



**FATEC – SP**

**Faculdade de Tecnologia de São Paulo**

*Departamento de Transportes e Obras de Terra*

**ALINE DE JESUS PEDROSO**

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL PARA  
USO EM PAVIMENTAÇÃO**

SÃO PAULO  
2015

**ALINE DE JESUS PEDROSO**

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO SILTOSO ARGILOSO COM  
ADIÇÃO DE CAL PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Dr. Edson de Moura

SÃO PAULO  
2015

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho ao único que é digno de toda glória e todo louvor Meu Amado JESUS, a minha mãe Avanete de Jesus Ferreira por sempre me incentivar a estudar e ao meu noivo Guilherme Daniel da Costa pelo amor e pelas palavras de apoio.

## **AGRADECIMENTO**

Em primeiro lugar agradeço ao meu Amado Jesus, que me sustentou e me guiou até aqui com sua Graça e seu amor em todos os momentos, me abençoou em todas as etapas do curso, me capacitando para entrega deste trabalho.

À minha amada mãe Avanete de Jesus Ferreira que sempre esteve ao meu lado, me incentivando a estudar, a seguir em frente, e a nunca desistir dos meus sonhos mesmo nos momentos difíceis.

Ao meu noivo Guilherme Daniel da Costa pelo apoio, por estar sempre disposto a me ajudar, pela paciência nos momentos difíceis e pelas palavras de carinho e de ânimo.

Ao Prof. Dr. Edson de Moura pela orientação, dedicação e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Profa. Arisol Simone Sayuri Tsuda Yamamoto pela dedicação, sugestões e transmissão de conhecimentos.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica dos Solos da FATEC – SP, Rafael Henrique F. de Godoy, Deise Dias do N. Machado e Celso da S. Cachola muito obrigada pelos valiosos auxílios na execução de cada um dos ensaios contemplados por este trabalho.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC – SP e aos professores do Departamento de Ensino Geral e do Departamento de Transportes e Obras de Terra, que colaboraram grandemente para todo conhecimento adquirido no meu período de formação.

À todos os colegas e amigos do curso de Movimento Terra e Pavimentação que me acompanharam até aqui, que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desse trabalho.

## **RESUMO**

O objetivo da pesquisa é o estudo da estabilização de um solo siltoso argiloso local, da região de São Paulo, visando a verificação da estabilização com adição de 3%, 4% e 5% de cal. Sendo analisado qual porcentagem de cal propicia o aumento da resistência à compressão simples, podendo ser empregada como base e sub-base na estrutura do pavimento. Após a coleta do solo, foram programados ensaios geotécnicos para o início da análise em laboratório. Estes ensaios, se dividem em três partes: Ensaio de caracterização, para confirmar se o solo coletado é realmente um solo siltoso. Ensaio de compactação Mini-Proctor nas misturas solo-cal, determinando as curvas de compactação e umidade ótima. Faz-se necessário a preparação e moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio de compressão simples, para as porcentagens de cal estabelecidas nos ensaios. No total foram moldados 75 corpos de prova, cinco corpos de prova para cada porcentagem e para cada dia de cura. A terceira parte foi a realização do ensaio de compressão simples, sendo rompidos corpos de prova nos respectivos dias: 3, 7, 28, 60 e 180 dias. Através do ensaio de compressão simples pode concluir-se que a porcentagem da mistura solo-cal que mais propicia ao ganho de resistência é a porcentagem 5% de cal. Sendo que as outras porcentagens da mistura solo-cal não foram suficientes para trazer o aumento da resistência a compressão no rompimento no tempo de cura de 180 dias. Sendo assim, segundo os ensaios, o método é eficaz para a estabilização dos solos, porém, o ganho significativo de resistência foi ratificado com 5% de teor de cal.

Palavra-chave: estabilização de solo. Solo-cal.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1 – Classificação do estado geral das extensões estudadas.....	12
Tabela 1.2 – Total da extensão da malha rodoviária brasileira .....	12
Tabela 5.1 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 3% .....	58
Tabela 5.2 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 4% .....	58
Tabela 5.3 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 5% .....	58
Tabela 5.4 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 3% .....	59
Tabela 5.5 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 4% .....	59
Tabela 5.6 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 5% .....	59
Tabela 5.7 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 3% .....	60
Tabela 5.8 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 4% .....	60
Tabela 5.9 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 5% .....	60
Tabela 5.10 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 3% .....	61
Tabela 5.11 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 4% .....	61
Tabela 5.12 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 5% .....	61
Tabela 5.13 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 3% .....	62
Tabela 5.14 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 4% .....	62
Tabela 5.15 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 5% .....	62
Tabela 5.16 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 3% .....	63
Tabela 5.17 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 3% .....	63
Tabela 5.18 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 3% .....	64
Tabela 5.19 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 3% .....	64
Tabela 5.20 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 3% .....	64
Tabela 5.21 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 4% .....	65
Tabela 5.22 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 4% .....	66
Tabela 5.23 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 4% .....	66
Tabela 5.24 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 4% .....	66
Tabela 5.25 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 4% .....	67
Tabela 5.26 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 5% .....	68
Tabela 5.27 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 5% .....	68
Tabela 5.28 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 5% .....	69

Tabela 5.29 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 5% .....	69
Tabela 5.30 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 5% .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição das camadas do pavimento flexível.....	11
Figura 4.1 – Amostra do solo antes de ser peneirada .....	23
Figura 4.2 – Amostra do solo depois de ser peneirada .....	24
Figura 4.3 – Resultado da distribuição granulométrica .....	25
Figura 4.4 – Mistura homogênea .....	25
Figura 4.5 – Aparelho Casagrande .....	26
Figura 4.6 – Aparelho Casagrande com a amostra .....	26
Figura 4.7 – Abertura do cinzel .....	27
Figura 4.8 – Cápsula com a amostra para a determinação da umidade ótima .....	28
Figura 4.9 – Cilindro com diâmetro de aproximadamente 3 mm.....	28
Figura 4.10 – Resultados do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade .....	30
Figura 4.11 – Amostra do solo passado na peneira 0,40 mm.....	32
Figura 4.12 – Amostra homogeneizada .....	32
Figura 4.13 – Os três anéis preenchidos corretamente.....	33
Figura 4.14 – Os anéis em um recipiente com água. ....	34
Figura 4.15 – As pastilhas começando absorver a água .....	34
Figura 4.16 – As pastilhas absorvendo a água .....	35
Figura 4.17 – Penetração das pastilhas .....	35
Figura 4.18 – Resultado do teor de umidade das pastilhas .....	36
Figura 4.19 – Resultado do ensaio de MCT – método da pastilha.....	36
Figura 4.20 – O aparelho compactador com o molde do corpo de prova .....	38
Figura 4.21 – O molde do corpo de prova, o anel de vedação e a folha de polietileno .....	39
Figura 4.22 – O soquete .....	39
Figura 4.23 – A amostra de solo sem água .....	40
Figura 4.24 – A amostra de solo com água .....	40
Figura 4.25 – A amostra homogeneizada.....	41
Figura 4.26 – Última camada compactada .....	41
Figura 4.27 – Excesso acima do cilindro .....	42
Figura 4.28 – O excesso removido .....	42
Figura 4.29 – Corpo-de-prova imerso na água .....	43
Figura 4.30 – Extensômetro .....	44
Figura 4.31 – Escoamento da água .....	44
Figura 4.32 – Prensa do ISC manual .....	45
Figura 4.33 – Resultado do Ensaio Compactação Mini-Proctor, CBR, Penetração e Expansão .....	46
Figura 4.34 – Gráfica do Ensaio Compactação Mini-Proctor .....	46
Figura 4.35 – Gráfico do Ensaio Índice de Suporte Califórnia .....	47
Figura 4.36 – Dividindo o corpo de prova para a determinação da umidade ótima.....	47
Figura 4.37 – Resultado do teor da umidade ótima .....	48
Figura 4.38 – Solo mais a porcentagem da cal .....	48
Figura 4.39 – Solo-cal mais a quantidade de água .....	49



Figura 4.40 – A mistura solo-cal homogeneizada .....	49
Figura 4.41 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 3% .....	51
Figura 4.42 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 4% .....	52
Figura 4.43 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 5% .....	53
Figura 4.44 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 3% .....	54
Figura 4.45 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 4% .....	54
Figura 4.46 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 5% .....	55
Figura 4.47 – Os corpos de prova identificados com a etiqueta.....	56
Figura 4.48 – Os corpos de prova prontos para ir para câmara úmida .....	56
Figura 4.49 – Valores de resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 3% - Fonte: PRÓPRIA (2015) .....	65
Figura 4.50 – Valores de resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 4%.....	67
Figura 4.31 – Valores de resistência a compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 5%.....	70
Figura 4.52 – Resumo dos resultados das dosagens .....	71

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	Considerações Iniciais.....	11
1.2	Objetivo.....	13
1.3	Justificativa.....	13
1.4	Metodologia.....	13
<b>2</b>	<b>SOLO .....</b>	<b>15</b>
2.1	Estabilização do solo.....	15
2.2	Estabilização granulométrica .....	15
2.3	Estabilização Mecânica .....	16
2.4	Estabilização de Solo-Betume .....	16
2.5	Estabilização com cloretos .....	16
2.6	Estabilização de Solo-Cimento.....	17
2.6.1	Características das misturas solo/cimento.....	17
<b>3</b>	<b>ESTABILIZAÇÃO DE SOLO-CAL .....</b>	<b>19</b>
3.1	História .....	19
3.2	Considerações Iniciais.....	20
3.3	Reações químicas da mistura solo-cal .....	21
3.4	Utilização de solo-cal em camada de pavimento.....	21
3.5	Alteração nas propriedades de solos estabilizados com cal .....	22
<b>4</b>	<b>ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....</b>	<b>23</b>
4.1	Primeira Parte – Ensaios de Caracterização .....	23
4.1.1	Granulometria.....	24
4.1.2	Limite de Liquidez de Solos.....	25
4.1.3	Limite de Plasticidade.....	28
4.1.4	Teor de umidade ótima (Wot) .....	31
4.1.5	Classificação dos solos tropicais MCT Expedita – Método das pastilhas .....	31
4.1.6	Índice de Suporte Califórnia - CBR.....	37
4.1.6.1	Compactação Mini-Proctor .....	37
4.1.6.2	Moldagem do corpo-de-prova - CBR .....	40
4.1.6.3	Expansão .....	43
4.1.6.4	Penetração .....	44
4.2	Segunda Parte – Montagens dos corpos de prova .....	48
4.3	Terceira Parte - Compressão Simples .....	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS FINAIS.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT), o pavimento visa promover segurança ao tráfego nas rodovias, deve suportar os efeitos das mudanças climáticas, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo aos pneus e não provocar altos níveis de ruídos, ter estrutura forte, resistir ao fluxo de veículos, permitir o escoamento da água e ter boa resistência a derrapagens. (DNIT, 2006)

Para atender esses requisitos a estrutura do pavimento deve ser constituída por camadas que distribuam as solicitações de carga, limitando as tensões e as deformações de maneira a garantir um desempenho adequado à via, por um longo período de tempo. Nesse sentido, os pavimentos flexíveis são divididos em camadas com o objetivo de distribuir as tensões oriundas dos veículos nas camadas subsequentes, minimizando os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecendo proteção ao subleito. (Figura 1.1) (CNT, 2013)

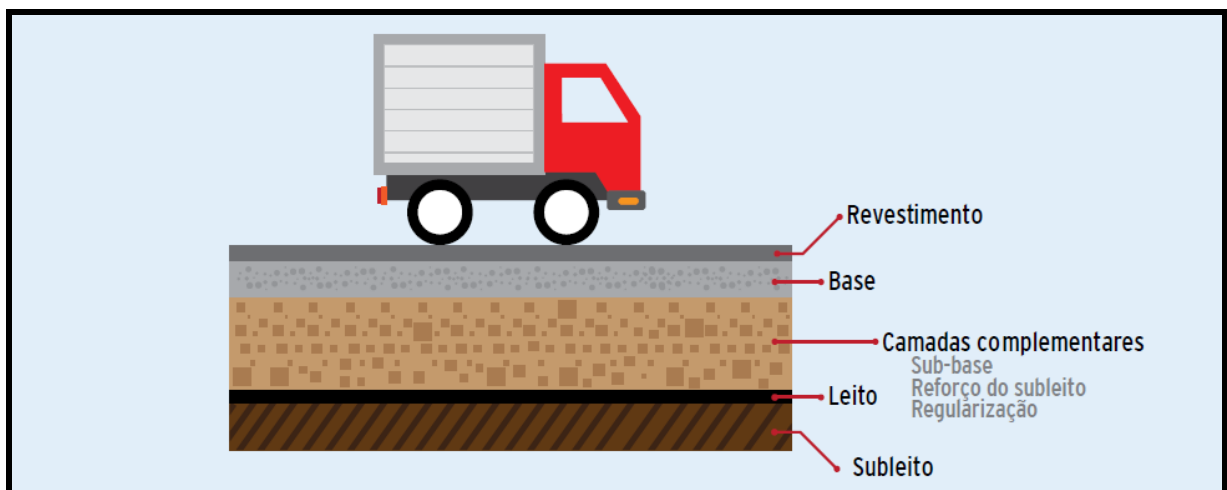


Figura 1.1 – Distribuição das camadas do pavimento flexível

Fonte: CNT (2013)

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), um dos problemas encontrados no Brasil, relacionado à estrutura dos pavimentos flexíveis, é o não atendimento das exigências técnicas, tanto da capacidade de suporte das camadas do pavimento, como da qualidade dos materiais empregados no revestimento. Falhas construtivas têm como

consequência um processo de deformação mais acelerado, resultando em maiores custos na reparação desses pavimentos para atingir condições ideais de tráfego. (CNT, 2013)

De acordo com a pesquisa CNT do ano de 2013, foram avaliados 96.714 quilômetros de rodovias federais e estaduais pavimentadas em todo o país. Os resultados apresentados apontam que 36,2% dos trechos pesquisados (35.002 km) mostram condições satisfatórias, classificado como ótimo ou bom. Sendo que os valores do ótimo são 10,2% e 26,0% como bom. Em 61.712 quilômetros de rodovias foram encontrados problemas e deficiência no pavimento, na sinalização ou na geometria da via, no total 63,8%. Sendo 8% considerado péssimo, 21,4% como ruim e 34,4% como regular. (Tabela 1.1)

Tabela 1. 1 – Classificação do estado geral das extensões estudadas

Estado Geral	Extensão Total	
	Km	%
<b>Ótimo</b>	9.895	10,2
<b>Bom</b>	25.107	26,0
<b>Regular</b>	33.302	34,4
<b>Ruim</b>	20.676	21,4
<b>Péssimo</b>	7.734	8,0
<b>Total</b>	96.714	100,0

Fonte: CNT (2013)

Conforme dados do Sistema Nacional de Viação (SNV), o país possui 1.713.885 km de rodovias, sendo 202.589 km pavimentados, ou seja, 11,8% da malha rodoviária. As rodovias federais são 64.291 km e as estaduais são 31.271 km. Na tabela 1.2 pode-se verificar a extensão total das rodovias pavimentadas e não pavimentadas da malha rodoviária.

Tabela 1.2 – Total da extensão da malha rodoviária brasileira

Região	Área Km <sup>2</sup>	Extensão das rodovias – Km		
		Total	Pavimentadas	Não Pavimentadas
<b>Brasil</b>	8.515.767,0	1.713.885	202.589	1.511.296
<b>Norte</b>	3.853.676,9	147.250	20.555	126.695
<b>Nordeste</b>	1.554.291,6	443.906	54.692	389.214
<b>Sudeste</b>	924.620,7	533.435	62.638	470.797
<b>Sul</b>	576.774,3	384.752	37.395	347.357
<b>Centro-Oeste</b>	1.606.403,5	204.542	27.309	177.233

Nota: Somatório das Federais, Estaduais e Municipais.

Fonte: CNT (2013)

Os pavimentos necessitam atender a algumas características relacionadas a fatores de segurança, economia e conforto, sendo a superfície do pavimento o elemento essencial e perceptível aos usuários. O mau estado de conservação das vias, a falta de manutenção

adequada, as condições inadequadas do acostamento e do pavimento, criam fatores que expõem os veículos a um elevado número de acidentes nas rodovias brasileiras.

As rodovias são a principal infraestrutura de transporte disponível no país, à necessidade de maiores investimentos para melhorias é de extrema importância. Tanto na execução do pavimento como na sua manutenção e restauração. Com isso evitam-se acidentes e aumenta-se o conforto do rolamento.

## ***1.2 Objetivo***

Verificar a estabilização de um solo de características siltoso argiloso com adição 3%, 4% e 5% de cal, uma vez que a cal propicia o aumento da resistência, tanto a compressão como também a tração, e com isso obter um melhor aproveitamento do solo como camada de pavimento.

## ***1.3 Justificativa***

O Brasil possui diversas regiões com solos que apresentam propriedades físicas e químicas que não são adequadas para fins rodoviários, dificultando a execução e a durabilidade da malha rodoviária brasileira.

Atualmente no mercado existem materiais que são fundamentais para a estabilização do solo na construção rodoviária. A cal é um desses materiais que pode ser utilizada, com baixo custo, garantindo o aumento da resistência à compressão simples do solo.

## ***1.4 Metodologia***

A pesquisa desenvolve-se por meio de estudo de bibliografia sobre o assunto, realização de ensaios geotécnicos no laboratório da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP) e ensaio de granulometria realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A realização dos ensaios divide-se em três partes.

A primeira parte ocorre com a realização dos ensaios de caracterização do solo que são:

- Granulometria;
- Limites de Atterberg (Liquidez e Plasticidade);

- Compactação Mini-Proctor (Energia Normal);
- Determinação do Índice de Suporte Califórnia;
- Determinação da umidade ótima;
- Classificação Geotécnica MCT Expedita – Método das Pastilhas, Mini – MCV.

Na segunda parte determina-se a umidade ótima e a massa específica aparente seca da mistura de solo-cal e a água com o ensaio de Compactação Mini- Proctor (Energia Normal) com 3%, 4% e 5 % de cal. E a moldagem dos corpos de prova no teor de umidade ótimo para a realização do ensaio de compressão simples.

A terceira parte é a realização do ensaio de Compressão simples, o rompimento dos corpos de prova nos respectivos dias 3, 7, 28, 60 e 180 dias.

## **2 SOLO**

### ***2.1 Estabilização do solo***

Nas regiões que há falta de pedras e o solo não possui características aceitáveis, ou quando se pretende fazer uma camada de solo resistente, recorre-se a alternativa de estabilizar o solo. A estabilização do solo consiste em atribuir condições de resistir a deformações e rupturas durante o período que estiver desempenhando funções que exigem essas características em um pavimento ou outra obra. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005; SENÇO, 2001).

Os métodos para alterar as propriedades química, física e biológica de um solo. Classificam-se em três grupos, sendo que o primeiro método é a estabilização mecânica que tente a melhorar as características do solo através de uma melhor distribuição das partículas, assim corrigindo a distribuição granulométrica. O segundo método é a estabilização física que altera as propriedades do solo, podendo ser por meio do calor ou da eletricidade. E o terceiro é a estabilização química, que altera permanentemente as propriedades do solo por meio de algum aditivo. (CRISTELO, 2001)

O solo estabilizado tem que apresentar resistência ao cisalhamento e resistência a deformação. A resistência ao cisalhamento deve oferecer ao solo, quando sujeito as tensões oriundas da passagem dos veículos, resistência sem causar ruptura, ou algum dano de acordo com as necessidades do tráfego. (SENÇO, 2001)

A principal aplicação da estabilização de solos é na construção de pavimentos, especialmente nas bases, sub-bases e camadas de desgaste de estradas e aeródromos. (CRISTELO, 2001)

### ***2.2 Estabilização granulométrica***

Pode-se conseguir estabilizar o solo através de um simples ato, distribuir os diâmetros dos grãos adequadamente, ou seja, a distribuição granulométrica das diversas partículas de solos fazendo com que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses pelos pequenos. (SENÇO, 2001)

A estabilização granulométrica impõe limites aos índices físicos, como Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade. Garantindo que o solo fique estabilizado, devidamente compactado e convenientemente drenado formando uma estrutura resistente e estável,

podendo atender as necessidades que as camadas constituintes do pavimento solicitam. (SENÇO, 2001)

### ***2.3 Estabilização Mecânica***

A necessidade de trabalhar com solos corretamente estabilizados ocorre em obras de pavimentação rodoviária. A estabilização mecânica confere operações mecânicas que atribui estabilidade quando solicitado em pavimentação de estradas. (CRISTELO, 2001)

O objetivo principal da estabilização mecânica é obter um material com características granulométricas e de consistência melhores que o solo de origem. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005).

Podem-se considerar operações mecânicas aquelas que modificam apenas as partículas do solo ou a granulometria. A inserção de aditivos como o cimento, a cal, e o betume, são materiais não inertes como os solos e os agregados, não constituindo uma estabilização mecânica. (CRISTELO, 2001)

### ***2.4 Estabilização de Solo-Betume***

O betume costuma ser utilizado sob uma forma fluida, betume fluidificado ou como emulsão asfáltica. Os teores em betume variam de 4% a 6% do solo seco, sendo que o valor do teor é determinado em função dos resultados de um ensaio de resistência e das variações volumétricas após a imersão a água. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005)

Como aglutinante, a principal função do betume é dar ao solo a coesão que esta faltando. Os solos mais adequados para a estabilização com estes aditivos são os que tem as porcentagens passantes na peneira 200 inferiores a 10% e granulometria não uniforme. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005)

### ***2.5 Estabilização com cloretos***

A principal função da estabilização com cloretos é a retenção da umidade, evitando assim a formação de pó are ao seu arrastamento pela chuva. Os cloretos mais utilizados em obras rodoviárias são cloreto de sódio e o cloreto de cálcio. (CRISTELO, 2001)

Normalmente o cloreto de sódio é utilizado para a remoção do pó em estradas de terra, podendo ser usado junto com a cal ou o cimento. O efeito que o cloreto de cálcio possui



é no aumento da densidade em alguns tipos de solos, podendo alcançar 11% ou em outro pode provocar um efeito nulo ou contrário. (CRISTELO, 2001)

## ***2.6 Estabilização de Solo-Cimento***

O cimento é um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química de um solo. Os principais objetivos da utilização do cimento na estabilização de solos são a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade relativa à variação do teor em água. (CRISTELO, 2001)

Nos Estados Unidos o cimento é utilizado para a estabilização do solo e também para o melhoramento de estradas de seixos. A mistura solo/cimento é o tipo de estabilização mais utilizada, sendo vantajosa em solos granulares, solos siltosos e argilas pouco plásticas. A presença de matéria orgânica não é adequada para os solos. (CRISTELO, 2001)

Na estabilização química de solos os cimentos do tipo Portland são os mais usados, apesar de todos os tipos de cimento serem empregados. Seja qual for o tipo de cimento utilizado na estabilização do solo, esse deve atender todas as especificações que caracterizam um cimento de qualidade. (CRISTELO, 2001)

### **2.6.1 Características das misturas solo/cimento**

Os principais elementos que condicionam as propriedades físicas dos solos estabilizados com cimento são o tipo de solo, quantidade de aditivos, o grau da mistura, o tempo de cura e a massa específica seca da mistura compactada. (CRISTELO, 2001)

A ação estabilizante do cimento é exercida conforme o teor de cimento da mistura. Uma das ações que consiste em elevar o nível de resistência mecânica devido à ação aglutinante do aditivo, tendo efeito quando os teores de cimento são mais altos. Quando os teores de cimentos são baixos, consiste na alteração da fração argilosa do solo, assim diminuindo a plasticidade, e não garantindo a resistência mecânica, podendo ou não elevar seu nível de resistência. (CRISTELO, 2001)

A seguir pode-se verificar os três tipos principais de mistura de solo-cimento com diferentes aplicações. O primeiro tipo de mistura solo-cimento é aplicado como solo-cimento compactado. Essa mistura de solo e cimento possui uma quantidade suficiente de cimento para provocar o endurecimento, preparada com uma quantidade de água necessária a compactação e hidratação do cimento. (CRISTELO, 2001)

O segundo tipo de mistura é o solo corrigido com cimento, que tem a função de corrigir algumas propriedades físico-químicas do solo, sendo elas a expansibilidade, a plasticidade ou a capacidade de carga. A quantidade de cimento dessa mistura é bem inferior comparada a primeira mistura, assim não chega ter um endurecimento significativo. (CRISTELO, 2001)

A terceira mistura é denominada solo-cimento plástico, a quantidade de cimento utilizada nessa mistura é suficiente para deixa-la endurecer, sendo adicionada a água necessária no momento da aplicação sua consistência é parecida com as das argamassas. (CRISTELO, 2001)

### 3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO-CAL

#### 3.1 *História*

Os romanos foram os primeiros a desenvolver técnicas de aplicações de cal em obras rodoviárias. Na área de geotécnica utilizavam a cal na secagem de terrenos e na fixação das lajes de algumas de suas estradas às plataformas CRISTELO, 2001; JUNIOR, 2011; GUIMARÃES, 2002)

Pode-se encontrar exemplos de aplicação marcantes na história, na Itália, na via Ápia, entre a Porta Capena-Capua-Brindisi, elaborada no ano 312 a. C, e também em alguns trechos da construção da muralha da China no ano de 228 a. C. (CRISTELO, 2001; JUNIOR, 2011; GUIMARÃES, 2002)

A estabilização de solo com adição de cal teve um maior destaque a partir da década de 20. Depois da construção de trechos experimentais no estado americano do Missouri, o estudo técnico realizado pela “U.S Bureau of Public Road”, foi possível chegar à conclusão sobre os teores ótimos de cal para executar a mistura solo-cal. (AZEVEDO, 2010).

Os teores ótimos da cal alcançados são bastante diversos, pois o resultado dos teores depende do material argiloso usado. (AZEVEDO, 2010)

Na década de 50, no Brasil iniciou-se o uso de solo-cal em rodovias brasileiras. A seguir exemplos de sucessos na sua aplicação.

O Aeroporto de Congonhas (São Paulo), a pista foi constituída com uma base de solo-cal agregado, com 6% de cal hidratada, o tipo do solo A-7-5 (HRB). (GUIMARÃES, 1971)

Na segunda pista da Rodovia Curitiba / Porto Alegre (Paraná), foi utilizado um solo siltoso com 3% e 7% de cal. (GUIMARÃES, 1971)

A Rodovia Brasília/ Fortaleza (Distrito Federal), dois trechos de 150 metros cada, foram construídos e, a base com 1% e 3% de cal. (GUIMARÃES, 1971)

A Avenida Sernambetiba – Guanabara (Rio de Janeiro), um trecho de 18 Km, usando como base a mistura com 3% a 4% de cal. (GUIMARÃES, 1971)

A última pista aqui citada é a Rodovia Cruz Alta/Carazinho BR-377/RS, em dois trechos, foi usado o solo local argiloso e com 4% de cal. (GUIMARÃES, 1971)

### 3.2 Considerações Iniciais

A estabilização de solos com adição de cal é recomendada principalmente para solos argilosos ou muito siltosos, que geralmente apresentem plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte. (SANTOS,)

Justifica-se essa técnica pelas reações físico-químicas e químicas que se desencadeiam entre a cal e os constituintes do solo, principalmente a fração de argila. (SANTOS, 2004)

A principal característica da estabilização de solo-cal é que consegue atingir uma resistência mais elevada do que o solo compactado. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005)

A redução da plasticidade dos solos argilosos é o principal efeito da estabilização com cal. A cal reage quimicamente com a água absorvida nas partículas de argila e submerge de uma forma que o solo fica menos sensível a água. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005)

Nessa situação, obtém-se um efeito imediato de modificação da granulometria e da plasticidade, melhorando a propriedade do solo. Ao mesmo tempo, aumenta a resistência do solo compactado. (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2005)

A adição da cal é uma solução economicamente viável e uma excelente técnica quando comparada com os trabalhos de remoção de camada de solo argiloso, para substituir por solo granular. Sendo vantajoso para fim de estabilizar o leito. (SENÇO, 2001)

Se o tráfego de serviço já está em funcionamento pela pista em construção, a estabilização com cal melhorará as características de suporte de carga do subleito, assim podendo diminuir a espessura necessária do pavimento. (SENÇO, 2001)

Os tipos de cal mais utilizados em estabilização de solos são: cal hidratada cálcica,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; cal dolomítica mono hidratada –  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$ ; cal virgem -  $\text{CaO}$  e cal dolomítica virgem –  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ . (SANTOS, 2004)

A diferença entre esses produtos e a rocha de origem é o processo de fabricação (calcinação). Geralmente para fins rodoviários a cal cálcica hidratada é a mais utilizada. Sendo que no comércio é apresentada em forma de pó, ensacada em papel ou plástico, facilitando o manuseio e o transporte. (SENÇO, 2001; SANTOS, 2004)

A variação dos tipos de cal resulta em diferentes teores da umidade ótima, tempo de cura, porcentagem de cal necessária à estabilização e alterações dos valores da resistência do solo. (SANTOS, 2004)

### ***3.3 Reações químicas da mistura solo-cal***

A adição de cal em um solo causa mudanças em suas propriedades, sendo as principais mudanças nos solos de granulométrica média a fina, verificando ganho de resistência e de melhoria na trabalhabilidade, redução na plasticidade e expansão. O processo da troca catiônica e floculação, carbonatação e reação pozolânica são reações responsáveis por essas mudanças. (SANTOS, 2004)

A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma inicial rápida, que dura algumas horas podendo levar até dias, e outra mais lenta, que pode levar alguns meses e anos. (LOVATO, 2004)

A fase lenta caracteriza-se pelas reações pozolânicas e a carbonatação. A fase rápida caracteriza-se pela troca catiônica e a floculação, assim produzem alterações imediatas nas propriedades físicas do solo. (LOVATO, 2004; SANTOS, 2004)

As reações responsáveis pela mudança na plasticidade e trabalhabilidade, são os processos da troca de cátions, floculação e aglomeração. O aumento de resistência deve-se a reação pozolânica entre o solo e a cal, resultando na formação de alguns compostos cimentantes, aumenta a resistência e a durabilidade da mistura solo-cal. (SANTOS 2004)

A carbonatação é outra reação importante da mistura solo-cal. Na carbonatação o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com a cal, formando carbonatos de cálcio ou de magnésio, dependendo do tipo de cal hidratada utilizada. (SANTOS, 2004)

Sendo que a carbonatação é uma reação indesejada que ocorre com o gás carbônico do ar, nas minúsculas bolhas gasosas absorvidas pela mistura, resultando na expansão de volume. A carbonatação acaba sendo prejudicial na medida em que diminui a formação de silicatos cimentantes. (SANTOS, 2004)

Essa reação depende do contato do material com ar, recomenda-se evitar essa reação através de uma impermeabilização da superfície de contato com ar. Assim cria-se uma barreira entre o ar e o material. (SANTOS, 2004)

### ***3.4 Utilização de solo-cal em camada de pavimento***

Na área de engenharia rodoviária a estabilização de solos com cal aplica-se na estabilização das camadas de pavimento, na sub-base e na base. Denomina-se sub-base uma camada complementar a base, que por algum motivo técnico e econômico não é possível construir a base diretamente sobre a regularização do subleito ou reforço. A base é a camada

designada a resistir e distribuir esforços verticais oriundos do tráfego. (GUIMARÃES, 1971; SENÇO, 2007)

Nas misturas de solo-cal para a estabilização de bases, o teor de cal hidratada aplicado varia de 0,5% a 4%, dependendo do projeto do pavimento. Já na execução das sub-bases, a porcentagem aumenta para até 6%. (GUIMARÃES, 1971)

A estabilização de solo com utilização da cal depende de alguns fatores para ser eficiente, como a intensidade das reações relacionadas com o tamanho das partículas do solo, método de construção e a quantidade de cal utilizada. Todos os métodos de aplicação de estabilização do solo, inclusive o da cal, têm suas limitações e faixas de aplicação restrita ao solo. (GUIMARÃES, 1971)

### ***3.5 Alteração nas propriedades de solos estabilizados com cal***

As propriedades físicas do solo argiloso são alteradas quando se adiciona cal, melhorando a plasticidade, trabalhabilidade e nas características de resistência. Em geral essas alterações dependem de diversos fatores, como o tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, tempo e condições de cura. (LOVATO, 2004)

Segundo Lovato (2004) “o teor estabilizante necessário depende do objetivo específico do processo de estabilização: modificação ou estabilização”.

A definição de modificação é quando deseja alterar algumas propriedades do solo. Adicionando uma quantidade pequena, sendo necessário apenas ocorrer à fase rápida das reações. (LOVATO, 2004)

Já a estabilização tem o objetivo de alcançar as reações pozolânicas, sendo necessário adicionar uma quantidade maior de cal. (LOVATO, 2004)

## 4 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Os ensaios geotécnicos que foram realizados nessa pesquisa seguiram as diretrizes da Norma Brasileira (NBR) da ABNT e as especificações do Departamento de Estradas de Rodagem (DER/SP). Apresentam-se as principais características dos materiais e seus resultados. Dividindo-se em três partes.

### 4.1 Primeira Parte – Ensaios de Caracterização

A especificação do DER/SP (1974) a norma M 2-61, da preparação de amostras de solo para Ensaios de Caracterização, especifica o método da preparação da amostra para a execução dos ensaios geotécnicos. (DER/SP, 1974)

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6457 (1986a), prevê a preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. (ABNT, 1986a)

Toda a amostra de solo deste estudo foi peneirada na peneira Nº 10 e separadas as porções para a realização dos ensaios geotécnicos. Na Figura 4.1 observa-se a amostra de solo vinda do campo antes de ser peneirada. A Figura 4.2 apresenta a amostra de solo logo após ser peneirada. (ABNT, 1986a)



Figura 4.1 – Amostra do solo antes de ser peneirada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

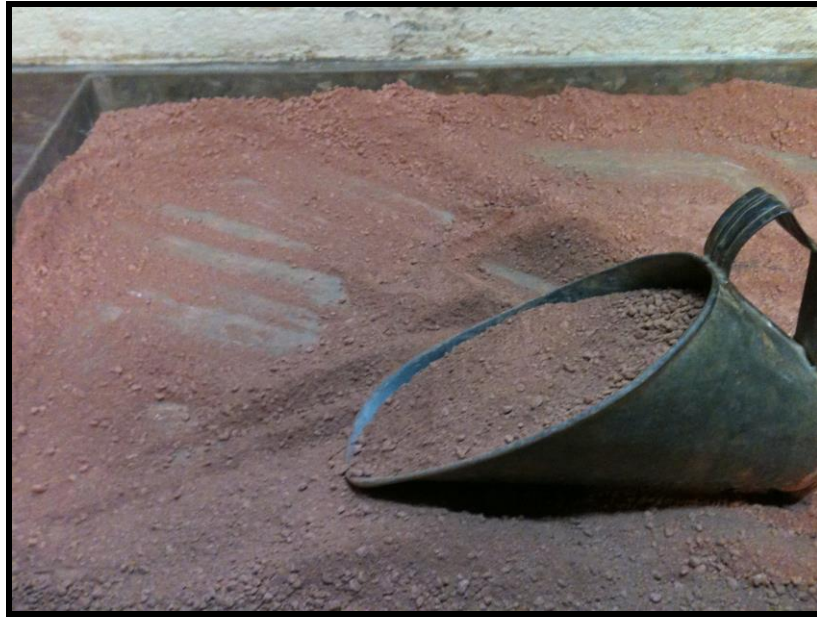


Figura 4.2 – Amostra do solo depois de ser peneirada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### **4.1.1 Granulometria**

O procedimento de granulometria utilizado foi a granulometria com o granulômetro a laser, que consiste submeter porções de amostra de solo ao peneiramento mecânico. A amostra de solo utilizada para o ensaio foi preparada conforme a norma da NBR 6457 da ABNT. (ABNT, 1986a; SANTOS, 2004)

As amostras ensaiadas no aparelho granulômetro a laser, com ou sem ultrassom, tem a finalidade de desagregar mecanicamente o solo. (SANTOS, 2004)

Na figura 4.3 apresenta o resultado da curva do ensaio de granulometria para o solo siltoso argiloso, obtido através do método tradicional, padronizado pela norma da NBR 7182 da ABNT e pelo uso do granulômetro a laser. (ABNT, 1984c; SANTOS, 2004)



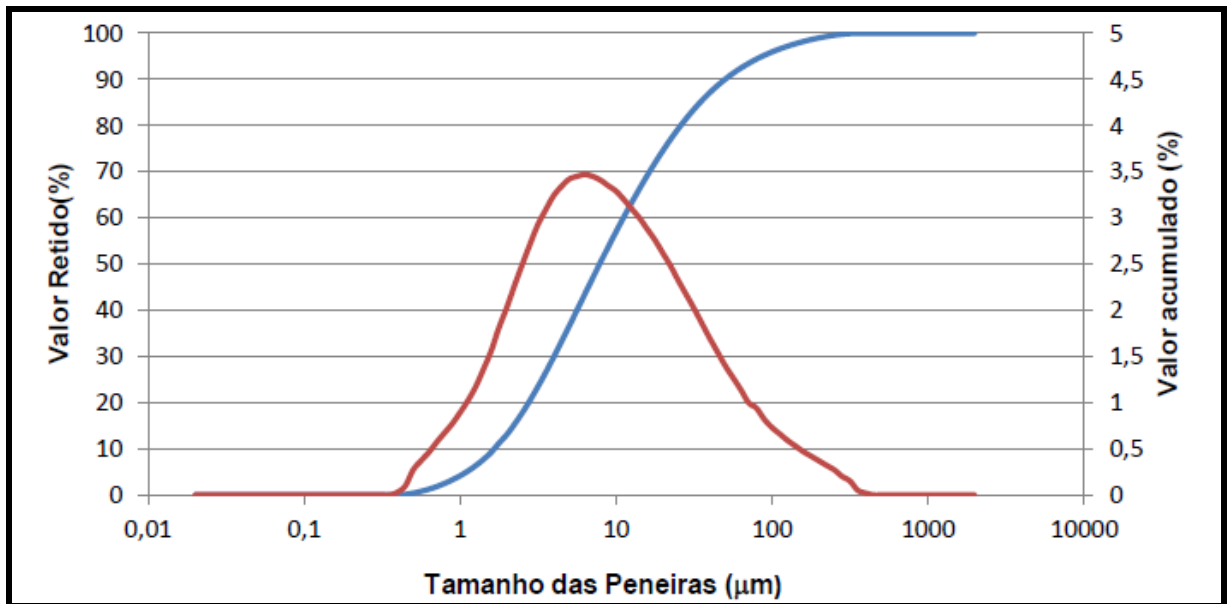


Figura 4.3 – Resultado da distribuição granulométrica  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### 4.1.2 Limite de Liquidez de Solos

Segundo a especificação do DER/SP, 1974, a norma M4-61, define que o Limite de Liquidez de solos é o teor de umidade que o solo apresenta quando se encontra no limite divisório entre seu estado líquido e plástico. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)

A realização do ensaio consiste em colocar a amostra de solo na cápsula de porcelana com a porcentagem de água destilada e misturar com ajuda da espátula até que torne uma mistura homogênea. Conforme a Figura 4.4. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)



Figura 4.4 – Mistura homogênea  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Com auxílio da espátula, coloca-se uma parte da mistura no aparelho Casagrande, (Figura 4.5) moldando-a de maneira que ocupe 2/3 da concha e uma espessura de cerca de 1 cm. Na Figura 4.6 apresenta o aparelho Casagrande com a amostra como citado anteriormente. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)



Figura 4.5 – Aparelho Casagrande  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.6 – Aparelho Casagrande com a amostra  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Através do cinzel curvo, faz-se uma abertura no centro da amostra na concha, em ângulo reto com a sua articulação. A execução dessa abertura deve ser feita, se possível, com uma única abertura do cinzel (Figura 4.7). (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)



Figura 4.7 – Abertura do cinzel  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Posiciona-se com cuidado a concha no aparelho, acionando a manivela golpeia-se a concha até que as bordas inferiores da abertura se unam em um comprimento de aproximadamente 1,3 cm ( $1/2$ ), anota-se o número de golpes necessários. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)

Através dos teores de umidade e seus respectivos números de golpes obtidos, elabora-se um gráfico traçando uma linha reta, com cinco pontos. Traça uma linha correspondente ao valor 25 golpes, até que a mesma intercepte uma reta. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)

Dessa interseção determina-se o o teor de umidade correspondente. Sendo que o teor de umidade é o resultado limite de liquidez do solo ensaiado. (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)

Após a determinação do número de golpes, retira-se com a espátula uma pequena quantidade de material em toda a largura e profundidade da concha, localizada na parte central da amostra. Coloca-se o material retirado em uma cápsula para determinar seu teor de umidade ótima (Figura 4.8). (ABNT, 1984a; DER/SP, 1974)



Figura 4.8 – Cápsula com a amostra para a determinação da umidade ótima  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### 4.1.3 Limite de Plasticidade

A especificação do DER/SP M5-61 estabelece o procedimento para determinar o limite de plasticidade o índice de plasticidade do solo. Define o limite de plasticidade de solos como o limite inferior do estado plástico, com uma quantidade mínima de água, onde o solo possui condições de ser moldado em forma de cilindro de 3 mm de diâmetro, sem romper. (ABNT, 1984b; DER/SP, 1974)

Com a amostra obtida do ensaio Limite de Liquidez, forma-se um cilindro, com as palmas das mãos, moldado sobre a placa de vidro. Conforme a Figura 4.9 a seguir. (ABNT, 1984b; DER/SP, 1974)



Figura 4.9 – Cilindro com diâmetro de aproximadamente 3 mm  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Sendo que o rompimento pode ocorrer assim que o cilindro tiver diâmetro superior a 3 mm, considerando um ponto final é satisfatório para o ensaio. O rompimento poderá exibir aparência diversa para cada tipo de solo. (ABNT, 1984b; DER/SP, 1974)

Alguns se quebram em pequenas partículas, podendo romper em segmentos de 3 a 5 mm de comprimento. A aparência do rompimento não interfere no resultado do ensaio. (ABNT, 1984b; DER/SP, 1974)

Depositam-se as porções rompidas de solos em cápsulas para a determinação do seu teor de umidade Conforme a especificação do DER/SP M1. (DER/SP, 1974)

O resultado do limite de plasticidade é a média dos cinco teores de umidade obtidos. E o índice de plasticidade é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Conferem-se os resultados e o gráfico na Figura 4.10. (DER/SP, 1974)

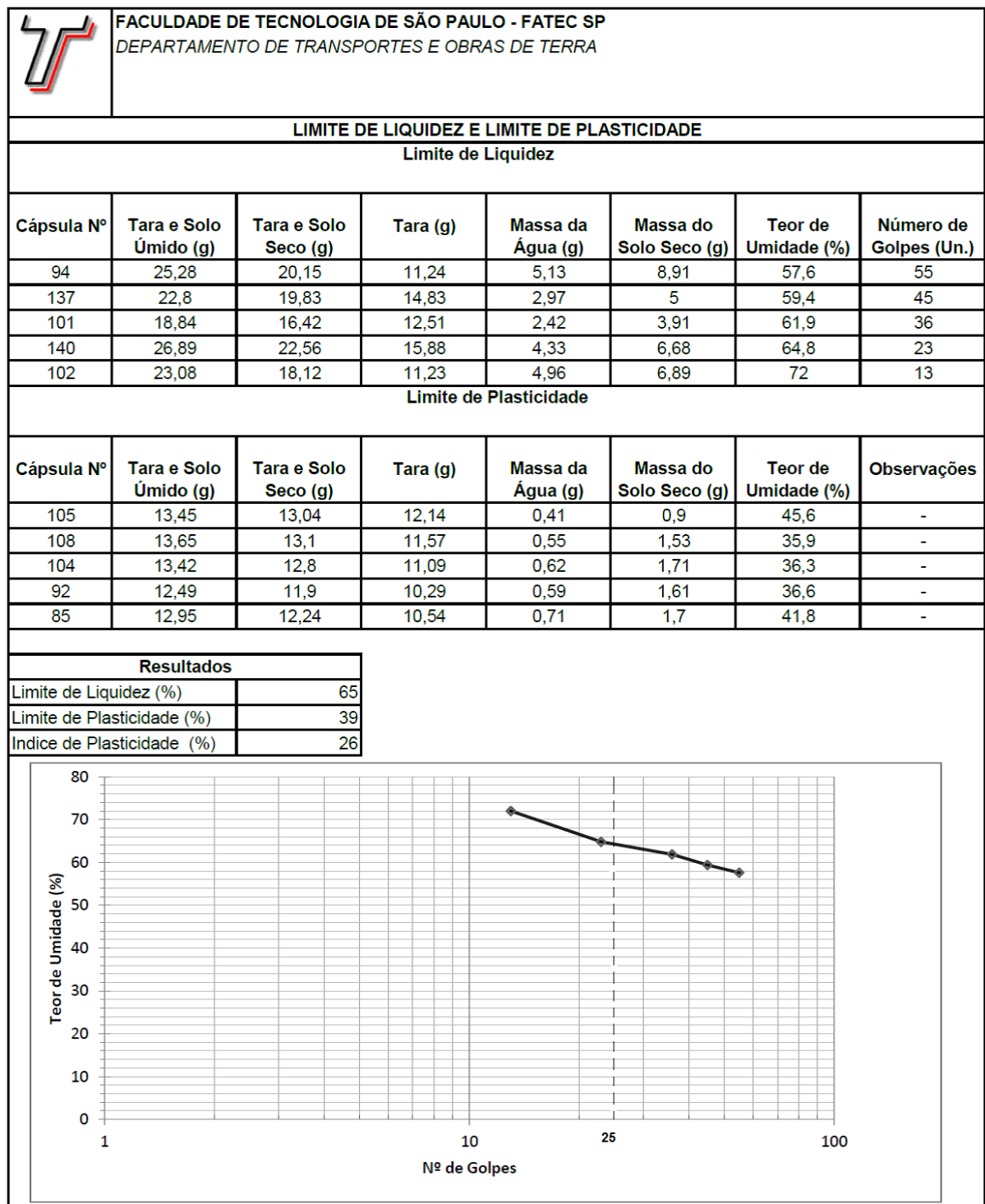


Figura 4.10 – Resultados do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### **4.1.4 Teor de umidade ótima (Wot)**

A norma do DER/SP (1974) M1-61, determina que o teor de umidade do solo é a razão entre a massa d'água contida no solo e a massa dos solos secos. (SENÇO, 2001; DER/SP, 1974)

A realização do ensaio consiste em colocar a amostra do solo úmido na capsula e determinar o peso. (DER/SP, 1974)

Em seguida coloca-se a capsula na estufa, permanecendo-a em um período mínimo de 12 horas. (DER/SP, 1974)

Após esse período, retire-se a capsula da estufa e determine o peso da capsula com o solo seco. (DER/SP, 1974)

Calcula-se o teor de umidade através das formulas 4.1 e 4.2 (SENÇO, 2001; DER/SP, 1974)

$$PW=(PU-PS) \quad (4.1)$$

$$W=PW/PS \quad (4.2)$$

#### **4.1.5 Classificação dos solos tropicais MCT Expedita – Método das pastilhas**

A classificação expedita dos solos tropicais Método das Pastilhas consiste em uma série de determinações efetuadas em pastilhas.

A realização do ensaio consiste na preparação da amostra para a realização do ensaio.

Inicia-se com a peneiração do solo na peneira 0,40 mm, sendo preparada pelo menos com 12 horas de antecedência (Figura 4.11) (MOURA 2015)



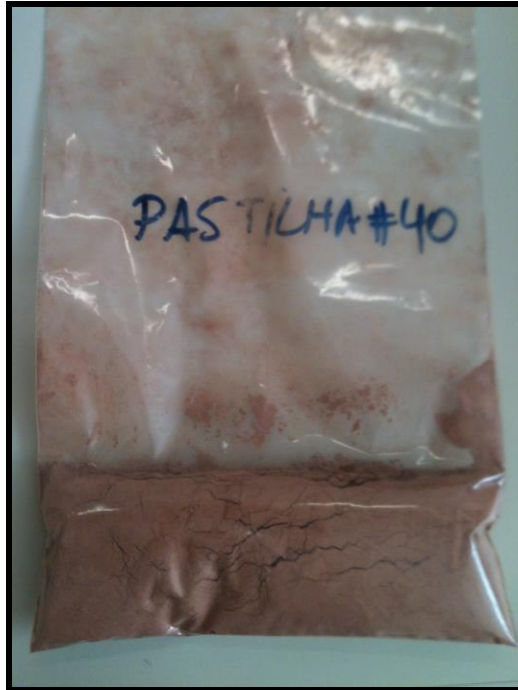


Figura 4.11 – Amostra do solo passado na peneira 0,40 mm  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Coloca-se o solo devidamente umedecido sobre uma placa de vidro e misturar até ficar homogeneizado, obtendo uma pasta com espessura de cerca de 1 cm. Conforme a Figura 4.12 (MOURA, 2015)



Figura 4.12 – Amostra homogeneizada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Em seguida retira-se uma porção da pasta, para moldagem de uma esfera do tamanho que seja ideal para caber no anel, preenchendo o anel por inteiro. (MOURA, 2015)



Sendo realizado esse procedimento em três anéis, corretamente preenchidos (Figura 4.13). Para a determinação da umidade ótima molda-se algumas esferas. (MOURA, 2015)

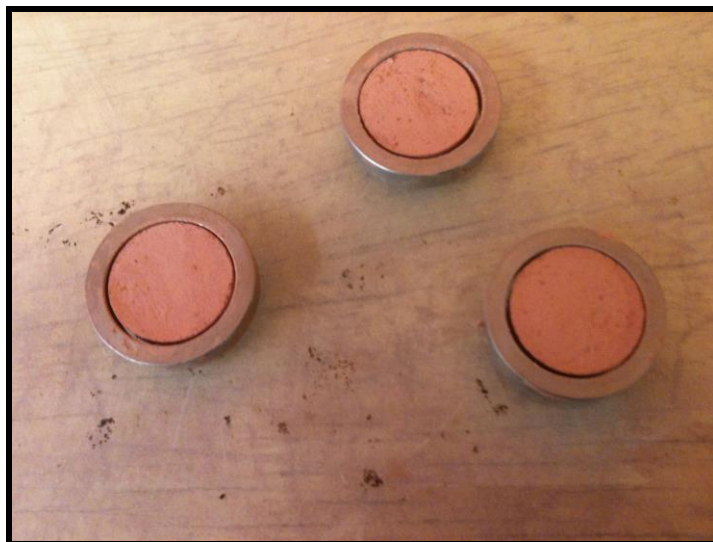


Figura 4.13 – Os três anéis preenchidos corretamente  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Os anéis e as esferas irão para a estufa, em uma temperatura aproximadamente a  $60^{\circ}\text{C}$ . Permanecendo na estufa por um período mínimo de 24 horas. Confere-se os resultados dos teores ótimos na Figura 4.18. (MOURA, 2015)

Com o auxílio de um paquímetro, mede-se a contração. Sendo que o valor da contração é a distância máxima entre a borda interna do anel e a borda externa da pastilha. (MOURA, 2015)

Colocando os anéis em um recipiente com água (Figura 4.14). Mede-se o tempo que as pastilhas absorvem a água (Figura 4.15), (Figura 4.16), deixando – a em repouso pelo menos 2 horas. (MOURA, 2015)

Mede-se o valor da consistência na superfície superior da pastilha da parte central como junto da borda em contato com o anel. Considerar os valores de penetração mais frequente (Figura 4.17). (MOURA, 2015)



Figura 4.14 – Os anéis em um recipiente com água.  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.15 – As pastilhas começando absorver a água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.16 – As pastilhas absorvendo a água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.17 – Penetração das pastilhas  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

O resultado da contração media (ct) desse ensaio é igual a 0,853 ct > 0,6 mm, portanto a equação para calcular o valor do coeficiente  $c'$  é  $c' = (\log_{10} ct + 0,7) / 0,5$ . O resultado do ensaio e o gráfico encontra-se na Figura 4.19.

Anéis	I	II	III
Cápsula nº	56	51	52
Solo Umid + Tara	110,82	115,4	109,82
Solo Seco + Tara	105,02	108,5	103,8
Tara	35,63	32,6	33,45
Umidade (%)	12,0	9,1	8,6

Figura 4.18 – Resultado do teor de umidade das pastilhas

Fonte: PRÓPRIA (2014)


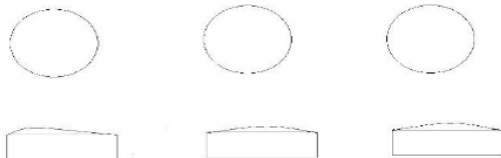
 <b>FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC SP</b> DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA																																											
<b>Ensaio das Pastilhas - MCT</b>																																											
Consistência (Amostra Úmida) <input type="checkbox"/> não plástica <input type="checkbox"/> pouco plástica <input checked="" type="checkbox"/> plástica <input type="checkbox"/> Muito plástica																																											
<b>Pastilhas</b>																																											
<b>Anéis</b>	0°      120°      240°      Média																																										
Contração (mm)	I      19,25      19,2      19,2      19,22																																										
	II      19,10      19,15      19,1      19,12																																										
	III      19,10      19,1      19,1      19,1																																										
Contração Média(ct) = 19,147 ct=0,853																																											
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>Formas de Expansão e Trincas</b>    </div> <div style="width: 50%;"> <math>ct=0,1 \text{ a } 0,5 \text{ mm} \rightarrow c'=(\log_{10}ct+1) / 0,904</math>  <math>ct \geq 0,6 \text{ mm} \rightarrow c'=(\log_{10} ct+0,7) / 0,5</math>   <math>c'=1,26</math> </div> </div>																																											
Penetração Média (mm)  2,5 mm																																											
Classificação MCT (preliminar)  NA'-NS'	<div style="text-align: center;"> <b>Coefficiente c'</b>  0,2      0,5      0,9      1,3      1,7 </div> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>5</td> <td>NA-NS'</td> <td>NS'-NA'</td> <td>NS'/NA'</td> <td>NS'-NG'</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>NA</td> <td>NA'/NS'</td> <td>NA'-NS'</td> <td>NA'/(NG'-NS')</td> <td>NG'</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>LA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td>LA-LA'</td> <td>LA'</td> <td>LA'-LG'</td> <td>LG'</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,15</td> <td>0,22</td> <td>0,55</td> <td>0,9</td> <td>1,4</td> </tr> </table> <div style="text-align: center;"> <b>Contração diametral (mm)</b> </div>	5	NA-NS'	NS'-NA'	NS'/NA'	NS'-NG'		4	NA	NA'/NS'	NA'-NS'	NA'/(NG'-NS')	NG'	3						2	LA					1		LA-LA'	LA'	LA'-LG'	LG'	0							0,15	0,22	0,55	0,9	1,4
	5	NA-NS'	NS'-NA'	NS'/NA'	NS'-NG'																																						
4	NA	NA'/NS'	NA'-NS'	NA'/(NG'-NS')	NG'																																						
3																																											
2	LA																																										
1		LA-LA'	LA'	LA'-LG'	LG'																																						
0																																											
	0,15	0,22	0,55	0,9	1,4																																						
Observações:																																											

Figura 4.19 – Resultado do ensaio de MCT – método da pastilha

Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### **4.1.6 Índice de Suporte Califórnia - CBR**

A norma ABNT, 1987 NBR 9895/87, corresponde ao ensaio Índice de Suporte Califórnia - CBR. O ensaio trata-se de avaliar a resistência de um determinado tipo de solo. (ABNT, 1987)

Para a realização do ensaio, é necessário que primeiro determine o teor de umidade ótimo (%) e a massa específica aparente seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ ). Esses índices serão determinados através do ensaio de Compactação Mini – Proctor. (ABNT, 1987)

Após a determinação do teor de umidade ótimo (%) e a massa específica aparente seca máxima, molda-se um único corpo-de-prova para a realização do ensaio Índice de Suporte Califórnia. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

##### **4.1.6.1 Compactação Mini-Proctor**

Coloca-se a amostra em uma bandeja e adiciona-se água, para obter uma umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima, sendo que pelo menos dois pontos fique no ramo úmido e dois no ramo seco. (ABNT, 1986b; DNER, 1994b; MOURA, 2015)

O solo é dividido igualmente em cinco sacos plásticos, cada saco possui 200 g. É importante que o solo esteja devidamente homogeneizado. (DNER, 1994b; MOURA, 2015)

É necessário armazenar o solo de forma a não comprometer sua umidade. Este repouso deve ser de 12 horas. (DNER, 1994b; MOURA, 2015)

Para compactação mede-se a constante de aferição do compactador a ser usado. Determinada a constante de aferição, coloca-se o espaçador em volta do pistão inferior do aparelho de compactação (Figura 4.20). (ABNT, 1986b; DNER, 1994b; MOURA, 2015)

Unta-se com vaselina o molde e coloca-se em seguida sobre o pistão inferior, inserir a folha de polietileno e o anel de vedação (Figura 4.21). A folha de polietileno é um círculo com o mesmo diâmetro do molde do corpo de prova. (DNER, 1994b; MOURA, 2015)

Pesa-se aproximadamente 200 g da amostra de solo, e deposita-se no molde com o auxílio de um funil e uma espátula. Com o auxílio de um assentador nivelar o solo dentro do molde. (DNER, 1994b; MOURA, 2015)

Em seguida inserir o anel de vedação e o disco de polietileno. Coloca-se o soquete (Figura 4.22) dentro do molde, e em seguida aplica-se os golpes necessários. Sendo que para a energia normal são necessários cinco golpes, nesse ensaio foi utilizada energia normal. O

corpo de prova e invertido e repete o número de golpe, sendo cinco golpes. (DNER, 1994b; MOURA, 2015)



Figura 4.20 – O aparelho compactador com o molde do corpo de prova  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Realiza-se a leitura do extensômetro, que com a constante de aferição, poderá obter a altura do corpo de prova, do último golpe. Calcula-se a altura do corpo de prova, sendo que o resultado tem que estar entre  $50 \pm 1,0\text{mm}$ . (DNER, 1994b; MOURA, 2015)

Não obtendo esse resultado, deve ser compactar outro corpo de prova, calcula-se o peso da porção de amostra por uma simples proporção. (ABNT, 1986b; DNER, 1994b; MOURA, 2015)





Figura 4.21 – O molde do corpo de prova, o anel de vedação e a folha de polietileno  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.22 – O soquete  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

É necessário separar uma porção do solo, para determinação da umidade ótima. O processo deve se repetir para os demais teores.

#### 4.1.6.2 Moldagem do corpo-de-prova - CBR

A realização do ensaio consiste na preparação da amostra de solo conforme a norma NBR 1986 da ABNT (Figura 4.23). (ABNT, 1987)

Para a moldagem do corpo-de-prova é necessário fixar o molde cilíndrico a sua base, colocando o eixo espaçador e uma folha de papel filtro do mesmo tamanho do diâmetro usado pelo molde. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Adiciona-se a quantidade de água necessária para atingir o mesmo valor do teor de umidade ótima obtido no ensaio de compactação. (Figura 4.24). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)



Figura 4.23 – A amostra de solo sem água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.24 – A amostra de solo com água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



A amostra de solo com água deve ser bem misturada. Colocando-a em um saco plástico e deixando-a em repouso por um período de 24 horas para ficar homogeneizada (Figura 4.25). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Em seguida compactar o material, atendendo ao número de golpes necessário (Figura 4.26). A energia utilizada foi à energia normal. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Separa-se uma porção da amostra de solo em duas capsulas, para a determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)



Figura 4.25 – A amostra homogeneizada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.26 – Última camada compactada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Retire-se o cilindro, após finalizar a compactação (Figura 4.27). Com o auxílio de uma espátula retire o excesso, podendo ser retirado no máximo 10 mm de solo compactado

acima do cilindro, sendo removido e rasado com auxílio de uma régua biselada (Figura 4.28). Realizado esse procedimento remover o cilindro de sua base. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)



Figura 4.27 – Excesso acima do cilindro  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.28 – O excesso removido  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Com o auxílio de uma balança, pesa-se o conjunto (cilindro + solo úmido compactado). Sabendo-se o peso do cilindro obtém a massa úmida do solo compactado. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

#### 4.1.6.3 Expansão

Finalizada a compactação do corpo-de-prova, preparar o ensaio de imersão. O corpo-de-prova ficara imerso por um período de 96 horas. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Fixa-se o cilindro + solo úmido compactado na base. No espaço deixado pelo disco espaçador, sobre o solo, coloca-se um disco de papel filtro e os pesos anelares, sendo a massa total (4540+20) g. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Na borda do cilindro coloca-se o extensômetro, anota-se a leitura inicial, e em seguida imergir o corpo-de-prova no tanque com água (Figura 4.29). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

O corpo-de-prova deve permanecer imerso por quatro dias, sendo que as leituras no extensômetro devem ser efetuadas de 24 em 24 horas (Figura 4.30). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)



Figura 4.29 – Corpo-de-prova imerso na água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.30 – Extensômetro  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Após os quatro dias retira-se o corpo-de-prova do tanque com água. Deixe-o escoar a água por quinze minutos (Figura 4.31). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)



Figura 4.31 – Escoamento da água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

#### 4.1.6.4 Penetração

Após o período de escoamento da água, coloca-se o cilindro na prensa.

No topo do corpo-de-prova, dentro do molde cilindro coloca-se os mesmos pesos anelares utilizados no ensaio de expansão. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

Na prensa ajustar o pistão de penetração de maneira a tocar levemente o centro da superfície do corpo-de-prova. A seguir zerar o ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico, e a velocidade 1,27 mm/min aciona-se a manivela da prensa (Figura 4.32). (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

A leitura do extensômetro do anel é relacionada à função da penetração do pistão no solo, e do tempo específico para o ensaio. (ABNT, 1987; MOURA, 2015)

O resultado dos ensaios de Mini-Proctor, CBR, expansão e penetração, encontra-se na Figura 4.33. O gráfico de Compactação na Figura 4.34 e o gráfico do Índice de Suporte Califórnia na Figura 4.35.



Figura 4.32 – Prensa do ISC manual  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC SP

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA

Calibração do Aparelho =

50,0+23,30=73,30

Compactação - Mini Proctor energia normal

Pontos	500+50		500+65		500+80		500+95		500+110	
Molde N°	1		2		3		4		5	
Massa Úmida (g)	155		162		170		172		173	
Leitura Final (mm)	23,27		24,3		24,3		23,3		22,32	
Altura do cp (mm)	50,02		79		79		50		50,98	
M.E.A.U (g/cm³)	1,58		1,68		1,77		1,75		1,76	
M.E.A.S (g/cm³)	1,310		1,360		1,400		1,350		1,330	

Determinação de Umidade

Capsula N°	9	58	72	5	42	22	52	13	86	74
Amostra Úmida + Tara	120,26	131,26	133,52	132,99	133,95	144,27	162,51	131,16	157,43	170,13
Amostra Seca + Tara	105	114,02	114,43	114,5	113,49	121,12	133,19	109,26	127,25	137,78
Tara	30,15	31,45	33,59	34,85	36,42	33,11	33,41	34,59	33,79	34,78
Umidade	20,4	20,9	23,6	23,2	26,5	26,3	29,4	29,3	32,3	31,4
Média umidade	20,65		23,4		26,4		29,35		31,85	

CBR - na ótima

Penetração (mm)	Leitura	Carga (Kgf)	Pressão (Kgf/cm²)	M.E.A.S. máx	1,40	
0,63	6	12	0,59	Wot	26,5	
1,27	9	18	0,95	Penetração (mm)	Pressão (Ensaio)	
1,9	13	26	1,4	2,54	1,48	
2,54	15	30	2	5,08	3,55	
3,17	19	38	2,4	ISC	Constante do Anel =2	
3,81	22	44	2,7	indv.		Média
4,44	28	56	3,15	2,14		3,0
5,08	36	72	3,55	3,41		
7,92	48	96	4,74	Expansão (mm)		
8,89	52	104	5,13	Leitura inicial	1,63	
10,16	55	110	5,43	Leitura final	6,17	
		Constante	2,00	H-altura do cp	114,5	
		Área	20,27	Exp=	3,97	

Figura 4.33 – Resultado do Ensaio Compactação Mini-Proctor, CBR, Penetração e Expansão  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

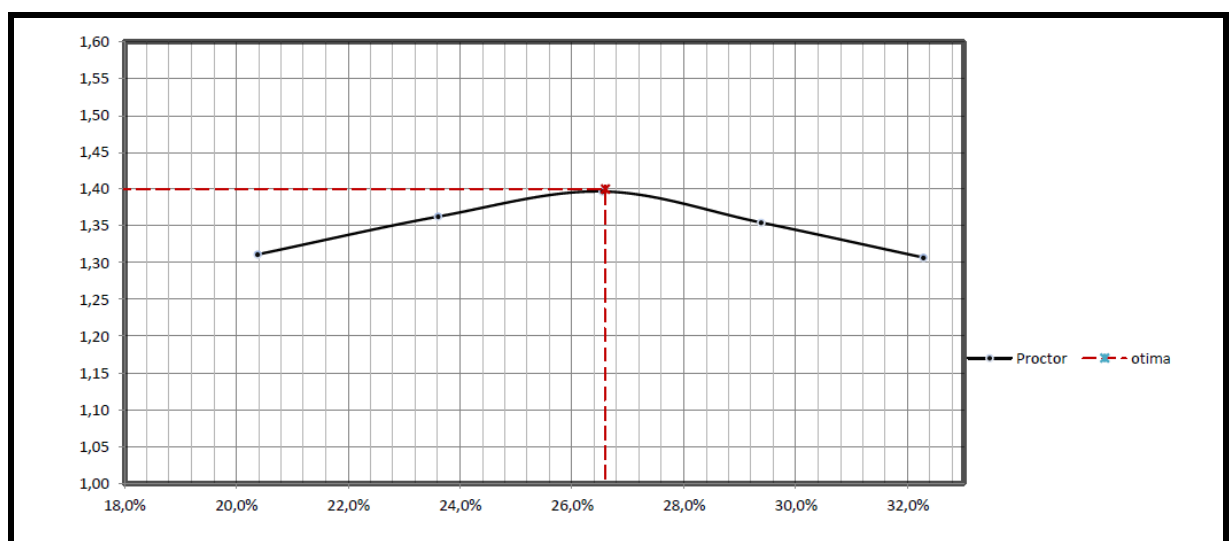


Figura 4.34 – Gráfica do Ensaio Compactação Mini-Proctor  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

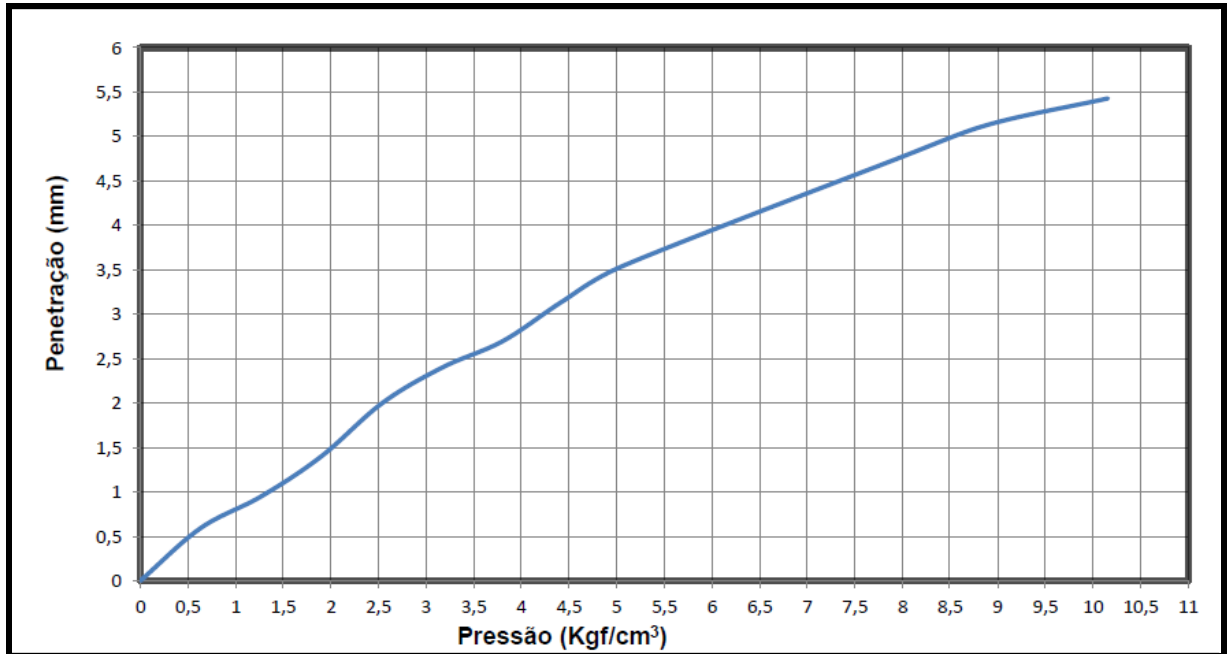


Figura 4.35 – Gráfico do Ensaio Índice de Suporte Califórnia  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Retira-se o corpo de prova do molde, dividi-o em três partes o topo, o centro e a base (Figura 4.36). Coloca-se uma parte do solo de cada uma das três partes para a determinação da umidade ótima. Confere-se os resultados na Figura 4.37.



Figura 4.36 – Dividindo o corpo de prova para a determinação da umidade ótima  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Teor de umidade - CBR - na ótima						
	Topo		Central		Base	
N° cápsula (g)	60	80	44	24	45	41
Massa+Solo úmido+Cápsula (g)	138,78	170,11	128,94	157,32	145,73	150
Massa+Solo Seco+Cápsula (g)	108,55	128,87	104,31	125,19	114,66	118,12
Massas de Água (g)	30,23	41,24	24,63	32,13	31,07	31,88
Peso da Cápsula (g)	34,2	34,1	35,62	36,81	33,55	35,25
Massa Solo Seco (g)	74,35	94,77	68,69	88,38	81,11	82,87
Teor de umidade (%)	40,7	43,5	35,9	36,4	38,3	38,5
Média Teor de umidade (%)	42,1		36,2		38,4	

Figura 4.37 – Resultado do teor da umidade ótima  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

## 4.2 Segunda Parte – Montagens dos corpos de prova

A segunda parte dos ensaios consiste em determinar o teor umidade ótima, a massa específica aparente seca e a montagem dos corpos de prova para a realização do ensaio de compressão simples através do ensaio Compactação Mini-Proctor.

Em um recipiente com a amostra de solo, preparada conforme a norma NBR 6457 da ABNT. Adiciona-se a quantidade de cal (Figura 4.38) corresponde às porcentagens de 3%, 4% e 5% e a quantidade de água necessária (Figura 4.39).

Homogeneizar corretamente a mistura (Figura 4.40), evitando a perda de umidade. Coloca-se a mistura solo-cal com água em um saco plástico, sendo que deve ser bem lacrado, para evitar a perda de umidade.



Figura 4.38 – Solo mais a porcentagem da cal  
Fonte: PRÓPRIA (2014)





Figura 4.39 – Solo-cal mais a quantidade de água  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.40 – A mistura solo-cal homogeneizada  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Na primeira mistura, a porcentagem de cal é 3%, a quantidade de solo é equivalente a 500 gramas, e a quantidade de água inicia-se com 90 ml e aumenta 10 ml para cada um dos demais corpos de prova. Confere-se os valores na Figura 4.41.

Na segunda mistura, a porcentagem de cal é 4%, a quantidade de solo é equivalente a 500 gramas, e a quantidade de água inicia-se com 85 ml e aumenta 10 ml para cada um dos demais corpos de prova. Confere-se os valores na Figura 4.42.

Na terceira mistura, a porcentagem de cal é 5%, a quantidade de solo é equivalente a 500 gramas, e a quantidade de água inicia-se com 85 ml e aumenta 10 ml para cada um dos demais corpos de prova. Confere-se os valores na Figura 4.43.


	FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC SP										
	DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA										
										3% de cal	
										Calibração do Aparelho = 50,0+31,86=81,86	
Compactação - Mini Proctor energia normal											
Pontos	500+90		500+100		500+110		500+120		500+130		
Molde N°	1	-	2	-	3	-	4	-	5	-	
Massa Úmida (g)	153	-	167	-	174	-	178	-	177	-	
Leitura Final (mm)	32	-	31,86	-	32,62	-	31,68	-	31,46	-	
Altura do cp (mm)	49,86	-	50,05	-	49,24	-	50,18	-	50,43	-	
M.E.A.U (g/cm³)	1,571	-	1,701	-	1,798	-	1,810	-	1,791	-	
M.E.A.S (g/cm³)	1,277	-	1,36	-	1,415	-	1,400	-	1,36	-	
Determinação de Umidade											
Capsula N°	61	24	1	45	70	23	41	72	63	40	
Amostra Úmida + Tara	151,11	174,65	130,24	145,05	180,25	197,1	186	183,05	150,46	151,26	
Amostra Seca + Tara	129,15	148,66	111,2	122,5	149,2	162,43	152,06	149,03	124,03	124,8	
Tara	32,99	37,01	36,05	33,7	34,97	33,98	35,79	33,73	40,15	30,88	
Umidade	22,8	23,3	25	25,2	27,2	27	29,2	29,4	31,6	31,8	
Média umidade	23,05		25,1		27,1		29,3		31,7		
					M.E.A.S. máx		1,42	Wot (%)		28	

Figura 4.41 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 3%

Fonte: PRÓPRIA (2014)


	FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC SP								4% de cal Calibração do Aparelho = 50,0+31,86=81,86	
	DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA									
Compactação - Mini Proctor energia normal										
Pontos	500+85		500+95		500+105		500+115		500+125	
Molde N°	1	-	2	-	3	-	4	-	5	-
Massa Úmida (g)	159	-	175	-	178	-	179	-	181	-
Leitura Final (mm)	31,75	-	30,98	-	32,63	-	32,24	-	32,18	-
Altura do cp (mm)	50,11	-	50,98	-	49,23	-	49,32	-	49,68	-
M.E.A.U (g/cm³)	1,616	-	1,745	-	1,838	-	1,849	-	1,852	-
M.E.A.S (g/cm³)	1,3	-	1,385	-	1,430	-	1,421	-	1,400	-
Determinação de Umidade										
Capsula N°	53	83	197	5	41	46	76	38	6	71
Amostra Úmida + Tara	164,45	150,15	126,34	126	132,84	144,17	120,26	121,46	142,62	151
Amostra Seca + Tara	140,15	128,46	107,2	107,3	111,3	119,61	100,26	101,26	116,12	122,95
Tara	40,15	38,05	33,58	34,94	35,42	33,84	35,17	34,8	33,87	35,55
Umidade	24,3	24,2	26	26	28,4	28,6	30	30,2	32,2	32,3
Média umidade	24,25		26		28,5		30,1		32,25	
					M.E.A.S. máx		1,43	Wot (%)		28,3

Figura 4.42 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 4%

Fonte: PRÓPRIA (2014)


	FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC SP DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA								5% de cal	
									Calibração do Aparelho = 50,0+31,86=81,86	
Compactação - Mini Proctor energia normal										
Pontos	500+85		500+95		500+105		500+115		500+125	
Molde N°	1	-	2	-	3	-	4	-	5	-
Massa Úmida (g)	166	-	175	-	185	-	186	-	184	-
Leitura Final (mm)	31,53	-	31,62	-	32,22	-	31,95	-	32	-
Altura do cp (mm)	50,33	-	50,24	-	49,64	-	79,91	-	79,86	-
M.E.A.U (g/cm³)	1,687	-	1,771	-	1,896	-	1,895	-	1,883	-
M.E.A.S (g/cm³)	1,34	-	1,387	-	1,455	-	1,431	-	1,402	-
Determinação de Umidade										
Capsula N°	79	38	76	23	6	44	71	41	86	46
Amostra Úmida + Tara	148,4	151,65	136,71	144,47	154,3	162,09	157,37	127,8	155,73	136,26
Amostra Seca + Tara	125,29	127,76	114,66	120,48	126,32	132,62	127,48	105,24	124,87	110,15
Tara	36,02	35,05	35,19	33,96	33,93	35,81	35,81	35,48	33,99	33,84
Umidade	25,9	25,8	27,7	27,7	30,2	30,4	30,4	32,3	34	34,2
Média umidade	25,85		27,7		30,3		31,35		34,1	
					M.E.A.S. máx		1,46	Wot (%)		30

Figura 4.43 – Resultado da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 5%

Fonte: PRÓPRIA (2014)

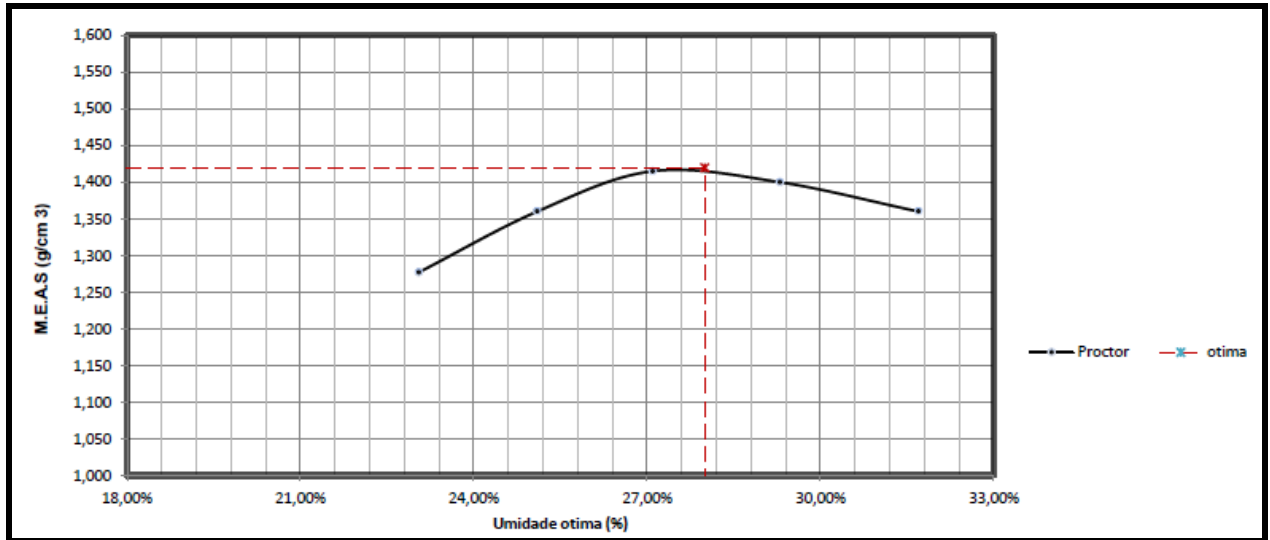


Figura 4.44 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 3%  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

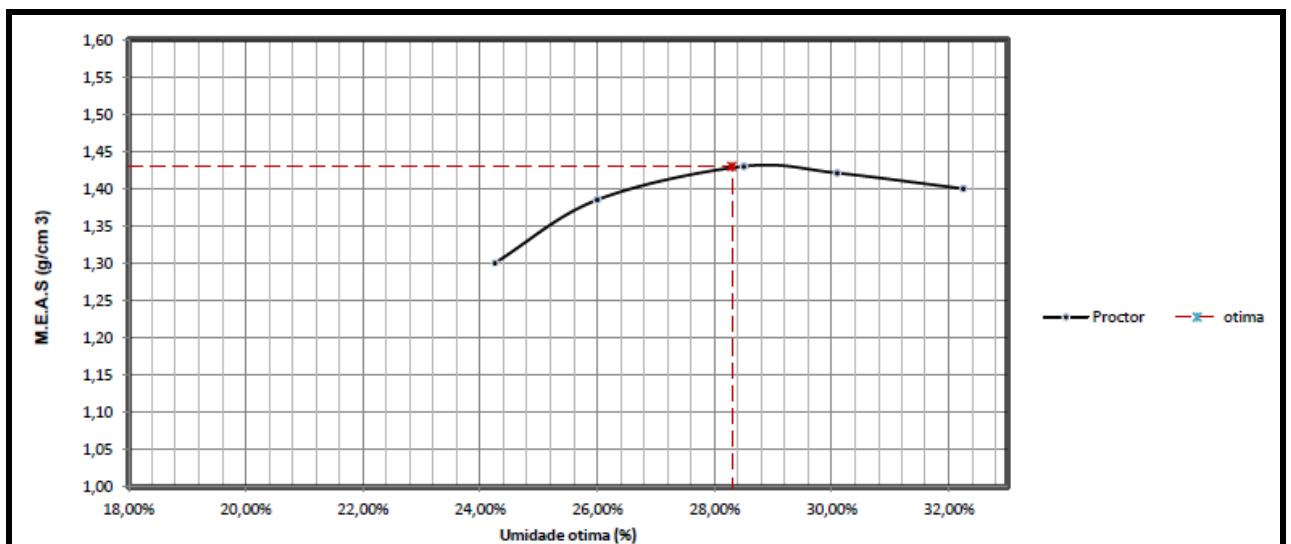


Figura 4.45 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 4%  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

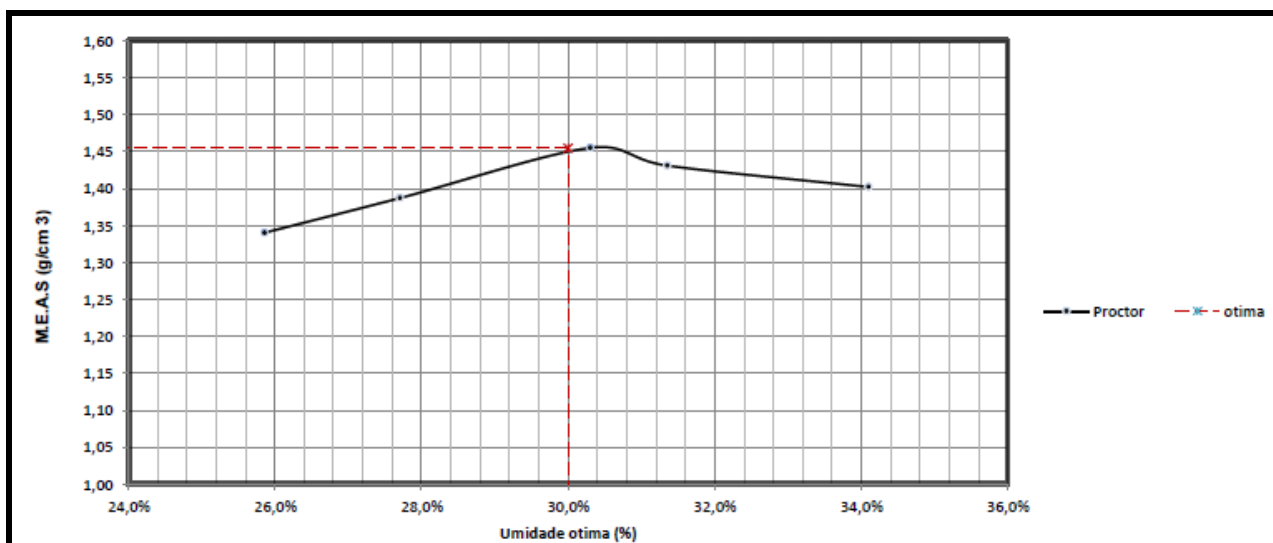


Figura 4.46 – Resultado do gráfico da Compactação Mini-Proctor com a mistura solo-cal 5%  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Logo após a finalização da mistura sol-cal, foi realizado o ensaio de Compactação Mini-Proctor conforme o procedimento da norma ME 228/94 do DNER, como já foi citado anteriormente no item 4.1.61. (DNER, 19494a)

As curvas de compactação determinadas foram para as misturas 3%, 4% e 5% de cal. Confere o resultado das curvas de compactação de cada mistura através dos gráficos que encontra-se na Figura 4.44, Figura 4.45 e Figura 4.46.

No total foram compactados 75 corpos de prova, cinco para cada porcentagem de cal e para cada dia cura.

Após o termino do ensaio de Compactação Mini-Proctor os corpos de prova são retirados com cuidado e selados com papel filme de PVC de uma maneira que o proteja, e minimiza possível perda de umidade.

Os corpos de prova foram identificados com etiqueta (Figura 4.) e levados a câmara úmida (Figura 4.59), onde permaneceram durante os períodos de cura 3, 7, 28, 60, e 180, onde é realizado o ensaio de compactação simples.



Figura 4.47 – Os corpos de prova identificados com a etiqueta  
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 4.48 – Os corpos de prova prontos para ir para câmara úmida  
Fonte: PRÓPRIA (2014)

### ***4.3 Terceira Parte - Compressão Simples***

O ensaio de compressão simples avalia a resistência de misturas solo-cal, e depende de diversas variáveis como: o tipo de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura. (JUNIOR, 2011)



A resistência à compressão simples aumenta linearmente conforme a quantidade de cal até um determinado ponto. A taxa de acréscimo de resistência diminuiu a partir desse ponto, isso ocorre devido à cimentação lenta e depende diretamente do tipo de solo. (JUNIOR, 2011; SANTOS, 2004)

A resistência à compressão simples é determinada baseada na norma DNER (1994) ME 180/94, em corpos de prova de 50X50 mm. Com o objetivo de avaliar a variação da resistência com o tempo, foram moldados corpos de prova de diâmetro 50 mm para as misturas solo-cal com 3%, 4% e 5% de cal. A resistência à compressão simples de um solo que será aplicado como sub-base na execução de uma rodovia é um importante ponto positivo para o dimensionamento. (SANTOS 2004)

Com o objetivo de obter através do ensaio de compressão simples a carga máxima que cada corpo de prova correspondente à mistura de solo-cal de 3%, 4% e 5% suporta em um determinado dia de cura que são 3, 7, 28,60 e 180 dias.

Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizado a prensa manual (Figura 4.43), a mesma prensa utilizada para o ensaio do CBR.

## 5 RESULTADOS FINAIS

Nos dias de rompimento dos corpos de prova foram listados dados para a determinação da umidade ótima para a mistura solo-cal para as respectivas porcentagens 3%, 4% e 5%.

Nas Tabelas 5.1 a 5.3 conferem-se os valores dos dados listados para a determinação da umidade ótima para o tempo de cura de três dias para as respectivas porcentagens de cal 3%, 4% e 5%.

Tabela 5.1 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 3%

<b>3 dias – 3%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C3D3C1</b>	37	201,36	165,72	37,89	163,47	127,83	35,64	27,88	19,80
<b>C3D3C2</b>	55	194,30	161,28	31,52	162,78	129,76	33,02	25,45	19,80
<b>C3D3C3</b>	34	190,17	158,74	35,33	154,84	123,41	31,43	25,47	19,80
<b>C3D3C4</b>	50	187,38	155,86	33,87	153,51	121,99	31,52	25,84	19,80
<b>C3D3C5</b>	42	164,00	138,31	36,67	127,33	101,64	25,69	25,28	19,80
<b>W(%)</b>								<b>25,98</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.2 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 4%

<b>3 dias – 4%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C4D3C1</b>	81	195,28	162,47	35,83	159,45	126,64	32,81	25,91	19,80
<b>C4D3C2</b>	23	197,53	164,04	33,81	163,72	130,23	33,49	25,72	19,80
<b>C4D3C3</b>	48	174,32	145,99	35,07	139,25	110,92	28,33	25,54	19,80
<b>C4D3C4</b>	70	181,85	152,14	35,09	146,76	117,05	29,71	25,38	19,80
<b>C4D3C5</b>	44	180,45	151,08	34,81	144,64	115,27	29,37	25,48	19,80
<b>W(%)</b>								<b>25,61</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.3 – Dados do rompimento de três dias de cura para porcentagem de 5%

<b>3 dias – 5%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C5D3C1</b>	42	187,77	154,26	36,57	151,20	117,69	33,51	28,47	19,80
<b>C5D3C2</b>	50	190,60	155,72	33,87	156,73	121,85	34,88	28,63	19,80
<b>C5D3C3</b>	88	186,77	153,18	35,12	151,65	118,06	33,59	28,45	19,80
<b>C5D3C4</b>	55	181,56	147,72	31,52	150,04	116,20	33,84	29,12	19,80
<b>C5D3C5</b>	37	190,84	157,38	37,89	152,95	119,49	33,46	28,00	19,80
<b>W(%)</b>								<b>28,53</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.4 a 5.6 conferem-se os valores dos dados listados para a determinação da umidade ótima para o tempo de cura de sete dias para as respectivas porcentagens de cal 3%, 4% e 5%.

Tabela 5.4 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 3%

<b>7 dias – 3%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C3D7C1</b>	44	192,34	160,24	35,81	156,53	124,43	32,10	25,80	19,80
<b>C3D7C2</b>	Inteiro	170,39	136,24	-	170,39	136,24	34,15	25,07	19,80
<b>C3D7C3</b>	50	151,17	126,69	33,87	117,30	92,82	24,48	26,37	19,80
<b>C3D7C4</b>	Anulado								
<b>C3D7C5</b>	42	161,09	135,08	36,67	124,42	98,41	26,01	26,43	19,80
<b>W(%)</b>								<b>25,92</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.5 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 4%

<b>7 dias – 4%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C4D7C1</b>	61	179,02	148,02	32,94	146,08	115,08	31,00	26,94	19,80
<b>C4D7C2</b>	79	186,49	154,05	35,81	150,68	118,24	32,44	27,44	19,80
<b>C4D7C3</b>	73	163,66	136,10	34,74	128,92	101,36	27,56	27,19	19,80
<b>C4D7C4</b>	60	135,47	114,15	34,09	101,38	80,06	21,32	26,63	19,80
<b>C4D7C5</b>	55	153,15	127,35	31,52	121,63	95,83	25,80	26,92	19,80
<b>W(%)</b>								<b>27,12</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.6 – Dados do rompimento de sete dias de cura para porcentagem de 5%

<b>7 dias – 5%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C5D7C1</b>	61	177,67	148,25	32,94	144,73	115,31	29,42	25,51	19,80
<b>C5D7C2</b>	73	178,36	148,55	34,74	143,62	113,81	29,81	26,19	19,80
<b>C5D7C3</b>	55	149,76	126,03	31,52	118,24	94,51	23,73	25,11	19,80
<b>C5D7C4</b>	79	171,55	143,45	35,81	135,74	107,64	28,10	26,11	19,80
<b>C5D7C5</b>	60	168,11	139,17	34,09	134,02	105,08	28,94	27,54	19,80
<b>W(%)</b>								<b>26,09</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.7 a 5.9 conferem-se os valores dos dados listados para a determinação da umidade ótima para o tempo de cura de 28 dias para as respectivas porcentagens de cal 3%, 4% e 5%.

Tabela 5.7 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 3%

<b>28 dias – 3%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C3D28C1</b>	81	186,18	145,33	34,07	151,11	110,26	40,85	37,05	19,80
<b>C3D28C2</b>	06	173,02	140,91	34,67	138,35	106,24	32,11	30,22	19,80
<b>C3D28C3</b>	48	134,80	114,84	35,07	99,73	79,77	19,96	25,02	19,80
<b>C3D28C4</b>	70	122,39	164,89	35,09	87,30	129,80	42,50	32,74	19,80
<b>C3D28C5</b>	58	139,04	117,74	33,91	105,13	83,83	21,30	25,41	19,80
<b>W(%)</b>								<b>30,10</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.8 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 4%

<b>28 dias – 4%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C4D28C1</b>	61	132,62	112,01	33,09	99,53	78,92	20,61	26,12	19,80
<b>C4D28C2</b>	90	158,26	133,00	34,46	123,80	95,54	25,26	25,63	19,80
<b>C4D28C3</b>	05	159,41	134,62	35,01	124,40	99,61	24,79	24,89	19,80
<b>C4D28C4</b>	34	160,52	135,26	35,33	125,19	99,93	25,26	25,28	19,80
<b>W(%)</b>								<b>25,48</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.9 – Dados do rompimento de 28 dias de cura para porcentagem de 5%

<b>28 dias – 5%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C5D28C1</b>	48	132,49	111,69	34,94	97,55	76,75	20,80	27,10	19,80
<b>C5D28C2</b>	05	123,57	104,51	35,00	88,57	69,51	19,06	27,42	19,80
<b>C5D28C3</b>	165	105,89	90,00	32,45	73,44	57,55	15,89	27,61	19,80
<b>C5D28C4</b>	70	137,00	114,78	35,03	101,97	79,75	22,22	27,86	19,80
<b>C5D28C5</b>	06	127,68	107,80	34,58	93,10	73,22	19,88	27,15	19,80
<b>W(%)</b>								<b>27,43</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.10 a 5.12 conferem-se os valores dos dados listados para a determinação da umidade ótima para o tempo de cura de 60 dias para as respectivas porcentagens de cal 3%, 4% e 5%.

Tabela 5.10 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 3%

<b>60 dias – 3%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C3D60C1</b>	79	114,93	99,11	36,03	78,90	63,08	15,82	25,08	19,80
<b>C3D60C2</b>	50	122,89	103,27	33,95	88,94	69,32	19,62	28,30	19,80
<b>C3D60C3</b>	73	109,63	90,04	36,52	73,11	53,52	19,59	36,60	19,80
<b>C3D60C4</b>	44	116,64	94,35	34,19	82,45	60,16	22,29	37,05	19,80
<b>C3D60C5</b>	48	88,60	78,00	34,83	53,77	43,17	10,60	24,55	19,80
<b>W(%)</b>								<b>30,32</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.11 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 4%

<b>60 dias – 4%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C4D60C1</b>	190	83,60	72,39	29,30	54,30	43,09	11,21	26,02	19,80
<b>C4D60C2</b>	178	53,91	48,83	29,13	24,78	19,70	5,08	25,79	19,80
<b>C4D60C3</b>	117	61,89	55,24	30,03	31,86	25,21	11,37	26,38	19,80
<b>C4D60C4</b>	135	82,00	70,63	27,12	54,88	43,51	15,24	26,13	19,80
<b>C4D60C5</b>	124	101,96	86,72	29,20	72,76	57,32	15,24	26,50	19,80
<b>W(%)</b>								<b>26,16</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.12 – Dados do rompimento de 60 dias de cura para porcentagem de 5%

<b>60 dias – 5%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C5D60C1</b>	70	103,42	88,08	35,03	68,39	53,05	15,34	28,92	19,80
<b>C5D60C2</b>	34	119,81	100,84	35,33	84,48	65,51	18,97	28,96	19,80
<b>C5D60C3</b>	06	124,39	103,79	34,58	89,81	69,21	20,60	29,76	19,80
<b>C5D60C4</b>	05	136,89	113,30	35,00	101,89	78,30	23,59	30,13	19,80
<b>C5D60C5</b>	55	142,50	117,34	31,52	110,98	85,82	25,16	29,32	19,80
<b>W(%)</b>								<b>29,42</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.13 a 5.15 conferem-se os valores dos dados listados para a determinação da umidade ótima para o tempo de cura de 180 dias para as respectivas porcentagens de cal 3%, 4% e 5%.

Tabela 5.13 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 3%

<b>180 dias – 3%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C3D180C1</b>	181	130,67	110,68	28,45	102,22	82,23	19,99	24,30	19,80
<b>C3D180C2</b>	115	99,20	84,14	29,43	69,77	54,71	15,06	27,50	19,80
<b>C3D180C3</b>	126	147,29	123,96	29,91	117,38	94,05	23,33	24,80	19,80
<b>C3D180C4</b>	171	115,01	92,83	29,40	85,61	63,43	22,18	35,00	19,80
<b>C3D180C5</b>	138	106,46	91,03	26,99	79,47	64,04	15,43	24,10	19,80
<b>W(%)</b>								<b>27,10</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.14 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 4%

<b>180 dias – 4%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C4D180C1</b>	193	95,21	81,85	29,62	65,59	52,23	13,36	25,60	19,80
<b>C4D180C2</b>	186	102,16	87,48	29,59	72,57	57,89	14,68	25,40	19,80
<b>C4D180C3</b>	178	103,69	88,65	29,26	74,43	59,39	15,04	25,30	19,80
<b>C4D180C4</b>	189	99,50	83,77	29,43	70,07	54,34	15,73	28,90	19,80
<b>C4D180C5</b>	134	97,50	83,05	26,55	70,95	56,50	14,45	25,60	19,80
<b>W(%)</b>								<b>26,20</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.15 – Dados do rompimento de 180 dias de cura para porcentagem de 5%

<b>180 dias – 5%</b>									
<b>Corpo</b>	<b>Tara</b>	<b>Tara+Solo úmido</b>	<b>Tara+Solo Seco</b>	<b>Peso da Tara</b>	<b>Solo úmido</b>	<b>Solo Seco</b>	<b>PW</b>	<b>W (%)</b>	<b>Área</b>
<b>C5D180C1</b>	124	95,69	82,15	29,26	66,43	52,89	13,54	25,60	19,80
<b>C5D180C2</b>	136	102,67	87,14	30,81	71,56	56,33	15,23	27,00	19,80
<b>C5D180C3</b>	140	117,88	99,05	30,31	87,57	68,74	18,83	27,40	19,80
<b>C5D180C4</b>	146	94,44	80,57	29,29	65,15	51,28	13,87	27,00	19,80
<b>C4D180C5</b>	175	100,74	85,63	28,74	72,00	56,89	15,11	26,60	19,80
<b>W(%)</b>								<b>26,70</b>	

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.16 a 5.20 conferem-se os valores obtidos no ensaio de compressão simples, para o tempo de cura estabelecido na pesquisa para a mistura solo-cal de 3% de cal. Na figura 4.49 confere-se o gráfico com os valores de resistência a compressão simples em relação ao tempo de cura. Observa-se que os os valores foram crescentes ao longo do tempo.

Tabela 5.16 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 3%

<b>3 dias – 3%</b>			
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Carga (kgf)</b>	<b>Carga /Área</b>	<b>Resultado da Resistência (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
C3D3C1	116	116/19, 80	5,90
C3D3C2	120	120/19, 80	6,10
C3D3C3	130	130/19, 80	6,60
C3D3C4	114	114/19, 80	5,80
C3D3C5	110	110/19, 80	5,60
<b>Média</b>	118	<b>Média</b>	6,00
<b>Desvio Padrão</b>			0,40

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.17 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 3%

<b>7 dias – 3%</b>			
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Carga (kgf)</b>	<b>Carga /Área</b>	<b>Resultado da Resistência (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
C3D7C1	118	118/19, 80	6,00
C3D7C2	148	148/19, 80	7,50
C3D7C3	122	122/19, 80	6,20
C3D7C4		Anulado	
C3D7C5	150	150/19, 80	7,60
<b>Média</b>	134,50	<b>Média</b>	6,80
<b>Desvio Padrão</b>			0,90

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.18 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 3%

28 dias – 3%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3D28C1	40	40/19, 80	2,00
C3D28C2	120	120/19, 80	6,10
C3D28C3	160	160/19, 80	8,10
C3D28C4	170	170/19, 80	8,60
C3D28C5	170	170/19, 80	8,60
<b>Média</b>	132	<b>Média</b>	6,70
<b>Desvio Padrão</b>			2,80

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.19 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 3%

60 dias – 3%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3D60C1	150	150/19, 80	7,60
C3D60C2	140	140/19, 80	7,10
C3D60C3	150	150/19, 80	7,60
C3D60C4	150	150/19, 80	7,60
C3D60C5	170	170/19, 80	8,60
<b>Média</b>	152	<b>Média</b>	7,70
<b>Desvio Padrão</b>			0,60

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.20 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 3%

180 dias – 3%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C3D180C1	180	180/19, 80	7,60
C3D180C2	140	140/19, 80	7,10
C3D180C3	210	210/19, 80	7,60
C3D180C4		Anulado	
C3D180C5	190	190/19, 80	9,60
<b>Média</b>	180	<b>Média</b>	9,10
<b>Desvio Padrão</b>			1,50

Fonte: PRÓPRIA (2015)



Na Figura 4.49 apresentam-se, em forma de gráfico, os resultados de resistência à compressão simples para 3% de cal para todos os períodos de cura. Pode-se constatar que a resistência foi sensível ao tempo de cura, partindo de um patamar de valores na ordem de 6 kgf/cm<sup>2</sup> para 9 kgf/cm<sup>2</sup>, um ganho na ordem de 50%.

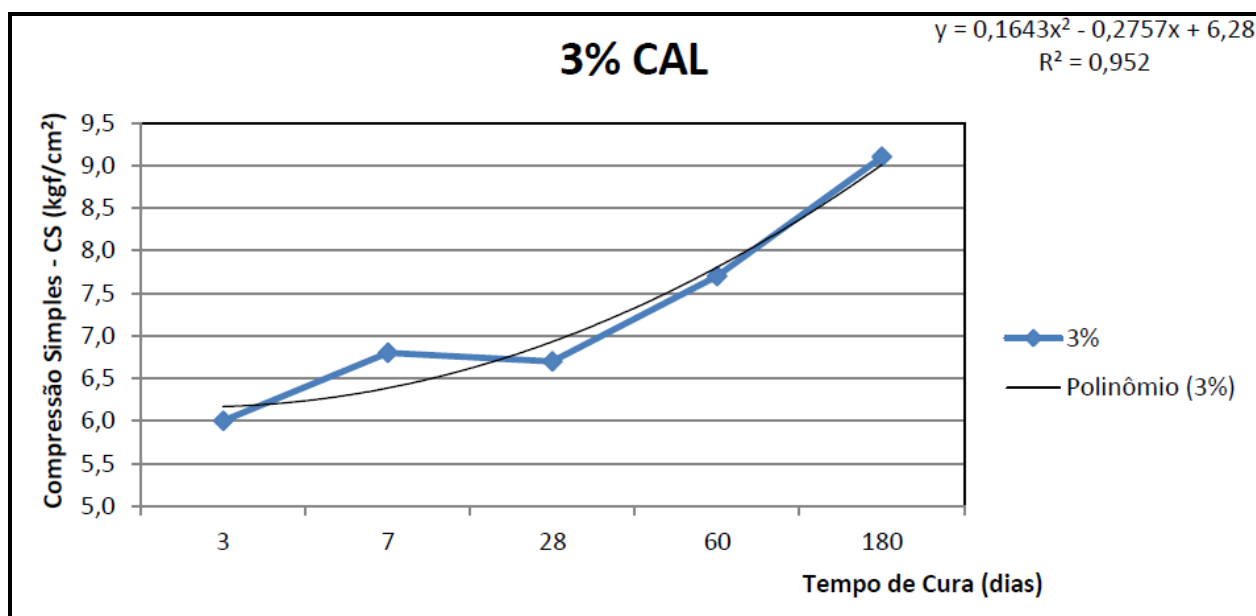


Figura 4.49 – Valores de resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 3% - Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.21 a 5.25 conferem-se os valores obtidos no ensaio de compressão simples, para o tempo de cura estabelecido na pesquisa para a mistura solo-cal de 4% de cal.

Tabela 5.21 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 4%

3 dias – 4%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C4D3C1	64	64/19, 80	3,20
C4D3C2	101	101/19, 80	5,10
C4D3C3	83	83/19, 80	4,20
C4D3C4	81	81/19, 80	4,10
C4D7C5	92	92/19, 80	4,60
<b>Média</b>	84,20	<b>Média</b>	4,30
<b>Desvio Padrão</b>			0,70

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.22 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 4%

7 dias – 4%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C4D7C1	90	90/19, 80	4,50
C4D7C2	128	128/19, 80	6,50
C4D7C3	130	130/19, 80	6,60
C4D7C4	130	130/19, 80	6,60
C4D7C5	120	120/19, 80	6,10
<b>Média</b>	120	<b>Média</b>	6,0
<b>Desvio Padrão</b>			0,90

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.23 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 4%

28 dias – 4%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C4D28C1	144	144/19, 80	7,30
C4D28C2	116	116/19, 80	5,90
C4D28C3	128	128/19, 80	6,50
C4D28C4	130	130/19, 80	6,60
<b>Média</b>	129,50	<b>Média</b>	6,50
<b>Desvio Padrão</b>			0,60

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.24 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 4%

60 dias – 4%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C4D60C1	160	160/19, 80	8,10
C4D60C2	170	170/19, 80	8,60
C4D60C3	200	200/19, 80	10,10
C4D60C4	180	180/19, 80	9,10
C4D60C5	170	170/19, 80	8,60
<b>Média</b>	176	<b>Média</b>	8,90
<b>Desvio Padrão</b>			0,80

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.25 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 4%

180 dias – 4%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C4D180C1	210	210/19, 80	10,60
C4D180C2	220	220/19, 80	11,11
C4D180C3	230	230/19, 80	11,62
C4D180C4	180	180/19, 80	9,09
C4D180C5	200	200/19, 80	10,10
<b>Média</b>	208	<b>Média</b>	10,50
<b>Desvio Padrão</b>			1,00

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Na Figura 4.50 apresentam-se, em forma de gráfico, os resultados de resistência à compressão simples para 4% de cal para todos os períodos de cura. Pode-se constatar que a resistência foi sensível ao tempo de cura, partindo de um patamar de valores na ordem de 4 kgf/cm<sup>2</sup> para 10,5 kgf/cm<sup>2</sup>, um ganho superior a 100%. Note-se que para a porcentagem de 4% de cal apresentou uma resistência inicial inferior à dosagem de 3%, entretanto, após 180 dias de cura o ganho foi superior.

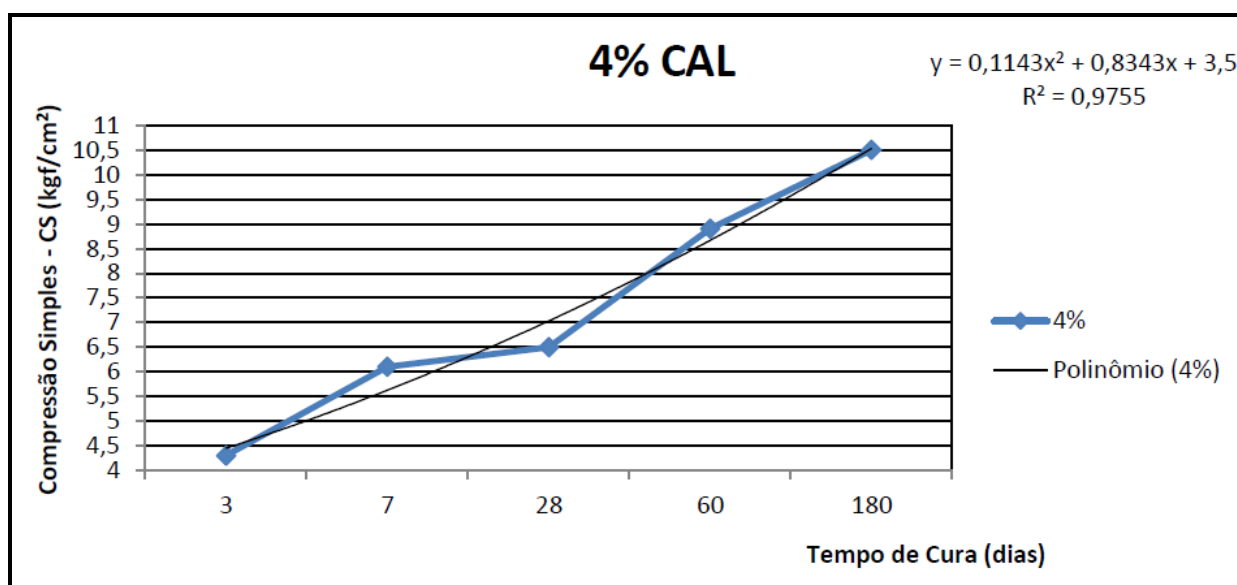


Figura 4.50 – Valores de resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 4%

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Nas Tabelas 5.26 a 5.30 conferem-se os valores obtidos no ensaio de compressão simples, para o tempo de cura estabelecido na pesquisa para a mistura solo-cal de 5% de cal. Na Figura 4.51 confere-se o gráfico com os valores de resistência a compressão simples em relação ao tempo de cura. Observa-se que os valores foram crescentes ao longo do tempo.

Tabela 5.26 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de três dias, mistura solo-cal 5%

<b>3 dias – 5%</b>			
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Carga (kgf)</b>	<b>Carga /Área</b>	<b>Resultado da Resistência (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
C5D3C1	97	97/19, 80	4,90
C5D3C2	101	101/19, 80	5,10
C5D3C3	84	84/19, 80	4,20
C5D3C4	94	94/19, 80	4,70
C5D3C5	101	101/19, 80	5,10
<b>Média</b>	96,60	<b>Média</b>	4,80
<b>Desvio Padrão</b>			0,40

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.27 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de sete dias, mistura solo-cal 5%

<b>7 dias – 5%</b>			
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Carga (kgf)</b>	<b>Carga /Área</b>	<b>Resultado da Resistência (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
C5D7C1	110	110/19, 80	5,60
C5D7C2	106	106/19, 80	5,40
C5D7C3	120	120/19, 80	6,10
C5D7C4	120	120/19, 80	6,10
C5D7C5	120	120/19, 80	6,10
<b>Média</b>	115	<b>Média</b>	5,80
<b>Desvio Padrão</b>			0,30

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.28 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 28 dias, mistura solo-cal 5%

28 dias – 5%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C5D28C1	130	130/19, 80	6,60
C5D28C2	140	140/19, 80	7,10
C5D28C3	140	140/19, 80	7,10
C5D28C4	130	130/19, 80	6,60
C5D28C5	140	140/19, 80	7,10
<b>Média</b>	136	<b>Média</b>	6,90
<b>Desvio Padrão</b>			0,30

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.29 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 60 dias, mistura solo-cal 5%

60 dias – 5%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C5D60C1	150	150/19, 80	7,60
C5D60C2	160	160/19, 80	8,10
C5D60C3	170	170/19, 80	8,60
C5D60C4	170	170/19, 80	8,60
C5D60C5	150	150/19, 80	7,60
<b>Média</b>	160	<b>Média</b>	8,10
<b>Desvio Padrão</b>			0,50

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Tabela 5.30 – Valores da resistência à compressão simples tempo de cura de 180 dias, mistura solo-cal 5%

180 dias – 5%			
Corpo de Prova	Carga (kgf)	Carga /Área	Resultado da Resistência (kgf/cm <sup>2</sup> )
C5D180C1	290	150/19, 80	14,60
C5D180C2	280	160/19, 80	14,10
C5D180C3	260	170/19, 80	13,10
C5D180C4	230	170/19, 80	11,60
C5D180C5	230	150/19, 80	11,60
<b>Média</b>	258	<b>Média</b>	13,00
<b>Desvio Padrão</b>			1,40

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Por fim, na Figura 4.51 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples para 5% de cal para todos os períodos de cura. Da mesma forma a resistência foi sensível ao tempo de cura, partindo de valores de 5 kgf/cm<sup>2</sup> para 13 kgf/cm<sup>2</sup>, apresentado também um ganho superior a 100%.

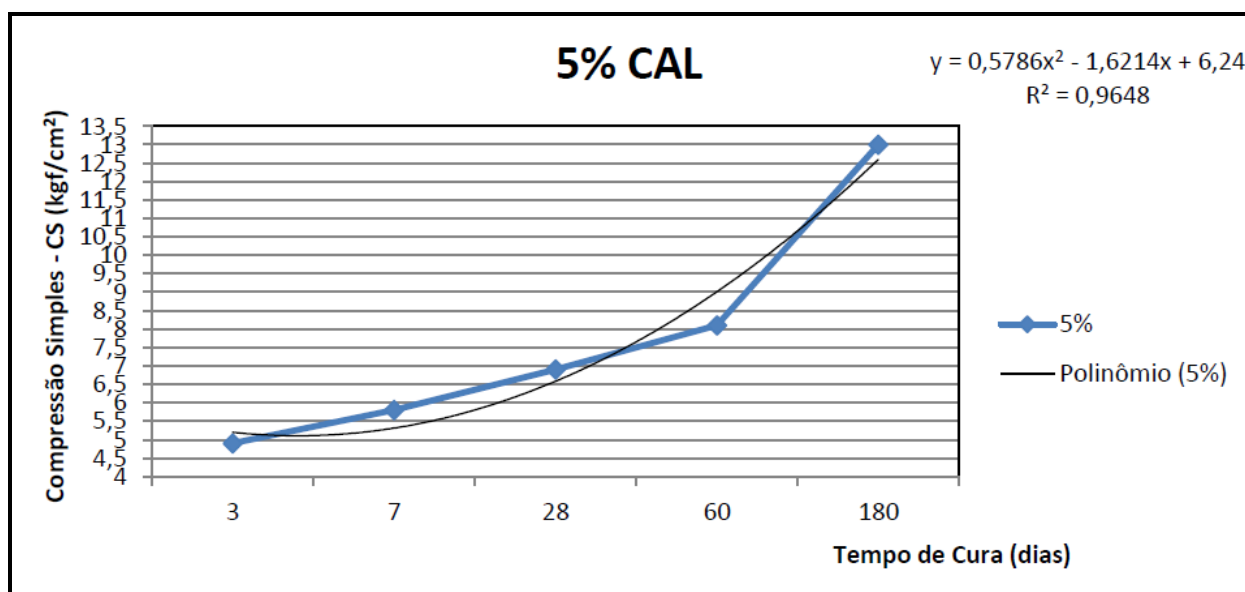


Figura 4.31 – Valores de resistência a compressão simples ao longo do tempo de cura da mistura solo-cal 5%

Fonte: PRÓPRIA (2015)

Na figura 4.52 é apresentado o resultado das dosagens de 3%, 4% e 5% para todos os períodos de cura: 3, 7, 28, 60 e 180 dias. Note-se que para a dosagem de 3% de cal no período de cura de 3 e 7 dias de cura os valores de resistência à compressão foram superiores aos teores de 4% e 5% para os mesmos períodos. Em seguida, observe-se um ponto de inflexão para o período de 28 dias em que os três teores, praticamente apresentam os mesmos valores de resistência à compressão. A partir desse período é registrado um ganho de resistência, principalmente para o período de 180 dias, com valores na ordem de 13 kgf/cm<sup>2</sup> para o teor de 5% de cal.

Pesquisas tem registrados ganhos de resistência à compressão após até 2 anos de cura. Tem-se encontrado também para maiores valores de resistência à compressão porcentagens menores de cal, na ordem de 3% a 4%, diferentemente observado nessa pesquisa. Provavelmente, a porcentagem de 5% mostrou-se mais indicada devido a presença pronunciada da fração argilo mineral do solo, acima de 10% de fração inferior 0,02 mm.

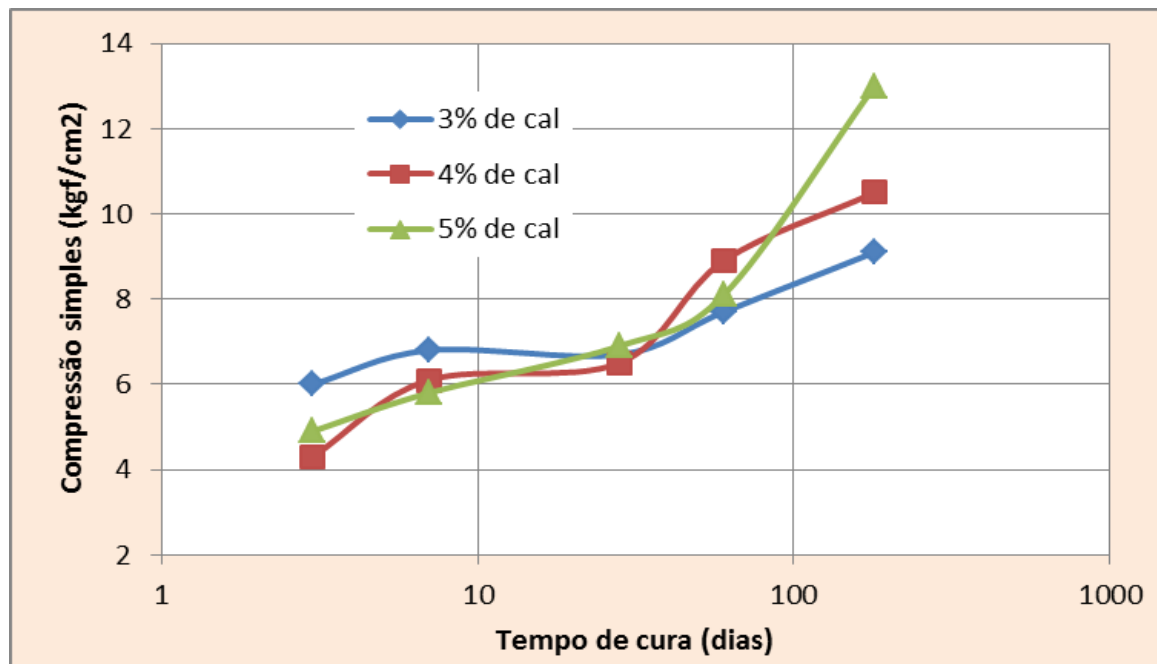


Figura 4.52 – Resumo dos resultados das dosagens  
Fonte: PRÓPRIA (2015)

## 6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos através do ensaio de compressão simples foi possível verificar e constatar que para as porcentagens 3%, 4% e 5% de cal adicionada ao solo siltoso argiloso, houve um ganho significativo de resistência em todas as porcentagens de cal estudadas. Sendo assim alcançado o objetivo da pesquisa, que era verificar se a estabilização de um solo com a adição de cal realmente propicia o aumento da resistência à compressão simples. Conclui-se que a porcentagem da mistura solo-cal que mais propicia ganho de resistência é a porcentagem 5% de cal. Que no tempo de cura de 180 dias apresenta o melhor resultado. As outras amostras não apresentam resultados satisfatórios nesse tempo cura.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984c.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986b.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1987.

AZEVÊDO, André Luís Cairo. **Estabilização de Solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição da cal**. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: < [http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo\\_2014/teses/arquivos/andre-cairo.pdf](http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/andre-cairo.pdf)>. Acesso em: 04 dez. 2014.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2005.

CNT – CONFERENCIA NACIONAL DE TRANSPORTE. **Relatório gerencial pesquisa CNT 2013**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 02 out. 2014.

CRISTELO, Nuno. **Estabilização de Solos Residuais graníticos através da adição de cal**. 96 p. 2013. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil – Estrutura, Geotécnica e Fundações - Universidade do Minho. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/150>>. Acesso em: 21 out. 2014.

DER/SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE ESTRADA DE SÃO PAULO. **Métodos de Ensaio**. São Paulo, 1974.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 228: Solos compactação em equipamentos miniatura**. [S.l.], 1994a.

\_\_\_\_\_. **ME 254: Solos compactados em equipamento miniatura mini - CBR e expansão**. [S.l.], 1997.

\_\_\_\_\_. **ME 258: Solo compactado em equipamento miniatura**. [S.l.], 1994b.



DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE.

**Manual de Pavimentação.** [S.l.], 2006. Disponível em: <

[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Pavimentacao\\_Versao\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf)>. Acesso em: 2 out. 2014.

GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação de cal – Seus conceitos e suas vantagens.** São Paulo: ABPC, 1971. Boletim nº1.

\_\_\_\_\_. **A Cal – Fundamento e Aplicações na Engenharia Civil.** 2º ed. São Paulo: Pini, 2002.

JUNIOR, L.S.L. **Metodologia de Previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal.** 2011. 226 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 19 set. 2014.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo de comportamento mecânico de um solo latéritico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** 2004. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em:<

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6646/000444396.pdf?sequence=1>>.

Acesso em: 16 set. 2014.

MOURA, Edson. **Mecânica dos solos.** São Paulo: FATEC SP, 2015. 194 p. Notas de aula de mecânica dos solos do curso do Movimento de Terra e Pavimentação FATEC SP. Disponível em: < [http://professoredmoura.com.br/download/Apostila\\_Mec\\_Solos\\_1\\_2015.pdf](http://professoredmoura.com.br/download/Apostila_Mec_Solos_1_2015.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2015.

SANTOS, Janaina. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** 2004. 95p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Disponível em: < <http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/127-2004.pdf%2011/03/2015>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

SENÇO, Wlastermiller. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** São Paulo: PINI, 2007. v.1.

\_\_\_\_\_. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** São Paulo: PINI, 2001.v.2.

WALLAU, Juliano Reis. Disponível em <<http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/tcc->

[titulos/2004/Avaliacao\\_da\\_Tecnica\\_de\\_Estabiizacao\\_Granulometrica\\_como\\_Revestimento\\_Primary\\_de\\_Rodovias\\_Nao\\_-\\_Pavimentadas.pdf](http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/tcc-titulos/2004/Avaliacao_da_Tecnica_de_Estabiizacao_Granulometrica_como_Revestimento_Primary_de_Rodovias_Nao_-_Pavimentadas.pdf)>. Acesso em 02 mar.2015.