  – percentagem de solo em suspensão;

$N$  – percentagem de material que passa na peneira de 2 mm;

$\delta$  – massa específica dos grãos do solo ( $g/cm^3$ );

$\delta_d$  – massa específica do dispersor ( $g/cm^3$ );

$V$  – volume da suspensão ( $cm^3$ );

$\delta_c$  – massa específica da água ( $g/cm^3$ );

$L$  – leitura do densímetro na suspensão;

$L_d$  – leitura do densímetro no meio dispersor;

$M_h$  – massa do material úmido submetido à sedimentação;

$h$  – umidade higroscópica do material passado na peneira de 2 mm.

O diâmetro máximo das partículas em suspensão foi obtido pela Equação 4.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \cdot \mu}{\delta - \delta_d} \cdot \frac{a}{t}} \quad (4)$$

Onde:

- d – diâmetro máximo das partículas (mm);
- $\mu$  – coeficiente de viscosidade do meio dispersor (g.s/cm<sup>2</sup>);
- $\delta$  – massa específica dos grãos do solo (g/cm<sup>3</sup>);
- $\delta_d$  – massa específica do dispersor (g/cm<sup>3</sup>);
- a – altura de queda das partículas (cm);
- t – tempo de sedimentação (s).

A Equação 5 refere-se ao cálculo da porcentagem que passa em cada peneira do peneiramento fino.

$$Q_f = \frac{(M_h \cdot 100) - M_i \cdot (100 + h)}{M_h \cdot 100} \cdot N \quad (5)$$

Onde:

- $Q_f$  – porcentagem do material passante em cada peneira;
- $M_h$  – massa do material úmido submetido ao peneiramento;
- $M_i$  – massa do material retido acumulado em cada peneira;
- h – umidade higroscópica;
- N – porcentagem de material que passa na peneira de 2 mm.

### 3.2.2 Massa Específica do Solo

O ensaio para a massa específica foram feitos conforme a NBR 6508 (ABNT, 2016) que propõem a determinação da massa específica dos grãos que passantes pela peneira 4,8 mm. As amostras ensaiadas foram preparadas conforme as especificações da NBR 6457 (ABNT, 2016). A Figura 9 apresenta imagens da execução desse ensaio.

Figura 9 – Execução do ensaio de Massa Específica do Solo



Fonte: Elaboração própria

A massa específica dos grãos de solo, foi determinada a partir da Equação 6.

$$Q_s = \frac{\frac{M_1 \cdot 100}{(100+h)}}{\frac{M_1 \cdot 100}{(100+h)} + M_3 - M_2} \cdot \delta_T \quad (6)$$

Onde:

$\delta$  – massa específica dos grãos do solo ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_1$  – massa do solo úmido;

$M_2$  – massa do picnômetro + solo + água, na temperatura  $T$  de ensaio;

$M_3$  – massa do picnômetro cheio de água;

$h$  – umidade inicial da amostra;

$\delta_T$  – massa específica da água na temperatura  $T$  de ensaio.

### 3.2.3 Massa Específica da Cal e da Cinza Volante

Para a determinação das massas específicas das amostras de cal e cinza volante foi seguindo as especificações da NBR NM 23 (ABNT, 2001)- Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.



A massa específica do material será determinada pela Equação 7.

$$\rho = \frac{m}{(V2 - V1)} \quad (7)$$

Onde:

$\rho$  – massa específica do material (g/cm<sup>3</sup>);

V1 – volume inicial (cm<sup>3</sup>);

V2 – volume final (cm<sup>3</sup>).

### 3.2.4 Limite de Liquidez

A determinação do limite de liquidez foi feita segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do limite de liquidez. A amostra a ser utilizada no ensaio correspondeu à metade da amostra especificada pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

O experimento foi feito até encontrar 3 pontos no intervalo de 35 a 15 golpes. Para a determinação da umidade foi feita segundo a NBR 6457 (ABNT, 1986).

A Figura 10 apresenta a execução do ensaio no equipamento de Casagrande  
Figura 10 – Execução do Ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: Elaboração própria

Com os resultados encontrados no experimento, foi construído um gráfico no qual as ordenadas em escala logarítmica, corresponderão ao número de golpes e as abscissas, são os teores de umidade correspondentes. A partir deste gráfico, foi obtido o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o limite de liquidez do solo.

### 3.2.5 Limite de Plasticidade

Os ensaios para a determinação do limite de plasticidade e para o cálculo do índice de plasticidade dos solos são descritos na NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do limite de plasticidade. A amostra a ser utilizada no ensaio correspondeu à metade da amostra especificada pela NBR 6457 (ABNT, 2016). A Figura 11 apresenta a realização do experimento.

Figura 11 – Execução do Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Elaboração própria

A equação 8 serviu para obter o índice de plasticidade, que é a diferença entre os valores de liquidez e limite de plasticidade.

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

Onde:

IP – índice de plasticidade;

LL – limite de liquidez;

LP – limite de plasticidade.

### 3.2.6 Ensaio de Compactação Mini-MCV

Para o ensaio de compactação Mini-MCV, seguiu as especificações da norma do DNER ME 258/94 (DNER, 1994). Este ensaio pode ser utilizado no controle da compactação e na previsão da erodibilidade.

Para a compactação dos corpos de prova, foram realizados golpes sucessivos e o processo foi interrompido quando a diferença entre a leitura obtida após 4n golpes e a obtida n golpes foi menor que 2 mm, ou quando houver intensa exsudação de água ou atingir 256 golpes.

O teor de umidade de cada porção foi determinado pela Equação (9).

$$h = \frac{(M_h - M_s) \cdot 100}{M_s} \quad (9)$$

Onde:

h – teor de umidade da amostra;

$M_h$  – massa de solo úmido;

$M_s$  – massa de solo seco em estufa.

A Equação 10 calcula a massa específica aparente seca do solo compactado.

$$MEAS = \frac{M_h \cdot 100}{(100+h) \cdot V} \quad (10)$$

Onde:

MEAS – massa específica aparente seca do solo ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_h$  – massa de solo úmido da porção compactada;

h – teor de umidade da porção compactada;

V – volume do corpo-de-prova compactado.

Com o intuito de demonstrar os resultados dos ensaios, foram traçadas a família de curvas de compactação e as curvas de Mini-MCV.

### **3.2.7 Classificação MCT**

Essa classificação é prescrita pela norma DNER CLA 259/96 (DNER, 1996) e se fundamenta nos ensaios descritos pelas normas DNER ME 256/94 (DNER, 1994b) e DNER ME 258/94 (DNER, 1994c).

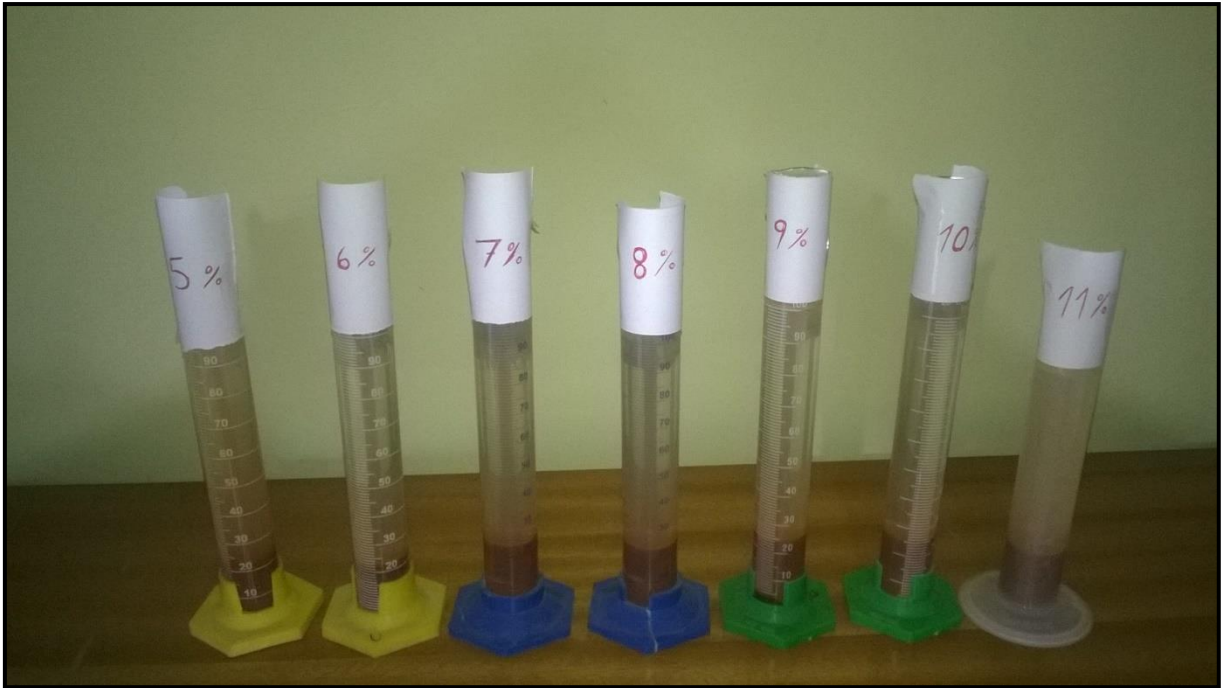
O MCT usa nos ensaios de corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro. Este método abrange dois grupos de ensaios: Mini-CBR e associados; Mini-MCV e associados (VILLIBOR, 2009).

### **3.3 Ensaio Físico-Químico**

O ensaio físico-químico foi proposto por Casanova *et. al.* (1992), o método estipulou a quantidade ideal de cal para fazer a cinza volante reagir quimicamente e a quantidade de ter de cal necessária para estabilizar o solo. Esse método verificou através de variação volumétrica das misturas a dosagem requerida.

Para a determinação da quantidade mínima de cal necessária para estabilizar o solo, foram utilizadas sete provetas de 250 ml cada, nas quais foram adicionados valores crescentes de porcentagem de cal para 25 gramas de solo natura, os teores usados foram de: 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10% e 11%, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Ensaio Físico-Químico: mistura Solo + Cal



Fonte: Elaboração própria

Para a determinação da quantidade mínima de cal necessária para reagir com a cinza volante, foram utilizadas sete provetas de 250 ml cada, nas quais foram adicionados valores crescentes de porcentagem de cal para 25 gramas de cinza, os teores usados foram de: 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%.

A Figura 13 mostra as misturas utilizadas para o ensaio Físico-químico, para as misturas de solo com cal e a mistura de cal com cinza volante

Figura 13 – Preparação das Misturas do Ensaio Físico-químico



Fonte: Elaboração própria

Com as misturas em cada proveta foi adicionada água até a marca de 150 ml, posteriormente as provetas foram agitadas e deixadas em repouso por 24 horas. Após esse período, foi feita a leitura de nível da parte sólida e com o auxílio de um bastão de plástico as misturas foram agitadas por 30 segundos, e novamente deixadas em repouso por mais 24 horas para repetir sua leitura de nível.

O procedimento de agitação e leitura do nível da matéria sólida foi repetido por 12 dias, tempo em que se notou uma leitura constante ou decrescente das misturas.

Com os níveis encontrados foi possível calcular a variação volumétrica percentual para ambas as misturas e respectivas porcentagens de cal. A equação 12 mostra como foi calculado essa variação.

$$\Delta V = \frac{V_{max} - V_{max(1dia)}}{V_{max(1dia)}} \quad (12)$$

Onde:

$\Delta V$  – variação volumétrica (%);

$V_{max}$  – volume máximo para cada teor de cal;

$V_{max(1^{\circ}dia)}$  – volume da leitura no 1º dia de cada mistura.

### **3.4 Ensaio de Compactação Mini-Proctor**

O método de ensaio seguiu a DNER ME 228/94 (DNER,1994a), no qual explica o procedimento de compactação dinâmica de solos passando na peneira de 2mm de abertura, realizados em laboratório, com corpos de prova miniatura, cilíndricos com 50 mm de diâmetro.

O ensaio correlaciona o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca, sendo possível construir um gráfico da curva de compactação.

As etapas do Mini-Proctor consistiram em inicialmente preparar 6 porções de cada mistura (Solo, Solo+Cal, Solo+CV e Solo+Cal+CV) em cada porção foi feita para ter uma porcentagem crescente de umidade, variando entre 3 a 4%.

A primeira amostra a ser compactada foi a de umidade mais baixa, separando uma quantia de 180g que posteriormente foi despejada com o auxílio de um funil no molde. Para o tipo de solo analisado foi feita a compactação com energia intermediária através um soquete, aplicando 6 golpes de cada lado do corpo de prova. Para cada corpo de prova foi anotado o seu teor de umidade e altura. A Figura 14 apresenta as fotos da realização do ensaio.

Figura 14 – Execução do Ensaio de Mini-Proctor



Fonte: Elaboração própria

O teor de umidade de cada porção foi determinado pela Equação (13).

$$h = \frac{(M_h - M_s) \cdot 100}{M_s} \quad (13)$$

Onde:

$h$  – teor de umidade da amostra;

$M_h$  – massa de solo úmido;

$M_s$  – massa de solo seco em estufa.

A Equação 14 serve para calcular a massa específica aparente seca do colo compactado.

$$MEAS = \frac{M_h \cdot 100}{(100+h) \cdot V} \quad (14)$$

Onde:



MEAS – massa específica aparente seca do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$M_h$  – massa de solo úmido da porção compactada;

$h$  – teor de umidade da porção compactada;

$V$  – volume do corpo-de-prova compactado.

Com os resultados, foi construído o gráfico da curva de compactação, onde as ordenadas representam as massas específicas aparentes do solo seco e as abscissas os teores de umidade.

O ponto máximo da ordenada representa a massa específica aparente máxima do solo seco e respectivamente obtém-se o teor de umidade ótimo no eixo das abscissas que corresponda a esse ponto.

### **3.5 Misturas e Dosagem**

Com os resultados encontrados nos ensaios físico-químicos foi possível determinar as porções de cal e cinza a serem utilizadas para moldagem dos corpos de prova. Foram moldadas também as misturas para referência, uma contendo apenas cinza volante e outra contendo apenas cal.

As misturas feitas foram: Solo, Solo+Cal, Solo+CV e Solo+Cal+CV.

Para a moldagem dos corpos de prova, foi utilizada a umidade ótima encontrada para cada mistura obtida através do ensaio de Mini-proctor.

### **3.6 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova**

Para a realização dos ensaios foram moldados dois tipos diferentes de corpos de prova, um para ser submetido ao Ensaio de Compressão Simples e outro para ser submetido ao Ensaio de Tração por Compressão Diametral.

#### **3.6.1 Corpos de prova para ensaio de Compressão Simples**

Os corpos de prova para serem submetidos à ruptura por compressão simples tiveram as dimensões de 5 x 10 cm, moldados no teor de umidade ótima e peso

específico máximo encontrados nos ensaios Físico-químicos e Mini-proctor respectivamente, o tipo de compactação foi a estática de duplo embolo.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura, nos quais 3 foram submersos 24 horas antes de se realizar sua ruptura, o total de CP's moldados foi de 24.

Após a moldagem, os corpos de prova foram preparados para a cura de 28 dias, o preparo consistiu em embala-los em plástico filme e em seguida aplicou-se uma camada de parafina, posteriormente foram transferidos para um ambiente com temperatura controlada e guardada até o dia de sua ruptura.

A Figura 15 apresenta a imagem da compactação da mistura, posteriormente a desmoldagem do Cp e a ultima com eles já preparados para a cura de 28 dias.

Figura 15 – Moldagem dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Elaboração própria

### 3.6.2 Corpos de Prova para Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Os corpos de prova para serem submetidos à ruptura por compressão diametral tiverem o diâmetro de 10 cm e a altura variando entre 5,4 à 5,8 cm, como no caso dos CP's moldados para o ensaio de compressão simples, eles também foram preparados no teor de umidade ótima e peso específico máximo encontrados através do ensaio físico-químico e Mini-Proctor.

As moldagens dos corpos de prova foram feitas pelo Compactador Marshall, para poder usar esse método de compactação foi feito um reajuste no número de golpes efetuados pelo aparelho para coincidir com a energia gerada pelo compactador do Mini-Proctor

A equação 15 refere-se ao cálculo utilizado para igualar essa energia de compactação.

$$EC = \frac{M \cdot H \cdot Ng \cdot Nc}{V} \quad (15)$$

Onde:

EC – Energia de Compactação;

M – Massa do Soquete;

H – Altura de Queda do Soquete;

Ng – Número de Golpes por camada;

Nc – Número de camadas;

V – Volume do solo compactado.

Os valores de base da energia comumente utilizada para o ensaio de compactação do Mini-Proctor foram os tirados referentes à energia intermediária de correspondendo a 16,84 kgf.cm/cm<sup>2</sup>. A Tabela 1 apresenta os valores característicos do ensaio Mini-Proctor para a energia intermediária.

Tabela 1 – Características do Ensaio de Mini-Proctor

<b>Característica</b>	<b>Energia: Intermediária</b>
Massa do Soquete (M)	4540 g
Altura de Queda (H)	305 mm
Número de Golpes Total (Nt)	12
Diâmetro do Molde Cilíndrico (D)	50 mm
Volume do CP (V)	97,82 cm <sup>3</sup>
Energia de Compactação (EC)	16,84 kgf.cm/cm <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de VILLIBOR (2009)

Adaptando o método para utilizar o compactador Marshall com a energia igual à intermediária do ensaio Mini-Proctor foi necessário efetuar 18 golpes por camada.

Como no caso da moldagem dos corpos de prova para compressão simples foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura, nos quais 3 foram submersos 24 horas antes de se realizar sua ruptura, o total de corpos moldados foi de 24.

Após a moldagem, os corpos de prova foram preparados para a cura de 28 dias, o preparo consistiu em embala-los em plástico filme e aplicar parafina, posteriormente foram transferidos para um ambiente com temperatura controlada e guardada até o dia de sua ruptura.

A Figura 16 apresenta a compactação da mistura, posteriormente desmoldando e a ultima com corpos de prova já preparados para a cura de 28 dias.

Figura 16 – Moldagem dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte: Elaboração própria

### 3.7 Imersão das Amostras

Com o intuito de se obter valores de resistência onde o solo se encontraria em total submersão, os corpos de prova foram imersos em água 24 horas antes de sua ruptura. A Figura 17 mostra essa etapa do experimento. Imediatamente antes do ensaio, os corpos de prova foram retirados da água, superficialmente secos com o auxílio de um tecido absorvente e levados para o ensaio de compressão.

Figura 17 – Imersão dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração própria

### 3.8 Ensaio de Compressão Simples

A norma que estabelece o método de ensaio de resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento é a NBR 12025 (ABNT, 2012). Podendo ser aplicado para a determinação em laboratório do teor de cimento para a estabilização de solo quanto ao controle da qualidade do solo-cimento na obra.

O carregamento de compressão foi aplicado com taxa de aproximadamente 1 mm/min, aplicado até a sua ruptura. Para encontrar a tensão de ruptura à compressão foi feito a divisão de carga de ruptura pela área de seção transversal do corpo de prova.

Com os dados obtidos da ruptura dos corpos de prova foi possível a construção do gráfico de Tensão versus Deformação, assim como a determinação do Módulo da Elasticidade de cada dosagem.

Para a obtenção do módulo de elasticidade de cada mistura foi determinado a partir da inclinação da parte elástica da curva do gráfico de Tensão versus Deformação, a equação 16 refere-se o modo como foi calculada essa inclinação.

$$E = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varepsilon - \varepsilon_0} \quad (16)$$

Onde:

$E$  – módulo de elasticidade (MPa);

$\sigma$  – tensão final;

$\sigma_0$  – tensão inicial;

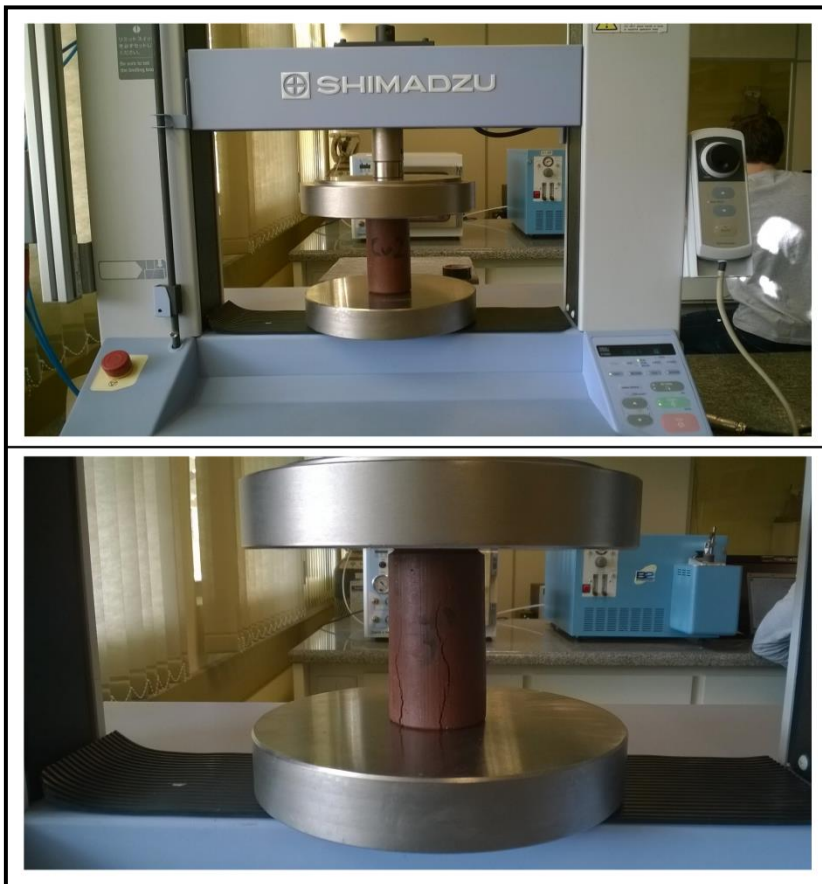
$\varepsilon$  – deformação final;

$\varepsilon_0$  – deformação inicial.

Procurando encontrar o valor correspondente à linha elástica do gráfico Tensão versus Deformação a tensão inicial foi adotada como sendo 20% da tensão de ruptura e de 80% para a tensão final.

Na Figura 18 é possível ver a ruptura dos corpos de prova por compressão simples.

Figura 18 – Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Elaboração própria

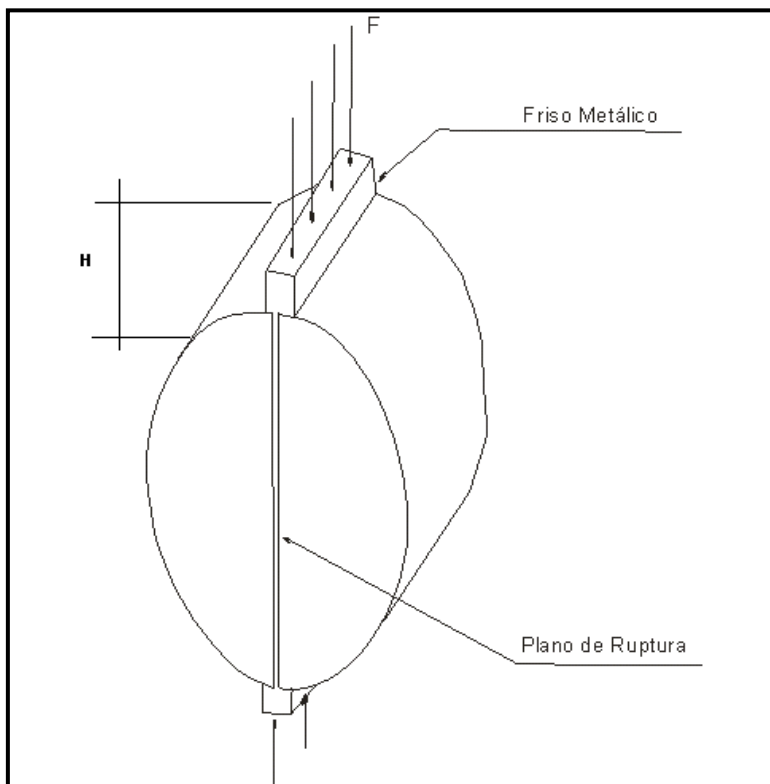
### 3.9 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios seguiram as especificações da norma DNIT 136/2010- ME. Tal norma serviu como documento base, visando estabelecer os procedimentos para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de mistura asfáltica, através do ensaio de compressão diametral.

As amostras foram cilíndricas, com altura de 5,8 cm ( $\pm 0,2$  cm) e diâmetro de 10 cm, procurando atingir essa altura a massa do solo para compactação dos moldes foi controlada. Essa altura esta de acordo com as normas do DNIT 136/2010- ME, no qual especifica que a altura deve estar entre 3,50 cm e 6,50 cm.

Na ruptura dos corpos de provas, eles foram colocados com a superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, curvos em uma das faces, com comprimento igual ao do corpo de prova, conforme mostra a Figura 19, logo após foi aplicada uma carga progressiva, com uma velocidade de deformação de 0,8 mais ou menos 0,1 mm/s, até que se deu a ruptura por separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical.

Figura 19 – Ensaio de Compressão Diametral de Corpo de Prova Cilíndrico



Fonte: DNIT 136/2010- ME ( p 4.)



Com o valor obtido foi calculado a resistência à tração do corpo de prova diametral através da Equação 17.

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (17)$$

Onde:

$\sigma_R$  – resistência à tração, em kgf/cm<sup>2</sup>;

F – carga de ruptura, em kgf;

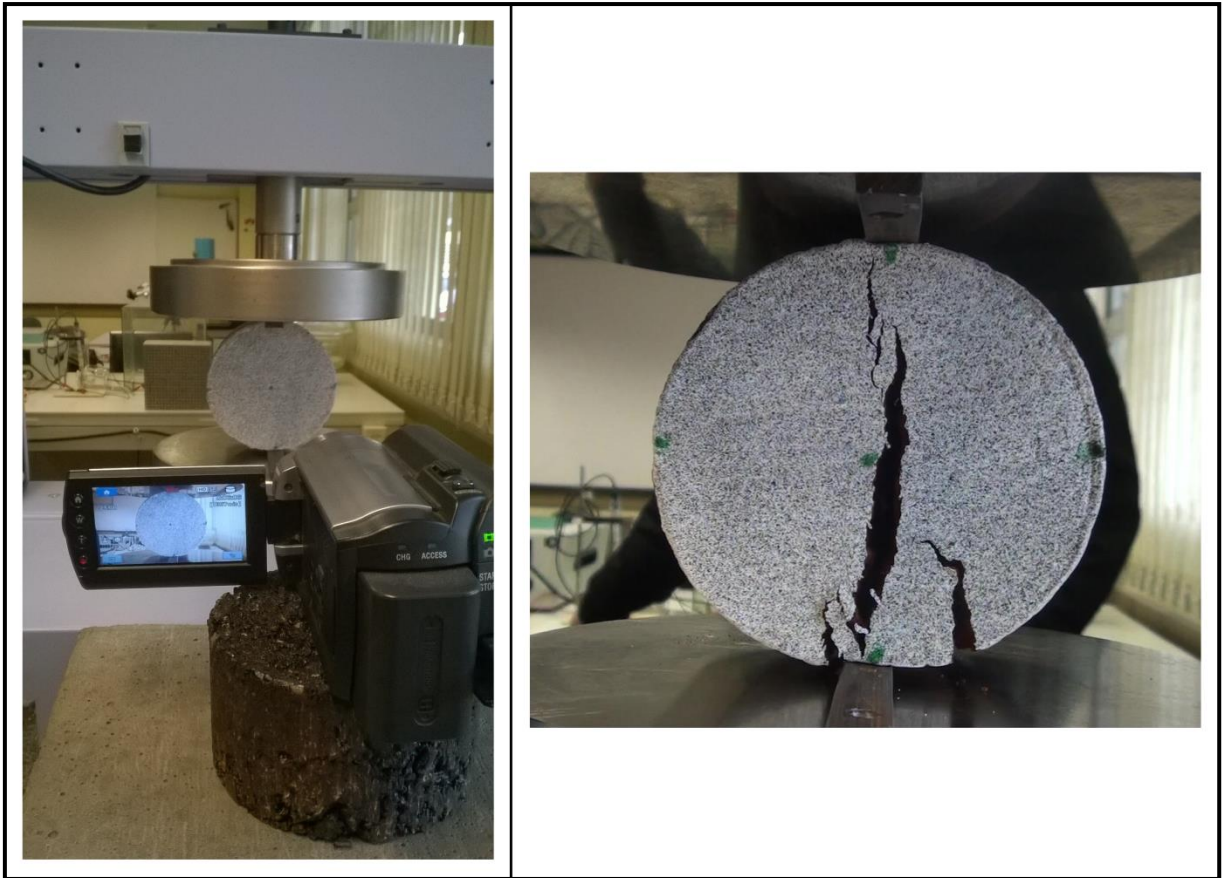
D – diâmetro de corpo de prova, em cm;

H – altura do corpo-de-prova, em cm.

Com os dados obtidos da ruptura dos corpos de prova foi possível a construção do gráfico de Tensão versus Deformação.

Na Figura 20 é possível ver a ruptura dos corpos de prova por tração através de compressão diametral.

Figura 20 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte: Elaboração própria

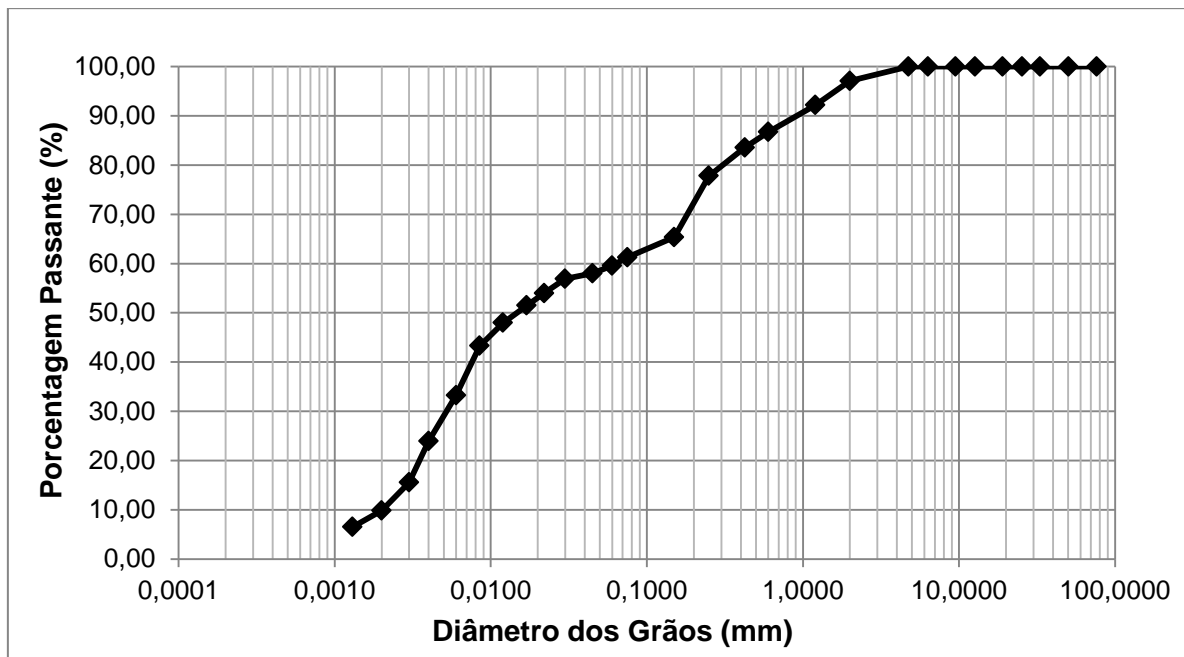
## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados encontrados durante o desenvolvimento das atividades de pesquisa propostas na metodologia.

### 4.1 Granulometria

Para a classificação do solo foi traçada a curva granulométrica, conforme descrito no item. 3.2.1, o Gráfico 1 apresenta os resultados obtidos.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica



Fonte: Elaboração própria

O solo ensaiado, conforme o Gráfico 1, apresentou 7,82% de areia grossa, 30,93% de areia fina, 9,77% de silte e 51,49% de argila em sua composição granulométrica. Na análise granulométrica 61,26% do solo passou na peneira nº200, portanto, trata-se de um solo fino.

## 4.2 Massa Específica

Os valores das massas especificadas para o Solo, Cal e Cinza Volante estão apresentados na Tabela 2, os ensaios foram realizados conforme os procedimentos prescritos no item 3.2.2 para o Solo e no item 3.2.3 para a Cal e Cinza.

Tabela 2 – Massa Específica

Solo	2,47 g/cm <sup>3</sup>
Cal	2,30 g/cm <sup>3</sup>
CV	1,98 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Elaboração própria

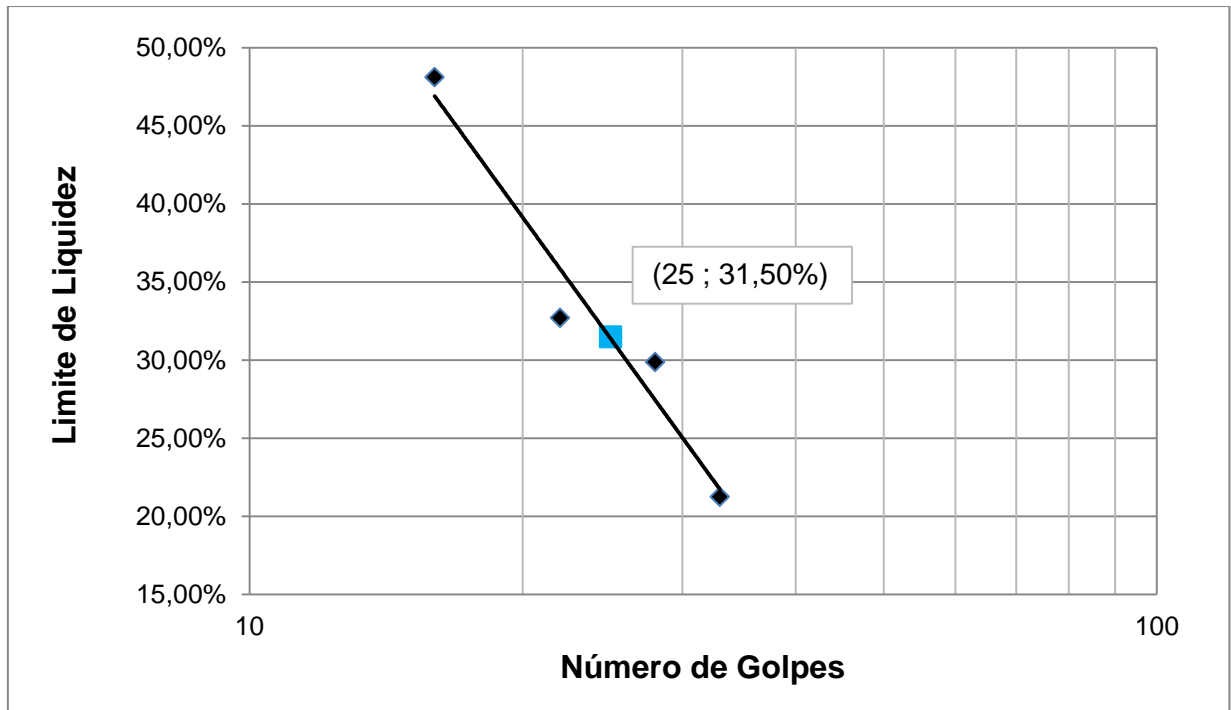
## 4.3 Limites de Atterberg

Os resultados para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade do solo estão apresentados a seguir. Os ensaios seguiram as normas prescritas nos itens 3.2.4 e 3.2.5, sendo a NBR 6459 (ABNT, 2016) para o limite de liquidez e a NBR 7180 (ABNT, 2016) para o limite plástico e índice de plasticidade.

### 4.3.1 Limite de Liquidez

Para o limite de liquidez foi construído o Gráfico 2, onde se tem como ordenada o teor de umidade e a abscissa correspondente ao número de golpes.

Gráfico 2 – Limite de Liquidez



Fonte: Elaboração própria

Nota-se pelo gráfico 2, que o limite de liquidez referente a 25 golpes teve um teor de umidade de 31,50%.

#### 4.3.2 Limite de Plasticidade

O solo analisado apresentou um limite de plasticidade igual a 26,08%, o experimento foi executado conforme descrito no item 3.2.5. Esse valor indica um comportamento plástico do solo.

#### 4.3.3 Índice de Plasticidade

Com os valores encontrados nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foi possível calcular o índice de plasticidade. A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados

Tabela 3 – Limites de Consistência

LL	31,50%
LP	26,08%
IP	5,42%

Fonte: Elaboração própria

Os valores encontrados para os Limites de Consistência estão de acordo com as especificações do DNIT 058/2004 – ES e DNIT 143/2010 – ES. Estes órgãos preconizam a utilização de valores máximos para o limite de liquidez de 40% e índice de plasticidade máximo de 18%, valores encontrados de 31,50 para o LL e 5,42% para o IP.

#### 4.4 Classificação do Solo

A Tabela 4 apresenta as três metodologias de classificação do solo propostas, o intuito dessas classificações é para possibilitar a comparação entre si.

Tabela 4 – Classificação do Solo

Sistema de Classificação Rodoviária	A - 4
Sistema Unificado de Classificação de Solos	ML
Sistema de Classificação MCT	NA'

Fonte: Elaboração própria

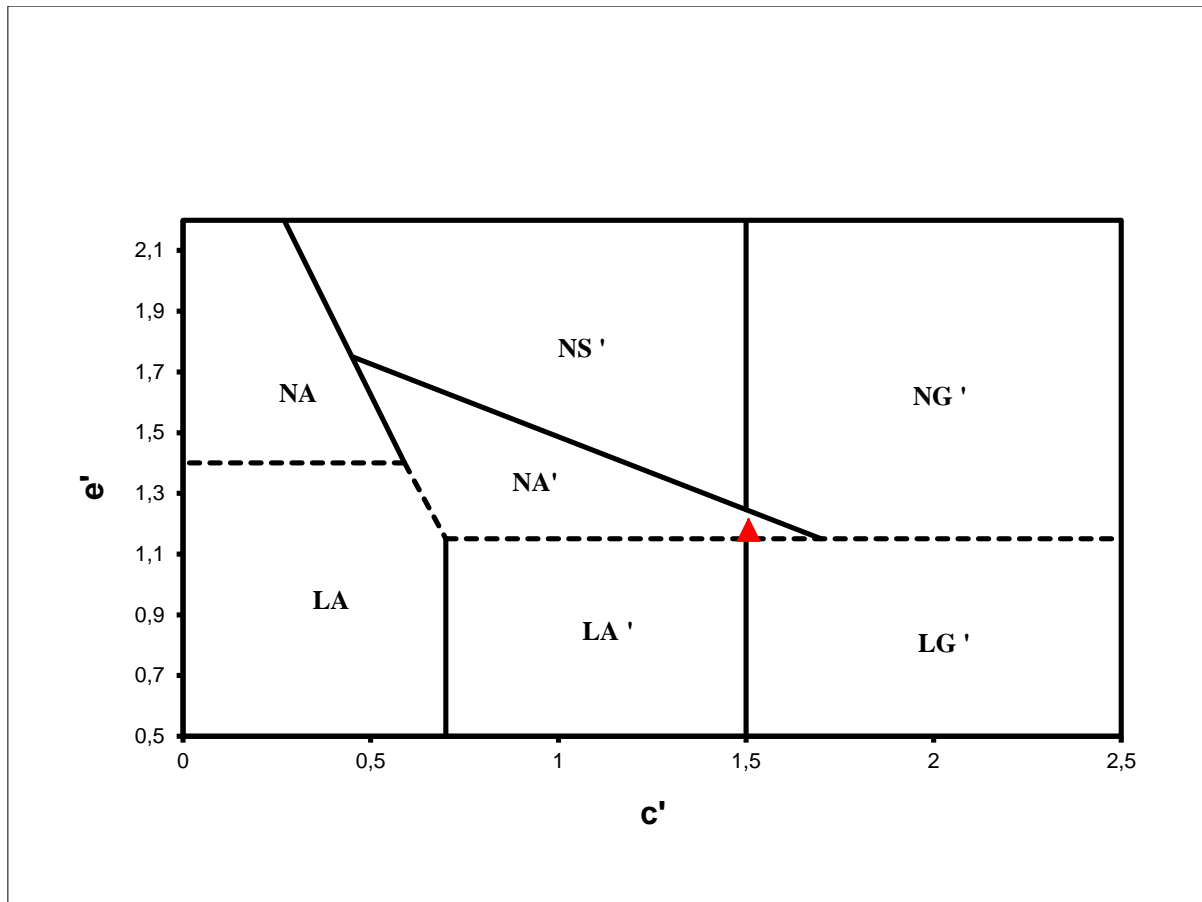
Pelo ensaio de granulometria verificou-se que se trata de um solo fino, apresentando mais de 50% de material passante na peneira nº 200.

De acordo com o Sistema de Classificação Unificado o solo foi classificado como sendo areias finas siltosas e argilosas. A simbologia usada pela classificação é a ML que significa *mo and low liquid limit* (areia fina com baixo limite de liquidez).

No Sistema de Classificação Rodoviária como o solo apresentou baixos valores de LL e IP foi classificado no grupo A – 4.

Para o sistema de classificação MCT o solo foi classificado como NA' que significa não-laterítico arenoso, como demonstra o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Sistema de Classificação MCT



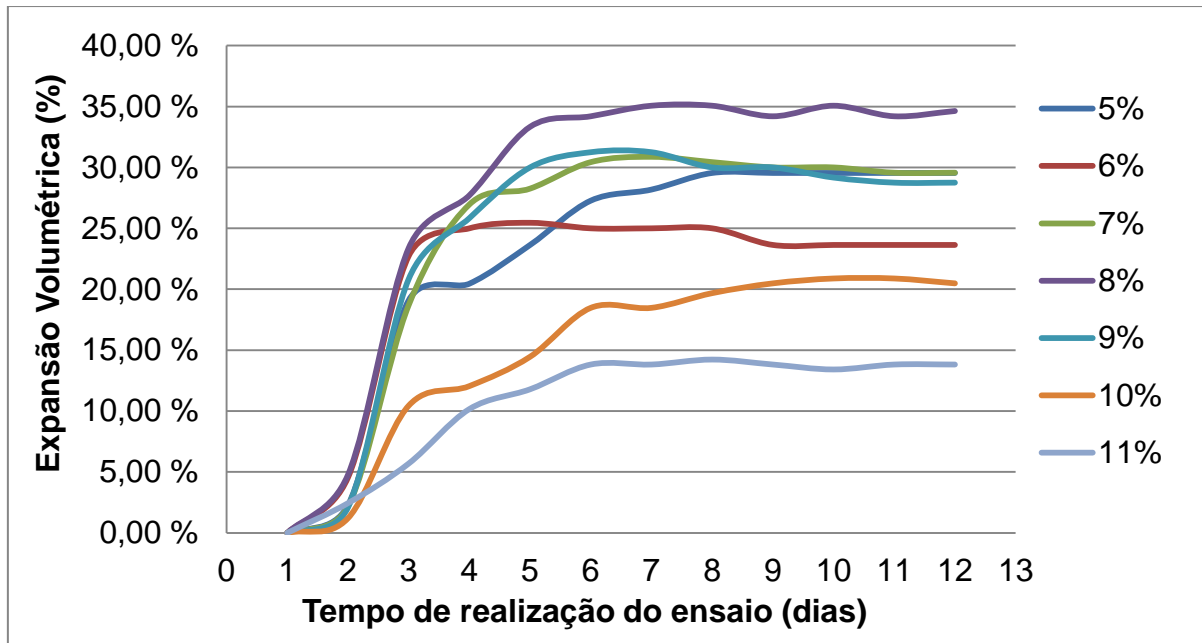
Fonte: Elaboração própria

Os três métodos de classificação do solo de certa forma apresentaram grande similaridade. No gráfico da classificação MCT pode-se verificar que o solo ficou próximo do limite entre solo laterítico e não-laterítico, como entre solos argilosos e arenosos. No sistema de Classificação Unificada o material se enquadra como areias finas siltosas e argilosas, já no sistema de classificação Rodoviário o solo entrou no grupo dos materiais silto argilosos. Desse modo pode-se notar certa concordância entre as classificações analisadas.

#### 4.5 Definição dos Teores de Cal e Cinza Volante

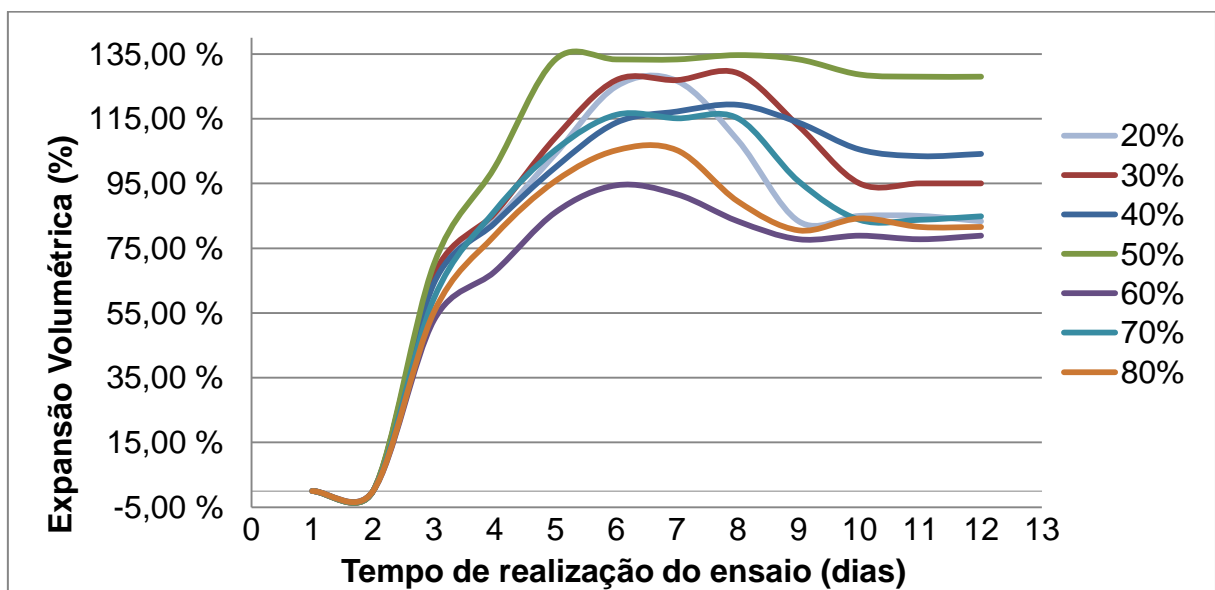
As determinações do teor de cal e cinza volante foram obtidas conforme descrito no item 3.3, através do ensaio físico-químico. Os resultados encontrados estão representados nos Gráfico 4 e 5.

Gráfico 4 – Ensaio Físico-químico: Mistura Solo + Cal



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Ensaio Físico-químico: Mistura CV + Cal



Fonte: Elaboração própria

No ensaio com a mistura Solo+Cal a que apresentou maior variação volumétrica foi para o teor de 8%, já para o ensaio com mistura de CV+Cal o teor de 50% apresentou a maior expansão.

Com os resultados obtidos, estabeleceu-se que a porcentagem de adição no solo seria de 8%, já para a mistura de Solo+Cal+CV essas adições seriam 50% de



cinza volante e 50% de cal. A adição de cinza volante para o caso da mistura de Solo+CV seria de 8%, tendo em vista que tal porcentagem apresentou melhor resultado para a adição de cal. A Tabela 5 apresenta as porcentagens utilizadas em cada mistura.

Tabela 5 – Porcentagens das Misturas

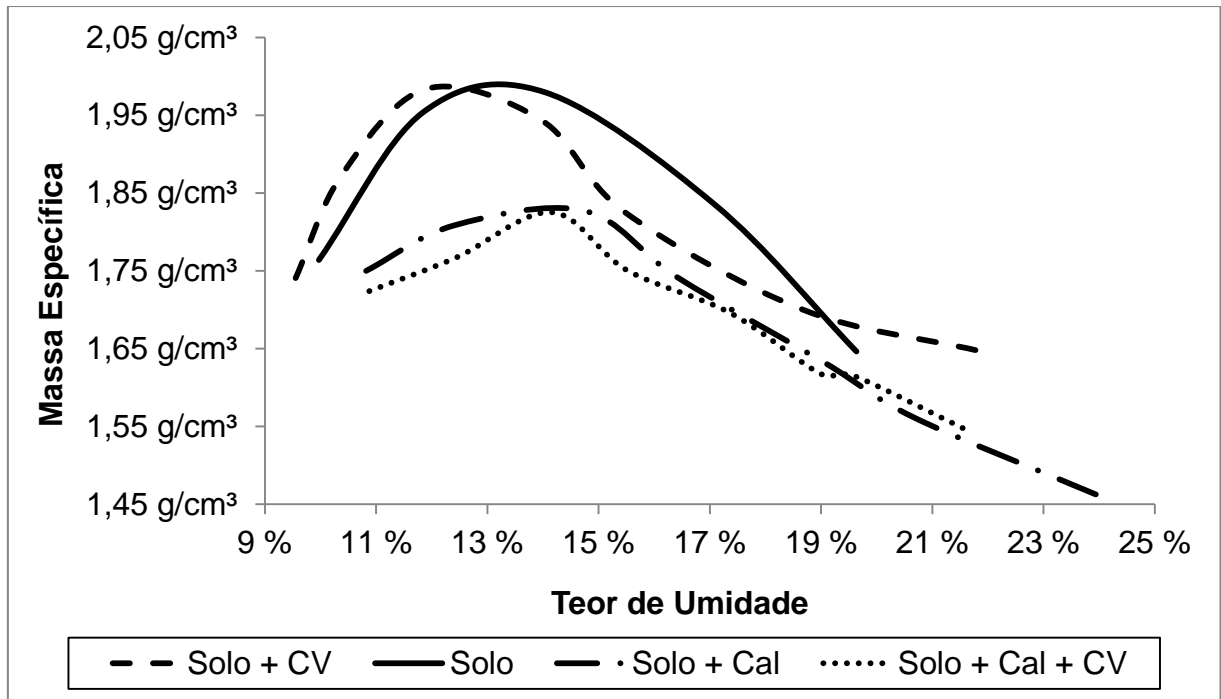
	Solo	Solo + CV	Solo + Cal	Solo + CV +Cal
Solo	100%	92%	92%	92%
Cal	-	-	8%	4%
CV	-	8%	-	4%

Fonte: Elaboração própria

#### 4.6 Definição da Massa Específica e Umidade Ótima

Os resultados obtidos nos ensaios de Mini-Proctor para determinação da umidade ótima e massa específica podem ser verificados no Gráfico 6, no qual apresenta a curva de compactação para as misturas de Solo, Solo+Cal, Solo+CV e Solo+Cal+CV. Através do gráfico é possível identificar o valor da massa específica de moldagem, que seria a máxima nas ordenadas e a umidade ótima nas abscissas.

Gráfico 6 – Curva de Compactação – Mini-Proctor



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 6 apresenta massa específica e umidade ótima encontrada para cada mistura.

Tabela 6 – Massa Específica e Umidade Ótima

	Solo	Solo + CV	Solo + Cal	Solo + CV + Cal
Massa Específica	1,98 g/cm <sup>3</sup>	1,98 g/cm <sup>3</sup>	1,83 g/cm <sup>3</sup>	1,84 g/cm <sup>3</sup>
Umidade Ótima	14,03%	11,90%	14,74%	14,15%

Fonte: Elaboração própria

Analisando o gráfico, nota-se que ao se acrescentar apenas a cinza volante na mistura o teor de umidade caiu, mas manteve-se a mesma massa específica encontrada para o caso de apenas solo. Com a adição de cal houve a queda da massa específica e conseqüentemente o aumento da umidade ótima, sendo que a maior porcentagem de umidade foi encontrada na mistura de Solo+Cal. Na mistura com os três materiais observou-se a queda da umidade, porém permaneceu acima da encontrada no caso de apenas solo ou solo e cinza.

Com adição da cal ocorreu à redução da massa específica, esse fato devesse pela floculação inferior da estrutura, como conseqüência a mistura necessitou de uma quantidade de água maior para atingir o ponto da curva máxima.

#### 4.7 Dosagens

Com os resultados encontrados nos ensaios citados anteriormente foi possível determinar a dosagem de cada mistura, a Tabela 7 indica tais dados.

Tabela 7 – Dosagens Realizadas

	Solo	Solo + CV	Solo + Cal	Solo + CV +Cal
Massa Específica	1,98 g/cm <sup>3</sup>	1,98 g/cm <sup>3</sup>	1,83 g/cm <sup>3</sup>	1,84 g/cm <sup>3</sup>
Umidade Ótima	14,03%	11,90%	14,74%	14,15%
Solo	100%	92%	92%	92%
Cal	-	-	8%	4%
CV	-	8%	-	4%

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.8 Submersão dos CP's

Com o intuito de se verificar a resistência das misturas quando encontradas em um ambiente de total saturação, foi proposto à submersão total dos corpos de prova 24 horas antes de serem efetuados os ensaios de compressão simples e o ensaio de tração por compressão diametral. As amostras moldadas apenas como solo e com solo e cinza volante não apresentaram características para serem usadas submersas, se desmanchando durante o processo, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Submersão das Amostras de Solo e Solo+CV



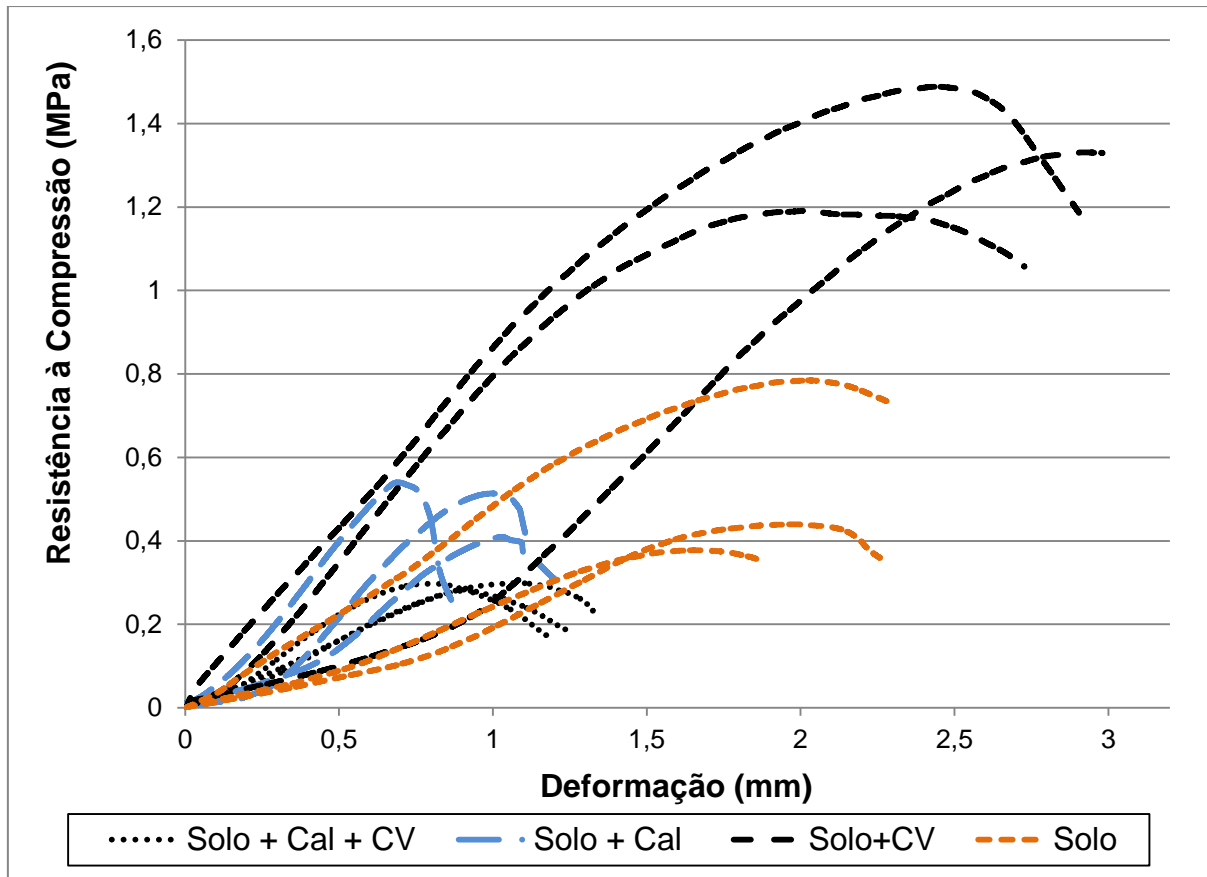
Fonte: Elaboração própria.

As amostras preparadas com Solo+Cal+CV e Solo+Cal apresentaram características para resistir à submersão, sendo possível realizar os ensaio de compressão simples e compressão diametral para ambas as misturas.

#### 4.9 Resistência à Compressão Simples

As tensões de ruptura à compressão simples dos corpos de prova não submersos podem ser verificados no Gráfico 7, no qual apresenta os valores de resistência para as misturas de Solo, Solo+CV, Solo+Cal e Solo+Cal+CV

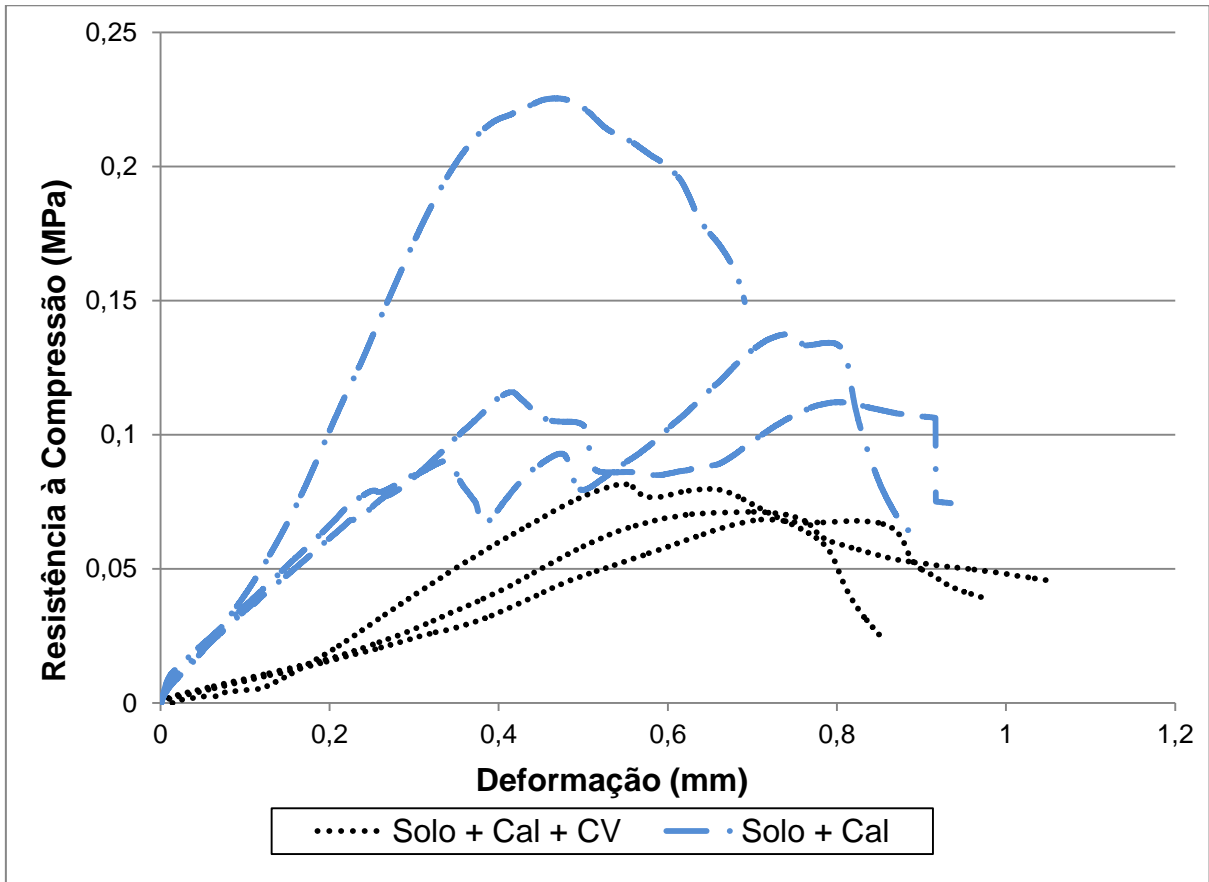
Gráfico 7 – Tensão versus Deformação- Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Elaboração própria

As tensões de ruptura à compressão simples dos corpos de prova que foram submetidos à submersão 24hrs antes dos ensaios podem ser verificados no Gráfico 8, ele apresenta os valores para as misturas de Solo+Cal e Solo+Cal+CV, os corpos de prova das misturas de Solo e Solo+CV se desmancharam quando submetidos a submersão. Através do gráfico é possível identificar a tensão máxima e com a inclinação da curva é possível calcular o Modulo Elástico.

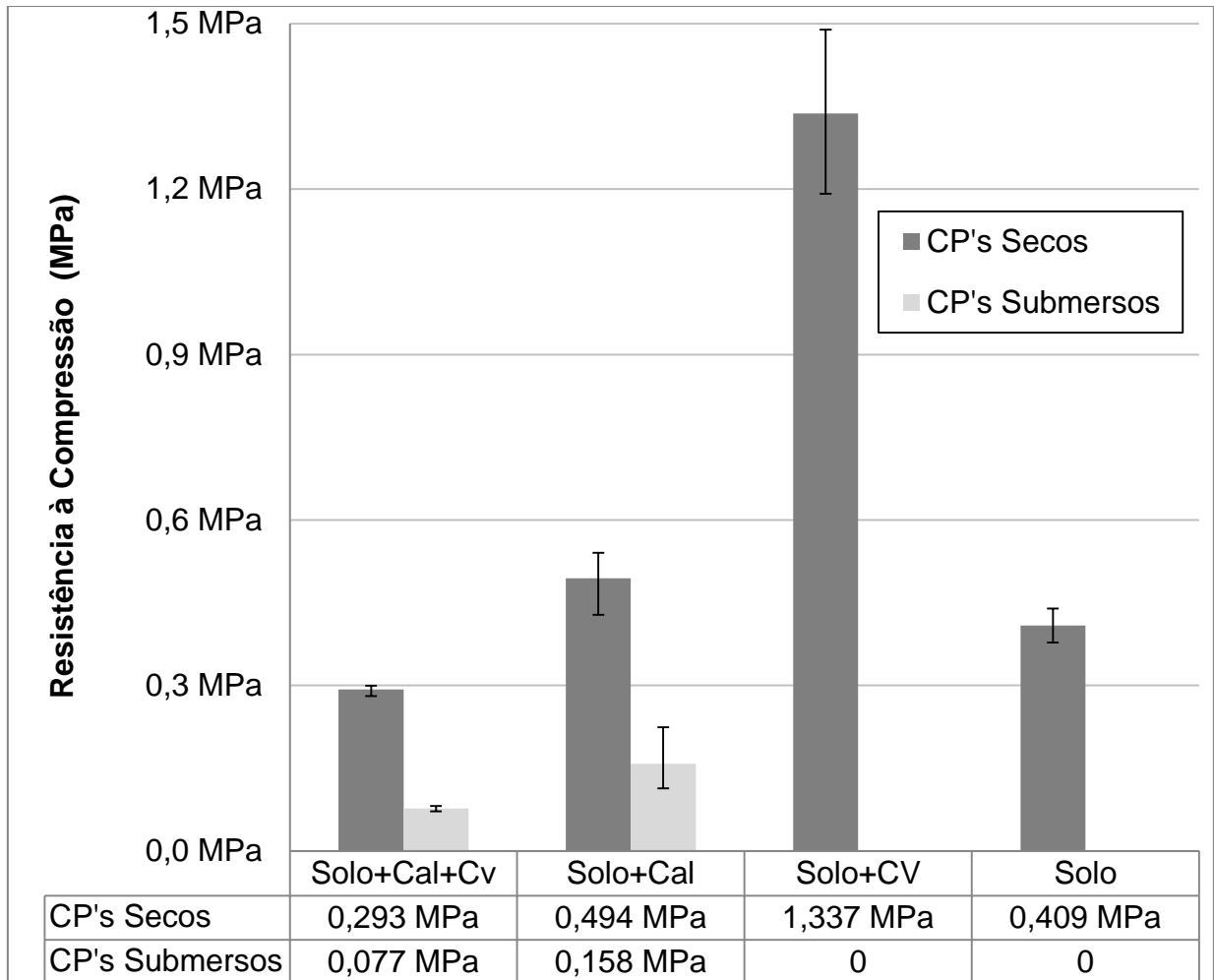
Gráfico 8 – Tensão versus Deformação- Ensaio de Compressão Simples para CP's Submersos



Fonte: Elaboração própria

A resistência á compressão de todas as dosagens podem ser analisados no Gráfico 9. Junto aos valores de resistência à compressão é apresentado uma barra de erros, mostrando os valores máximos e mínimos de cada conjunto de 3 amostras.

Gráfico 9 – Resistência à Compressão das Misturas



Fonte: Elaboração própria

A mistura que apresentou maior ganho na resistência, como mostrou o gráfico 8 foi a de Solo+CV, representando um aumento de 226,89% quando comparado com a mistura Solo. A mistura com solo e cal dolomítica o ganho de resistência foi de 28,36% quando também comparado ao solo natural.

Analisado as misturas que foram submersas antes da ruptura, verificou-se a queda da resistência quando comparado com os CP's secos, no caso da mistura utilizando 4% de cinza volante e 4% de cal a perda significou 73,72%, no caso da mistura com 8% de cal essa queda chegou a 68,01%. Como mencionado no item 4.8 as misturas de solo natural e solo com 8% de cinza volante não apresentaram características para resistir a submersão

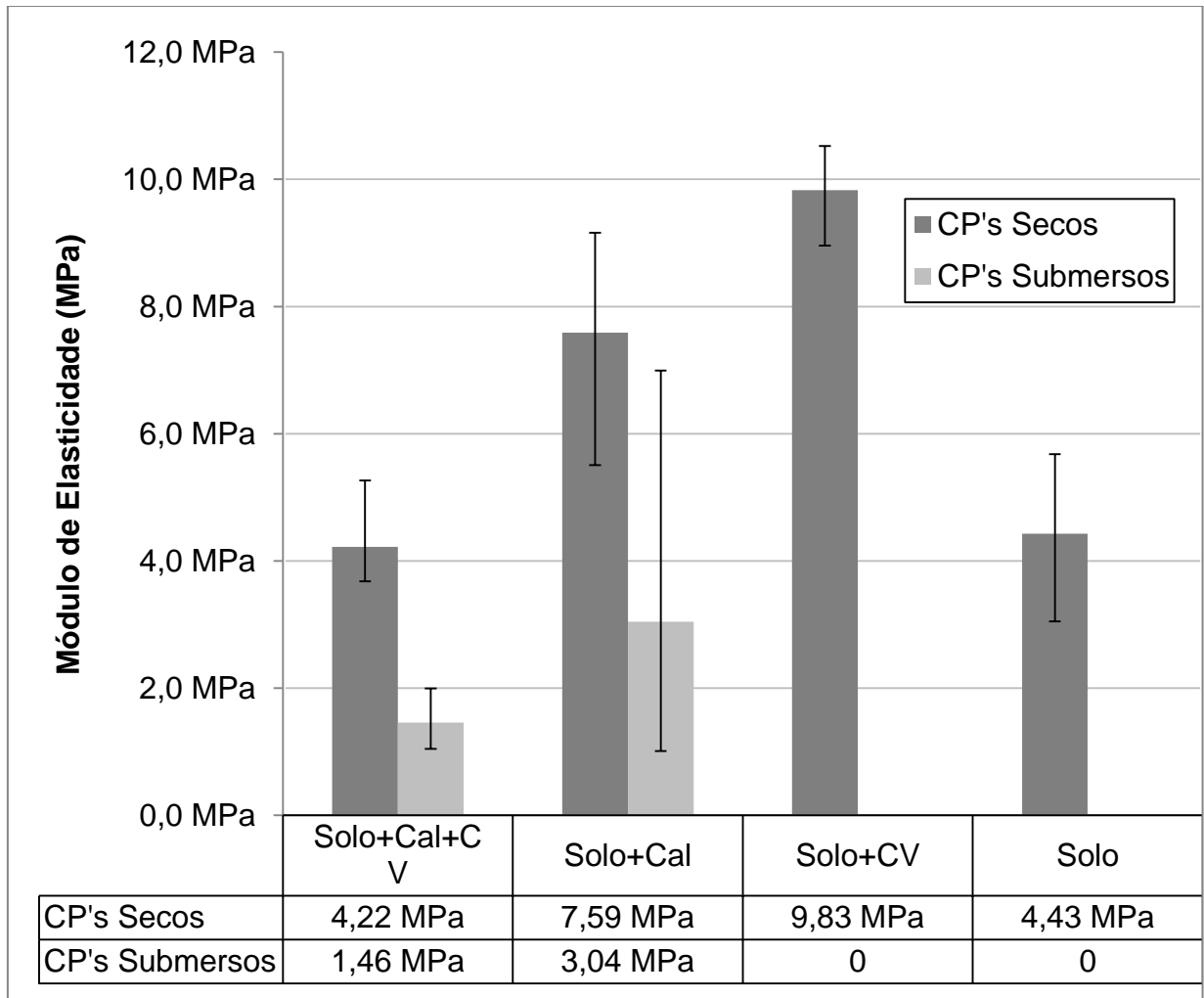
#### 4.10 Módulo de Elasticidade das Misturas

Com os resultados de Tensão versus Deformação, conforme apresentados anteriormente nos Gráficos 7 e 8 foi possível determinar o módulo de elasticidade para cada mistura analisada, a verificação se deu a partir da inclinação da reta de cada gráfico. Para pegar os valores correspondentes à linha elástica, adotou-se como ponto inicial a tensão correspondente a 20% da tensão de ruptura e 80% para a tensão final, juntamente com os respectivos valores de deformação.

O Gráfico 10 apresenta os resultados calculados para cada dosagem, podendo-se ver a queda no valor do módulo de elasticidade quando submetido à submersão 24 horas antes de sua ruptura. Para o caso da mistura de Solo+Cal (submerso) a queda da resistência foi de 59,90%, para a mistura de Solo+Cal+CV (submerso) essa queda foi de 65,49%. O gráfico apresenta uma barra de erros, mostrando os valores máximos e mínimos de cada conjunto de 3 amostras ensaiadas.



Gráfico 10 – Módulo de Elasticidade das Misturas



Fonte: Elaboração própria

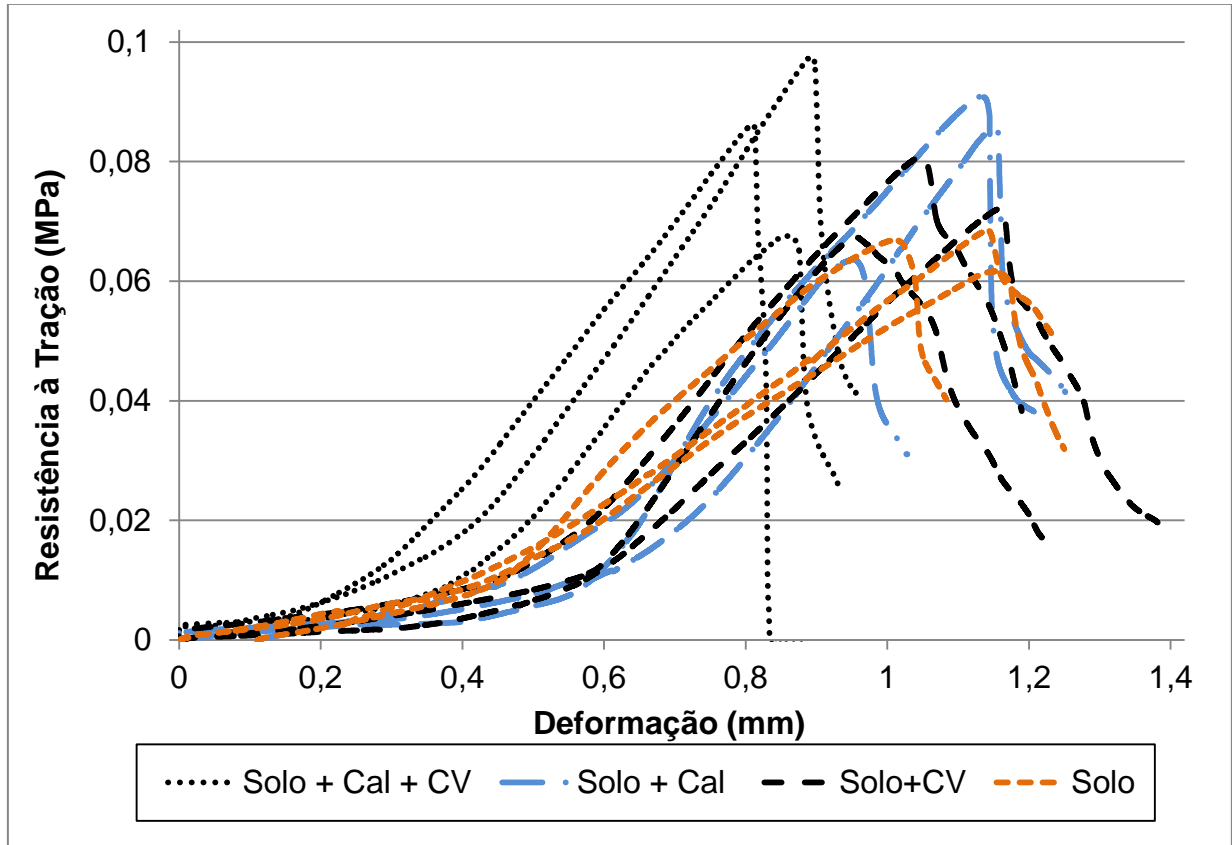
Analisando o gráfico nota-se a diferença no módulo de elasticidade para os tipos de misturas adotadas, a que apresentou maior ganho de rigidez foi a de Solo+CV (seco) apresentando um aumento de 221,90% em comparação da rigidez do solo natural. Já para a mistura de Solo+Cal (seco) esse aumento representou 171,33%. Para a mistura de Solo+Cal+CV (seco) o módulo de elasticidade manteve-se muito similar ao do solo natural.

#### 4.11 Ensaio à Tração por Compressão Diametral

As tensões de ruptura à tração através de compressão diametral das misturas podem ser verificadas no Gráfico 11, ele apresenta os resultados de resistência à

tração das misturas de Solo, Solo+Cal, Solo+CV e Solo+Cal+CV. O valor da resistência foi calculado conforme o explicado no item 3.8.

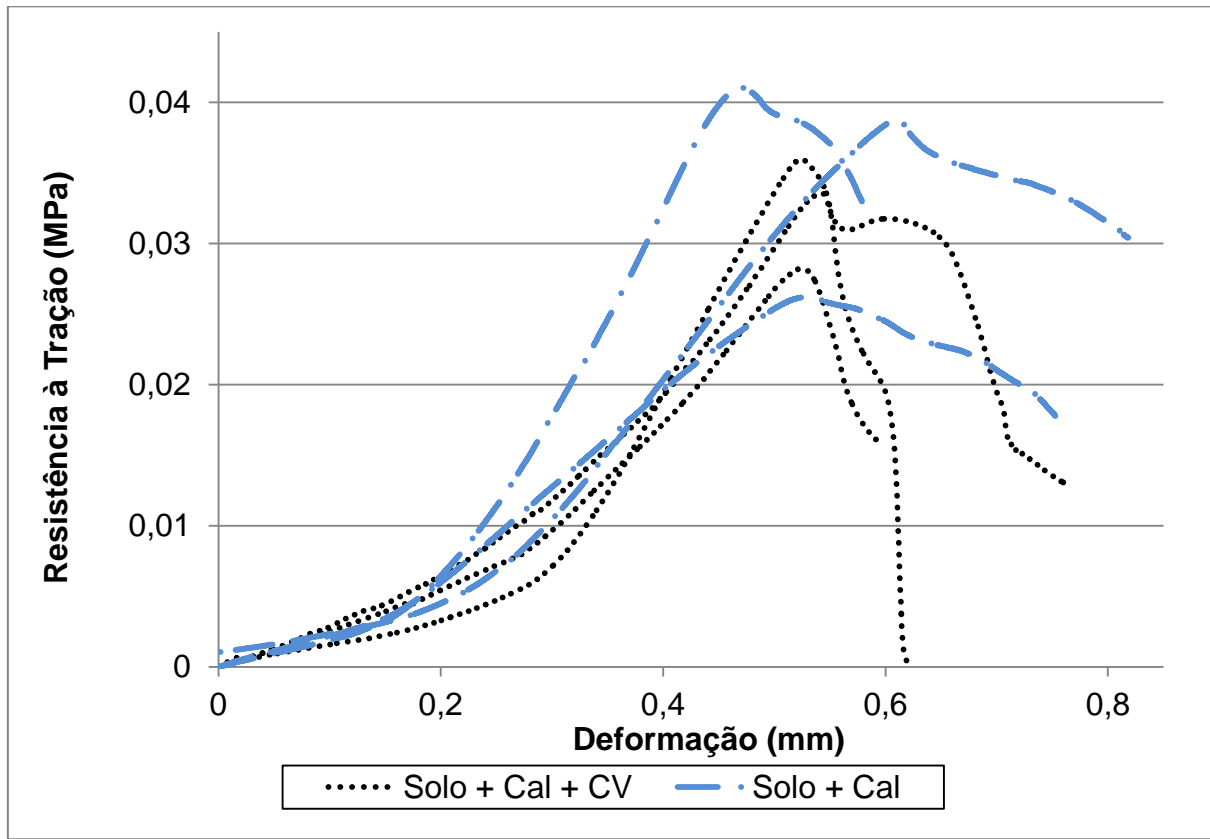
Gráfico 11 – Resistência a Tração versus Deformação- Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte: Elaboração própria

O mesmo ensaio foi verificado para as amostras submetidas à submersão antes da ruptura, o Gráfico 12 apresenta os resultados da resistência tração calculado pela deformação sofrida pelos corpos de prova.

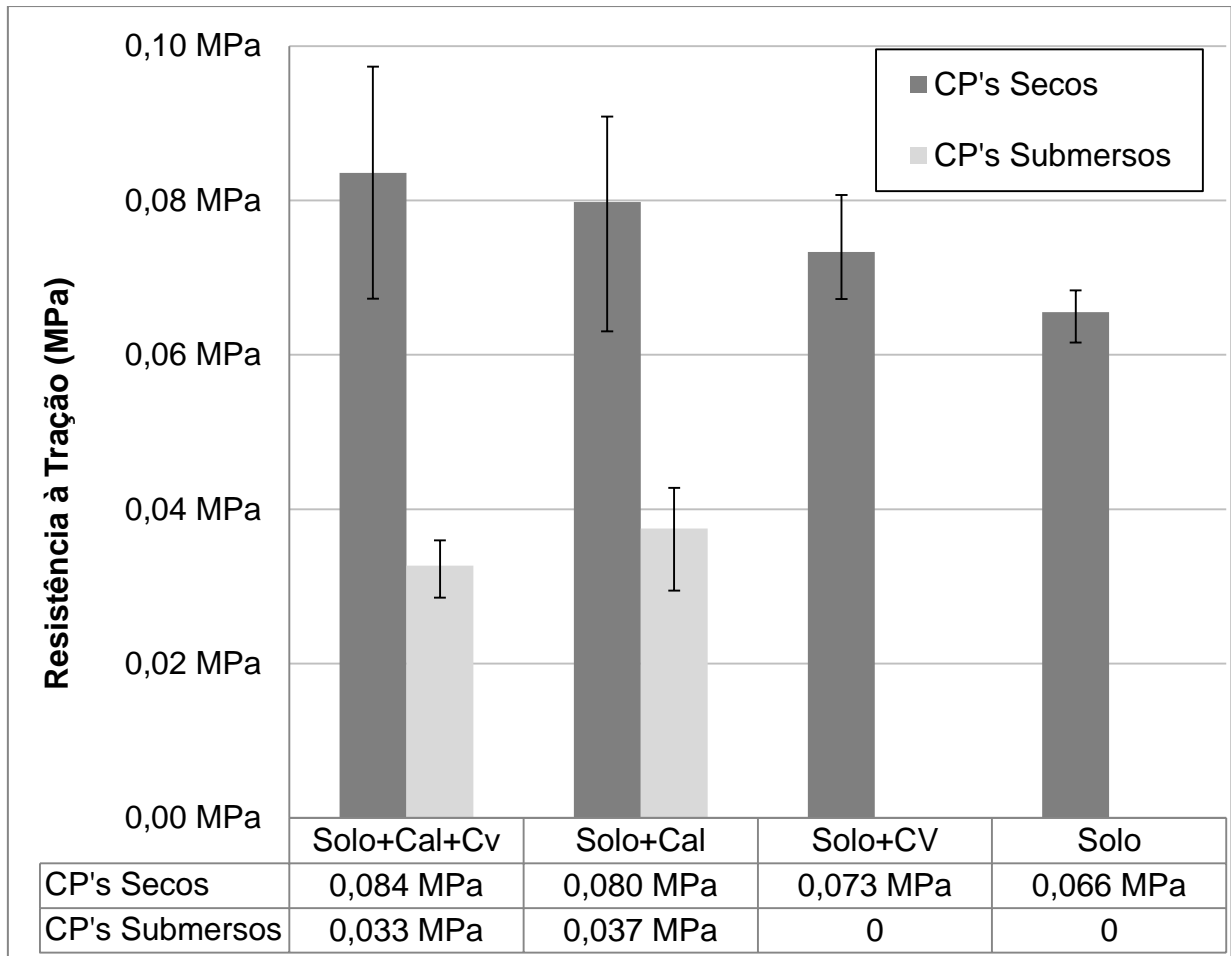
Gráfico 12 – Resistência à Tração versus Deformação para Amostras Submersas



Fonte: Elaboração própria

A partir do Gráfico 13 é possível ter uma melhor ideia da dispersão dos valores de resistência à tração diametral para as diferentes misturas. Podendo ser feita a comparação na queda da resistência quando comparado às amostras secas das submersas. O gráfico mostra a barra de erros para cada resistência, apresentando o máximo e mínimo para cada mistura ensaiada.

Gráfico 13 – Resistência à Tração das Misturas



Fonte: Elaboração própria

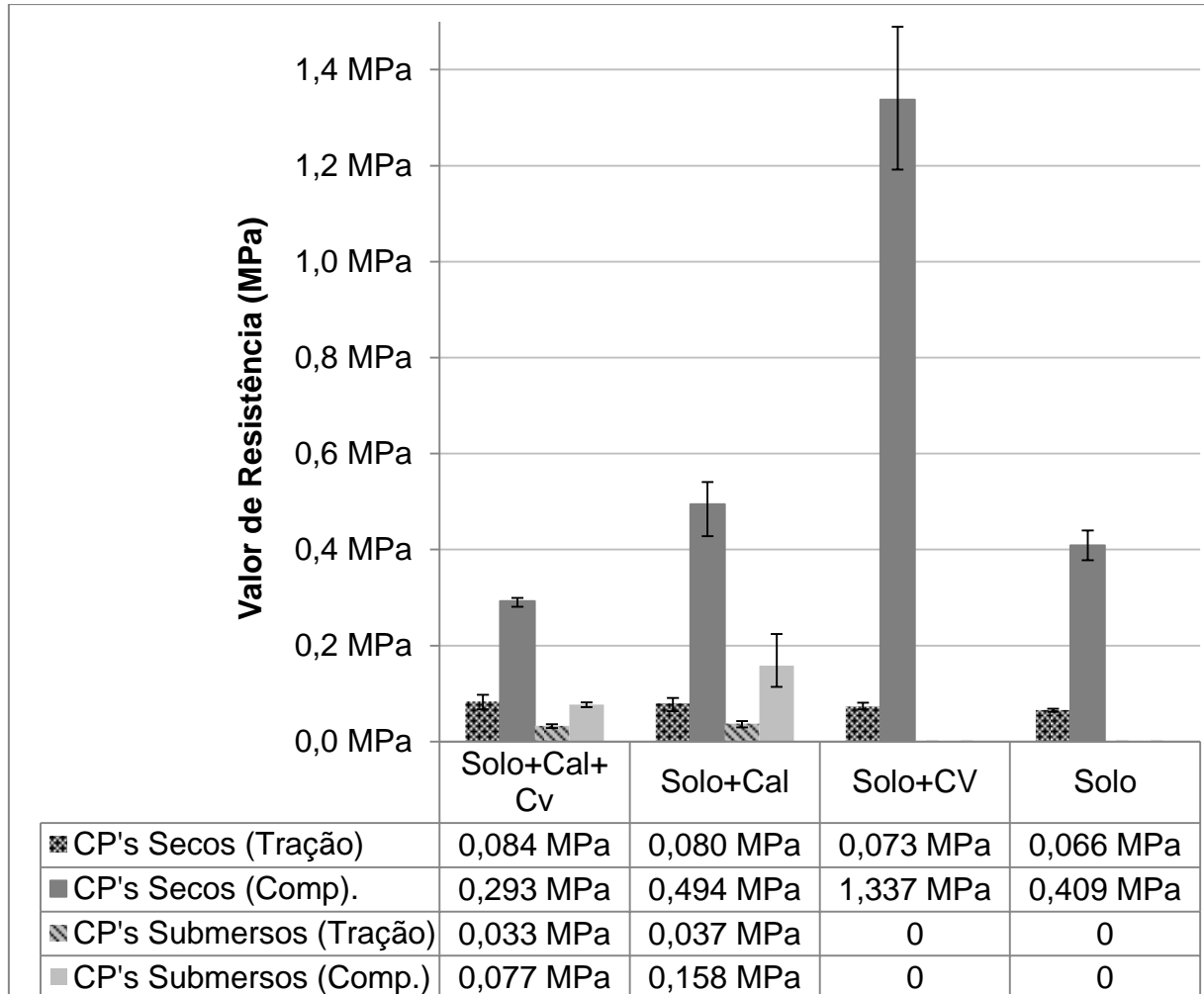
Quando comparados com o solo natural, todas as misturas apresentaram ganho na Resistência à Tração, sendo a mistura de com 4% de cal e 4% de cinza volante com maior ganho.

Os corpos de prova foram submetidos à submersão tiveram uma perda considerável de resistência, no caso da mistura Solo+Cal+CV essa perda chegou a 60,71%, já na mistura de solo e cal dolomítica a diferença foi de 53,75%.

#### 4.12 Relação RCS/RTCS

O Gráfico 14 apresenta as resistências à tração e as resistências à compressão de todas as misturas analisadas.

Gráfico 14 – Análise das Resistências de Todas as Misturas



Fonte: Elaboração própria

A tabela 8 apresenta a relação dos resultados encontrados para a resistência à compressão e a resistência à tração, assim como a porcentagem de solo, cal e cinza volante utilizados em cada mistura, identificando também as condições de ensaios em que foram submetidos os corpos de prova.

Tabela 8 – Relação RCS/RTCD

Mistura			Condição de ensaio	RCS	RTCD	Relação RCS/RTCD
Solo (%)	Cal (%)	CV (%)				
100	0	0	seco	0,409 MPa	0,066 MPa	16,03 %
92	8	0	seco	0,494 MPa	0,080 MPa	16,14 %
92	0	8	seco	1,337 MPa	0,073 MPa	5,48 %
92	4	4	seco	0,293 MPa	0,084 MPa	28,55 %
100	0	0	submerso	0,000 MPa	0,000 MPa	0,00 %
92	8	0	submerso	0,000 MPa	0,000 MPa	0,00 %
92	0	8	submerso	0,158 MPa	0,037 MPa	23,70 %
92	4	4	submerso	0,077 MPa	0,033 MPa	42,29 %

Fonte: Elaboração própria

A relação entre a resistência à compressão pela resistência à tração se torna interessante, pois em determinadas situações os parâmetros utilizados para projetos são obtidos por meio de correlações.

A mistura que apresentou maior diferença entre as resistências foi a solo com 8% de cinza volante em condições secas de ensaio, a relação foi de 5,48%. Já a mistura que apresentou maior relação foi a de 92% de solo, mais 4% de cal e 4% de cinza em condições submersas, a relação foi de 42,29%.

## 5 CONCLUSÃO

O solo coletado proveniente da Jazida na VRS 306, distante 03 km do bairro Balneário Caverá, no município de Alegrete do estado do Rio Grande do Sul apresentou uma granulometria fina, com mais de 50% de sua amostra passante na peneira nº 200. De acordo com a classificação Unificada se enquadrou como areia fina com baixo limite de liquidez (ML). Já para o sistema de classificação Rodoviária entrou no grupo A – 4 devido aos baixos valores encontrados do limite de liquidez e índice de plasticidade. No sistema de classificação MCT o material apresentou comportamentos não-lateríticos, entrando no grupo NA', se tratando um solo arenoso. Nota-se, portanto, que ocorreu certa concordância entre as classificações analisadas.

Com os ensaios de massa específica o solo apresentou resultado de 2,47 g/cm<sup>3</sup>, já para a cal (Dolomítica CH-II) e a cinza volante proveniente da Usina Termoelétrica Presidente Médici (localizada no município de Candiota – RS) tiveram a massa de 2,30 g/cm<sup>3</sup> e 1,98 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

As misturas analisadas nesse trabalho foram Solo+Cal, Solo+CV, Solo+Cal+CV e Solo, a definição da melhor porcentagem de cada componente da mistura foi encontrado pelo ensaio físico-químico, proposto por Casanova, com os resultados encontrados, mostrou-se necessário à adição mínima de 8% para estabilização do solo, já para a relação Cal e CV o ensaio apresentou melhor resultado para 50% de Cal e 50% de CV. As porcentagens procuraram o método mais econômico para a estabilização.

Pelo ensaio de compactação Mini-proctor foi determinado à umidade ótima e massa específica para cada mistura analisada. Com esses valores encontrados foi possível realizar a moldagens das amostras propostas.

Com os ensaios de compactação simples a mistura que apresentou maior ganho de resistência foi a de Solo+CV, tendo um aumento de 226,89%. As misturas com Cal dolomítica não apresentaram um aumento esperado na resistência à compressão, nos trabalhos apresentados por Gutierrez, Kruger e Nobrega (1998) que utilizaram essa cal também não encontraram resultados satisfatórios quando empregado em solos argilosos, para uma melhor conclusão seria necessário uma análise química dos compostos gerados quando acrescentado à cal dolomítica na mistura.

Quando comparados com o solo natural, todas as misturas apresentaram um aumento na resistência à tração, sendo a mistura de Solo+Cal+CV com maior ganho.

As amostras rompidas foram condicionadas em duas situações diferentes, uma rompida a seco e outra submetida à submersão 24 horas antes de sua ruptura, isso foi feito a fim de determinar a resistência em um ambiente de total saturação, verificando a diferença entre as resistências. Das misturas preparadas para imersão, apenas duas apresentaram características para resistir à saturação, sendo a mistura de Solo+Cal e Solo+Cal+CV, logo quando usar as misturas que não apresentaram tal característica deve-se evitar ascensão capilar, garantido que o nível do lençol freático fique abaixo, ou quando usado no meio da pavimentação devesse garantir sua impermeabilização.

Para as misturas que apresentaram características à saturação a queda na resistência à compressão chegou a 73,72% para as misturas utilizando 4% de cal e 4% de cinza. No módulo de elasticidade da mistura a queda chegou a 59,90%. Já para a resistência à tração essa queda chegou a 60,71%. Valores semelhantes foram encontrados para a mistura com solo e cal.

Por fim, as misturas utilizadas apresentaram-se ineficientes quando empregados como base de pavimentos, nenhuma das amostras obteve uma resistência igual ou maior a 2,1 MPa exigido pela NBR 12253/2012. Mas o uso da cal e cinza volante apresentou um aumento no Módulo de Elasticidade das misturas, diminuindo assim as suas deformações, além de tornar possível o seu uso em saturação.

## 5.1 Sugestão para trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento da adição de cal dolomítica e cinza volante em outros tipos de solos;
- Avaliar o comportamento do mesmo solo quando acrescida cal calcítica junto da cinza volante;
- Avaliar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito das misturas do presente estudo por meio do ensaio de cisalhamento direto ou compressão triaxial.



## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. Associação Brasileira de Normas Técnicas, N. B. R. 6457, **Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

\_\_\_\_\_. ABNT, N. B. R. 7175,(2003a). **Cal hidratada para argamassas–Requisitos**, 2003

\_\_\_\_\_, ABNT.N. B. R. 7181 . **Análise Granulométrica: Solo**. Rio de, p. 13, 2016

BEHAK, L.. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. 2007. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BHATTACHARJA, SANKAR; BHATTY, J. I.; TODRES, H. ALAN. **Stabilization of clay soils by portland cement or lime—a critical review of literature**. PCA R&D Serial, n. 2066, p. 60, 2003.

CAPUTO, H. P.. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. In:**Mecânica dos solos e suas aplicações**. LTC, 1988

CHAUVEL, A.; NÓBREGA, M. T. **Comportamento dos Solos Argilosos Desenvolvidos sobre Basaltos do Brasil Meridional após Tratamento com Cal**. IV REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL. Boletim, 1980.

CRISTELO, N. M. C., **Estabilização de solos residuais graníticos através de adição de cal**. 2001. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2001.

CRUZ, M.; JALALI, S.. **Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento**. In: **12º Congresso Nacional de Geotecnia**. Universidade do Minho, 2010.

DALLA ROSA, A.. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009.

DHIR, R. K. **Pulverised fuel ash. Cement Replacemnet Materials. Concrete Techenology and Design**. Ed. RN Swamy. Concrete Technology and Design, Vol. 3. 1986.

DNER, M. E. 228/94 **Método de ensaio–solos-Compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT (2006). **Manual da Pavimentação**. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. 3 ed. IPR 719 Brasil, 2006.

DNIT 143 – ES. Pavimentação. Base de Solo-Cimento – Especificações de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

GAVA, G. P. et al. Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica. 1999.

GUTIERREZ, N. H. M.; KRÜGER, C. A.; NÓBREGA, M. T. Efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso laterítico. In: **XI Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica**. 1998.

HOPPE FILHO, J.. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KANIRAJ, S.; SHENBAGA, R.; VASANT, H. Fly ash and fly ash-soil mixture for embankment construction. In: Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka. 1996.

KATZ, L. B. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. 2007.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of lowa soils with lime and fly ash**. 1961. 247 f. Dissertation (PhD) – Major of Civil Engineering, Iowa State University of Science And Technology, Ann Arbor, Michigan, 1961.

\_\_\_\_\_. **ME 136/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010. 6p

\_\_\_\_\_. **ME 258/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 14 p.

\_\_\_\_\_. **ME 256/94**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro: DNER, 1994b. 6 p.

\_\_\_\_\_. **ME 258/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 14 p.

MEDINA, J., – **Apostila de estabilização de solos** – COPPE/UFRJ, 1987

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARQUER, G. L. de O. Capítulo 4- **Estabilização dos solos para fins de pavimentação**. Minas Gerais: Universidade Feral de Juiz de Fora, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. São Paulo: AMN, 2000. 5 p.

NBR, ABNT. 6508. **Determinação da Massa Específica: Grãos de Solos que Passam na Peneira**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **PAVIMENTOS ECONÔMICOS**: Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

NÓBREGA, M. T. A estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários. **A estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários**, 1988.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Porto Alegre, 1991.

ROHDE, G. M. et al. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais**. Porto Alegre: Cientec, 2006.

SUÁREZ, D. A. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.

VOGT, J. C., **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho, 1971.

VILLIBOR, D. F. et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. Arte & Ciência, 2009.