

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

**EDUAN MAGANHOTTO GUÉRIOS**

**ESTUDO DO MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL  
HIDRATADA PARA USO EM PAVIMENTO URBANO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL NA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ**

**CURITIBA**

**2013**

**EDUAN MAGANHOTTO GUÉRIOS**

**ESTUDO DO MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL  
HIDRATADA PARA USO EM PAVIMENTO URBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Departamento de construção civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. D. Sc. Ronaldo Luis S. Izzo.

Co-orientador: Prof. Dr. José Alberto Cerri

**CURITIBA**

**2013**

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ***ESTUDO DO MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA PARA USO EM PAVIMENTO URBANO***

Por

**EDUAN MAGANHOTTO GUÉRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 08 de maio de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

---

Ronaldo Luis S. Izzo  
Prof. Orientador  
UTFPR

---

José Alberto Cerri  
Prof. Co-Orientador  
UTFPR

---

Rogério Francisco Küster Puppi  
Membro titular  
UTFPR

Dedico este trabalho ao meu pai, minha  
mãe e minha irmã pela paciência em  
meus momentos ausência.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Aos meus amigos que estiveram me motivando para continuar e ao mesmo tempo me acalmando para terminar este trabalho.

Ao meu chefe, e também pai, por me ajudar com o conhecimento prático e consideração por dias de ausência em serviço.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem a paciência deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Além é claro de meus orientadores, Prof<sup>o</sup> Ronaldo Izzo e Prof<sup>o</sup> José Alberto Cerri, e ao Gustavo Macioski quem me auxiliou nos ensaios realizados.

## RESUMO

GUÉRIOS, E. M. **ESTUDO DO MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA PARA SEU USO EM PAVIMENTO URBANO**. 2012. 69 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Esta monografia apresenta um estudo envolvendo a adição de cal hidratada a um solo na região de Curitiba visando o melhoramento para seu uso como sub-base de pavimentos asfálticos. O trabalho incluiu estudos de reações entre solo e cal hidratada, cujo produto é conhecido como solo-cal. A estabilização do solo foi o foco principal, onde a substituição de parte dos materiais usados como sub-base por cal hidratada traz benefícios tanto para o custo quanto para a resistência à compressão desta sub-base. No global, as misturas solo-cal estudadas apresentam comportamento adequado para utilização em camadas de sub-base de pavimentos, criando assim a oportunidade para seu uso em regiões carentes de agregados ou recursos financeiros. Este trabalho demonstrou-se o efeito positivo da cal hidratada ao solo no quesito de aumento da resistência do solo. Com base em resultados de ensaios de laboratório foi demonstrado o aumento da resistência à tensão normal, e à tensão de cisalhamento do solo após a adição de cal hidratada, principalmente na mistura em que 10% da massa era cal hidratada e 90% era o solo puro.

**Palavras-chave:** solo-cal, estabilização de solo, cal hidratada, capacidade de suporte, pavimentos urbanos.

## ABSTRACT

GUÉRIOS, E. M.. **A STUDY OF THE IMPROVEMENT OF THE SOIL BY ADDITION OF HYDRATED LIME FOR YOUR USE IN URBAN PAVEMENT.** 2012. 69 pages. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2012.

This dissertation presents a study involving the addition of hydrated lime to soils in the region of Curitiba in order to improve its use as sub-base asphalt pavements. The study included studies of reactions between soil and lime, whose product is known as soil-lime. The stabilization of the soil was the focus, where the replacement of part of the materials used as sub-base for slaked lime is beneficial for both the cost and to the compressive strength of this subfloor. Overall, the soil-lime mixtures studied exhibit appropriate behavior for use in sub-base layers of pavement, creating the opportunity for its use in regions lacking aggregates or financial resources. This work demonstrated the positive effect of slaked lime to the soil in the requirement of increasing the resistance of the soil. Based on the results of laboratory tests demonstrated the increased resistance to normal stress and shear stress of the soil after the addition of hydrated lime, particularly in the mixture in which 10% of the mass was 90% of hydrated lime and soil was pure.

**Key words:** soil-lime, soil stabilization, hydrated lime, supportability, urban pavements.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução das vias pavimentadas brasileiras.....	11
Tabela 2 - Estrutura e características químicas da cal virgem. ....	14
Tabela 3 - Estrutura e características químicas da cal hidratada.....	15
Tabela 4 - Decomposição do custo dos componentes da pavimentação. ....	29
Tabela 5 - Custo por m <sup>3</sup> das opções de material para sub-base. ....	30
Tabela 6 - Planilha para amostra com 0% de cal hidratada.....	32
Tabela 7 - Planilha para amostra com 2% de cal hidratada.....	32
Tabela 8 - Planilha para amostra com 5% de cal hidratada.....	32
Tabela 9 - Planilha para amostra com 10% de cal hidratada.....	33
Tabela 10 - Estrutura básica da tabela utilizada para registro dos dados.....	36
Tabela 11 - Tabela com dados da amostra com 0% de cal hidratada.....	37
Tabela 12 - Tabela com dados da amostra com 2% de cal hidratada.....	37
Tabela 13 - Tabela com dados da amostra com 5% de cal hidratada.....	38
Tabela 14 - Tabela com dados da amostra com 10% de cal hidratada.....	39
Tabela 15 - Tabela de $\gamma$ e $\gamma_d$ das amostras de 0% cal hidratada.....	39
Tabela 16 - Tabela de $\gamma$ e $\gamma_d$ das amostras de 2% cal hidratada.....	40
Tabela 17 - Tabela de $\gamma$ e $\gamma_d$ das amostras de 5% cal hidratada.....	40
Tabela 18 - Tabela de $\gamma$ e $\gamma_d$ das amostras de 10% cal hidratada.....	40
Tabela 19 - Dados de compressão e tensão normal amostras.....	45
Tabela 20 - Densidade relativa dos grãos.....	47
Tabela 21 – Dimensões do corpo de prova.....	48
Tabela 22 – Massa úmida do corpo de prova e teor de umidade ótimo.....	48
Tabela 23 - Tensão Normal e Tensão Cisalhante das amostras.....	58
Tabela 24 - Coesão e Inclinação das envoltórias.....	60
Tabela 25 - Dados de GS e máxima tensão normal.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrada do Mar.....	6
Figura 2 - Caminho do Ouro ou Estrada Real .....	7
Figura 3 - O mapa do caminho velho e novo do Caminho do Ouro .....	8
Figura 4 - Trecho da Rodovia Presidente Dutra .....	9
Figura 5 - Rodovia Presidente Dutra .....	10
Figura 6 - Molde de ensaio de cisalhamento.....	24
Figura 7 - Demonstração de custos em uma obra de rodovia asfaltada .....	28
Figura 8 - Porcentagem do custo dos componentes da pavimentação.....	29
Figura 9 - Custo de material para pavimentação.....	30
Figura 10 - Curva de compactação do solo com 0% de cal hidratada .....	41
Figura 11 - Curva de compactação do solo com 0% de cal hidratada .....	42
Figura 12 - Curva de compactação do solo com 5% de cal hidratada .....	43
Figura 13 - Curva de compactação do solo com 10% de cal hidratada .....	44
Figura 14 - Tensões máximas de todas as amostras.....	47
Figura 15 – Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa.....	49
Figura 16 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa.....	50
Figura 17 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa.....	50
Figura 18 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa.....	51
Figura 19 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.....	52
Figura 20 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 2% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.....	53
Figura 21 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 5% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.....	53
Figura 22 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 10% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.....	54
Figura 23 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.....	55
Figura 24 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 2% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.....	56
Figura 25 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 5% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.....	56
Figura 26 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 10% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.....	57
Figura 27 - Envoltória Linear das amostras.....	59
Figura 28 - Tensão Máxima x % de cal hidratada.....	61
Figura 29 - GS x Máxima Tensão Normal .....	63
Figura 30 - Teor de umidade ótimo – amostras.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS

CAH	Aluminato de cálcio hidratado
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto betuminoso usinado à quente
CSH	Silicato de cálcio hidratado
CTC	Capacidade de troca catiônica
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MR	Módulo de resiliência
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_d$	Tensão desvio
$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{ót}$	Teor de umidade ótima

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. CONTEXTO.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.3. JUSTIFICATIVA.....	5
2. HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL .....	5
2.1. USO DA CAL HIDRATADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	13
2.1.1.A CAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	13
2.2. ESTRUTURA QUÍMICA .....	13
2.3. ESTABILIZAÇÃO DA SUB-BASE.....	16
2.3.1. Utilização com rejeitos .....	16
2.3.2.Utilização de geotêxtil .....	16
2.3.3.Base Solo-Brita.....	17
2.4. ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND .....	18
2.5. ESTABILIZAÇÃO DA SUB-BASE COM CAL .....	18
2.5.1.REAÇÃO SOLO-CAL .....	18
2.5.2.CARACTERÍSTICAS INCORPORADAS À MISTURA .....	20
A) Distribuição granulométrica .....	20
B) Plasticidade .....	20
C) Variação volumétrica .....	21
D) Característica de compactação .....	21
E) Resistência mecânica à compressão.....	21
2.6. DOSAGEM .....	21
2.7. MÉTODOS DE ENSAIO (METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS).....	23
2.7.1.Ensaio de cisalhamento direto.....	23
2.7.2.Ensaio de compactação de solos - Proctor Normal.....	26

2.8. CUSTO .....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1. A amostra de solo .....	31
3.2. Material de ensaio .....	33
3.3. Ensaio de compactação Proctor Normal.....	34
3.4. Ensaio de cisalhamento Normal .....	35
4. RESULTADOS .....	36
4.1. Apresentação dos resultados do ensaio de Proctor Normal.....	36
4.2. Apresentação dos resultados do ensaio de cisalhamento .....	48
4.3. Comparação e análise de resultados .....	60
4.4. Discussão geral e comparação de resultados .....	65
5. CONCLUSÃO.....	66
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
REFERÊNCIAS.....	68

## 1. INTRODUÇÃO

O início da aplicação dos princípios da Mecânica dos Solos ocorreu na década de quarenta, devido a grande dificuldade na execução de pavimentos no Brasil pela carência em conhecimento dos solos lateríticos. O conhecimento nesta área era dominado apenas por países desenvolvidos cujos solos não correspondiam às mesmas características dos solos tropicais, encontrados no Brasil.

Os materiais naturais conhecidos como solos lateríticos ou solos tropicais, abundantemente encontrados no Brasil, apresentavam características diferentes daquelas especificadas para uso rodoviário, como elevados valores de limite de liquidez e de índice de plasticidade. Quanto a sua capacidade de suporte, posteriormente foi comprovado a partir do ensaio de CBR (“California Bearing Ratio”) possuírem elevada capacidade.

Com a escassez de material puro e a necessidade constante de obter maior estabilização de solos para o desenvolvimento de obras viárias, aeroportos e portuárias, foi essencial o estudo de novas técnicas que aumentassem a velocidade de obras, incrementassem a resistência do solo e diminuíssem seu custo.

Essa monografia apresenta no Capítulo 1 uma breve introdução, contextualização e justificativa do trabalho e seus objetivos.

No Capítulo 2 tem-se uma história da pavimentação no Brasil, lembrando momentos marcantes e decisivos na história da engenharia de infraestrutura brasileira.

O Capítulo 2 traz informações importantes da substância utilizada como foco de estabilização dos solos nesta dissertação, a cal. Estrutura química, características e propriedades são aspectos importantes revisados. Além do seu uso geral em construção civil.

No Capítulo 2 tem-se referência de técnicas de estabilização de sub-bases de solo para conhecimento e comparação à técnica apresentada neste trabalho de conclusão de curso.

No Capítulo 2 encontra-se a principal técnica exposta nesta monografia, a estabilização da sub-base de um solo com cal hidratada. São apresentados métodos de ensaio de compressão e cisalhamento, características agregadas ao produto final da mistura, comparação de custos com outras técnicas e a dosagem que deve ser feita de cal para que busquem a maior eficiência da mistura.

O Capítulo 3 traz a preparação para os ensaios realizados, envolvendo a preparação das amostras e equipamentos.

No Capítulo 3 tem-se o procedimento detalhado de cada um dos ensaios realizados, os padrões usados, as singularidades de cada ensaio e informações gerais do desenvolvimento destes ensaios.

No Capítulo 4 são expostos os resultados encontrados de ambos os ensaios realizados, uma análise comparativa dentre eles, uma análise dos resultados e aprofundamento de suas importâncias ao trabalho.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

### 1.1.CONTEXTO

Segundo dados do Geipot (2001), aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é rodoviário. O modal ferroviário responde por 21%, o aquaviário por 14%, o dutoviário por 5% e o aéreo por menos de 1%. O modal de transporte rodoviário encontra-se em parte em estado deficiente, sendo os investimentos nas rodovias prioritários neste momento, não apenas por ser o modal mais utilizado, mas por exigir menor investimento quando comparado aos demais modais. Destaca-se ainda que pelo modal rodoviário circulam 96% dos passageiros.

Levantamentos recorrentes da Confederação Nacional do Transporte – CNT têm considerado a grande maioria dos pavimentos do Brasil de baixo conforto ao rolamento, incluindo muitos trechos concessionados da malha federal. Estima-se de 1 a 2 bilhões de reais, por ano, para manutenção das rodovias federais. De acordo com Bernucci (2006) seriam necessários R\$ 10 bilhões para recuperação de toda a malha viária federal.

Com o grande aquecimento na economia brasileira técnicas para estabilização de solos visando à pavimentação devem ser aprimoradas, focando sempre no baixo custo, velocidade de execução e durabilidade, evitando desta maneira gastos exorbitantes com manutenções e retrabalhos de pistas (Bernucci et al, 2006).

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é estudar, em nível laboratorial, o comportamento de um solo que poderá ser utilizado como sub-base para pavimento urbano após a definição da dosagem com cal hidratada, verificando sua estabilidade, esforços à compressão, capacidade de suporte e esforços cisalhantes.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

Como aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é rodoviário existe a necessidade de um foco maior nesse assunto.

Técnicas envolvendo cimento como aglomerante na estabilização de solos já são comuns em obras públicas (conhecidos como solo-cimento), porém o alto custo deste aglomerante sinaliza o estudo de alternativas.

Além de uma alta velocidade na cura devido a flocculação inicial, conceito que será explicado neste trabalho, o preço cerca de 30% mais barato quando comparado ao cimento Portland é um atrativo para o uso de cal hidratada na estabilização da sub-base de pavimentos rodoviários.

A cal hidratada já é utilizada na área de estabilização de solos, porém dificilmente tem seu uso exclusivo, ou seja, normalmente é combinado com o cimento Portland devido à falta de estudos na dosagem específica de cal para cada tipo de solo.

## 2. HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL

Tomando como objetivo final deste trabalho o melhoramento da sub-base de uma via que passará por uma pavimentação, importante conhecer sobre o histórico desta técnica milenar.

Uma das mais antigas estradas pavimentadas implantadas não se destinou a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas. Para a construção das pirâmides no Egito (2600-2400 a.C.), foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. O atrito era amenizado com umedecimento constante por meio de água, azeite ou musgo molhado (Saunier (1936) apud Bernucci et al (2006)).

Em uma revisão histórica sobre o assunto no livro *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, Bernucci et al. (2006), foi apresentado que uma das primeiras estradas reportadas tem início em 1560, à época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá. Trata-se do caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661, o governo da Capitania de São Vicente recuperou esse caminho, construindo o que foi denominada Estrada do Mar (ou Caminho do Mar), permitindo assim o tráfego de veículos (Figura 1). Hoje a estrada também é conhecida como Estrada Velha do Mar. Em 1789, a estrada foi recuperada, sendo a pavimentação no trecho da serra feita com lajes de granito, a chamada Calçada de Lorena, ainda hoje em parte preservada. A Estrada do Mar emprestou parte do seu traçado para a construção da Estrada da Maioridade, em homenagem à maioria de D. Pedro II, iniciada em 1837 e concluída em 1844. Em 1913, iniciou-se novamente uma recuperação, mas a estrada foi posteriormente abandonada devido à concorrência da linha férrea. Em 1920, foi criada a Sociedade Caminho do Mar, responsável pela reconstrução da estrada e estabelecimento de pedágio e, em 1922, o seu trecho mais íngreme foi pavimentado com concreto. Em 1923, foi abolido o pedágio pelo governo de São Paulo que comprou a Sociedade Caminho do Mar. Era presidente de São Paulo, Washington Luiz, que foi presidente da República de 1926 a 1930, sendo sua a célebre frase “governar é abrir estradas”.



**Figura 1 - Estrada do Mar**

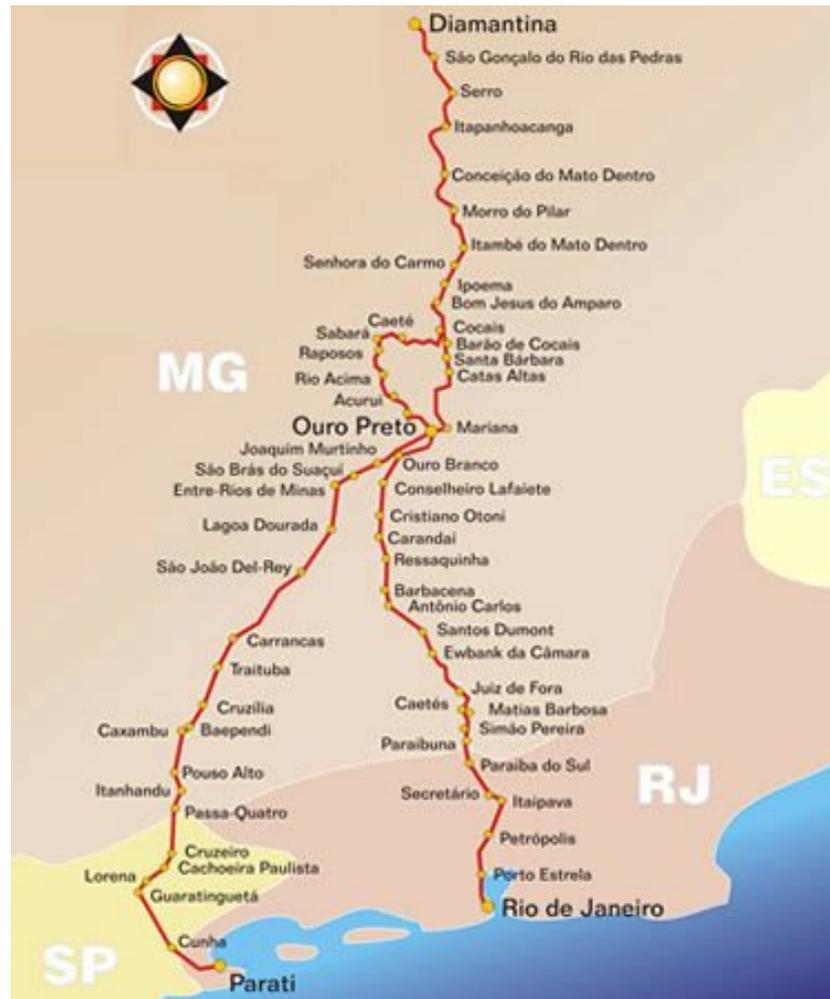
**Fonte: Bernucci et al (2006)**

A movimentação da economia, geração de lucros e crescimento de mercados sempre foram os principais motivos que levaram os engenheiros rodoviários daquela época a traçar novas rotas e melhorar as vias. Um exemplo claro dessa busca por crescimento econômico foi a Estrada Real. A *Estrada Real* (Figura 3), designação usada em Minas Gerais, ou *Caminho do Ouro* (Figura 2) tem sua origem atribuída a uma trilha usada pelos índios goianás anteriormente à chegada dos portugueses, daí Trilha Goianá ser também uma designação do caminho, entre outras. (Bernucci et al, 2006).



**Figura 2 - Caminho do Ouro ou Estrada Real**

**Fonte: Bernucci et al (2006)**



**Figura 3 - O mapa do caminho velho e novo do Caminho do Ouro**

**Fonte: Site Oficial da Estrada Real**

O investimento em construções na infraestrutura rodoviária do Brasil passou por altos e baixos. Um ponto baixo que vale ser lembrado foi durante o Império (1822-1889). Nesta época haviam cerca de 500 km de estrada no país e foram feitos poucos investimentos para ampliação de tais estradas, devido principalmente ao fato de que o tráfego na época era apenas de animais com carroças. Porém, com a chegada do automóvel Ford modelo T em 1919 no Brasil mudanças deveriam ser feitas.

Como principal marco do início dos investimentos reais em programas de expansão de rodovias foi construída a rodovia Rio-São Paulo, com 506 km de extensão, a qual foi inaugurada em 1928 pelo então presidente Washington Luiz. Um exemplo de rodovia criada nessa época foi a Presidente Dutra (Figura 4 e Figura 5).



**Figura 4 - Trecho da Rodovia Presidente Dutra**

**Fonte: Site da construtora Dan-Hebert**



**Figura 5 - Rodovia Presidente Dutra**

**Fonte: Site do Motonline**

Outra época desaquecida para a expansão viária brasileira, quando comparada ao resto do mundo, ocorreu durante os anos da ditadura (1964-1984), onde cerca de 10% das vias brasileiras eram pavimentadas contra 50% na Europa e a média na América do Sul de 20%.

Para ilustrar o atraso do país em relação aos investimentos na área de infraestrutura, principalmente na pavimentação, em 1998 o consumo de asfalto por ano nos Estados Unidos era de 27 milhões de toneladas, tendo ultrapassado 33 milhões em 2005. No Brasil, somente nos últimos 2 anos é que este consumo retomou a marca de 1998, com aproximadamente 2 milhões de toneladas por ano. Levando-se em consideração que os dois países têm áreas semelhantes, de 9,8 e 8,5 milhões de km<sup>2</sup>, respectivamente, fica clara a condição precária de desenvolvimento do país neste aspecto (BERNUCCI, 2006).

Dados relacionados a quantidade de vias pavimentadas e não pavimentadas no decorrer dos anos são de suma importância para analisar quando houve um atraso significativo e uma aceleração nessa área. De acordo com a Tabela 1, é possível observar que no ano de 1975 houve uma grande expansão nas rodovias estaduais e um diminuição nas rodovias federais, isso devido ao fato de que grande parte das rodovias mudaram da concessão federal para uma concessão estadual, facilitando assim a administração dessas vias. A partir de 2000 o investimento e a ampliação da rede viária vêm se tornando algo notável, para afirmar tal evolução segue a Tabela 1 fornecida pelo (Ministério de Transportes, 2009).

Tabela 1 - Evolução das vias pavimentadas brasileiras. Fonte: Ministério dos Transportes, 2009

Ano	Federal			Estadual		
	Pavimentada	Não pavimentada	Total de Vias	Pavimentada	Não pavimentada	Total de Vias
1970	23.146	27.394	50.540	24.431	105.040	129.471
1975	40.190	28.774	68.964	20.641	86.320	106.961
1980	39.685	19.480	59.165	41.612	105.756	147.368
1985	46.455	14.410	60.865	63.084	100.903	163.987
1990	50.310	13.417	63.727	78.284	110.769	189.053
1993	51.612	13.783	65.395	81.765	110.773	192.538
2003	57.143	14.049	71.192	84.352	111.410	195.762
2005	58.149	14.651	72.800	98.377	109.963	208.340
2007	61.304	13.636	74.940	106.548	113.451	219.999

Tamanho crescimento na expansão não está próximo de seu final, pois com o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) elevado volume de recursos está estão sendo destinados para pavimentação, tanto municipal (a qual tem a maior

porcentagem de área não pavimentada (BERNUCCI, 2006) quanto vias federais e estaduais.

A rua, assim como a calçada, é um elemento urbano que deve ser interpretado como suporte de múltiplos usos. Não sendo esta classificada apenas como um elemento funcionalista para a circulação de veículos e pedestres, mas também como local de relações permanentes entre os usuários (JACOBS, 2000).

O asfalto é sinônimo de progresso e desenvolvimento socioeconômico para as localidades, já que esta obra visa atender as necessidades locais e ao mesmo tempo contribuir para as empresas instaladas na região, mas para isso se concretizar é necessário planejamento por parte da administração municipal, além da ajuda de parcerias, tanto do poder público quanto do privado.

Para a comunidade, o asfalto significa o fim da convivência diária com os adventos dos efeitos climáticos, onde ora os mesmos convivem com a poeira, ora com a lama. O pó, além do incômodo da sujeira, pode intensificar problemas respiratórios, já que no período de chuvas o pavimento sofre com o tráfego e possíveis erosões, o que pode resultar até mesmo em trechos intransitáveis, comprometendo a locomoção dos moradores das pequenas comunidades e do escoamento do pequeno produtor, além de dificultar enormemente o acesso dos alunos às escolas. O asfalto traz junto outros benefícios à comunidade, como a melhor iluminação das vias, o aumento da segurança devido à facilidade de acesso de viatura da polícia em rondas, a possibilidade de linhas de ônibus municipais e o saneamento.

Para os municípios, as obras de pavimentação podem incrementar avanços no escoamento da produção rural, seja ela provinda do campo ou da pecuária, além de proporcionar melhorias na infraestrutura viária e, por fim, possibilitar o acesso de visitantes a áreas turísticas de sua região. Uma melhora nos serviços públicos também pode ser justificada pelo aumento de áreas pavimentadas em um município, como menos manutenção nos caminhões de recolhimento de lixo, fácil acesso de viaturas policiais e bombeiros, e melhor organização de loteamento dos terrenos.

O planejamento das vias pavimentadas é de fundamental importância devido a grande quantidade de sistemas que trabalham aliados à pavimentação, como por exemplo o sistema de drenagem, o sistema de esgoto e sistema de água. Estes devem ser projetados para que sejam executados antes da pavimentação para que não haja assim uma necessidade de reparação no pavimento asfáltico.

## 2.1. USO DA CAL HIDRATADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 2.1.1. A cal na construção civil

Segundo Marques (2006), a cal virgem ou hidratada é um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias (calcários ou dolomitos), a uma temperatura inferior à do início de fusão do material. Dentre as várias opções de aplicação da cal na construção civil pode-se citar: aumento da plasticidade às argamassas, estabilização de sub-bases e bases, pintura, fabricação de tijolos, de blocos e de painéis.

Integrante insubstituível na cesta básica da construção civil, a cal vem ganhando espaço, importância e principalmente credibilidade devido as suas características e baixo custo. Em 1995, quando teve início o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), o índice de não conformidade beirava os 90% e desde então, reduziu para 15%. Agora, grandes consumidores passaram a exigir mais: compromisso com boas práticas de produção, gestão ambiental e saúde do trabalhador (CAMPELLO, 2009).

A comum procura por matérias prima que existam em abundância no Brasil dirige nosso foco ao calcário. O Brasil é o sexto país no planeta com reservas naturais de calcário.

O óxido de cálcio (CaO) mais conhecido comercialmente como cal, é um dos materiais de construção mais antigos do mundo. Sua utilização é muito abrangente nos mais diversos segmentos: construção civil, construção de estradas, siderurgia e metalurgia, indústria química, papel e celulose, indústria alimentícia, agricultura, saúde e preservação ambiental.

## 2.2. ESTRUTURA QUÍMICA

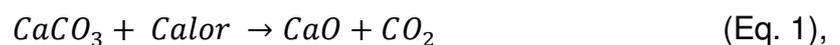
As características químicas básicas do CaO, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Estrutura e características químicas da cal virgem. Fonte: Wells, 1984.

Óxido de cálcio	
Nome IUPAC	Óxido de cálcio
Outros nomes	Cal
Propriedades	
Fórmula molecular	CaO
Massa molar	56.077 g/mol
Aparência	Sólido branco
Densidade	3.35 g/cm <sup>3</sup>

Para este estudo referente ao melhoramento do solo com a aplicação e mistura de cal hidratada é de suma importância para o decorrer dos ensaios o conhecimento das seguintes características citadas na Tabela 2: massa molecular, densidade, solubilidade em água e estrutura química.

A obtenção da cal é feita a partir de um processo conhecido como calcinação. Para que ocorra tal processo é necessário que após moagem e seleção, o calcário seja submetido a elevadas temperaturas em fornos industriais (em torno de 1000 °C). O processo químico que ocorre durante a calcinação pode ser observado na equação (1):



A aglomerante cal é vendida comercialmente de duas formas, a cal virgem e cal hidratada. A chamada cal virgem, também denominada cal viva ou cal ordinária, é o produto inicial resultante da calcinação de rochas calcárias, composto

predominantemente dos óxidos de cálcio e magnésio. A cal hidratada é o resultado da “extinção” ou “queima” da cal virgem com água.



A cal apresenta propriedade-aglomerante como o cimento, com a diferença que o enrijecimento e endurecimento do cimento, ocorre por meio das reações de hidratação do compostos e a cal por meio da reação de recarbonatação, ambos na presença de água.

Comparando o investimento financeiro necessário para aquisição de ambas as formas de cal, é possível observar que há um acréscimo médio de 9% na cal hidratada perante a sua versão livre de água.

Na Tabela 3 são apresentadas as características químicas e estruturais da cal hidratada.

Tabela 3 - Estrutura e características químicas da cal hidratada. Fonte: Wells, 1984.

Hidróxido de cálcio	
Nome IUPAC	Hidróxido de cálcio
Outros nomes	Hidróxido de cálcio II; Cal hidratada; Cal apagada; Cal extinta; Leite de cal.
Propriedades	
Fórmula molecular	Ca(OH) <sub>2</sub>
Massa molar	74.093 g/mol
Aparência	Pó branco macio/Líquido incolor
Densidade	2.211 g/cm <sup>3</sup> , sólido

## 2.3. ESTABILIZAÇÃO DA SUB-BASE

### 2.3.1. Utilização com rejeitos

Com a grande geração de resíduos em indústrias vem à tona um problema sobre qual fim se deve dar aos resíduos, tendo em vista que a construção civil, mais especificamente a engenharia viária, vem aprimorando técnicas de reutilização de resíduos em estabilização de sub-bases e subleitos.

Além da preocupação com a execução de pavimentos de baixo custo com desempenhos satisfatórios, a utilização de rejeitos também visa amenizar os danos ambientais que ocorrem com a estocagem.

Bodi et al. (1995) estudaram a utilização de entulho da construção civil reciclado na pavimentação urbana. Como revestimento primário do subleito, visando minimizar a ocorrência de lama e também para ajudar no reforço de tal base. Tomando como foco a estabilização do solo verifica que os agregados de entulho britados apresentam boa resistência à compressão quando comparado ao entulho bruto, pois na britagem a fragmentação se dá no plano de menor resistência do material. Logo, as frações menos resistentes são reduzidas às granulometrias de areia e a curva de capacidade de suporte cresce com o aumento da porcentagem de entulho na mistura.

### 2.3.2. Utilização de geotêxtil

A característica predominante do geotêxtil é dependente direta do caso de aplicação. O geotêxtil pode ser considerado uma solução para a impermeabilização com betume, assim como pode ser uma solução para estabilização de solos a partir do momento que tem sua resistência a abrasão incrementada com um tratamento superficial de penetração e colocado sobre a superfície de uma base de argila vermelha compactada.

Foram realizados alguns experimentos em rodovias paranaenses de baixo volume de tráfego. Basicamente, o método construtivo consistiu na compactação de uma camada de argila vermelha de 15 cm de espessura, na energia Proctor normal ou intermediário e na umidade ótima. Depois se estendeu a manta de poliéster (Bidim VP-75) e executou-se a imprimação com emulsão catiônica de cura rápida (RR-1C), diluída com cerca de 10% de água e distribuída numa taxa de 1,2 l/m<sup>2</sup>.

Depois se espalhou o agregado (diâmetro máximo de 19 mm) e realizou-se o tratamento superficial convencional. A grande dificuldade encontrada foi a execução de um controle de compactação severo em segmentos muito longos. No entanto, o objetivo principal de proteger a base de solo fino foi atingido, viabilizando seu uso em rodovias de tráfego baixo. (Rezende,1999).

### 2.3.3. Base Solo-Brita

A brita graduada simples é um dos materiais granulares mais largamente utilizados no país como base e sub-base de pavimentos asfálticos e foi introduzida na década de 1960, época em que houve um crescimento expressivo da malha rodoviária pavimentada. Consiste em um material com distribuição granulométrica bem-graduada, com diâmetro máximo dos agregados não excedendo a 38 mm e finos entre 3 e 9% (passante na peneira no 200), que confere um bom intertravamento do esqueleto sólido e uma boa resistência, com CBR normalmente elevado, da ordem de 60% a 100%.

O módulo de resiliência, MR, é a relação entre a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ), aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ). No caso destas bases é em média 100 a 400 MPa (1.000 a 4.000 kgf / cm<sup>2</sup>), dependendo da graduação, da natureza dos agregados, do estado de compactação e do estado de tensões, principalmente no que se refere à tensão de confinamento.

O transporte é feito em caminhões basculantes e a distribuição do material em pista é feita normalmente por vibroacabadora ou motoniveladora. A compactação é feita por rolos de pneus e/ou lisos, com vibração ou não. Esta operação deve ser realizada logo após o espalhamento para não perder a umidade. (Bernucci et al., 2006).

A brita colocada em mistura rica de argila laterítica contribui para a redução na abertura das trincas. Foi observado que em campo as sucessivas molhagens e secagens auxiliam na melhoria do desempenho (Rezende, 1999).

## 2.4. ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND

É um processo de estabilização visando à ação físico-química do cimento sobre o solo, em que as características incorporadas por esta mistura favorecem na estabilização e na resistência.

A característica aglomerante do cimento junto ao solo ocorre principalmente no processo de hidratação do cimento, o qual pode ser separado em 4 (quatro) fases distintas, segundo Pinheiro (2011):

- 1ª fase - componentes do cimento começam a reagir liberando o hidróxido de cálcio que se dissolve parcialmente na fase aquosa, elevando o pH para 13. Essa fase exotérmica (40 cal/g/h) dura aproximadamente de 5 a 10 minutos;
- 2ª fase - período de indução, durante o qual as superfícies dos grãos ficam cobertos com géis neo-formados. Forma-se uma camada gelatinosa de silicatos e aluminatos hidratados dos grãos de cimento;
- 3ª fase - endurecimento do gel, promovendo a ligação entre os grãos parcialmente hidratados. Duração aproximada de 6 horas;
- 4ª fase - endurecimento total do gel.

## 2.5. ESTABILIZAÇÃO DA SUB-BASE COM CAL

### 2.5.1. Reação solo-cal

Algumas das principais propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos (Attoh-Okine (1995) apud Lovato (2004)).

Quando um solo não tem as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada, principalmente quanto à sua resistência, torna-se necessário corrigi-lo ou substituí-lo por outro, com a adição ou subtração de componentes, ou com a ação de agentes químicos (orgânicos ou inorgânicos). A escolha da técnica deve ser baseada na economia e ainda na finalidade da obra.

A estabilização ou melhoria dos solos instáveis com adições de cal é uma das mais antigas técnicas empregadas pelo homem. Há exemplos encontrados ao sul da Itália, na Via Apia, entre a Posta Capena-Capua-Brindisi, construída no ano 312 a.C. e, num trecho da muralha da China, datado de 228 a.C. A técnica foi retomada por volta de 1920 e hoje sua expressão pode ser medida pelo consumo de cal. Em 1993 o consumo nos Estados Unidos foi de  $1,2 \times 10^6$  t / ano e no Japão,  $0,5 \times 10^6$  t / ano. Um consumo mais atualizado não foi encontrado nas revisões bibliográficas.

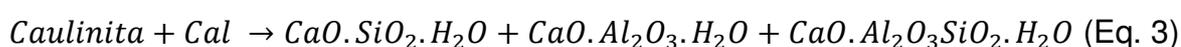
Alguns dos mecanismos das reações envolvidas na estabilização ou na melhoria dos solos com a cal ainda não são bem conhecidos, mas sabe-se que no processo predominam os efeitos físicos e físico-químicos da interação da cal com o solo. A cal como produto resultante da calcinação em altas temperaturas de rochas carbonáticas existentes na superfície terrestre - provoca reflexos quando em contato com o solo quanto à capacidade de troca iônica, à intensidade dos fenômenos de floculação / aglomeração, à variedade das reações pozolânicas e, por fim, à recarbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio.

A reação cal / solo inicia-se quase imediatamente, devido à alteração do pH que o meio alcalino cal provoca no solo. Reações de floculação / aglomeração acontecem em primeiro lugar, acompanhadas da troca iônica entre as argilas presentes no solo e a cal (Guimarães, 1995).

Segundo Bastos (2009), a reação de floculação da mistura solo-cal ocorre a partir de uma troca catiônica, devido ao aumento da CTC (capacidade de troca de cátions) e por final há um aumento eletrolítico da água dos poros do solo.

Segundo Guimarães (1995), é na floculação que têm início as alterações das propriedades do solo, como o aumento da capacidade de suporte, redução da expansão / contração, melhoria da plasticidade e, também, da sensibilidade à água. Ocorrem posteriormente as reações pozolânicas - formação de compostos químicos silicoaluminosos pelo ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo.

As reações pozolânicas são mais lentas e têm como influência a temperatura do ambiente, descritas na seguinte equação química:



Ao mesmo tempo, acontecem os fenômenos de recarbonatação devido ao ataque do anidrido carbônico (contido no ar e nas águas de infiltração) aos hidroxidados da cal, completando a química do processo (Guimarães, 1995).

Essas alterações provocadas no solo pela adição da cal são influenciadas por fatores do meio ambiente, entre eles a temperatura, a composição do ar atmosférico (principalmente a quantidade de oxigênio e anidrido carbônico), a ação das águas emergentes do lençol freático e, finalmente, os esforços mecânicos realizados para obter a estabilização. O tempo de cura que é proporcionado à mistura, antes do seu recobrimento com a capa selante, também exerce influência nessa relação.

#### 2.5.2. Características incorporadas à mistura

Para que haja uma estabilização do solo na presença de cal hidratada são necessárias às reações químicas entre partículas dessa com a fração fina do solo.

Segundo Bastos (2009), as reações pozolânica e de floculação entre o solo e a cal, trazem novas propriedades e características aos seus reagentes.

##### A) Distribuição granulométrica

A partir de reações de floculação, em que colóides saem de suspensão na forma de agregados, formam-se partículas maiores, denominadas "flocos" ou "flóculos", ocorrendo assim uma alteração na distribuição granulométrica do solo. Esse efeito é mais intensificado proporcionalmente à finura dos grãos de solo, aumentando assim a área de reação.

##### B) Plasticidade

A propriedade relacionada a plasticidade tem como alterações evidentes um aumento no limite de plasticidade (wp), e tomando como foco o limite de liquidez (wl) há uma divergência quando comparado à argilas não expansivas e expansivas, as quais, respectivamente, tem-se um aumento e uma diminuição neste limite. Também é possível observar que quando o foco é a trabalhabilidade, o índice de plasticidade (IP) tem uma queda com a mistura de cal hidratada ao solo, logo há um melhoramento da trabalhabilidade. (Bastos, 2009)

### C) Variação volumétrica

A variação volumétrica é a de suma importância para a aplicação prática da mistura solo-cal, devido à necessidade de preencher de maneira correta as exigências de espessura especificadas em projeto. O resultado da mistura demonstra que há uma redução na expansibilidade e ainda um aumento na contração do produto final.

### D) Característica de compactação

Relacionada com a variação volumétrica, mas dessa vez agregando propriedades para a compactação do produto final, é possível observar uma redução no peso específico aparente seco ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e um aumento na umidade ótima da mistura ( $W_{ot}$ ).

### E) Resistência mecânica à compressão

A resistência mecânica à compressão de um solo, que será utilizado como sub-base na execução de uma rodovia, é ponto crucial para o dimensionamento do pavimento. A alteração no quesito de resistência é mais um ponto positivo para o uso do sistema solo-cal, pois imediatamente após a mistura já há um incremento nesta propriedade, e com o tempo há uma evolução contínua da resistência. Segundo Corrêa (2009), a estabilização ocorre quanto maior for a quantidade de cal adicionada a um solo reativo e esta quantidade adicionada de cal é suficiente para que, em longo prazo, o material estabilizado ganhe resistência a um nível significativo por meio das reações pozolânicas.

## 2.6. DOSAGEM

Segundo Corrêa (2009), diferentes métodos de dosagem para misturas solo-cal foram testados por muitos pesquisadores, que resultaram muitas vezes em conclusões distintas a respeito. O fato de haver aspectos negativos ou positivos a respeito de um ou outro método de dosagem pode estar relacionado ao tipo de solo

e cal utilizados e a reatividade dos mesmos, bem como à maneira de execução de cada ensaio.

Dos métodos de dosagem solo-cal, citam-se aqui dois: Método LFP (Lime Fixation Point) e o Método do pH.

O Método LFP foi proposto por Nuñez (1991) apud Corrêa (2009) e tem por objetivo estabelecer o teor de cal a ser adicionado para a melhoria da trabalhabilidade do solo sem produzir aumentos significativos na sua resistência. O ensaio para a determinação do LFP consiste em efetuar o ensaio de Limite de Plasticidade (LP) aumentando o teor de cal até que o LP alcance um valor máximo (LFP). Para teores de cal superiores ao LFP, o solo ganha resistência sem ter sua trabalhabilidade e índices plásticos (LL e LP) modificados. Por este motivo, quando é encontrado o LFP, são adicionados mais 4% no teor de cal para a estabilização.

O Método do pH, também proposto por Nuñez (1991) apud Corrêa (2009), fundamenta-se no pH da mistura solo-cal. O princípio básico deste procedimento é adicionar suficiente quantidade de cal de modo a assegurar um pH de 12,4 para a ocorrência das reações pozolânicas (que proporcionam resistência à mistura). Este método foi desenvolvido para solos de climas temperados. Em alguns solos tropicais o limite de pH de 12,4 é impossível de ser alcançado.

Tomando como objetivo principal a estabilização da sub-base, foi proposto por Angelim (2005) que fossem ensaiados 4 dosagens diferentes de cal hidratada no solo:

- Solo Natural;
- Solo-cal 2% em pó;
- Solo-cal 5% em pó e,
- Solo-cal 10% em pó.

Essa dosagem é baseada na massa de solo seco que será ensaiada.

O aumento excessivo na porcentagem de cal hidratada na mistura solo-cal causa aos produtos finais problemas de trincas devido ao alto enrijecimento do solo, razão pela qual esse trabalho restringirá o uso das porcentagens acima citadas.

Para cada dosagem de cal serão necessários 5 teores de umidades diferentes, para assim conseguir traçar a curva de saturação. As umidades escolhidas ficaram entre 20% à 40% de água, variadas uniformemente.

## 2.7. MÉTODOS DE ENSAIO (METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS)

### 2.7.1. Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi desenvolvido basicamente para a determinação da resistência ao corte de um corpo de prova de solo, de forma prismática e seção quadrada e de pequena espessura.

A ruptura em si é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Existe, portanto, uma camada de solo em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante o processo de ruptura, formando assim a zona cisalhada. Através do ensaio de cisalhamento direto é possível obter a envoltória linear, os valores de ângulo de atrito interno do solo e do intercepto coesivo.

Para este método de ensaio são utilizados equipamentos listados abaixo:

- Caixa bipartida dotada de placas dentadas e perfuradas;
- Pedras porosas de topo e base e quepe para transmissão de carga
- Molde do corpo de prova
- Prensa equipada com motor e sistema de transmissão de carga (pendural);
- Extensômetros mecânicos ou transdutores elétricos de deslocamentos;
- Anel de carga ou célula de carga elétrica;

Com o uso do molde metálico é possível compactar a amostra de solo de modo que ela encaixe perfeitamente na caixa bipartida, que é posteriormente encaixada na prensa. A separação de amostra do solo para determinação da umidade é fundamental e deve ser feita para todas as amostras.

Após a amostra ser transferida para a caixa bipartida onde encontra-se entre duas pedras porosas em forma de placa, a caixa como um todo é instalada na prensa.

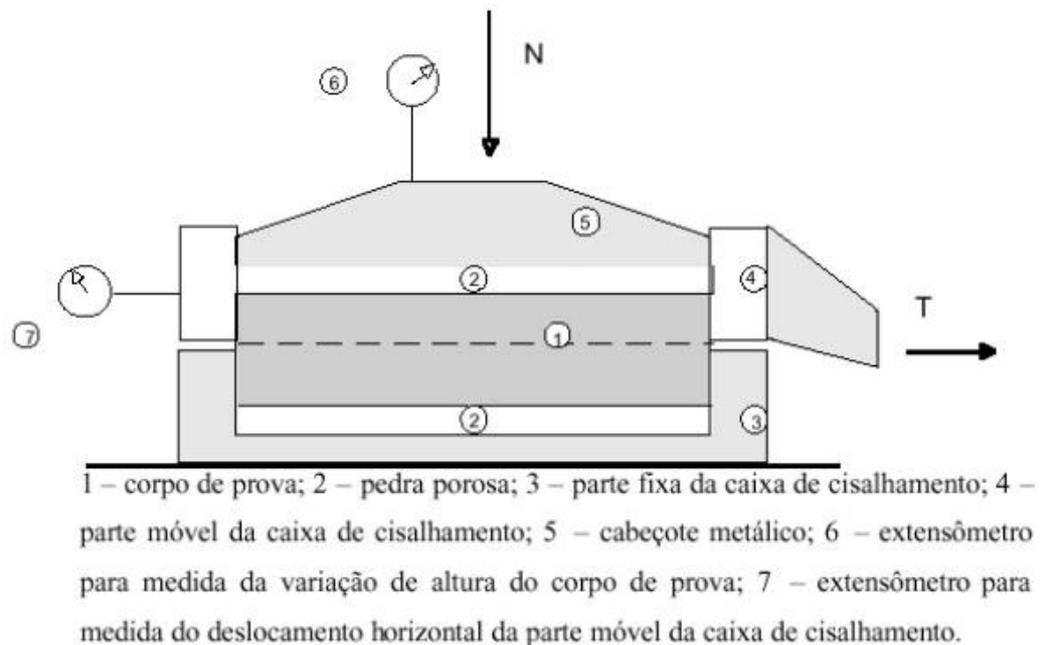


Figura 6 - Molde de ensaio de cisalhamento

Fonte: GERSCOVICH, 2010

Uma variação possível no ensaio é a tensão normal que irá ser aplicada na amostra, para o cálculo desta tensão é utilizada a equação a seguir:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

N – Carga normal

A – Área da seção

Com a escolha da tensão, e a caixa posicionada é possível iniciar a primeira etapa do ensaio: o adensamento.

A partir do momento que os extensômetros são calibrados toda a medição de dados é feito por eles, nessa primeira fase apenas a variação vertical é computada, tendo em vista que não há forças aplicadas no eixo horizontal do corpo de prova.

Quando não houver mais nenhuma variação de altura do corpo de prova, é iniciada a segunda etapa do ensaio: o cisalhamento.

Na etapa de cisalhamento, o solo adensado passa a receber junto com a força normal uma nova força cisalhante. A força aplicada pode ser variada com ajuste na prensa, e as medidas são novamente captadas pelos extensômetros.

Como resultados deste ensaio, após medição de todos os dados e coleta de resultados é possível traçar a curva de desenvolvimento do ensaio com valores da tensão cisalhante ( $\tau_i$ ) e a deformação cisalhante específica ( $\epsilon_i$ ). Esses valores podem ser encontrados com o uso de equações.

$$\tau_i = \frac{T_i}{A} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

$\tau_i$  – Tensão cisalhante

$T_i$  – Força cisalhante

$A$  – Área do corpo de prova

$$\epsilon_i = \frac{l_{hi}}{L} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:

$\epsilon_i$  – Deformação cisalhante

$l_{hi}$  – Leitura horizontal

$L$  – Lado do corpo de prova

Com os gráficos plotados, a partir de ferramentas do programa computacional Excel, é encontrado o ângulo de atrito do material e o seu intercepto coesivo.

Lembrando que esse ensaio deve ser feito no mínimo 3 vezes, em que a variação de tensão normal é fundamental para que encontre-se uma reta e um equação para a amostra, onde daí sim, é possível encontrar o ângulo de atrito e o intercepto coesivo.

### 2.7.2. Ensaio de compactação de solos - Proctor Normal

A compactação confere ao solo um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento, e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

Por meio do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado por determinada energia.

Para este método de ensaio são utilizados equipamentos encontrados facilmente em qualquer laboratório de mecânica dos solos:

- Peneira nº4 (4,8 mm);
- Molde cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup> com base e colarinho;
- Soquete cilíndrico;
- Extrator de amostras;
- Cápsulas para determinação da umidade;
- Estufa;
- Balança;
- Espátula;
- Pá;

Para a preparação da amostra toma-se uma quantidade de material seco em estufa. Foi usado aproximadamente para todo o experimento 32 kg, e fez-se o destorroamento até que não houvesse torrões maiores que 4,8 mm. Para verificação deste diâmetro, o material é passado na peneira nº 4 (4,8mm).

Adiciona-se então água para que possa atingir o teor de umidade proposto, tendo em vista que o solo está seco o cálculo da água a ser adicionada é facilmente calculada pela formula de teor de umidade:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \quad (\text{Eq. 7}),$$

em que:

w = Teor de umidade

Ps = Peso do solo seco da amostra

Pw = Peso de amostra da água

Após a adição de água, que deve ser feita em etapas para assim garantir a perfeita homogeneização, compacta-se a amostra no molde cilíndrico em 3 (três) camadas iguais, aplicando-se em cada uma delas 26 (vinte e seis) golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de 0,305 m.

Remove-se então o colarinho do molde, e com a ajuda de uma espátula aplaina-se a superfície do material à altura do molde e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado para assim encontrar o peso específico aparente úmido ( $\gamma$ ) e o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ).

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (\text{Eq. 8}),$$

em que:

P = Peso de solo úmido compactado

V = Volume do corpo de prova compactado

$\gamma$  = Peso específico aparente úmido

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (\text{Eq. 9}),$$

em que:

$\gamma_d$  = Peso específico aparente seco

w = Teor de umidade

Após a extração, o corpo de prova é mantido em estufa à 60 °C com um vasilhame contendo água para não haver alteração no teor de umidade do corpo de prova. Desta maneira a temperatura acelera a reação da cal hidratada com o solo, porém não interfere no teor de umidade da amostra.

Após 7 (sete) dias de cura em estufa, é avaliada a resistência mecânica à compressão.

Como resultado encontra-se uma curva de compactação, a qual é obtida marcando-se, em ordenadas, os valores dos pesos específicos secos e, em abscissas, os teores de umidade correspondentes ( $w$ ). O peso específico seco máximo é a ordenada máxima da curva de compactação, e a umidade ótima do solo é correspondente ao peso específico seco máximo. Além é claro, da própria tensão normal máxima.

## 2.8. CUSTO

O uso da cal hidratada para estabilização de sub-base tem como foco a diminuição do custo de uma obra viária, isto devido ao baixo preço de mercado deste aglomerante.

Segundo, Pedrozo (2001) os dados apresentados na Figura 6 demonstram os custos de uma obra pública de implantação de uma rodovia asfaltada.

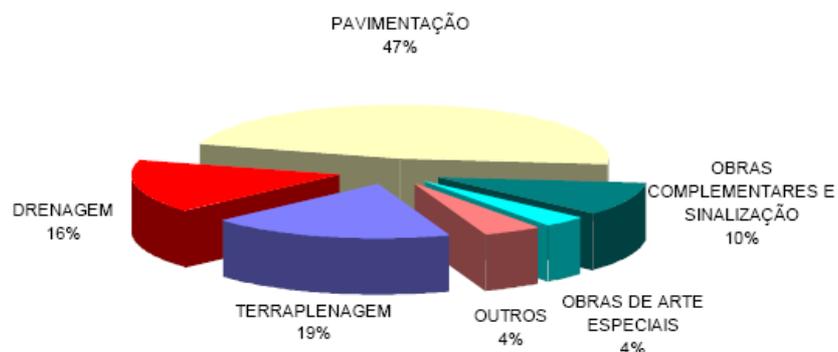


Figura 7 - Demonstração de custos em uma obra de rodovia asfaltada (Pedrozo, 2001)

Após a análise do gráfico exposto é possível concluir que a pavimentação representa praticamente 50% do custo de uma obra viária comum.

É de fundamental importância que a estabilização de solos seja considerada como uma componente dos custos da pavimentação no orçamento de uma rodovia. Utilizando o método da estrutura analítica de projeto é possível subdividir a

pavimentação em materiais, mão de obra, equipamentos e transportes, cujos custos percentuais podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Decomposição do custo dos componentes da pavimentação.  
Fonte: Ramo Construtora de Obras Ltda, 2012

<b>Componentes</b>	
Materiais	74%
Mão de obra	3%
Equipamentos	19%
Transportes	4%
TOTAL	100%

Para facilitar a análise dos dados expostos na Tabela 4, a Figura 8 apresenta os valores para evidenciar custo dos materiais em uma obra viária.

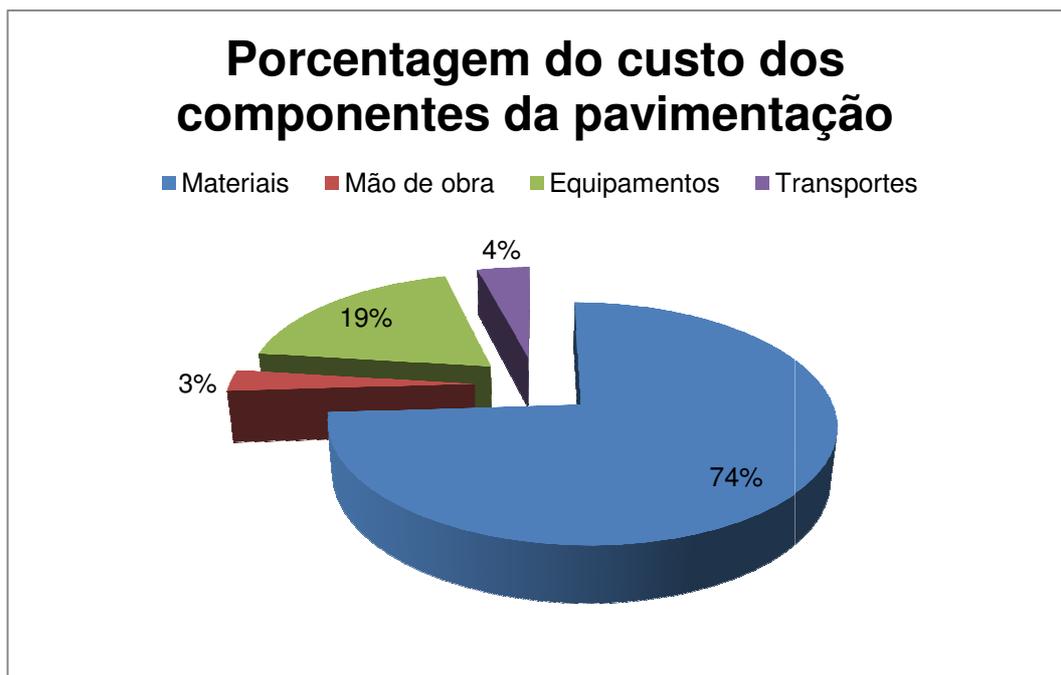


Figura 8 - Porcentagem do custo dos componentes da pavimentação.

Fonte: Ramo Construtora de Obras Ltda, 2012.

A ilustração evidencia que o maior custo em um orçamento de pavimentação são os materiais. Porém, estes materiais podem ser mais uma vez subdivididos para assim apresentar a contribuição real do material que será utilizado na base da via. É nessa parte do pavimento que está o foco do trabalho, pois a substituição de uma

parte deste material por cal hidratada seria muito econômico para a execução deste tipo de obra. A subdivisão dos materiais é apresentada a seguir na Figura 9.

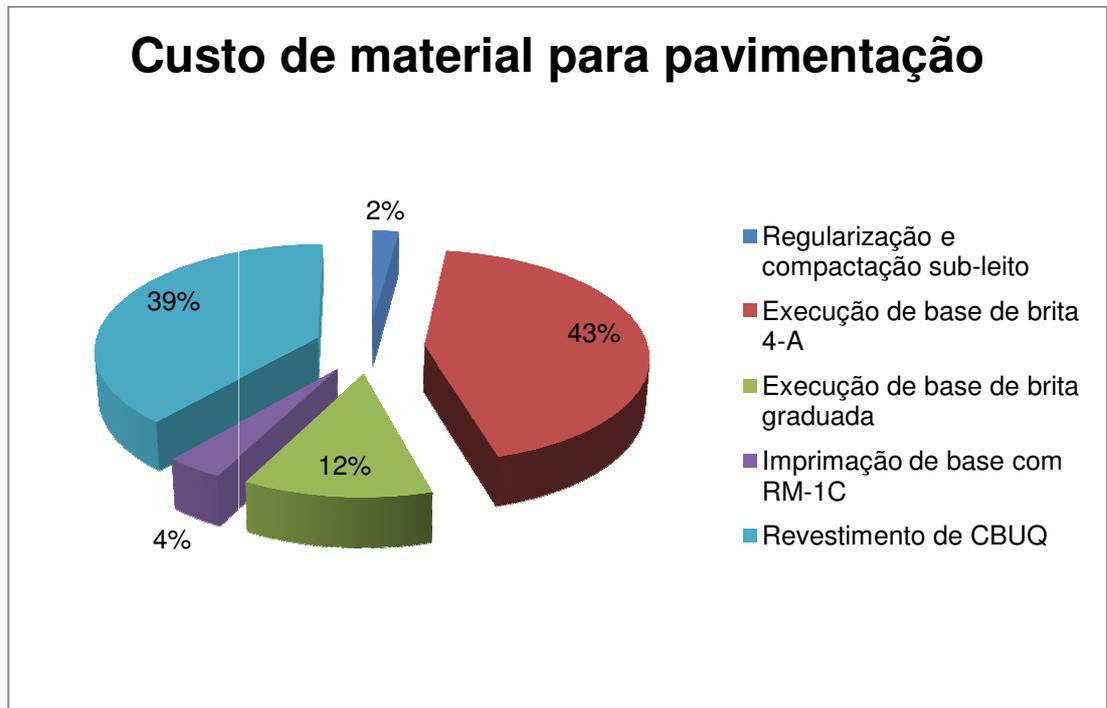


Figura 9 - Custo de material para pavimentação.

Fonte: Ramo Construtora de Obras Ltda.

A Figura 9 evidencia o quanto a incorporação de cal hidratada ao solo visando à substituição de outro material (neste caso foi usado brita tipo 4-A) é de fundamental importância na redução de custos, pois ela afeta cerca de 43% do custo total de materiais na etapa de pavimentação.

Para objeto de trabalho o solo a ser estabilizado tem um peso específico de 1500 kg/m<sup>3</sup> e será comparado o preço apenas do material que seria gasto caso fosse usado brita 4-A, cal hidratada em 3% a 5% da massa de solo, expressos os valores na Tabela 5.

Tabela 5 - Custo por m<sup>3</sup> das opções de material para sub-base. Fonte: Ramo Construtora de Obras Ltda.

	Brita 4-A	Solo-Cal 2%	Solo-Cal 5%
<b>Preço (R\$/m<sup>3</sup>)</b>	43,00	10,28	22,13

É preciso ressaltar que o uso do solo-cal não dispensa integralmente o uso de um agregado na sub-base, porém pode ajudar a substituir grande parte deste quando há uma boa dosagem e um solo com granulometria fina.

A composição de custo foi feita visando apenas o material, e qual seria o custo da substituição total de brita 4-A pelo solo-cal. A possibilidade desta substituição demanda vários experimentos e detalhes que não serão expressos neste trabalho, porém a proposta poderá ser colocada em prática em trabalhos futuros.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. A AMOSTRA DE SOLO**

Para a execução de todos os ensaios deste trabalho foi necessário coletar uma grande quantidade de solo. Esse solo foi coletado da região das proximidades da própria Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Sede Ecoville – Curitiba/PR, em uma obra a qual havia escavações de até 7 metros. A amostra recolhida foi da camada mais rasa, cerca de 1,5 à 2 metros de profundidade.

Com a permissão da empresa responsável pela obra, foram recolhidos aproximadamente 40 quilos de amostra e levados ao laboratório de mecânica dos solos do Departamento de Construção Civil.

Essa coleta foi feita em dezembro de 2011 e o material recolhido foi destorroado manualmente até atingir o diâmetro da peneira nº 4.

Com a amostra preparada para o uso, após deixá-la na estufa para que houvesse controle total da umidade, foi então iniciado o processo de misturas secas de solo com a cal hidratada. Foi utilizada a cal hidratada CH - III da marca PINOCAL.

As misturas consistiram em amostras de 1,6 kg no total, nas quais haviam variações com relação à porcentagem de cal hidratada. Foram separadas em sacos plásticos e bem vedados para que não houvesse alteração da umidade das amostras.

Os detalhes de preparação das misturas solo-cal podem ser observadas nas Tabelas (6 a 9).

Tabela 6 - Planilha para amostra com 0% de cal hidratada

AMOSTRA SOLO - 0% de Cal Hidratada					
	Massa Total (g)	Massa de solo (g)	Massa de Cal Hidratada (g)	% de água	Massa de água (g)
AMOSTRA 1	1600	1600	0	20	320
AMOSTRA 2	1600	1600	0	25	400
AMOSTRA 3	1600	1600	0	30	480
AMOSTRA 4	1600	1600	0	35	560
AMOSTRA 5	1600	1600	0	40	640

Tabela 7 - Planilha para amostra com 2% de cal hidratada

AMOSTRA SOLO-CAL - 2% de Cal Hidratada					
	Massa Total (g)	Massa de solo (g)	Massa de Cal Hidratada (g)	% de água	Massa de água (g)
AMOSTRA 1	1600	1568	32	20	320
AMOSTRA 2	1600	1568	32	25	400
AMOSTRA 3	1600	1568	32	30	480
AMOSTRA 4	1600	1568	32	35	560
AMOSTRA 5	1600	1568	32	40	640

Tabela 8 - Planilha para amostra com 5% de cal hidratada

AMOSTRA SOLO-CAL - 5% de Cal Hidratada					
	Massa Total (g)	Massa de solo (g)	Massa de Cal Hidratada (g)	% de água	Massa de água (g)
AMOSTRA 1	1600	1520	80	20	320
AMOSTRA 2	1600	1520	80	25	400
AMOSTRA 3	1600	1520	80	30	480
AMOSTRA 4	1600	1520	80	35	560
AMOSTRA 5	1600	1520	80	40	640

Tabela 9 - Planilha para amostra com 10% de cal hidratada

AMOSTRA SOLO-CAL - 10% de Cal Hidratada					
	Massa Total (g)	Massa de solo (g)	Massa de Cal Hidratada (g)	% de água	Massa de água (g)
AMOSTRA 1	1600	1440	160	20	320
AMOSTRA 2	1600	1440	160	25	400
AMOSTRA 3	1600	1440	160	30	480
AMOSTRA 4	1600	1440	160	35	560
AMOSTRA 5	1600	1440	160	40	640

As amostras devidamente secas foram armazenadas em saco plásticos e somente no momento da moldagem do corpo de prova foi adicionada a quantidade necessária de água.

### 3.2. MATERIAL DE ENSAIO

Para o ensaio de cisalhamento normal foram utilizados os equipamentos a seguir:

- Balança Lider. Modelo B-160;
- Balança Gehaka. Modelo BG2000;
- Prensa de cisalhamento ELE INTERNACIONAL. Modelo D-300A;
- Estufa Quimis. Modelo Q-317B;
- Gabarito de madeira;
- Gabarito metálico;
- Caixa bipartida dotada de placas dentadas e perfuradas;
- Pedras porosas de topo e base e quepe para transmissão de carga
- Molde do corpo de prova
- Extensômetros mecânicos ou transdutores elétricos de deslocamentos;
- Béquer;

E para o ensaio de compressão Proctor Normal foram utilizados os equipamentos a seguir:

- Balança Lider. Modelo B-160;
- Balança Gehaka. Modelo BG2000;
- Estufa Quimis. Modelo Q-317B;
- Prensa hidráulica EMIC;
- Soquete cilíndrico;
- Molde cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup>;
- Peneira nº 4, 8.5 mm a 4.8 mm;
- Extrator de amostras;
- Cápsulas para determinação da umidade;
- Pá de mão;
- Béquer;
- Sacola plástica;

### 3.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

O principal ensaio desse trabalho foi a compactação Proctor Normal. Para este ensaio foram feitas algumas pequenas modificações para atingir o máximo resultado de força normal e tensão normal nas resistências dos corpos de prova.

De modo a promover a melhor reação entre o solo puro e a cal hidratada as amostras compactadas foram mantidas em cura por um período de 7 dias em estufa com temperatura estabilizada e uniforme de 60°C. Tendo em vista que a temperatura poderia alterar o teor de umidade do corpo de prova, dentro da estufa térmica foi mantido um vasilhame com água para manter a umidade dos corpos de prova.

Como comprovação que o teor de umidade não foi alterado, amostras analisadas quanto ao teor de umidade nas duas etapas do processo: no momento em que a água era adicionada à mistura solo-cal (moldagem do corpo de prova) e imediatamente anterior ao rompimento do corpo de prova, após sete dias.

Outra modificação feita no ensaio foi a não reutilização de materiais já rompidos. Isso devido ao fato de o uso do material “virgem” trazer mais veracidade

ao ensaio, ou seja, não utilizar um material anteriormente sob fadiga e compactado. Portanto, foi utilizada uma grande quantidade de material para que todos os vinte corpos de provas fossem feitos com o mesmo material, nas mesmas condições e com a mesma técnica de ensaio.

### 3.4. ENSAIO DE CISALHAMENTO NORMAL

Com o preparo prévio da amostra de solo e os materiais a serem utilizados separados, deu-se início ao ensaio de cisalhamento normal.

Com todas as amostras separadas, e devidamente rotuladas, a organização e precisão foram pontos importantes na execução deste ensaio. Com as amostras secas, a primeira coisa a ser fazer era acrescentar água. O valor de água adicionado às misturas foram os valores de seu teor ótimo, o qual foi encontrado após o ensaio de Proctor Normal.

Após a etapa de umidificar a amostra, era iniciado o processo de moldagem do corpo de prova, para isso foi criado um gabarito para que houvesse a maior precisão do corpo de prova. Além do molde metálico que já acompanha o equipamento da prensa, foi feito um outro molde, este de madeira, para que houvesse a menor perda de material possível, tendo em vista que o peso final do corpo de prova já havia sido escolhido para análise posterior dos dados.

O peso final do corpo de prova foi calculado a partir do peso específico de cada composição solo-cal, esse dado foi retirado a partir do ensaio de Proctor Normal realizado anteriormente.

O corpo de prova era então encaixado na prensa hidráulica, os extensômetros eram todos testados, e a tensão normal era ajustada. Para esse ensaio foram utilizados massas de 5 kg, 10 kg e 20 kg, que representam respectivamente 49,03 kPa, 98,06 kPa e 196,13 kPa.

A primeira etapa do ensaio era o adensamento da amostra, essa etapa durava cerca de 10 minutos, e após o adensamento total do corpo de prova, era iniciada a segunda etapa do ensaio que é o cisalhamento.

Para a etapa do cisalhamento, a prensa aplica uma força na parte superior da caixa bipartida onde se encontra o corpo de prova, e extensômetros medem a força aplicada, assim como o deslocamento.

O ensaio é considerado terminado quando há o rompimento da amostra, que pode ser observada com o gráfico plotado pelo próprio equipamento.

Todos as amostras foram submetidas as mesma condições para que os resultados pudessem ser comparados e analisados de maneira mais genuína.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Apresentação dos resultados do ensaio de proctor normal

Como meio de organização para análise mais fácil e simples dos dados que foram adquiridos durante os ensaios foi criada uma tabela padrão na qual foram inseridas todos os dados. A estrutura básica das tabelas é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Estrutura básica da tabela utilizada para registro dos dados

Amos tra	Pote Nº	Cápsula (g)	Cáp + Solo Úmido (g)	Solo Úmido (g)	Cáp + Solo Seco(g)	Solo Seco (g)	Peso de H <sub>2</sub> O (g)	w	w med
1	1								
	2								
	3								
2	1								
	2								
	3								
3	1								
	2								
	3								
4	1								
	2								
	3								
5	1								
	2								
	3								

Na Tabela 10 observa-se que eram sempre extraídas três amostras para o cálculo do teor de umidade do corpo de prova. Estas amostras eram mantidas na estufa por no mínimo de 48 horas, para que houvesse a total desidratação e maior precisão dos dados coletados. Então era utilizada a média aritmética para a plotagem dos gráficos e desenvolvimento de outros resultados.

Os resultados encontrados para o teor de umidade de todas as amostras estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Tabela com dados da amostra com 0% de cal hidratada

Amostra	Pote Nº	Cápsula (g)	Cáp + Solo Úmido (g)	Solo Úmido (g)	Cáp + Solo Seco(g)	Solo Seco (g)	Peso de H <sub>2</sub> O (g)	Teor de Umidade	Teor de Umidade (Médio)
1	1	6,22	15,72	9,5	14,26	8,04	1,46	18%	
	2	7,63	13,71	6,08	12,61	4,98	1,10	22%	21%
	3	7,67	16,28	8,61	14,67	7,00	1,61	23%	
2	1	6,7	14,78	8,08	12,84	6,14	1,94	32%	
	2	7,9	14,14	6,24	13,07	5,17	1,07	21%	25%
	3	7,48	16,77	9,29	14,96	7,48	1,81	24%	
3	1	7,66	18,29	10,63	15,88	8,22	2,41	29%	
	2	7,5	15,31	7,81	13,67	6,17	1,64	27%	28%
	3	6,47	20,03	13,56	17,03	10,56	3,00	28%	
4	1	7,64	15,23	7,59	13,26	5,62	1,97	35%	
	2	7,51	16,89	9,38	14,33	6,82	2,56	38%	35%
	3	6,47	16,51	10,04	14,00	7,53	2,51	33%	
5	1	7,64	16,32	8,68	13,78	6,14	2,54	41%	
	2	7,51	18,43	10,92	15,09	7,58	3,34	44%	43%
	3	6,47	17,22	10,75	14,02	7,55	3,20	42%	

Como análise da Tabela 11 é possível observar que houve uma pequena diferença dos teores de umidade que estavam previstos (20, 25, 30, 35 e 40%), mesmo assim foi possível aproximar destes e os resultados não foram descartados.

A Tabela 12 mostra os resultados para a amostra com 2% de cal.

Tabela 12 - Tabela com dados da amostra com 2% de cal hidratada

Amostra	Pote Nº	Cápsula (g)	Cáp + Solo Úmido (g)	Solo Úmido (g)	Cáp + Solo Seco(g)	Solo Seco (g)	Peso de H <sub>2</sub> O (g)	Teor de Umidade	W (Médio)
1	1	6,5	14,5	8	13,13	6,63	1,37	21%	
	2	7,7	20,1	12,4	17,95	10,25	2,15	21%	21%
	3	6,8	18,4	11,6	16,32	9,52	2,08	22%	
2	1	8,2	17,9	9,7	15,89	7,69	2,01	26%	
	2	8,3	18	9,7	15,98	7,68	2,02	26%	26%
	3	7,6	19	11,4	16,66	9,06	2,34	26%	
3	1	8	16,9	8,9	14,79	6,79	2,11	31%	
	2	6,8	18,7	11,9	15,87	9,07	2,83	31%	31%
	3	6,9	20,3	13,4	17,25	10,35	3,05	29%	
4	1	7,8	18,8	11,0	15,80	8,00	3,00	38%	
	2	8	19,1	11,1	15,99	7,99	3,11	39%	38%
	3	7,5	24,8	17,3	20,06	12,56	4,74	38%	
5	1	6,9	20,9	14,0	16,89	9,99	4,01	40%	
	2	7,7	22,8	15,1	18,49	10,79	4,31	40%	40%
	3	7,8	22,7	14,9	18,50	10,70	4,20	39%	

Para a amostra que continha 5% de cal hidratada houve um pequeno erro na amostra de número 4, onde o esperado era que fosse hidratada com 35% de água, e na verdade acabou sendo por 38%, porém não foi uma falha que prejudicou o material e/ou o ensaio todo, foram utilizados todos os dados pois não havia problema nenhum nesse pequeno desvio.

A Tabela 13 mostra os resultados para a amostra com 5 % de cal.

Tabela 13 - Tabela com dados da amostra com 5% de cal hidratada

Amostra	Pote Nº	Cápsula (g)	Cáp + Solo Úmido (g)	Solo Úmido (g)	Cáp + Solo Seco(g)	Solo Seco (g)	Peso de H <sub>2</sub> O (g)	Teor de Umidade	Teor de Umidade (Médio)
1	1	6,89	17,46	10,57	15,59	8,70	1,87	21%	
	2	7,72	17,82	10,1	16,01	8,29	1,81	22%	21%
	3	7,09	17,17	10,08	15,45	8,36	1,72	21%	
2	1	7,45	12,81	5,36	11,78	4,33	1,03	24%	
	2	6,69	14,24	7,55	12,79	6,10	1,45	24%	24%
	3	7,91	11,90	3,99	11,10	3,19	0,80	25%	
3	1	7,54	15,44	7,9	13,50	5,96	1,94	33%	
	2	7,17	20,29	13,12	17,16	9,99	3,13	31%	32%
	3	11,33	27,08	15,75	23,32	11,99	3,76	31%	
4	1	7,74	21,06	13,32	17,60	9,86	3,46	35%	
	2	6,79	19,93	13,14	16,60	9,81	3,33	34%	35%
	3	7,53	20,64	13,11	17,13	9,6	3,51	37%	
5	1	7,00	19,60	12,60	15,98	8,98	3,62	40%	
	2	7,85	20,12	12,27	16,61	8,76	3,51	40%	40%
	3	7,84	19,82	11,98	16,35	8,51	3,47	41%	
6	1	7,51	14,12	6,61	12,84	5,33	1,28	24%	
	2	6,82	14,86	8,04	13,28	6,46	1,58	24%	24%
	3	6,89	13,28	6,39	12,02	5,13	1,26	25%	

A Tabela 14 mostra os resultados para a amostra com 10 % de cal.

Tabela 14 - Tabela com dados da amostra com 10% de cal hidratada

Amostra	Pote Nº	Cápsula (g)	Cáp + Solo Úmido (g)	Solo Úmido (g)	Cáp + Solo Seco(g)	Solo Seco (g)	Peso de H <sub>2</sub> O (g)	Teor de Umidade	Teor de Umidade (Médio)
1	1	13,23	27,09	13,86	24,68	11,45	2,41	21%	
	2	13,56	23,96	10,40	22,24	8,68	1,72	20%	21%
	3	12,44	26,59	14,15	24,11	11,67	2,48	21%	
2	1	6,65	13,52	6,87	12,11	5,46	1,41	26%	
	2	7,65	14,54	6,89	13,15	5,50	1,39	25%	25%
	3	5,93	13,15	7,22	11,69	5,76	1,46	25%	
3	1	7,04	18,54	11,5	15,90	8,86	2,64	30%	
	2	6,30	15,82	9,52	13,67	7,37	2,15	29%	30%
	3	7,93	15,21	7,28	13,55	5,62	1,66	30%	
4	1	11,49	21,36	9,87	18,85	7,36	2,51	34%	
	2	7,82	13,58	5,76	12,10	4,28	1,48	35%	34%
	3	11,97	25,80	13,83	22,30	10,33	3,50	34%	
5	1	7,92	18,87	10,95	15,72	7,80	3,15	40%	
	2	7,60	14,74	7,14	12,71	5,11	2,03	40%	40%
	3	6,76	12,74	5,98	11,02	4,26	1,72	40%	

Para a amostra de 10% de cal hidratada todos os resultados foram satisfatórios, como pode ser observado na Tabela 14, e dentro dos padrões de análise.

Com a moldagem do corpo de prova foi possível também, a partir do volume do molde cilíndrico e da massa de solo utilizado, encontrar o peso específico seco e úmido de todas as amostras.

Para a amostra com 0% de cal hidratada (tabela 15);

Tabela 15 - Tabela de  $\gamma$  e  $\gamma_d$  das amostras de 0% cal hidratada

Peso ( Solo úmido ) (g)	1540	1744	1754	1826	1772
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,543973803	1,748500202	1,758526006	1,830711794	1,776572453
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,275141791	1,393263233	1,372747197	1,352998072	1,245798072
Teor de Umidade (w)	21%	25%	28%	35%	43%

Para a amostra com 2% de cal hidratada (tabela 16);

Tabela 16 - Tabela de  $\gamma$  e  $\gamma_d$  das amostras de 2% cal hidratada

Peso ( Solo úmido ) (g)	1350	1455	1680	1685	1630
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,353483528	1,458754469	1,684335057	1,689347959	1,634206038
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,117079681	1,156922189	1,289869447	1,223684853	1,169135955
Teor de Umidade (w)	21%	26%	31%	38%	40%

Para a amostra com 5% de cal hidratada (tabela 17);

Tabela 17 - Tabela de  $\gamma$  e  $\gamma_d$  das amostras de 5% cal hidratada

Peso (Solo úmido) (g)	1370	1530	1660	1680	1635	1505
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,37353513	1,5339479	1,66428345	1,68433505	1,6392189	1,508883
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,13233946	1,2349421	1,26324158	1,24581384	1,1676572	1,213466
Teor de Umidade (w)	21%	24%	32%	35%	40%	24%

O parâmetro que ficou inadequado e fora do limite de erro da análise foi justamente o peso específico seco da amostra 2,(observar Tabela 17). Por isso foi feito o ensaio nesse caso e encontrado então um novo peso específico seco que por sua vez estava se enquadrando melhor a proposta.

Para a amostra com 10% de cal hidratada (Tabela 18);

Tabela 18 - Tabela de  $\gamma$  e  $\gamma_d$  das amostras de 10% cal hidratada

Peso ( Solo úmido ) (g)	1365	1495	1600	1665	1605
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,368522234	1,498857685	1,604128626	1,669296351	1,609141528
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,133774978	1,194486181	1,238688555	1,243996389	1,148057711
Teor de Umidade (w)	21%	25%	30%	34%	40%

A análise das Tabelas 15, 16, 17 e 18 pode ser feita de uma forma global enfatizando que os dados encontrados estavam adequados, ou refeitos até enquadrar no limite de erro, e são reais para análise do trabalho.

Um parâmetro importante para qualquer análise de mecânica dos solos é a curva que relaciona o peso específico seco com o teor de umidade, para assim encontrar o teor de umidade ótimo de uma amostra. Essa curva é conhecida por curva de compactação do solo ( $\gamma_d \times w$ ). Para a plotagem desta curva são

necessários os cinco dados coletados das amostras e a utilização da curva de dispersão para melhor ajuste do gráfico.

Como resultados desta análise foram obtidos gráficos que foram divididos pela porcentagem de cal hidratada na amostra. O primeiro caso exposto pela Figura 9 foi a amostra com 0% de cal hidratada.

O primeiro gráfico a ser apresentado é o gráfico da curva de compactação do solo com 0% de cal hidratada (Figura 10);

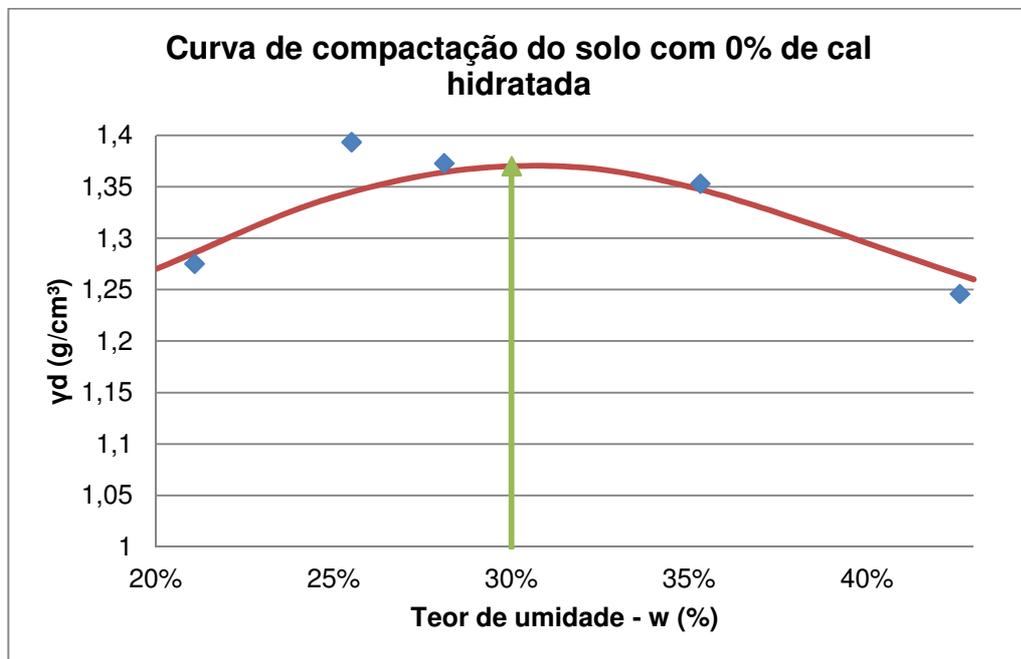


Figura 10 - Curva de compactação do solo com 0% de cal hidratada

Após análise do gráfico, é possível observar uma pequena dispersão do ponto relativo à amostra 2, porém está dentro dos padrões. A linha vertical representa o teor de umidade ótima da mistura solo-cal, sendo esse teor de aproximadamente 30%.

O segundo gráfico a ser apresentado é o gráfico da curva de compactação do solo com 2% de cal hidratada (Figura 11), sendo possível observar que o teor de umidade sofre um pequeno deslocamento para a direita quando comparado ao gráfico anterior.

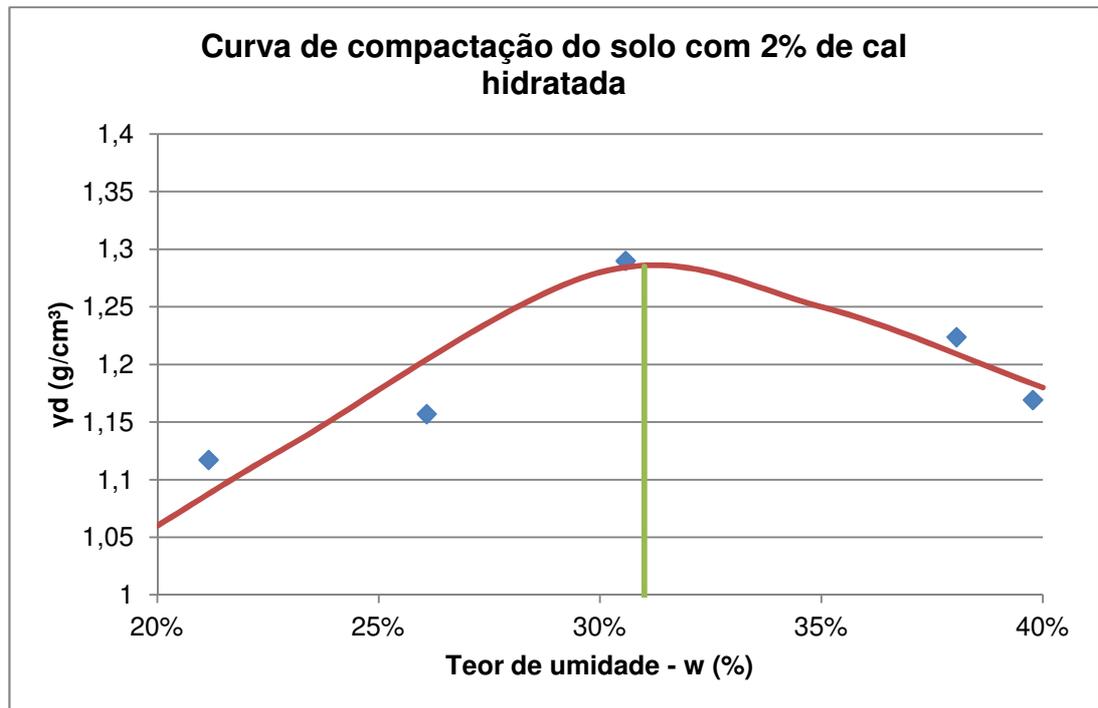


Figura 11 - Curva de compactação do solo com 0% de cal hidratada

Como análise da Figura 11 é possível tomar como principal mudança do acréscimo de cal hidratada à mistura, o aumento do teor de umidade ótimo, que nessa mistura passou a ser aproximadamente 31%. Isso significa que a cal hidratada age na mistura de maneira a absorver uma quantidade de água, evitando assim que o solo se torne supersaturado.

Outro aspecto interessante para análise é observar que o  $\gamma_{dmax}$  teve um decréscimo quando comparado à amostra anterior. Uma diminuição geral do  $\gamma_d$  significa que a amostra perde seu peso sem alterar seu volume, ou seja, se torna um material mais leve sem diminuir propriedades volumétricas.

O terceiro gráfico a ser apresentado é o gráfico que expõe a curva de compactação da amostra com 5% de cal hidratada (Figura 12), mais uma vez é possível analisar os mesmo aspectos já citados e observar que há uma certa linearidade das alterações que ocorrem com a cal hidratada.

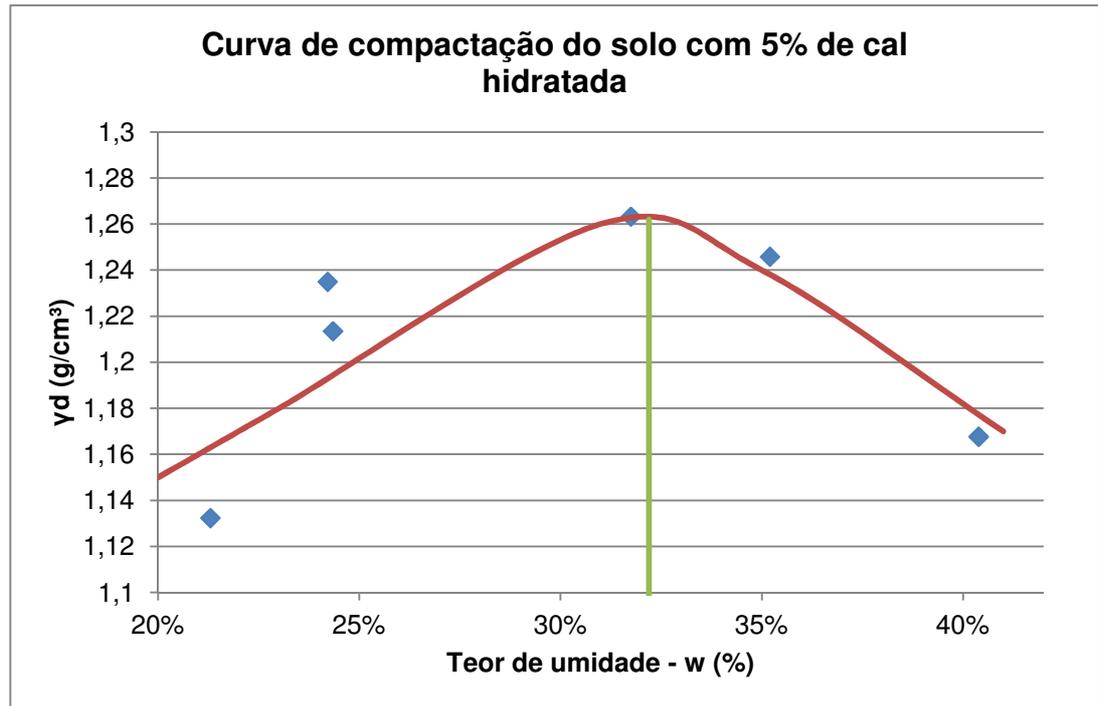


Figura 12 - Curva de compactação do solo com 5% de cal hidratada

Novamente ocorrem as mesmas particularidades já comparadas anteriormente, há um aumento do teor de umidade ótima, que agora passa para aproximadamente 32% e o  $\gamma_{dmax}$  passa para 1,26, tendo uma redução de aproximadamente 2% quando comparado ao mesmo índice na mistura com 2% de cal hidratada.

Neste gráfico é possível observar dois pontos para o teor de umidade de 20%, isso devido ao fato já comentado anteriormente, que um dos pontos foi descartado e refeito devido a uma certa dúvida criada sobre o resultado. Para plotagem do gráfico foi utilizado o ponto cujo valor se encaixou melhor na curva de dispersão da amostra.

O gráfico a seguir apresentado (Figura 13) traz os dados e a curva de compactação da amostra com 10% de cal hidratada, utilizaremos as mesmas propriedades já vistas para que haja uma boa comparação dos valores e diferença de atributos para a nova mistura.

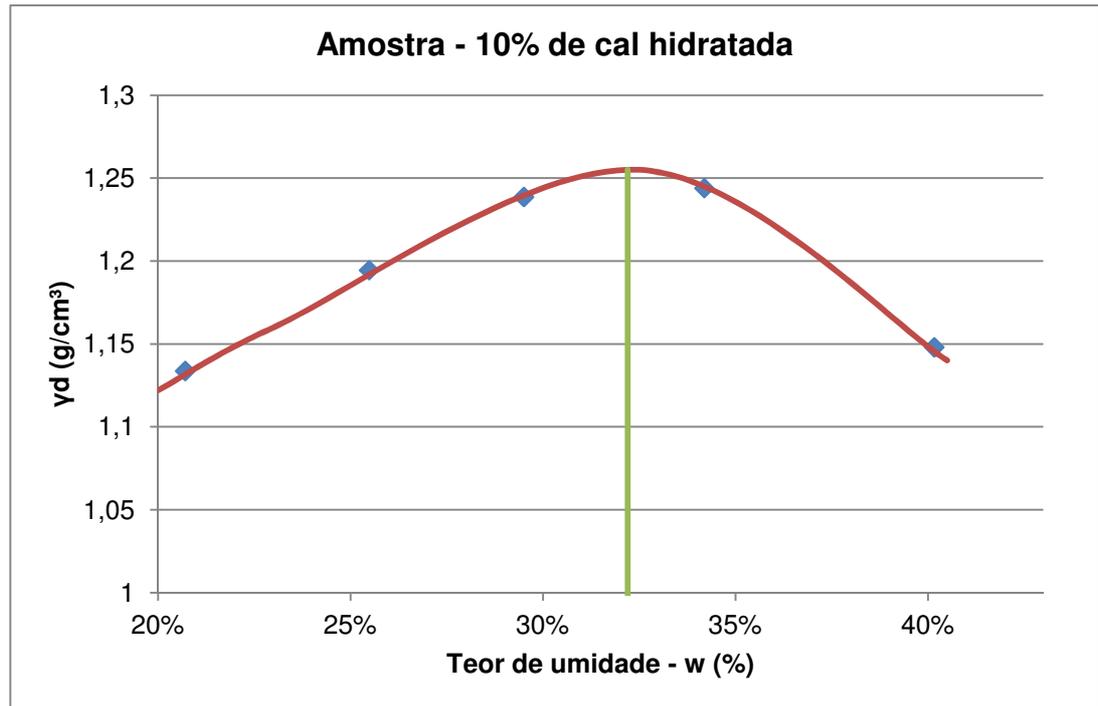


Figura 13 - Curva de compactação do solo com 10% de cal hidratada

Por fim, nas análises de peso específico aparente seco, é possível comparar a amostra de 10% de cal hidratada à todas as outras amostras moldadas e perceber que há um certo destaque no que diz respeito ao teor de umidade ótimo, que mais uma vez aumentou, agora chegando aproximadamente aos 33%. O peso específico aparente seco sofreu bastante influência durante o acréscimo de cal hidratada, o qual teve uma diminuição contínua sempre que houvesse um aumento do teor de cal hidratada na mistura. O  $\gamma_d$  passou de 1,37 g/cm<sup>3</sup> quando não havia nenhuma porcentagem de cal hidratada junto à mistura, decaindo até atingir o valor mínimo de 1,25 g/cm<sup>3</sup> quando junto ao solo estavam misturados 10% de cal hidratada.

Com o corpo de prova analisado e todas as informações necessárias extraídas, o corpo de prova era encaminhado para a máquina universal de ensaios na qual rompiam-se e assim encontradas sua tensão normal e compressão máxima. Os dados encontrados foram organizados na Tabela 19 onde os valores hachurados representam os maiores valores de cada composição solo-cal.

Tabela 19 - Dados de compressão e tensão normal amostras

% de Cal	Número do CP	Força (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	w (%)
0	1	1857,7	0,24	21%
0	2	7460,93	0,95	25%
0	3	7762,18	0,99	28%
0	4	12823,16	1,63	35%
0	5	341,42	0,04	43%

2	1	994,12	0,13	21%
2	2	3614,99	0,46	26%
2	3	13485,91	1,72	31%
2	4	11196,42	1,43	38%
2	5	9619,88	1,22	40%

5	1	1104,58	0,14	21%
5	2	5372,27	0,68	24%
5	3	11126,13	1,42	32%
5	4	14600,53	1,86	35%
5	5	13676,7	1,74	40%

10	1	3444,28	0,44	21%
10	2	12933,62	1,65	25%
10	3	20404,59	2,6	30%
10	4	25847,15	3,29	34%
10	5	10121,96	1,29	40%

Como forma de análise dos dados acima expostos tem-se como parâmetros a quantidade de cal hidratada adicionada ao solo e a tensão máxima. Os valores de resistência mecânica à compressão atingiram valores de 1,63 MPa quando foi ensaiado o solo puro, sem adição de cal hidratada, essa tensão aumentou juntamente com o aumento da cal hidratada na mistura. Ao misturar 2% de cal hidratada atingiu-se o valor de 1,72 MPa para a amostra de número 3, com a umidade de 31%. Para uma terceira porcentagem de cal hidratada, agora com 5%, houve novamente um aumento tímido com relação a tensão máxima adquirida, atingindo 1,86 MPa na amostra de número 4 e um teor de umidade de 35%. Para finalizar os ensaios, atingiu-se o maior valor de tensão aos 10% de cal hidratada, na amostra de número 4 com teor de umidade de 34%. O valor máximo atingido foi de

3,29 MPa, expressivo se comparado à tensão inicial de 1,63 MPa, cerca de 100% de aumento.

Tendo em vista que parte do trabalho foi o de encontrar o teor de umidade ótimo de cada mistura, pode-se observar alguma relação que há entre o teor de umidade ótimo e o maior valor encontrado para tensão em cada uma das misturas.

No primeiro caso, onde não havia mistura da cal hidratada, foi encontrado um teor de umidade ótimo de 30%. Já uma maior tensão foi observada na amostra número 4 onde o teor de umidade era de 35%. Não houve nenhuma amostra rompida com exatos 30% de umidade, porém não é possível relacionar a aproximação do teor de umidade ótimo com o aumento gradual da tensão.

Já no segundo caso, onde a mistura de cal hidratada representava 2% da mistura total, foi encontrado um teor de umidade ótimo de 31%, a mesma porcentagem encontrada para a maior tensão. Neste caso, houve total relação entre o maior valor de tensão encontrado com o teor de umidade ótimo.

Para o terceiro caso, onde a mistura de cal hidratada era de 5% da massa total da mistura, foi encontrado um teor de umidade ótimo de 32%, enquanto por outro lado, a maior tensão foi encontrada aos 35% de umidade. E neste caso houve uma amostra com exatos 32%, onde foi atingido 1,42 MPa, um resultado inferior ao 1,86 MPa encontrado aos 35% de teor de umidade. Logo, neste caso não houve relação alguma entre teor de umidade ótimo e maior tensão.

No último caso, onde a massa de cal hidratada representava 10% da mistura total solo-cal, foi encontrado um teor de umidade ótimo 33% e o maior valor de tensão foi encontrado na amostra de número 4, onde o teor de umidade era 34%, considerando um pequeno erro devido ao arredondamento do teor de umidade e por ser uma média, é possível considerar como se houvesse, neste caso, uma relação direta com a maior tensão encontrada com o teor de umidade ótimo, assim como no segundo caso (2% de cal hidratada).

Como resumo dessa comparação entre teor de umidade ótimo e máxima tensão, há uma relação entre eles, tendo em vista que todos os valores ficaram muito próximos, quando não iguais, e é aceitável ter uma pequena tolerância quando se trata de médias aritméticas. Portanto, é notável a relação de que quanto mais próximo do teor de umidade ótimo, maiores serão os valores encontrados para as tensões de ruptura à compressão.

Para melhor visualização dos valores de tensão máxima, foi plotado um gráfico (Figura 14) com todos os dados coletados.

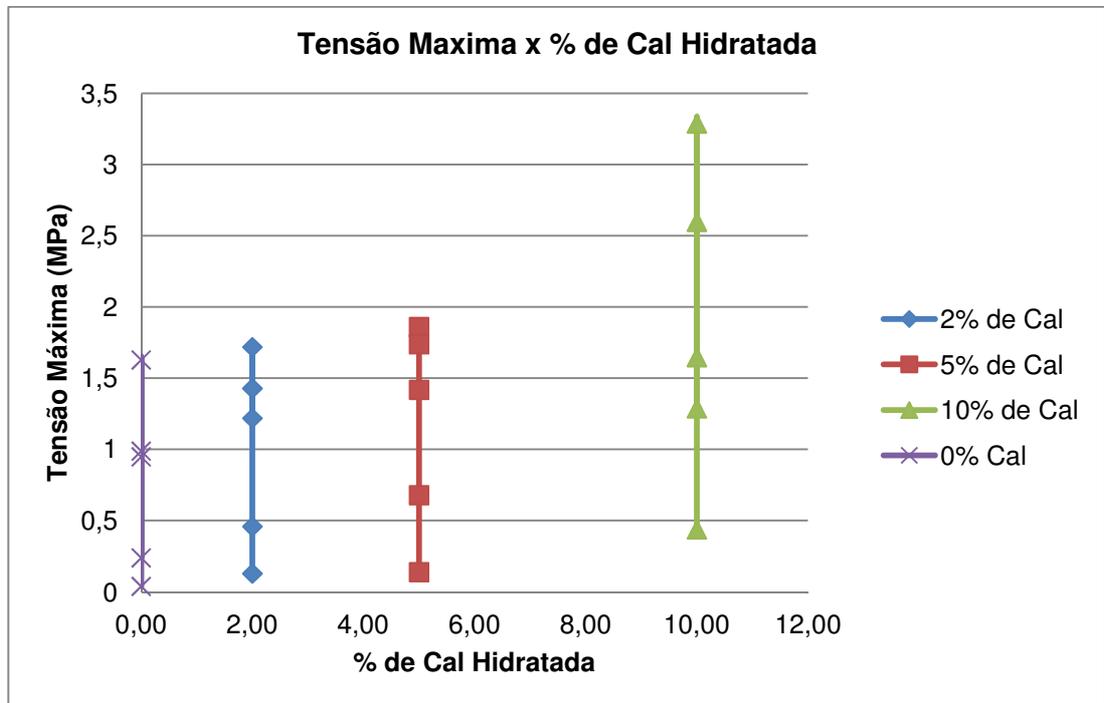


Figura 14 - Tensões máximas de todas as amostras

Como resumo das tensões, o gráfico acima demonstra todas as tensões encontradas de todas as amostras, para evidenciar mais uma vez como a relação cal hidratada x tensão é totalmente favorável para qualquer efeito que se queira. Quanto maior foi o uso da cal hidratada, maior foi a tensão máxima encontrada.

Uma propriedade importante como objeto de estudo para este trabalho foi a densidade relativa dos grãos. Os resultados encontrados para esta propriedade são apresentados, na Tabela 20, abaixo.

Tabela 20 - Densidade relativa dos grãos

	Porcentagem de cal hidratada na amostra (%)			
	0	2	5	10
GS	2,434874263	2,434887056	2,461970866	2,70676488

A densidade relativa do grão é a razão entre a massa ou o peso específico da parte sólida e a massa ou o peso específico de igual volume de água pura à 4°C,

é possível analisar esse resultado de maneira lógica e observar que quanto mais partículas sólidas (cal hidratada) são adicionadas, maior será a densidade dos grãos.

#### 4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

Para início dos ensaios foi necessário que houvesse uma padronização de todas amostras, devido a diferença de teor de umidade ótimo e do peso específico de cada amostra, uma tabela foi criada para que houvessem parâmetros de comparação. A tabela 21 apresenta as dimensões do corpo de prova utilizado, essa dimensão é padronizada.

Tabela 21 – Dimensões do corpo de prova

ALTURA CP	2	cm
LADO A	10	cm
LADO B	10	cm
ÁREA	100	cm <sup>2</sup>
VOLUME	200	cm <sup>3</sup>

A tabela 22, apresenta dados dos 4 (quatro) tipos de amostra que foram utilizados, lembrando que para cada uma das amostras foram feitos 3 (três) ensaios, com variação na tensão normal.

Tabela 22 – Massa úmida do corpo de prova e teor de umidade ótimo

	0% Cal	2% Cal	5% Cal	10% Cal
ps	1,37	1,285	1,262	1,255
Wot (%)	0,30	0,31	0,32	0,33
Massa Seca CP (g)	274,0	257,0	252,4	251,0
Massa Seca a separar (g)	301,4	282,7	277,64	276,1
Água a acrescentar (g)	90,4	87,6	88,8	91,1
Massa úmida misturada (g)	391,8	370,3	366,5	367,2
<b>Massa úmida do Cp (g)</b>	<b>356,2</b>	<b>336,7</b>	<b>332,7</b>	<b>333,1</b>

Os resultados encontrados permitem que seja elaborada a curva tensão x deformação do material. A curva tensão x deformação é não-linear, podendo ou não apresentar pico bem definido. Todos os solos apresentam curvas tensão x deformação que variam em função do confinamento.

Existem diferentes formas de se caracterizar ruptura do material a partir de curvas tensão x deformação:

- Tensão de pico;
- Máxima razão das tensões principais;
- Deformação limite;
- Estado crítico, a partir do qual a deformação volumétrica passam a ser nulas e;
- Resistência residual.

Nesta monografia foi considerada a ruptura do material a partir do momento que não foi necessário um aumento na tensão cisalhante para que haja um deslocamento, ou ainda, quando o material chega a seu estado crítico.

As Figuras 15, 16, 17 e 18 são, respectivamente, os gráficos tensão x deformação das amostras de 0%, 2%, 5% e 10% de cal hidratada, após o adensamento com uma tensão normal de 49,03 kPa.

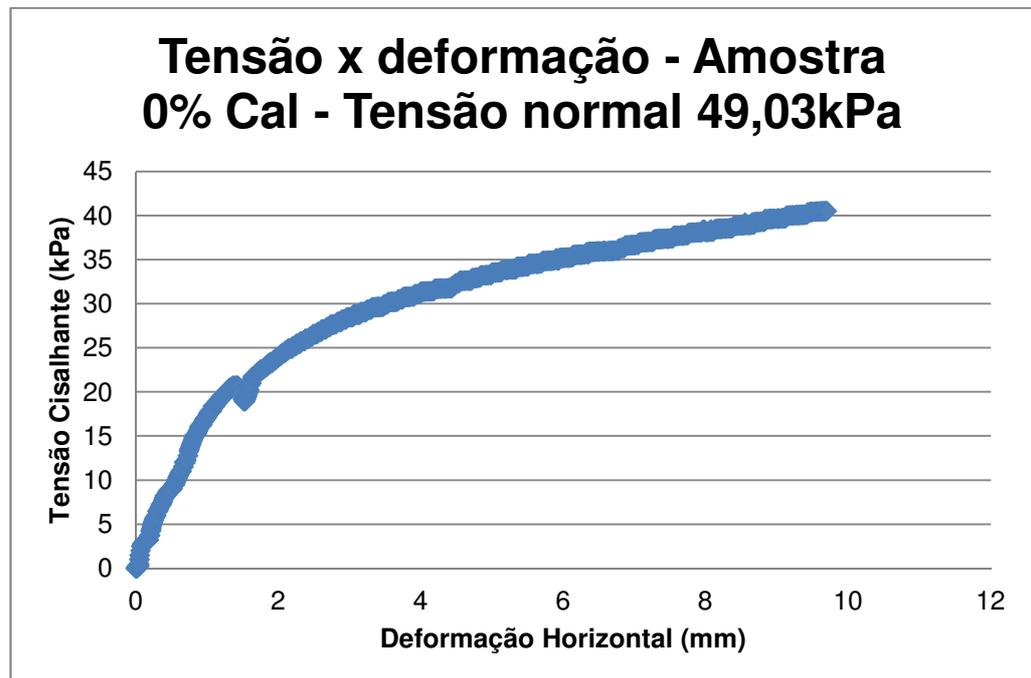


Figura 15 – Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa

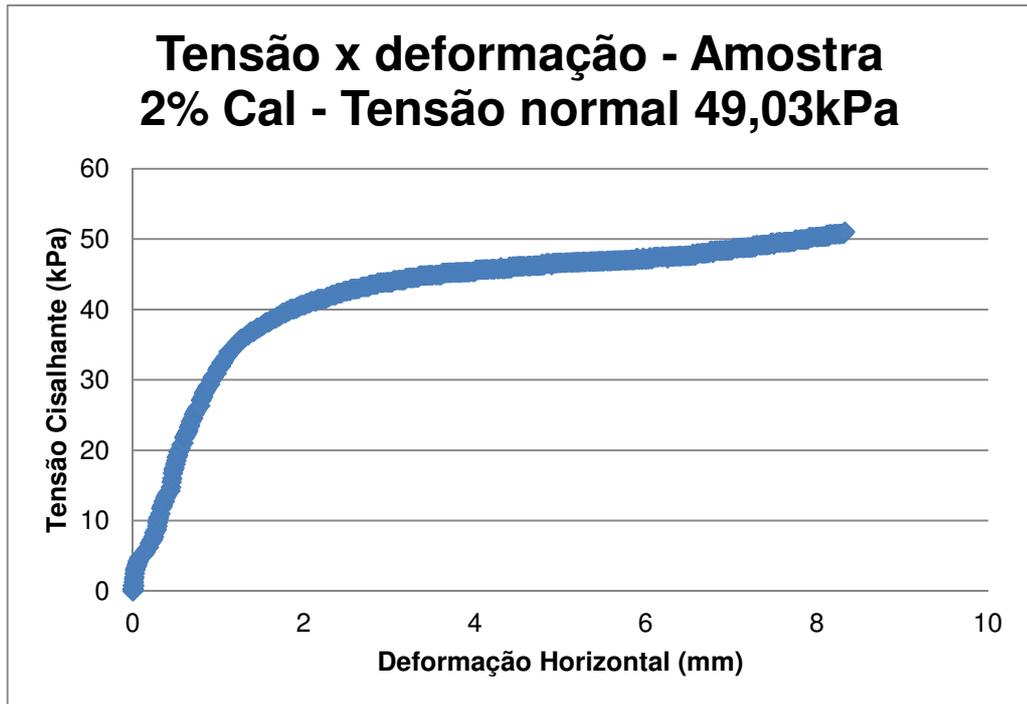


Figura 16 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa

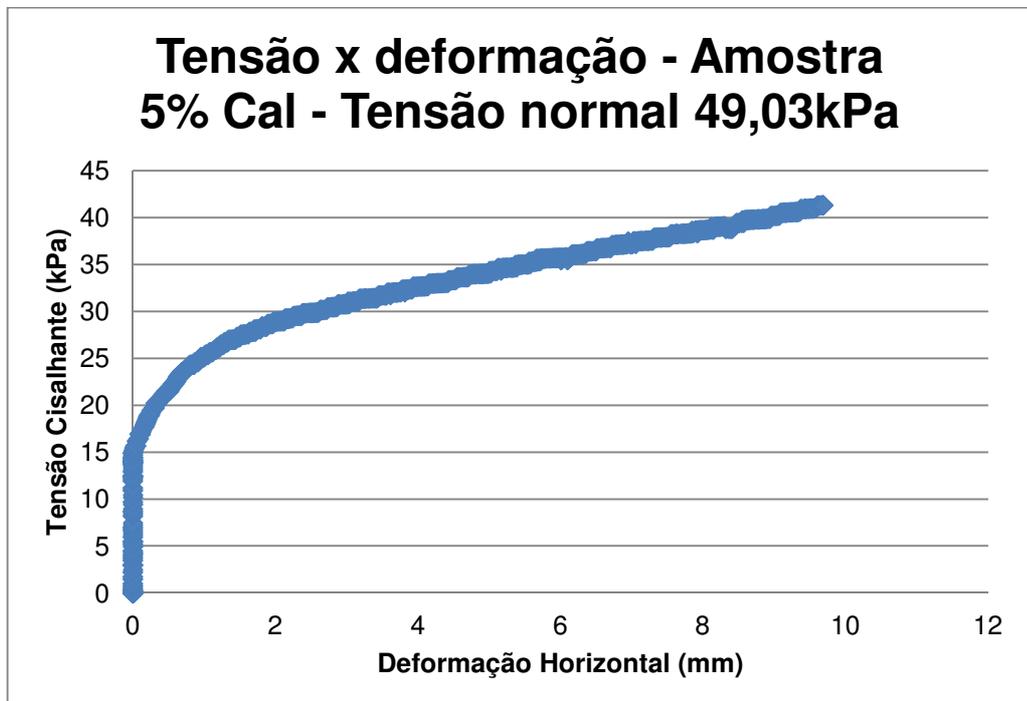


Figura 17 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa

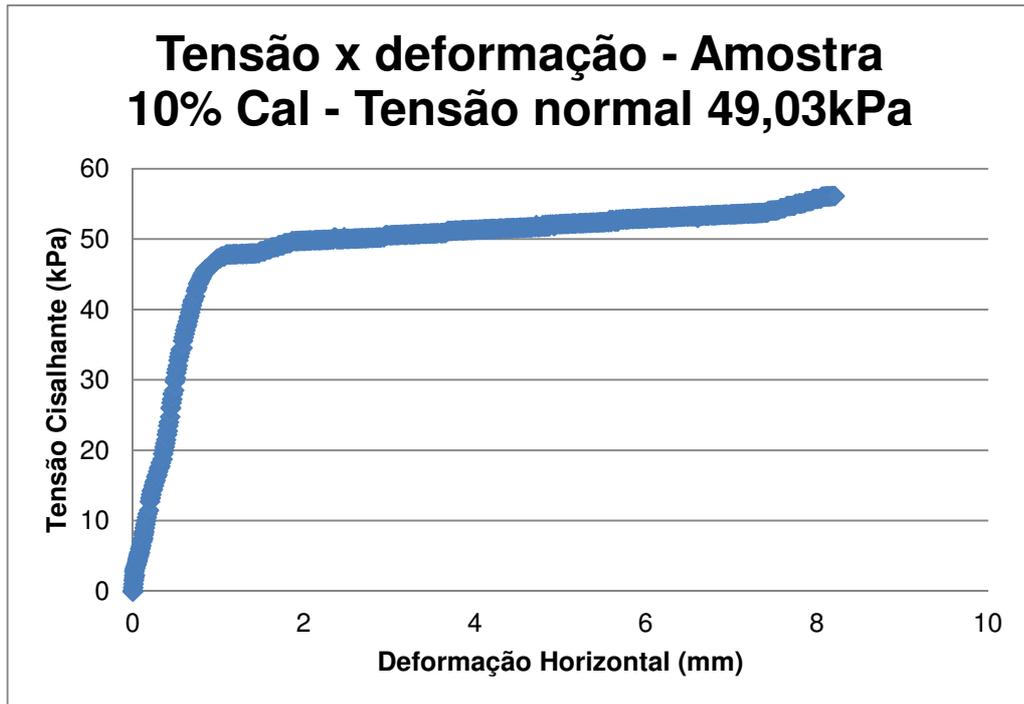


Figura 18 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 49,03 kPa

Como base de análise é necessário estabilizar uma deformação horizontal para todos os casos, e assim poder analisar os resultados. Neste caso foi tomado como base a deformação horizontal de 8,5 (oito e meio) milímetros.

Ao observar os resultados obtidos na Figura 15, tem-se que para a deformação pré definida foi encontrado uma tensão cisalhante de 38 kPa. Ao ser comparada com os dados da Figura 16, onde foi atingida uma tensão de cisalhamento de aproximadamente 50 kPa, demonstra a mudança devido a adição de cal hidratada na amostra de solo.

Com o aumento da porcentagem de cal hidratada, agora com 5% (Figura 17) houve uma diminuição quando comparada a amostra com 2% de cal hidratada. O aumento da tensão cisalhante era esperado, mas não foi este o resultado obtido. Para a amostra com 5% de cal hidratada foi encontrada uma tensão cisalhante de aproximadamente 39,43 kPa.

Para a amostra de 10% de cal hidratada (Figura 18) houve novamente um aumento na força cisalhante, dessa vez bem significativa e atingindo os 56 kPa.

Para esta amostra foi encontrado o maior valor da força cisalhante, houve um acréscimo de 47% quando comparado ao valor encontrado na amostra de solo pura.

As Figuras 19, 20, 21 e 22 são, respectivamente, os gráficos tensão x deformação das amostras de 0%, 2%, 5% e 10% de cal hidratada, após o adensamento com uma tensão normal de 98,06 kPa.

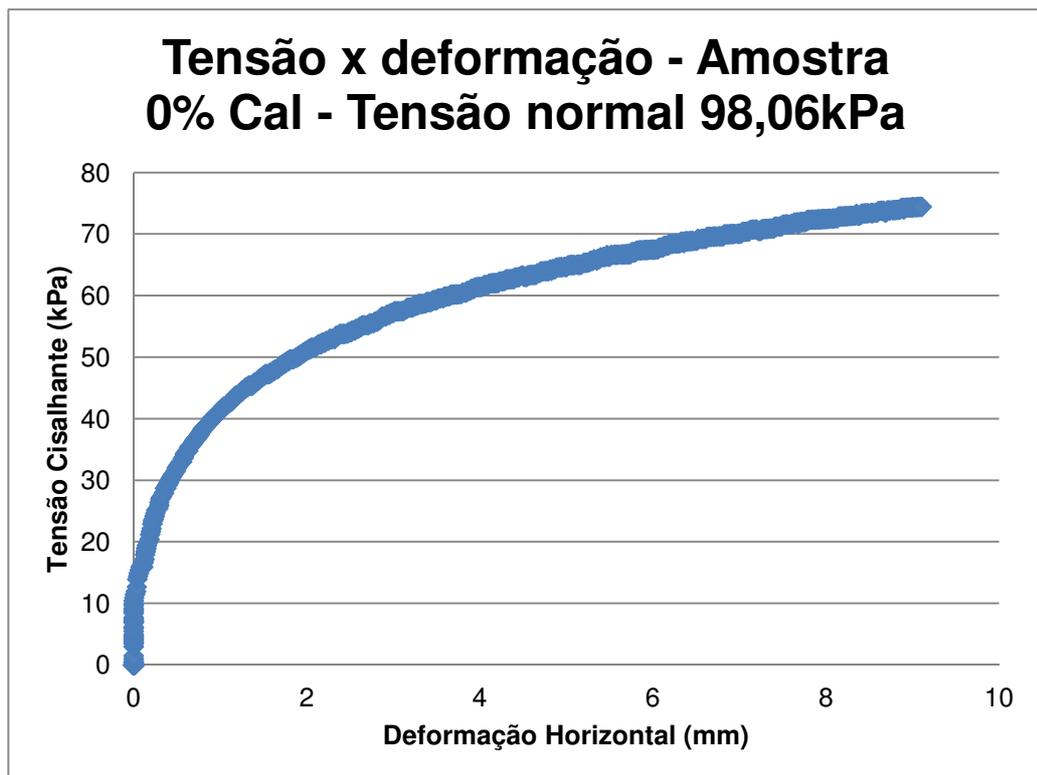


Figura 19 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa

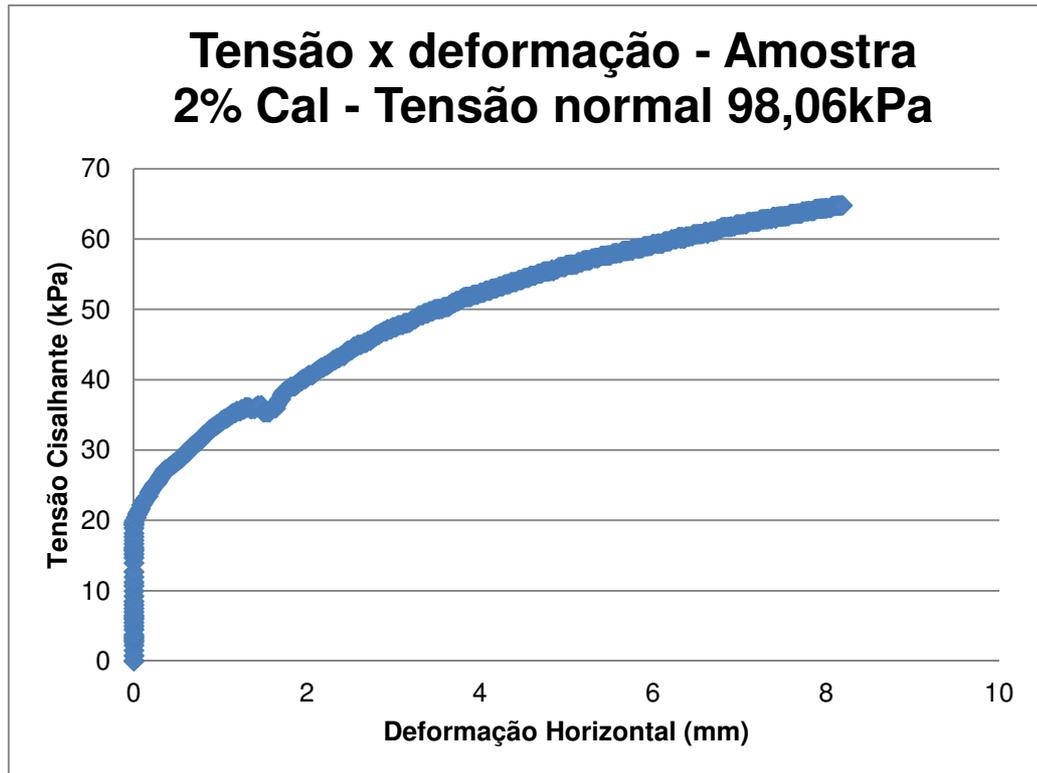


Figura 20 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 2% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa

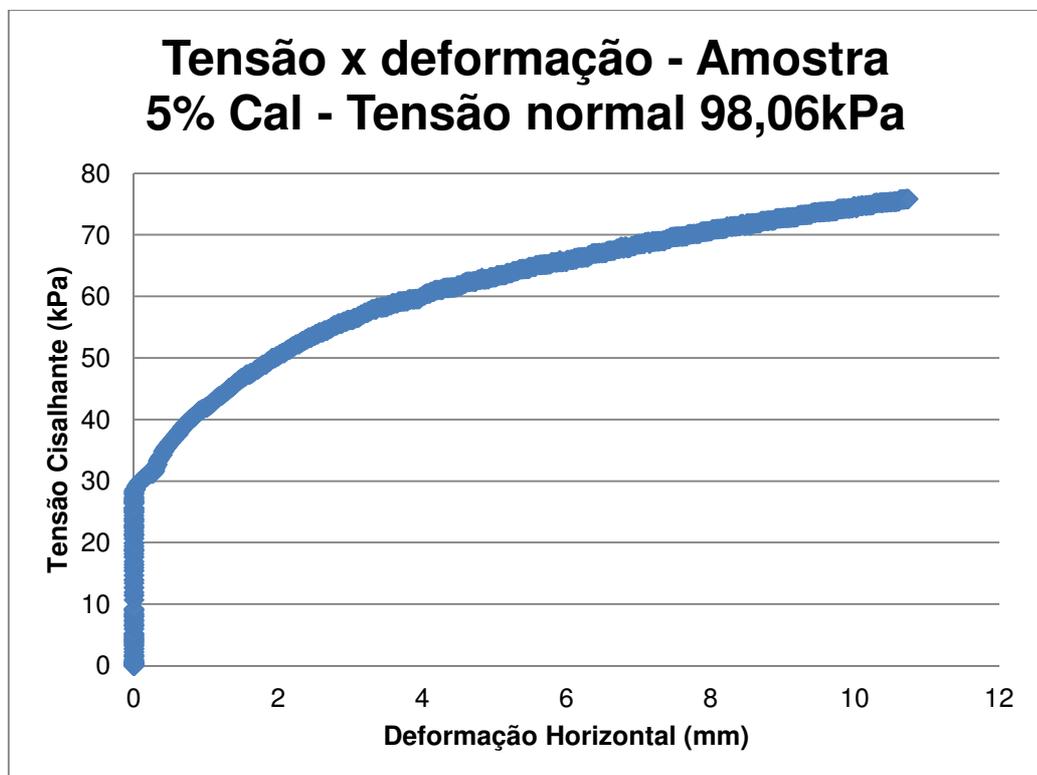


Figura 21 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 5% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.

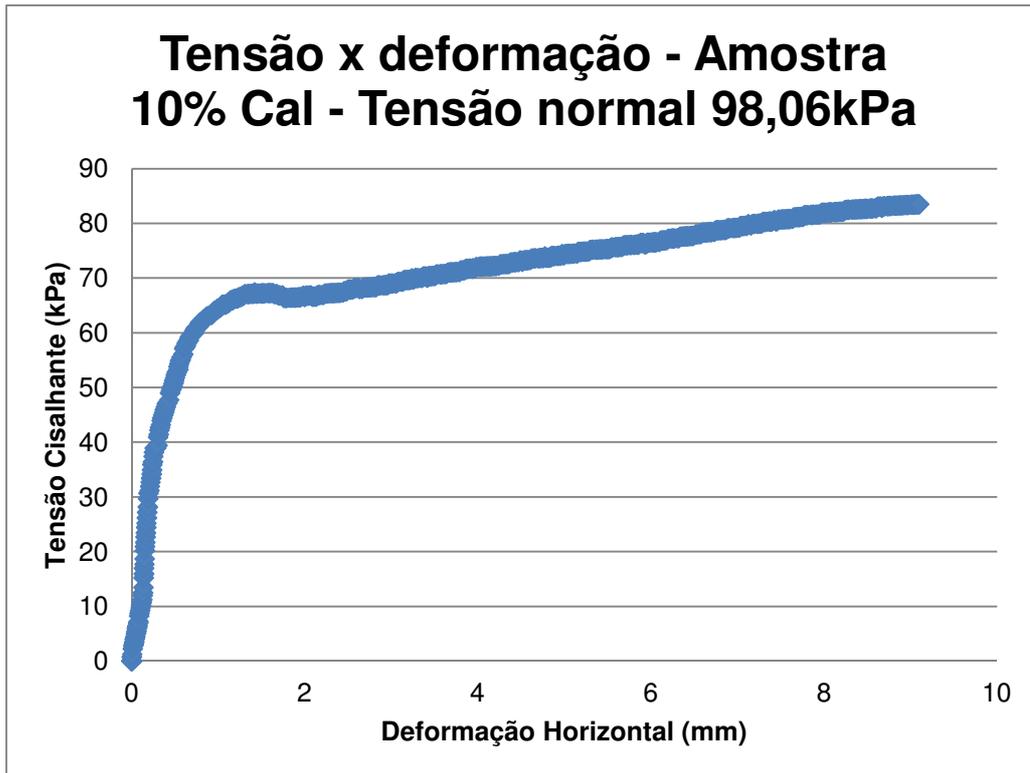


Figura 22 - Gráfico tensão x deformação para as amostras de solo com 10% cal hidratada e com tensão normal de 98,06 kPa.

Com todos os dados plotados em gráficos, a análise dos mesmos fica mais clara e palpável. O primeiro caso estudado foi o solo puro, onde para uma deformação de 8,5 (oito e meio) milímetros houve uma tensão cisalhante de 73,42 kPa (Figura 19). Esse valor aumentou muito quando comparado a mesma amostra porém com tensão normal de 49,03 kPa devido a melhor compactação do material, quanto maior for a tensão normal mais compacto o solo se torna. E quando comparado ao valor encontrado para a mesma deformação porém com a mistura solo-cal com 2% de cal hidratada (Figura 20), se torna intrigante o resultado de apenas 64 kPa. Nesta comparação não houve um acréscimo de resistência ao cisalhamento quando foi adicionado cal hidratada.

O aumento da tensão cisalhante foi encontrado na análise de dados da amostra de 5% de cal hidratada (Figura 21), onde foi medida uma tensão cisalhante de 71,80 kPa.

Ao analisar a Figura 22, fica evidente e explícito que o aumento da porcentagem de cal hidratada aumenta a resistência ao cisalhamento da amostra.

Para esta amostra foi encontrado um valor de 82,68 kPa, que ao ser comparado com a amostra pura de solo, corresponde a um acréscimo de 12%.

Por fim a análise das tensões de cisalhamento geradas pelo ensaio, dessa vez com uma tensão normal de 198,43 kPa.

As Figuras 23, 24, 25 e 26 são, respectivamente, os gráficos tensão x deformação das amostras de 0%, 2%, 5% e 10% de cal hidratada, após o adensamento com uma tensão normal de 198,43 kPa.

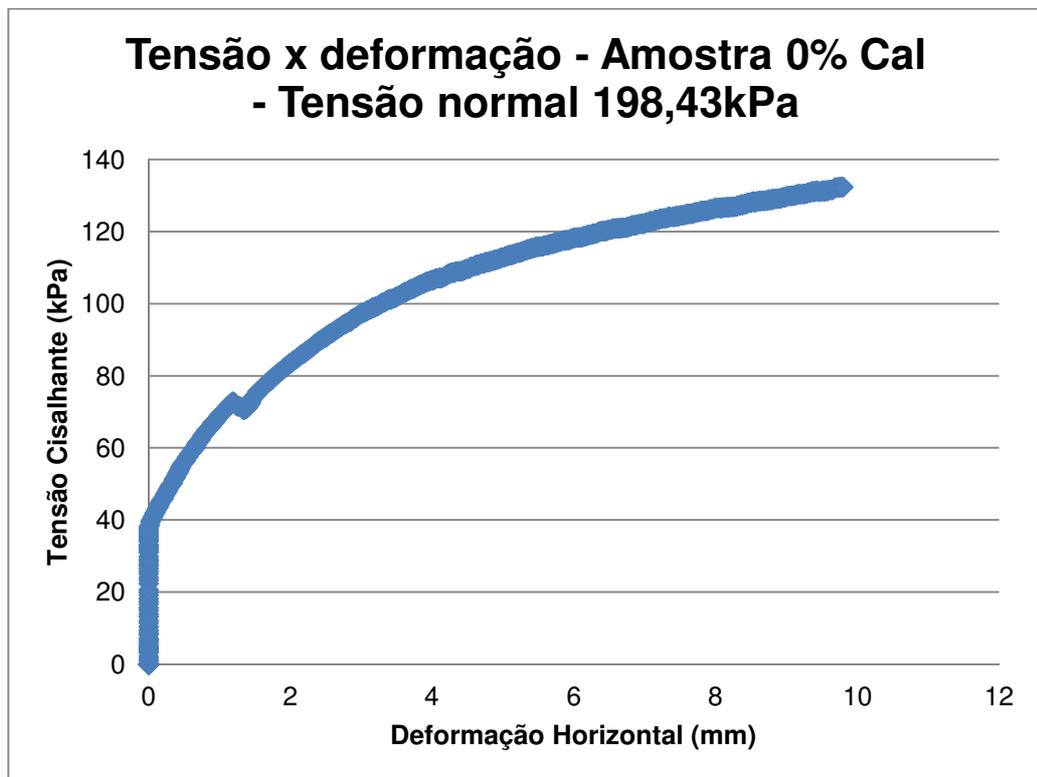


Figura 23 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 0% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.

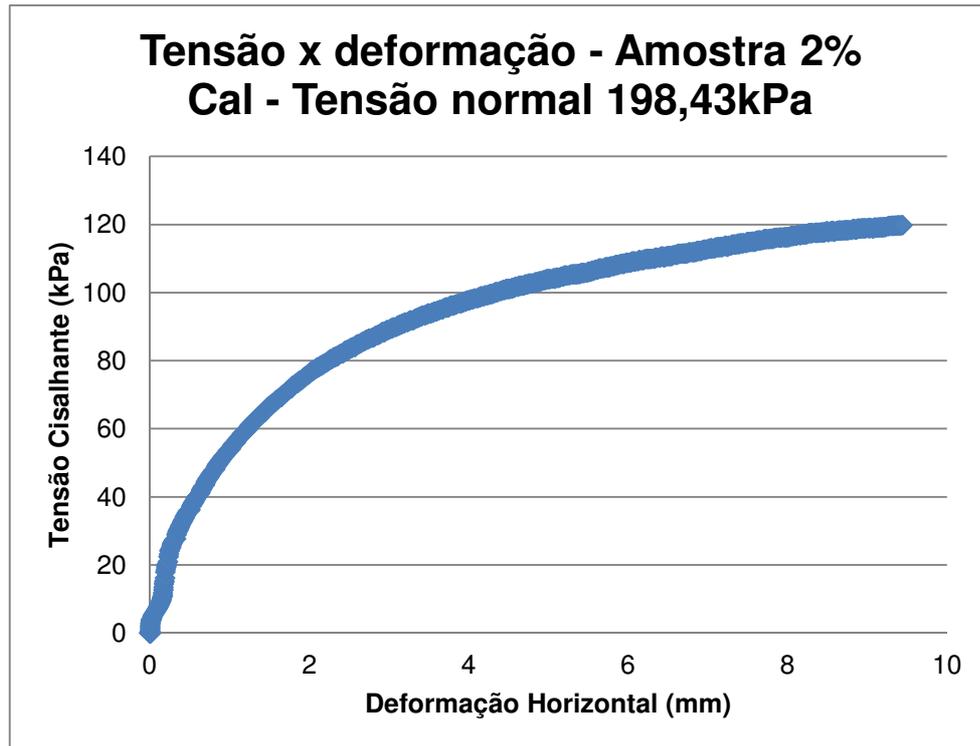


Figura 24 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 2% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.

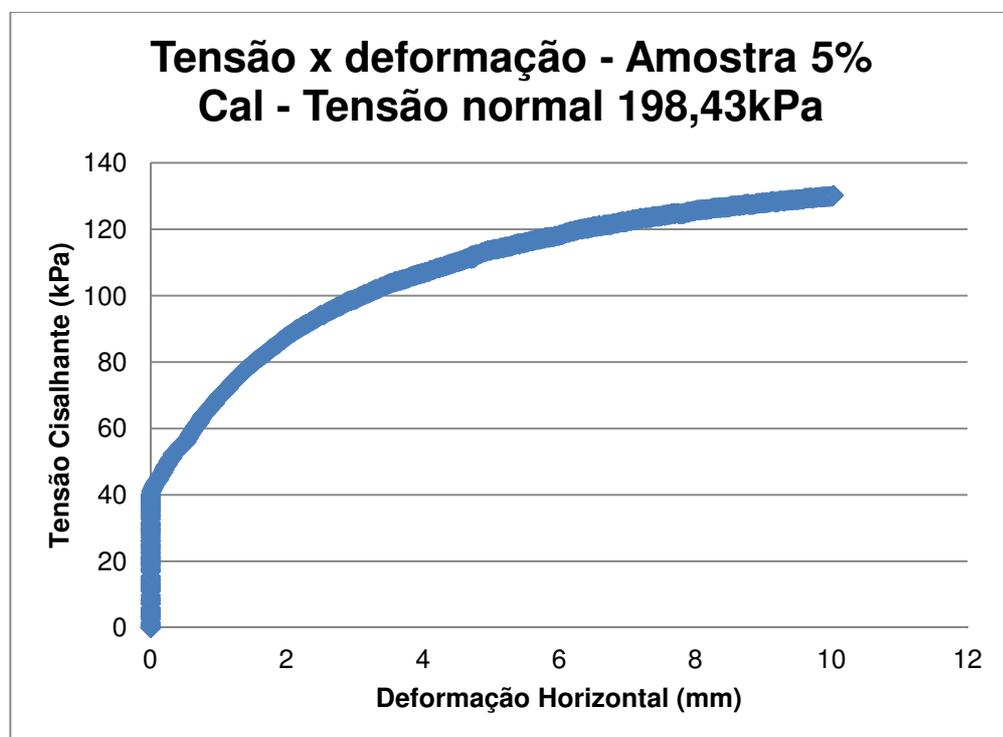


Figura 25 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 5% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.

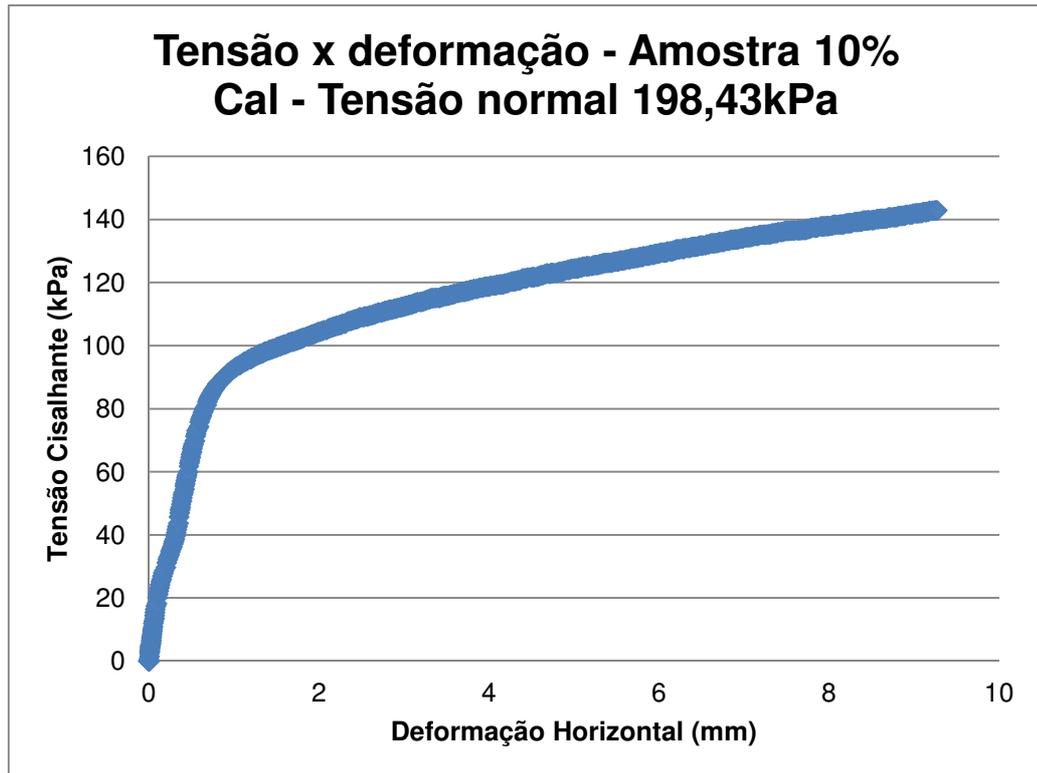


Figura 26 - Gráfico tensão x deformação para a amostras de solo com 10% cal hidratada e com tensão normal de 198,43kPa.

Como primeira análise dos casos onde houve o cisalhamento, após o período de adensamento com 198,43 kPa na tensão normal, será o caso da amostra pura de solo. Nesta amostra (Figura 23) houve uma tensão cisalhante de 126,09 kPa para a deformação de 8,5 (oito e meio) milímetros. Ao adicionar 2% de cal hidratada ao solo (Figura 24) e realizar o ensaio, foi registrado pelo extensômetro uma tensão de 118,03 kPa. Mais uma vez não houve acréscimo algum, pelo contrario, houve um decréscimo de tensão cisalhante, ao adicionar 2% de cal hidratada.

A análise da Figura 25, onde foi ensaiado uma amostra com 5% de cal hidratada traz como resultado um aumento na tensão de cisalhamento quando comparada às amostras de 0% e 2% de cal hidratada. A tensão encontrada foi de 126,73 kPa.

Mais uma vez a amostra de solo a qual foi adicionada 10% de cal hidratada superou todas as outras amostras, atingindo assim uma tensão cisalhante de 139,75 kPa. Ao comparada com a amostra de solo puro, houve um acréscimo de 10% de tensão de cisalhamento.

O principal resultado gerado pelo ensaio de cisalhamento é a envoltória linear de cada material. Neste caso foram geradas 4 (quatro) envoltórias, uma para cada mistura solo-cal. A partir desta envoltória é possível encontrar a coesão e inclinação de cisalhamento dos materiais.

Para a elaboração desta envoltória foram utilizados 2 (dois) dados fundamentais para cada uma das amostras, a tensão cisalhante e a tensão normal. Esses dados sempre foram captados no momento em que houvesse a deformação de 8,5 (oito e meio) milímetros das amostras. Os dados utilizados na plotagem da envoltória estão presentes na Tabela 23, todos os valores estão em kPa.

Tabela 23 - Tensão Normal e Tensão Cisalhante das amostras

<b>Solo-cal 0% de cal hidratada</b>		<b>Solo-cal 2% de cal hidratada</b>	
<b>Tensão Normal</b>	<b>Tensão Cisalhante</b>	<b>Tensão Normal</b>	<b>Tensão Cisalhante</b>
53,57884384	38,89	53,4818273	51,03
107,151833	73,42	106,8040474	64,78
214,3295815	126,09	214,3459777	118,04
<b>Solo-cal 5% de cal hidratada</b>		<b>Solo-cal 10% de cal hidratada</b>	
<b>Tensão Normal</b>	<b>Tensão Cisalhante</b>	<b>Tensão Normal</b>	<b>Tensão Cisalhante</b>
53,5704697	39,44	53,41191337	56,12
107,1682277	71,80	107,1693989	82,68
214,3272393	126,73	214,2874312	139,76

Essas tensões encontradas já foram apresentadas anteriormente, e serão fundamentais para a elaboração da envoltória linear. A envoltória linear traz informações em primeiro plano sobre a coesão do material e o ângulo de atrito, porém a partir destas medidas podem expandir para características de mecanismo de atrito, embricamento e influência da tensão normal.

O resultado da envoltória linear a qual foi traçada com o uso dos dados da tabela 23 é demonstrado na Figura 27. Foram traçados todas as envoltórias no mesmo gráfico para que ficasse mais acessível a visualização e a comparação de dados.

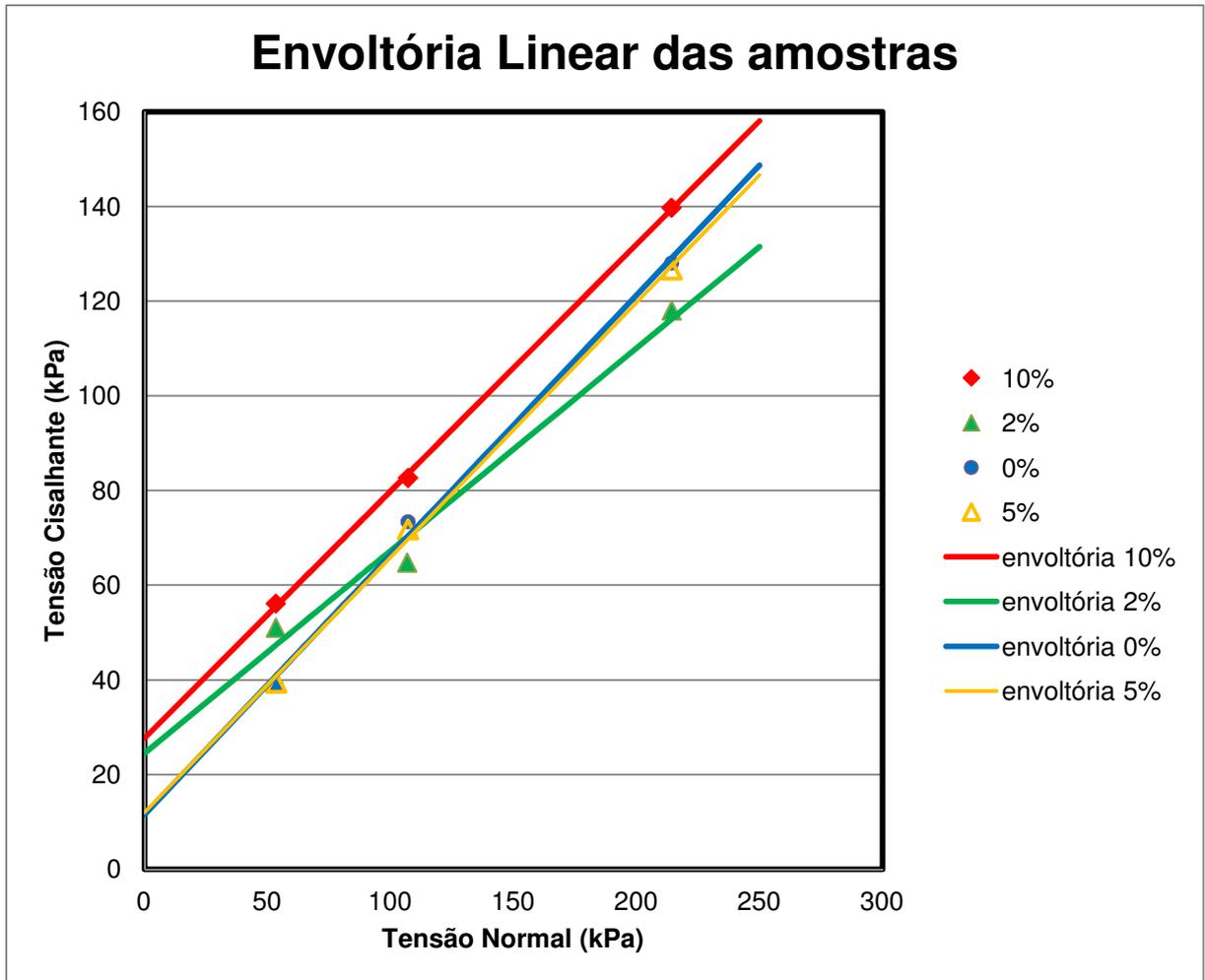


Figura 27 - Envoltória Linear das amostras

Com base na envoltória linear de todas as amostras é destoante a diferença das amostras de 10% de cal hidratada diante das outras. As amostras de 0% e 5% se confundem, e são praticamente as mesmas. Enquanto a amostra de 2% de cal hidratada se mostra com uma boa variação durante as tensões normais mais baixas, porém a partir dos 100 kPa ela acaba tendo uma baixa inclinação quando comparada às outras amostras.

Com relação à inclinação das envoltórias é bem palpável três retas (0%, 5% e 10% de cal hidratada) são praticamente paralelas e possuem a mesma inclinação, enquanto a reta correspondente por 2% de cal hidratada possui uma inclinação menor quando comparada às outras.

A coesão de cada amostra é encontrada a partir do prolongamento da reta até o seu encontro com o eixo Y (tensão de cisalhamento), e dentre as quatro amostras, a amostra de 10% de cal hidratada se mostrou a representante com maior coesão. Mais uma vez a envoltória linear das amostras com 0% e 5% de cal hidratada se confundem, gerando a mesma coesão praticamente. Enquanto a amostra com 2% de cal hidratada supera a coesão das amostras com 0% e 5% porém não ultrapassa a amostra com 10% de cal hidratada. Para uma comparação ainda mais detalhada, a Tabela 24 traz todos os dados.

Tabela 24 - Coesão e Inclinação das envoltórias

Envoltória 0%		
inclinação	0,55	
$\phi$	28,74	graus
coesão	11,56	
Envoltória 2%		
inclinação	0,43	
$\phi$	23,16	graus
coesão	24,51	
Envoltória 5%		
inclinação	0,54	
$\phi$	28,31	graus
coesão	11,97	
Envoltória 10%		
inclinação	0,52	
$\phi$	27,55	graus
coesão	27,66	

A partir do ângulo de atrito das amostras é possível encontrar a inclinação do plano de ruptura, porém esse não é o objetivo deste trabalho.

#### 4.3. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a obtenção dos resultados de todos os ensaios realizados é possível comparar resultados e encontrar relação entre eles. Essa comparação visa expandir o conhecimento adquirido com os resultados e procurar justificativas para os mesmos.

A principal comparação, tendo em vista que esse trabalho visa conhecer a resistência à compressão adquirida com o acréscimo de cal hidratada, a ser realizada é a comparação que reúne os dados das maiores tensões de rompimento de cada mistura solo-cal com a porcentagem de cal hidratada misturada ao solo.

Para fazer a comparação tensão de rompimento com a porcentagem de cal hidratada adicionada ao solo, foram utilizados os maiores dados de todas as amostras. Esses valores foram sempre encontrados muito próximos ao teor de umidade ótimo, independente da amostra.

Para melhor análise de resultados foi plotado um gráfico (Figura 28) para os quatro casos de amostra.

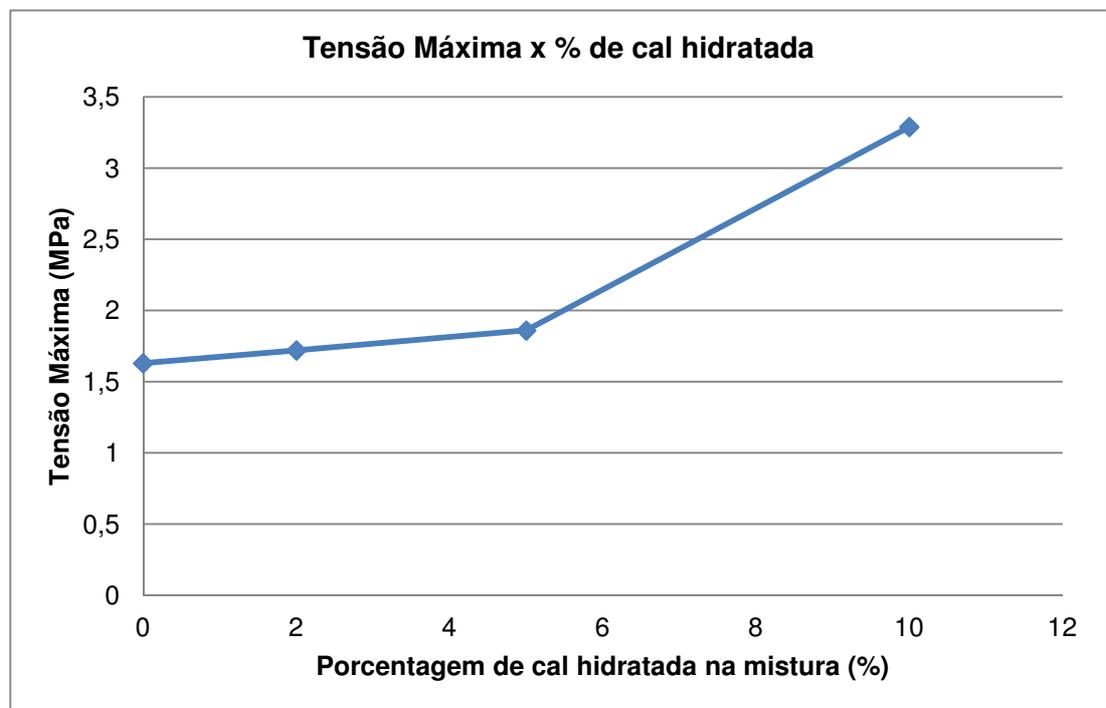


Figura 28 - Tensão Máxima x % de cal hidratada

Com a apresentação dos resultados no mesmo gráfico fica evidente a melhora na tensão máxima devido ao acréscimo de cal hidratada ao solo.

Esse crescimento é evidente, porém discreto até a marca de 5% de cal hidratada, a partir daí ele é muito acelerado e atinge a marca dos 3,2 MPa com o uso de 10% de cal hidratada na mistura.

Ao comparar o resultado obtido no solo puro e após a adição de 10% de cal hidratada houve um aumento de aproximadamente 100% do seu valor original. Com certeza é um acréscimo muito relevante e de grande importância.

A estabilização ocorre quanto maior a quantidade de cal é adicionada a um solo reativo e esta quantidade é suficiente para que, em longo prazo, o material estabilizado ganhe resistência a um nível significativo por meio das reações pozolânicas. O fenômeno ocorre devido à reação do cálcio da cal com os aluminatos e silicatos presentes nos argilo-mineirais. Esta reação pode começar rapidamente e é responsável por alguns dos efeitos de modificação. No entanto, estudos revelam que a expressão reação pozolânica pode continuar por um longo período desde que suficiente cal esteja presente e o pH permaneça elevado (acima de 10). Os resultados da estabilização podem ser aumentos nos valores de módulo resiliente e, mesmo após períodos de danos ambientais ou de carregamentos devido à passagem do tráfego, é de longa durabilidade ao longo de décadas de serviço (Little, 1999).

Outra análise de comparação válida para o nosso estudo é a comparação entre a tensão máxima encontrada nas amostras e sua densidade relativa do grão (GS). Os dados estão expostos na Tabela 25.

Tabela 25 - Dados de GS e máxima tensão normal

	Porcentagem de cal hidratada na amostra (%)			
	0	2	5	10
GS	2,434874263	2,434887056	2,461970866	2,70676488
Tensão Normal Máxima (MPa)	1,63	1,72	1,86	3,29

Como já exposto neste trabalho anteriormente, é possível observar que quanto maior a porcentagem de cal hidratada, maior é a densidade relativa do grão. Logo, quanto maior for o GS, maior será a resistência à compressão.

A apresentação do gráfico (Figura 29) com os dados coletados deixa evidente que essa relação busca a linearidade de uma equação.

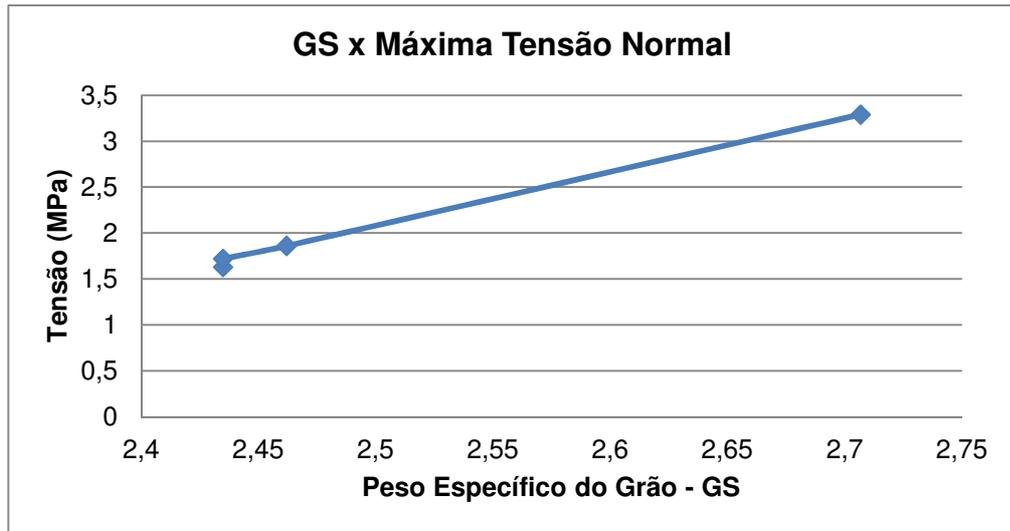


Figura 29 - GS x Máxima Tensão Normal

Tendo em vista que a densidade é a razão entre a massa ou o peso específico da parte sólida e a massa ou o peso específico de igual volume de água pura à 4°C, é possível analisar esse resultado de maneira lógica e observar que quanto mais partículas sólidas (cal hidratada) são adicionadas, maior será a resistência do solo devido ao fato dela estar preenchendo o que antes eram vazios com uma massa sólida de solo-cal.

O teor de umidade ótimo foi variável de acordo com a amostra. Já tendo como conhecimento prévio que teor de umidade ótimo é a razão entre a massa d'água contida no solo e passível de evaporação em estufa a 105 - 110°C e a massa de seus grãos secos em estufa, na mesma faixa de temperaturas, até constância de massa, e esse teor ótimo significa a quantidade máxima de água que a mistura consegue absorver e se tornar saturada. Esse teor de umidade foi aumentando de acordo com o acréscimo de cal hidratada como pode ser analisado no gráfico abaixo (Figura 30).

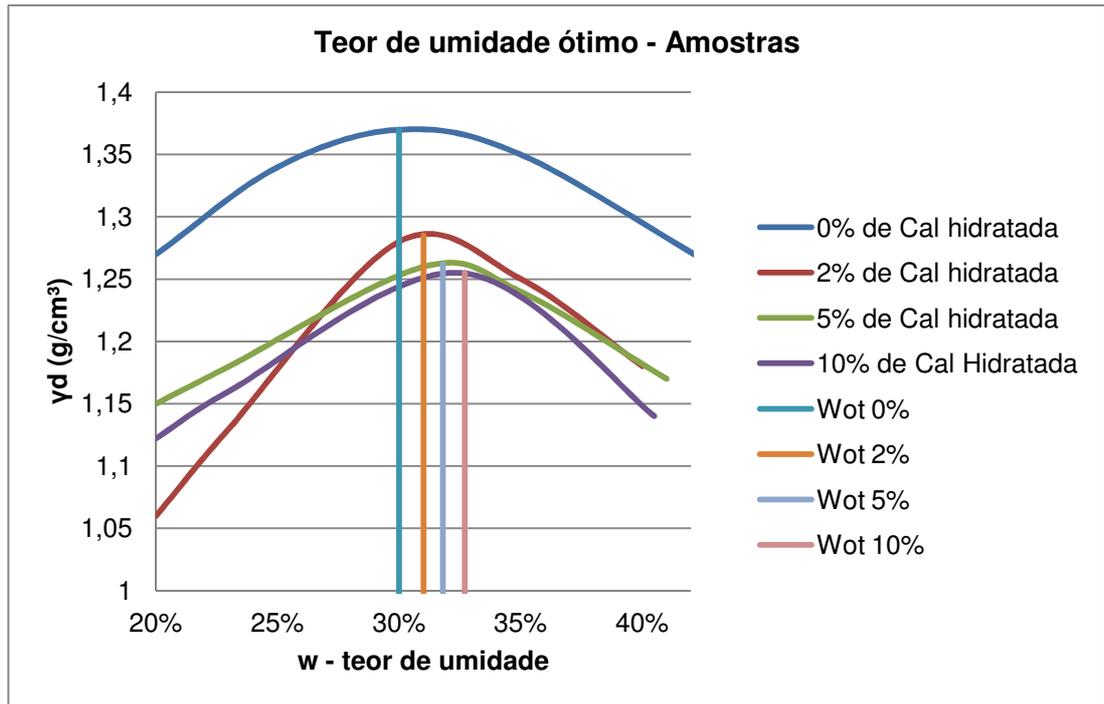


Figura 30 - Teor de umidade ótimo – amostras

O aumento gradual do teor de umidade ótimo veio acompanhado da diminuição do peso específico aparente seco das amostras, isso devido ao fato que com o acréscimo de cal hidratada é necessária uma maior quantidade de água para atingir o grau de saturação perfeito da amostra, e também, com partículas de cal hidratada preenchendo lugares que antes eram vazios, houve o aumento do peso específico aparente seco.

Como já visto anteriormente, esse aumento no peso específico seco trouxe outras melhoras as amostras, como por exemplo, o aumento na resistência à compressão e a tensão normal.

Durante a modelagem dos corpos de prova e dos ensaios foi possível observar uma melhora significativa na trabalhabilidade das misturas que continham maiores quantidades de cal hidratada. A cal hidratada ajudava a deixar as misturas mais “firmes” e não tão barrentas durante a adição de água, melhorando assim no momento da compactação durante o molde da amostra e na mistura com a água, deixando a mistura mais homogênea.

#### 4.4. DISCUSSÃO GERAL E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Para verificar se os resultados encontrados estão de acordo com o que foi estudado teoricamente, é necessário retroceder alguns meses e comparar agora os resultados esperados com os resultados reais.

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso era verificar o aumento real da resistência à compressão (tensão), e esse foi realmente um resultado esperado antes mesmo de iniciarmos os ensaios, e que se concretizou após a realização dos ensaios de compactação Proctor Normal.

Outro ponto importante para este trabalho era o aumento no teor de umidade ótima (wot.), era esperado que esse aumento surgisse devido ao fato das partículas de cal fossem substituindo parcelas de grão de solo com uma maior massa específica. Esse aumento ocorreu e ainda foi acompanhado pela diminuição do peso específico seco, outro fator que também foi previsto pelos estudos teóricos realizados anteriormente.

Com relação a trabalhabilidade da mistura, foi proposto que seria melhorada de acordo com o aumento da cal hidratada misturada, e realmente essa foi uma característica agregada à mistura.

## 5. CONCLUSÃO

Por fim, este trabalho de conclusão de curso trouxe resultados importantes para a área de mecânica dos solos, onde ficou claro que em todos os aspectos ensaiados houve uma melhora do solo quando acrescido de cal hidratada.

Algumas dosagens de cal hidratada não trouxeram tantos benefícios ou melhora nas características do solo, porém em todos os aspectos, sem exceções, quando a mistura de solo-cal era de 10% de cal hidratada as melhoras eram evidentes.

As melhoras incorporadas ao solo puro foram o aumento na tensão de ruptura, aumento da resistência ao cisalhamento, melhor trabalhabilidade, maior coesão, maior teor de umidade ótimo, um menor peso específico e o aumento do GS da amostra.

Dentre as três porcentagens de cal hidratada propostas para análise, a amostra que continha 10% de cal hidratada foi sempre um destaque, apresentando em todos os ensaios uma melhora muito grande quando comparada as outras amostras.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para próximos trabalhos deixo em aberto uma comparação com maior porcentagem de cal-hidratada nas misturas, por exemplo, 20% até 40%. Outra lacuna deixada foi o ensaio CBR (California Bearing Ratio), com o qual poderiam ser extraídas maiores propriedades dos materiais e compará-los novamente. Além de uma última sugestão envolvendo a área de micro moléculas e química, onde seria importante aprofundar os conhecimentos nas propriedades reativas das reações pozolânicas do solo-cal, conhecendo assim solos que poderiam ter uma maior reação e com isso maiores benefícios.

## REFERÊNCIAS

ANGELIM, R. S. Influência do Procedimento de Mistura da Cal Hidratada o Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária. In: II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 2005, Goiás.

BASTOS, C. Estabilização de solos – Slides de aula, 2009, Rio Grande.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G. de; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B., Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros, 2008, Rio de Janeiro.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá, 1995.

CAMPELLO, G. Setor da cal ganha selo de responsabilidade socioambiental. In: Revista Arquitetura & Construção, 2009, São Paulo.

CIMENTOS ITAMBÉ, Artigo Cal Virgem ou Hidratada, Eng<sup>o</sup> Jorge Aoki. In: Site [www.cimentoitambe.com.br](http://www.cimentoitambe.com.br), acessado 30 de maio de 2012 às 00:14, Brasil, 2009.

CORRÊA, J. F. ; MARCON, A. F. ; TRINCHÊS, G. Melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal. In: CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2009, São Paulo.

GEIPOT – GRUPO EXECUTIVO DE INTEGRAÇÃO DA POLÍTICA DE TRANSPORTES. *Anuário estatístico dos transportes*. Ministério dos Transportes. 2001.

GERSCOVICH, D. M. S. Resistência ao cisalhamento, 2010, Rio de Janeiro.

GUIMARÃES, J. E. P. Solo-cal: Como construir, 1995. In: Revista virtual PINIWEB, acessada em 30 de maio de 2012 às 00:11.

LITTLE, D. N.. Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The Nacional Lime Association, 1999.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação, 2004, Porto Alegre.

MARQUES, G. L. de O. Notas de aula da disciplina Pavimentação. In: Faculdade de Engenharia Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006, Juiz de Fora.

PEDROZO, L. G. Custo da infraestrutura rodoviária – análise e sistematização, 2001, Porto Alegre.

PINHEIRO, R. Princípios da estabilização dos solos. In: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2011, Santa Maria.

PORTER, O.J. Development of the original method for highway design. Development of CBR flexible pavement design method for airfields. *Transactions of American Society of Civil Engineers*, New York, v. 115, p. 461-7, 1950.

RAMO CONSTRUTORA DE OBRAS LTDA, Orçamento para edital de obra pública, Edital CP76-2011, 2012, Curitiba.

REZENDE, L. R. de; CARVALHO, J. C. de, CARDOSO, F. B. da F. & AMPELLO, C. S. Estudos Laboratoriais de dois solos finos estabilizados com cal. In: Simpósio

sobre solos tropicais e processos erosivos no centro oeste, 1. 2003, Brasília. Anais, Brasília, Unb, 2003, p. 207-217.

WELLS, A. F., 'Structural Inorganic Chemistry, 5th ed., Oxford University Press, Oxford, UK, 1984.