

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTELA BONAGURIO JULIO

**ANÁLISE DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO - ENERGIA MODIFICADA - EM  
UM SOLO COM ADIÇÃO DE CAL E CIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

ESTELA BONAGURIO JULIO

**ANÁLISE DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO - ENERGIA MODIFICADA - EM  
UM SOLO COM ADIÇÃO DE CAL E CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann.

CURITIBA

2019



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
Campus Curitiba – Sede Ecoville

Departamento Acadêmico de Construção Civil

Curso de Engenharia Civil

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ***ANÁLISE DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO - ENERGIA MODIFICADA - EM UM SOLO COM ADIÇÃO DE CAL E CIMENTO***

Por

ESTELA BONAGURIO JULIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

---

Orientadora – Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.

UTFPR

---

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.

UTFPR

---

Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.

UTFPR

---

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por me proporcionar incontáveis conhecimentos ao longo desses cinco anos através de profissionais muito competentes, principalmente à minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Amanda Dalla Rosa Johann, que me auxiliou de maneira brilhante neste último ano, disposta a compartilhar seu conhecimento, mostrando-me a profissional e pessoa maravilhosa que é.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, pelo apoio nos momentos de realização dos ensaios deste trabalho a partir da partilha de experiência. Agradeço principalmente o técnico de laboratório, Felipe Perreto, e meu colega de universidade, Roberth Carvalho, por toda a ajuda com as pesquisas.

Sou muito grata pela presença de amigos maravilhosos em minha vida, em especial Marcela Erat Scremim e Bruna Girardi, por me darem conselhos, me apoiarem, me ajudarem nos momentos mais complicados, e me fazerem rir na maior parte do tempo, tornando toda essa caminhada mais leve e gratificante.

Agradeço ao meu namorado, Dario, pelo amor, carinho e companheirismo, permanecendo ao meu lado até o final desta trajetória.

Essa conquista só foi possível devido aos meus pais, Alaíde e Pedro, por serem as pessoas que me ensinaram tudo de maior valor nessa vida, por me ajudarem a ser quem eu sou e não medirem esforços pela minha felicidade, assim como a dos meus irmãos, Marina e Bruno, meus primeiros e eternos amigos. Minha família sempre foi e sempre será minha luz e meu porto seguro. Obrigada.

Por fim, agradeço a Deus, por me abençoar todos os dias, por me fornecer forças e fé durante toda a minha vida, sendo luz e guia nos momentos mais difíceis, e motivo de agradecimento após a conclusão de uma etapa tão importante e significativa em minha vida.

## RESUMO

JULIO, Estela Bonagurio. **Análise do efeito da compactação - energia modificada - em um solo com adição de cal e cimento.** 2019. 69 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Os solos são materiais que apresentam uma grande diversidade, mesmo em regiões próximas, porque são provenientes da deterioração de rochas. Na engenharia, os solos são considerados aglomerados de partículas provenientes da decomposição da rocha, sendo muito utilizados como material de construção e/ou suporte para estruturas. Por esse motivo, esse material é submetido a diversos ensaios, como forma de conhecer suas características para ajustá-lo às necessidades da engenharia, através do seu melhoramento. Por ser uma solução mais econômica e favorável ao meio ambiente, a estabilização de solos é o processo mais utilizado para melhoramento do solo. A estabilização de solos pode ocorrer através de reações mecânicas, físicas e químicas, sendo a última realizada, comumente, com cal e cimento. A presente pesquisa tem como objetivo analisar os efeitos da compactação com energia modificada em um solo silte-argiloso, da formação Guabirotuba, através da adição de cal e cimento, comparando esses efeitos com os resultados obtidos por Sales et al. (2017) através da compactação desse mesmo solo com energia normal e com os resultados obtidos por Cavarsan (2018) através da compactação, também do mesmo solo, com energia intermediária. Para esta análise, foram definidos os teores de 3%, 5%, 7% e 9% dos aditivos químicos no solo, utilizando os mesmos métodos de Sales et al. (2017). Realizou-se o ensaio de compactação Proctor modificado, obtendo um peso específico aparente seco máximo de  $1,70 \text{ g/cm}^3$  e um teor de umidade ótimo de 15% para o solo natural, 18% para a mistura solo-cal e 20% para a mistura solo-cimento. A partir destes resultados, corpos de prova foram moldados com os teores definidos e submetidos ao ensaio compressão simples após 28 dias. Comparando esses resultados com os obtidos por Sales et al. (2017) e Cavarsan (2018), nota-se que a compactação com energia modificada deste tipo de solo, tanto natural quanto com a adição de cal, gera maior resistência à compressão simples que a compactação com os outros dois tipos de energia, mas o mesmo não ocorre para a mistura solo-cimento. Também foi realizado o ensaio CBR, notando-se que para a moldagem com a energia modificada, a expansão do solo foi maior se comparado à compactação com energia normal, além de apresentar menor suporte do solo. Uma análise de custos também foi realizada, concluindo-se que a mistura solo-cimento 3%, moldada com a energia modificada, é a mais viável economicamente.

**Palavras-chave:** Solo-cal. Solo-cimento. Resistência à compressão simples. Índice de suporte Califórnia. Análise de custos.

## ABSTRACT

JULIO, Estela Bonagurio. **Analysis of the effect of compaction – modified energy – on a soil with addition of lime and cement.** 2019. 69 f. Term paper. Graduate in Civil Engineering, Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2019.

Soils are materials that present a great diversity, even in the near regions, because they come from the deterioration of rocks. Engineering, soils are the clusters of particles from the decomposition of rock, much more the building material and / or support for structures. For this reason, this material is submitted to experimentation, with the purpose of knowing its characteristics to adjust it to the needs of the engineering, through its improvement. Because it is a more economical and environmentally friendly solution, process stabilization is more commonly used for soil improvement. Soil stabilization can be reversed through mechanic, physical and chemical, the latter being commonly performed with cement and lime. The research aims to evaluate the compaction with modified energy in a clay-silt soil, of Guabirotuba formation, through the addition of calcium and lime, comparing it with the results obtained by Sales et al. (2017) through the compaction of this same soil with normal energy and the results obtained by Cavarsan (2018) through the compaction, also of the same soil, with intermediate energy. For this analysis, the contents of 3%, 5%, 7% and 9% of the chemical additives in the soil were selected using the same methods of Sales et al. (2017). The modified Proctor compaction test was carried out, yielding a maximum specific dry weight of 1,70 g/cm<sup>3</sup> and an optimum moisture content of 15% for natural soil, 18% for a soil-lime mixture and 20% for a soil-cement blend. From these results, specimens were molded with the defined contents and subjected to the simple compression test after 28 days. Comparing the results with those obtained by Sales et al. (2017) and Cavarsan (2018), we notice a modified energy compaction of this type of soil, both natural and with an addition of energy, that generates greater resistance to simple compression than a compaction with the other two types of energy, but the same is not done for a soil-cement mix. It was also realized the CBR, noting for a modeling with the modified energy, the soil expansion was greater to the compaction with normal energy, besides presenting less support of the soil. A cost analysis was also performed, concluding a mixture of 3% of soil, with a modified energy, is more economically feasible.

**Key-words:** Soil-lime. Soil-cement. Unconfined compressive strength. California Bearing Ratio. Cost analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização da área de estudo.....	15
Figura 02 – Superfícies de aplainamento na região da Bacia de Curitiba.....	16
Figura 03 – Formação Guabirota na região metropolitana de Curitiba.....	17
Figura 04 – Curvas de compactação para diferentes energias de compressão. .....	19
Figura 05 – Curva de compactação. ....	23
Figura 06 – Profundidade em que o solo foi coletado. ....	29
Figura 07 – Curva Granulométrica do solo natural.....	30
Figura 08 – Molde cilíndrico utilizado para o ensaio de compactação. ....	33
Figura 09 – Corpo de prova moldado no ensaio de compactação. ....	34
Figura 10 – Corpo de prova moldado.....	35
Figura 11 – Ensaio de resistência à compressão simples.....	36
Figura 12 – Expansão do solo a partir de um extensômetro. ....	37
Figura 13 – Ensaio de penetração. ....	38
Figura 14 – Curva de compactação para o solo natural, com energia modificada.....	39
Figura 15 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo natural. .....	40
Figura 16 – Curva de compactação para a mistura solo-cal com energia modificada.....	41
Figura 17 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo-cal.....	42
Figura 18 – Curva de compactação para a mistura solo-cimento, com energia modificada.....	43
Figura 19 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo-cimento. .....	44
Figura 20 – Comparação entre as curvas de compactação, com energia modificada.....	45
Figura 21 – Comparação de resultados para todas as energias de compactação.....	49
Figura 22 – Comparação considerando os novos resultados para todas as energias de compactação. ....	52
Figura 23 – Comparação entre resultados do ensaio de CBR para energia modificada.....	53

Figura 24 – Expansão dos corpos de prova solo natural e solo-cal no molde CBR, com energia modificada.....	55
Figura 25 – Expansão dos corpos de prova solo-cimento no molde CBR, com energia modificada.....	55
Figura 26 – Expansão de todos os corpos de prova no molde CBR, com energia modificada.....	56
Figura 27 – Resultados à compressão simples para todas as energias de compactação com resistência alvo de 1,2 Mpa.....	58
Figura 28 – Resultados da análise de custos.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Energias de compactação. ....	23
Tabela 02 – Previsão do teor de cal em função do tipo de solo. ....	26
Tabela 03 – Composição granulométrica do solo natural. ....	30
Tabela 04 – Resumo dos ensaios LL e LP, e determinação do IP para solo-cal. .....	31
Tabela 05 – Resumo dos ensaios LL e LP, e determinação do IP para solo- cimento.....	32
Tabela 06 – Dados obtidos no ensaio de compactação para solo natural, com energia modificada. ....	39
Tabela 07 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo natural.....	40
Tabela 08 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-cal, com energia modificada. ....	41
Tabela 09 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cal. ....	42
Tabela 10 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo- cimento, com energia modificada. ....	43
Tabela 11 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cimento. ....	44
Tabela 12 – Resultados ensaio RCS para o solo natural.....	46
Tabela 13 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3%.....	46
Tabela 14 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5%.....	46
Tabela 15 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7%.....	46
Tabela 16 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 9%.....	47
Tabela 17 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3%.....	47
Tabela 18 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5%.....	47
Tabela 19 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7%.....	47
Tabela 20 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9%.....	48
Tabela 21 - Resultados médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa .....	48
Tabela 22 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 3%.....	50
Tabela 23 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 5%.....	50
Tabela 24 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 7%.....	50
Tabela 25 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 9%.....	50

Tabela 26 - Resultados novos médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa .....	51
Tabela 27 – Resultados do ensaio de CBR.....	53
Tabela 28 – Resultados do ensaio de CBR para energia normal e modificada.	54
Tabela 29 – Expansão dos corpos de prova submersos em água.....	54
Tabela 30 – Comparação entre resultados de expansão para o solo submerso para energia normal e modificada. ....	56
Tabela 31 – Especificações do DNIT para CBR e expansão. ....	57
Tabela 32 – Custos para diferentes energias de compactação de um solo. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos Específicos .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1 GEOLOGIA .....	15
2.1.1 Bacia Sedimentar de Curitiba .....	15
2.1.2 Formação Guabirota .....	16
2.2 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO .....	18
2.2.1 Fundamentos .....	18
2.2.2 Estabilização mecânica .....	18
2.2.3 Estabilização física .....	19
2.2.4 Estabilização química .....	20
2.2.4.1 Estabilização com cimento .....	20
2.2.4.2 Estabilização com cal .....	21
2.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	22
2.3.1 Limites físicos de Atterberg .....	24
2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CIMENTO E SOLO-CAL .....	24
2.4.1 Dosagem para a mistura solo-cimento .....	25
2.4.2 Dosagem para mistura solo-cal .....	25
2.5 ENSAIO DE RESITÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	27
2.6 SOLO-CIMENTO E SOLO-CAL APLICADO À PAVIMENTOS .....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	29
3.1 MATERIAIS .....	29
3.1.1 SOLO .....	29
3.1.2 Cal .....	31
3.1.3 Cimento .....	31
3.1.4 Água .....	32
3.2 MÉTODOS .....	32
3.2.1 Ensaio de compactação .....	33
3.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova .....	35
3.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	36
3.2.4 Ensaio CBR .....	37

<b>4 RESULTADOS E ANÁLISE</b> .....	39
4.1 ENSAIO DE PROCTOR.....	39
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	45
4.3 ENSAIO CBR.....	52
4.4 ANÁLISE DE CUSTOS.....	57
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	60
<b>6 SUGESTÕES FUTURAS</b> .....	62
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Os solos são provenientes da deterioração de rochas, através do intemperismo. Por isso, são materiais que apresentam grande diversidade, mesmo em regiões próximas. Para o engenheiro civil, os solos são classificados como um aglomerado de partículas provenientes da decomposição da rocha, podendo ser escavados com facilidade, e que são muito utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas (ORTIGÃO, 2007).

Neste contexto, é extremamente importante realizar um estudo minucioso do solo antes desse ser utilizado como suporte, ou fundação para uma obra da engenharia, pois muitos solos precisam ser reforçados para suportar a carga de uma construção.

A engenharia geotécnica é uma área que busca soluções para um solo que não satisfaz as necessidades da obra a ser realizada. Uma das soluções que vem se destacando é o aproveitamento de resíduos na estabilização de solos através da substituição de parte dos materiais por resíduos que apresentam um custo reduzido (DALLA ROSA et al., 2010).

Os métodos de estabilização de solos são a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos, podendo ser utilizados separadamente ou combinados, o que é mais usual. A estabilização química pode ser realizada com diferentes tipos de aditivos, como a cal, o cimento, a emulsão betuminosa, pozolanas, produtos industriais e resíduos industriais (BRITO, 2017).

Os aditivos mais utilizados atualmente são a cal e o cimento, pois permitem um aumento da resistência à compressão simples do solo, além de uma rigidez inicial maior, além de proporcionarem uma relativa redução de custos para a obra.

Além disso, para otimizar os efeitos destes aditivos, a combinação com a estabilização por compactação é muito efetiva, sendo relatada por diversos autores (DALLA ROSA, 2009; LOPES JUNIOR, 2007; CAVARSAN, 2018; SALES et al., 2017). O ensaio de compactação, ou também chamado como ensaio de Proctor, determina a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados. As energias especificadas para este ensaio são a normal, a intermediária e a modificada

(NBR 7182). Este trabalho utilizará a energia modificada para poder comparar resultados com outros trabalhos já realizados com misturas solo-cal e solo-cimento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos da adição de cal e cimento em um solo da formação Guabirota através de ensaios com energia de compactação modificada.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar ensaios de compactação modificada para o solo natural e para as misturas solo-cal e solo-cimento;
- Realizar os ensaios de resistência à compressão simples na energia de compactação modificada para o solo natural e para as misturas solo-cimento e solo-cal;
- Realizar o ensaio de penetração na energia modificada para o solo natural e para as misturas solo-cimento e solo-cal;
- Comparar os resultados obtidos para a resistência à compressão simples com os resultados de Sales et al. (2017) e de Cavarsan (2018);
- Comparar os resultados obtidos para os valores de CBR com os resultados de Sales et al. (2017);
- A partir de uma resistência-alvo comparar o custo de uma estabilização com cimento em relação à uma estabilização com cal.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GEOLOGIA

#### 2.1.1 Bacia Sedimentar de Curitiba

A bacia sedimentar de Curitiba situa-se no Primeiro Planalto Paranaense, abrangendo Curitiba (PR), e outros municípios circunvizinhos (Almirante Tamandaré, Colombo, Pinhais, São José dos Pinhais, Campina Grande do Sul, Araucária, Quatro Barras e Fazenda Rio Grande) (SALAMUNI, 1998).

Ainda segundo o autor, a maior parte dos sedimentos da Bacia são subjacentes ao sítio urbano de Curitiba, no qual ocorrem uma grande descaracterização dos afloramentos devido às pavimentações e ao calçamento, principalmente nas áreas centrais da cidade. Nas áreas periféricas e nos municípios vizinhos, por estarem em processo de urbanização e, frequentemente, serem focos de obras de engenharia, há boas exposições, para fins de estudos geológicos. A morfologia da região destaca-se pela presença de grandes colinas, vales abertos, tendo como principal receptor o Rio Iguaçu.

Na Figura 01 é possível visualizar a localização da área de estudo, sendo que na região cinza está a área de ocorrência dos sedimentos da bacia.

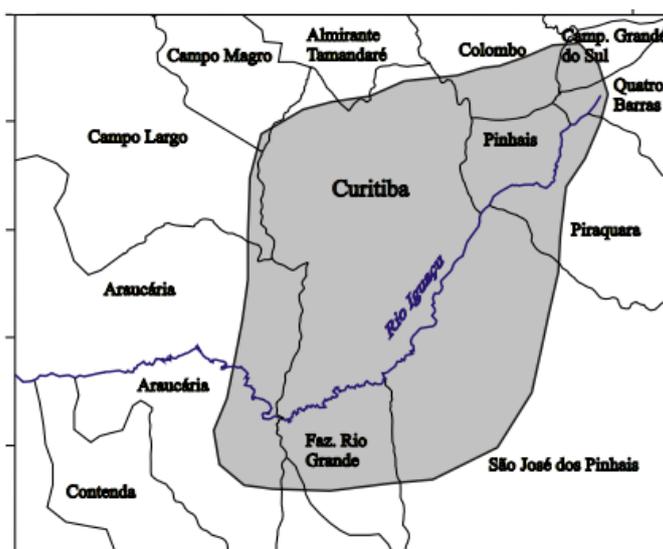
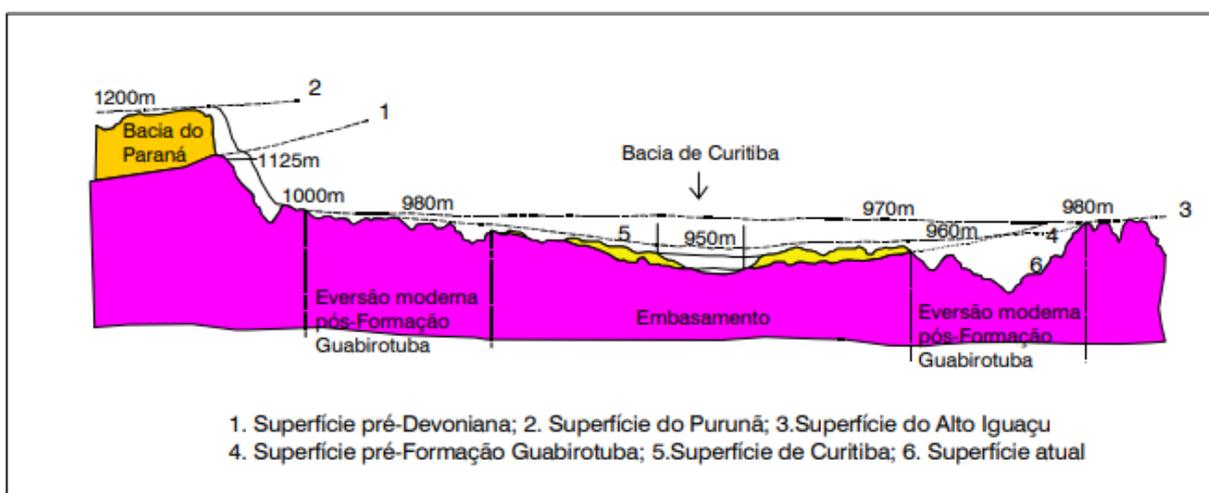


Fig. 01 – Localização da área de estudo.  
Fonte: Adaptado de Salamuni (1998).

### 2.1.2 Formação Guabirotuba

A Bacia Sedimentar de Curitiba é, em sua maior parte, preenchida pela unidade geológica denominada Formação Guabirotuba. Os seus sedimentos constituem-se principalmente em argilas siltosas e siltes argilosos, sendo que a deposição dos terrenos dessa formação iniciou-se no Terciário (SALAMUNI, 1998).

Na Figura 02 está esquematizada as diversas superfícies de aplainamento na região da Bacia de Curitiba.



**Fig. 02 – Superfícies de aplainamento na região da Bacia de Curitiba.**  
Fonte: Adaptado de Bigarella et al. (1961)

Segundo Felipe (2011), o nome Formação Guabirotuba se refere aos sedimentos depositados em um intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos, em um abatimento de rocha gerado por falhas na forma de uma bacia e que foram descritivos, inicialmente, no bairro denominado Guabirotuba, a leste de Curitiba, por Bigarella et al. (1961).

Ainda de acordo com Felipe (2011), os sedimentos da formação em questão atingem espessuras na ordem de 60-80 metros e predominam as argilas e areias arcólicas (20 – 40% feldspato), além da parte basal ser composta de cascalhos e arcósios de granulometria grosseira. É importante ressaltar que normalmente há concentração de carbonato de cálcio impregnando os sedimentos.



## 2.2 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

### 2.2.1 Fundamentos

A estabilização do solo pode ser definida, de modo geral, como sendo a modificação das características deste através de agentes estabilizadores como o cimento, a cal, aditivos químicos, fibras vegetais ou mesmo a estabilização granulométrica e a compactação, com o intuito de aumentar a resistência do solo e atingir as necessidades de projeto (FIORATTI, 2008).

A necessidade de modificar as características de um solo se deve ao fato de precisar melhorá-lo para evitar construir sobre um terreno ruim, evitando problemas futuros, e a estabilização de solos é uma solução que vem sendo altamente utilizada, e que gera grande eficácia.

Ao serem compactados, os sistemas solo-estabilizante se modificam com o aumento do limite de plasticidade, diminuição do limite de liquidez, aumento do teor ótimo de umidade e diminuição da massa específica aparente seca máxima.

A escolha do sistema solo-estabilizante a ser adotado deve ser feita, primeiramente, em bases econômicas e práticas, pois o custo final de uma obra é um dos aspectos mais relevantes. Outros fatores de grande influência são o tipo de solo do local e volume de corte e aterro, que também afetam diretamente nos custos da obra (BATISTA, 1976).

### 2.2.2 Estabilização mecânica

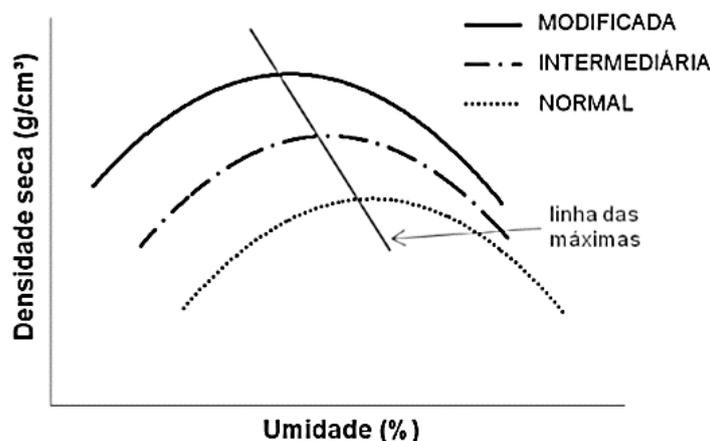
Segundo Caputo (1988),

Entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável. [...] A compactação de um solo visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas, também, nos aspectos: permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água. (CAPUTO, 1988)

De acordo com Das (2011), durante o processo de compactação, o peso específico do solo aumenta conforme ocorre o aumento do teor de umidade. A partir de um determinado teor de umidade, a água passa a ocupar os espaços que anteriormente eram ocupados por partículas sólidas, fazendo com que o peso específico comece a sofrer uma redução. Desta forma, pode-se determinar um teor de umidade ótimo que define o máximo peso específico seco.

Para Pinto e Preussler (2002), a estabilização mecânica pode ser obtida utilizando-se alguns tipos de equipamentos mecânicos como: rolos compactadores, moto niveladoras, caminhões e compactadores manuais. Segundo Das (2011), há fatores no campo que devem ser levados em consideração, como a espessura da camada, a intensidade da pressão aplicada pelo equipamento e o tipo de solo. Conseqüentemente, o peso específico seco, obtido ao final da compactação, também está relacionado ao número de passagens do rolo sobre o solo.

Quanto maior a energia de compactação, maior será o peso específico máximo e menor será o teor de umidade ótimo, conforme ilustrado na Figura 04 (PINTO, 2006).



**Fig. 04 – Curvas de compactação para diferentes energias de compressão.  
Fonte: Adaptado de Pinto (2006).**

### 2.2.3 Estabilização física

Neste tipo de estabilização, as propriedades do solo acabam se modificando, ocorrendo alteração na sua textura. Dentre as técnicas existentes

para estabilização física do solo, destaca-se a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais) (PINTO, 2008).

A correção granulométrica é realizada quando se deseja alterar a distribuição das partículas do solo para atingir um objetivo específico. De acordo com Barbosa et al. (2002), o teor de cada fração das partículas é relevante, mas recomenda-se uma faixa desejável de cada tamanho, sendo de 10 a 20 % de argila, 10 a 20% de silte e de 50 a 70 % de areia.

#### 2.2.4 Estabilização química

A estabilização química pode ser definida como sendo a adição de substâncias que melhoram as propriedades do solo, sendo uma técnica muito utilizada por sua versatilidade, facilidade de aplicação e, principalmente, pelos resultados obtidos, como aumento da resistência à compressão simples, ao cisalhamento e à impermeabilidade (OLIVEIRA, 2000).

Segundo Marques (2009), os estabilizantes mais utilizados são o cimento Portland, a cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, cinzas volantes, dentre outros. Silva (2016) destaca que, dentre diversos materiais, os principais estabilizantes utilizados são o cimento Portland e a cal hidratada.

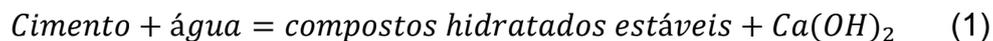
##### 2.2.4.1 Estabilização com cimento

Segundo Siqueira (2008), o cimento é um produto originado da pulverização de clinker (produto de origem granulosa, resultante da calcinação de uma mistura entre silicatos hidráulicos de cálcio com eventuais adições de substâncias para modificação de suas propriedades), sendo composto essencialmente por cal, sílica, alumina e óxido de ferro. As propriedades físicas do cimento podem ser analisadas quando este está em seu estado natural (em pó), misturado à água e misturado com agregado padronizado.

De acordo com a NBR 12023 (1992) da ABNT, define-se o sistema solo-cimento como o “produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12253”.

Petrucci (1978), descreve a estabilização do solo com cimento como reações de hidratação dos silicatos e aluminatos que se encontram no cimento, preenchendo parte dos vazios do material e unindo os grãos adjacentes do solo, o que lhe confere resistência inicial.

A equação 1 abaixo demonstra como ocorre a hidratação do cimento:



Nota-se que a hidratação do cimento libera hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), o que pode colaborar para a floculação das argilas (PETRUCCI, 1978).

Além disso, também ocorre a troca de cátions das estruturas dos argilominerais do solo com os íons de cálcio, provenientes da hidratação do cimento. Essa troca torna o solo mais granular, com menor adesividade e também menor sensibilidade à variação de umidade e a variação volumétrica (MILANI, 2005).

A partir de informações como essas e de pesquisas mais aprofundadas sobre a estabilização do solo com cimento, este conjunto passou a ser usado na construção civil, principalmente na pavimentação de estradas. Porém, foi no final da década de 1940 que o Brasil resolveu utilizar o solo-cimento como material de construção (MILANI, 2005).

#### 2.2.4.2 Estabilização com cal

Guimarães (2002) afirma que a cal é formada por compostos químicos e físicos, formados ao longo de milhares de anos atrás, portanto, é um produto de origem mineral. Ela se encontra na natureza na forma de grãos grandes e porosos, predominantemente na cor branca. Para obtenção da cal virgem, é realizada a calcinação, processo no qual é realizada a decomposição térmica dos calcários.

Segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal hidratada é um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) “Solo-cal é uma mistura de solo, cal e água e, às vezes, cinza volante, uma pozolana

artificial. O teor de cal mais frequente é de 5% a 6%, o processo de estabilização ocorre por modificação, carbonatação e pozolanização”.

O sistema solo-cal é utilizado preferencialmente em solos argilosos e siltosos caulínicos, e segue os mesmos objetivos da mistura com cimento, pois gera aumento da rigidez, incremento de trabalhabilidade e redução da expansão (BERNUCCI et al., 2008).

Silva (2010) afirma que “A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e econômico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactos ambientais”.

De acordo com Araújo et al. (2008), a cal altera características do solo como redução da plasticidade e da expansão e aumento da resistência, por ser constituída por um material fino. Conseqüentemente, por produzir uma reação química na mistura com outros materiais, ocorre um aumento da superfície específica do material, diminuindo o peso específico aparente seco máximo.

### 2.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Segundo Kormann (1997), o ensaio de compactação possui basicamente dois objetivos, que são a determinação da umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação, e a determinação do peso específico aparente máximo associado à umidade ótima.

Para a aplicação da norma NBR 7182/1986, que se refere ao ensaio de compactação, é necessário consultar a NBR 5734 (Peneiras para ensaio – especificação), NBR 6457 (Amostras de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio), NBR 6458 (Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água – Método de ensaio) e NBR 6508 (Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio).

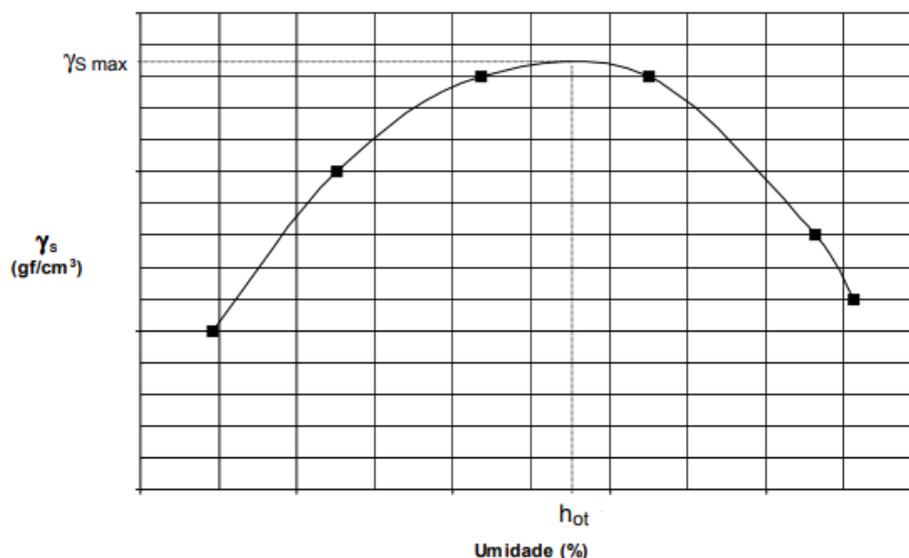
As energias de compactação especificadas na norma NBR 7182 são a normal, intermediária e modificada. Na Tabela 1 estão assinaladas as características referentes a cada energia de compactação.

**Tabela 01 – Energias de compactação.**

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/1986 adaptada.

Ainda segundo Kormann (1997), para desenvolver o traçado da “curva de compactação”, cria-se um gráfico como demonstrado na Figura 05, que deve apresentar um formato aproximadamente parabólico. O ponto de máximo da curva ajustada corresponde ao peso específico aparente seco máximo do solo ( $\gamma_{s\ max}$ ). O teor de umidade associado a este ponto é denominado “umidade ótima” ( $h_{ot}$ ).



**Fig. 05 – Curva de compactação.**  
Fonte: Kormann adaptada (1997).

As curvas de saturação podem ser consideradas o lugar geométrico da umidade e da massa específica onde o solo está saturado. A curva de compactação encontra-se abaixo da curva de saturação 100%

Todos os cálculos e métodos de ensaio estão especificados nas normas base e também estão descritos no capítulo Materiais e Métodos desta pesquisa, detalhando como o ensaio será utilizado neste caso específico.

### 2.3.1 Limites físicos de Atterberg

O estado de consistência do solo impacta na suscetibilidade do mesmo à compactação devido ao uso de maquinários pesados, dentre outros fatores. O solo pode apresentar características iguais às de um líquido ou de um sólido, em função do teor de umidade, sendo que entre estes dois estados limites, o solo passará ainda por outros dois estados, o plástico e semissólido, sendo estes denominados estados de consistência dos solos (ROSA, 2015).

Segundo Ribeiro et al. (2018), os limites de Atterberg referem-se ao limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC), sendo iguais aos valores de umidades que separam um estado de consistência do solo de outro. Conhecendo-se os valores dos limites de Atterberg, é possível saber, em função da umidade natural do solo ( $W$ ), se o solo se encontra no estado sólido ( $W < LC$ ), no estado friável ( $LC < W < LP$ ), no estado plástico ( $LP < W < LL$ ) ou no estado viscoso ( $W > LL$ ). A passagem de um estado de consistência para outro é gradual.

## 2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CIMENTO E SOLO-CAL

Diversas pesquisas foram realizadas utilizando mistura solo-cimento e solo-cal, conseqüentemente, é importante citar os estudos mais relevantes para a atual pesquisa, vislumbrando seus resultados para possíveis comparações futuras.

#### 2.4.1 Dosagem para a mistura solo-cimento

Segundo a Associação Técnica da Indústria de Cimento (ATIC), a dosagem de cimento deve atender a quantidade mínima do aglomerante, para satisfazer às condições de resistência e durabilidade exigidas em projeto (VITALI, 2008).

Vitali (2008) estudou a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a razão Volume de Vazios / Volume de Cimento, a partir de um solo residual de granito do Porto com adição de cimento. O autor concluiu que para teores baixos de cimento (2 e 3%) a resistência intrínseca da estrutura e o efeito da cimentação se compensam e para teores elevados de cimento (5 a 7%) o efeito cimentação é mais relevante.

Sales et al. (2017) analisou a resistência mecânica de um solo sedimentar da Formação Guabirotuba, da região de Curitiba, com adição de cal e cimento nas porcentagens de 0%, 3%, 5%, 7% e 9%. A conclusão obtida foi que, dentre as cinco porcentagens utilizadas, a mistura solo-cimento (com utilização de cimento CP V-ARI) com adição de 9% apresentou maior resistência, além de apresentar melhores resultados para todas as adições se comparado com a mistura solo-cal.

Cavarsan (2018) estudou os efeitos da energia de compactação e do teor de aditivo na resistência à compressão simples de misturas solo-cimento e solo-cal, seguindo a mesma metodologia de Sales et al. (2017), exceto pela moldagem dos corpos de prova, que foram compactados na energia intermediária. Os resultados foram comparados com os dados obtidos por Sales et al. (2017) para os mesmos teores na energia de compactação normal. A autora relata que para ambas as energias de compactação, o cimento resulta em uma resistência mais alta do que o cal.

#### 2.4.2 Dosagem para mistura solo-cal

Para simplificar a previsão do teor de cal a ser adicionada no solo, pode-se utilizar a Tabela 2, adaptada por Dalla Rosa (2009) de Inglês e Metcalf (1972),

a qual exhibe algumas correlações, de acordo com o grau de alteração das propriedades do solo natural desejada e o tipo de solo empregado.

**Tabela 02 – Previsão do teor de cal em função do tipo de solo.**

Tipo de solo	Teor de Cal para modificação	Teor de Cal para estabilização
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

**Fonte: Adaptada de Ingles e Metcalf, (1972) apud Dalla Rosa, (2009).**

Segundo Lovato (2004), os métodos utilizados para dosagem de misturas solo-cal são diversos, sendo que os mais recorrentes no Brasil são o método do pH, método do ICL, método do Lime Fixation Point e método de Thompson.

Bordignon (2015), analisou o comportamento mecânico de um solo da região de Curitiba (PR) estabilizado quimicamente com cal hidratada CH-III, através de ensaios de resistência à compressão simples. O autor selecionou uma amostra do solo da região para verificar a relação dos teores de cal misturada ao solo nas porcentagens de 3%, 6%, 8% e 16%, e os tempos de cura de 0, 7, 14, 28 e 56 dias. A conclusão obtida foi que as misturas solo-cal estudadas apresentaram comportamento aceitável pelas normas vigentes para utilização como camadas de sub-base de pavimentação.

Guérios (2013) estudou as melhorias em um solo da região do município de Curitiba (PR) com adição de cal hidratada nas porcentagens de 2%, 5% e 10%. A conclusão verificada pelo autor foi que, dentre as três porcentagens utilizadas, a mistura solo-cal com adição de 10% da cal hidratada apresentou aumento na resistência à compressão simples e ao cisalhamento, além de melhor trabalhabilidade e coesão.

Como citado no item 2.4.1, Sales et al. (2017) analisou a resistência mecânica de um solo sedimentar da Formação Guabirota, da região de Curitiba, com adição de cal e cimento nas porcentagens de 0%, 3%, 5%, 7% e 9%. A conclusão obtida foi que, dentre as cinco porcentagens utilizadas, a

mistura solo-cal (com utilização de cal hidratada CH-III) com adição de 9% apresentou maior resistência.

Como citado no item 2.4.1, Cavarsan (2018) estudou os efeitos da energia de compactação e do teor de aditivo na resistência à compressão simples de misturas solo-cimento e solo-cal, seguindo a mesma metodologia de Sales et al. (2017), exceto pela moldagem dos corpos de prova, que foram compactados na energia intermediária. Para todos os corpos de prova, a autora observou aumento de resistência entre a energia normal e intermediária e entre o cimento em relação à cal.

## 2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Segundo Foppa (2005), ensaios de resistência à compressão simples (RCS), mostram-se frequentes nos trabalhos que estudam a eficácia da estabilização do solo com cimento, por apresentar baixo custo de execução, ser breve e confiável. Sabe-se que uma camada compactada de solo-cimento aplicada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, tem no geral a ruptura ocasionada por esforços de tração em sua base. Desta forma, nota-se ser mais prudente utilizar o ensaio de resistência à tração como uma medida direta da resistência do solo-cimento. Entretanto, diversos trabalhos demonstram que, em geral, a resistência à tração de solos cimentados varia entre 9% e 14% da resistência à compressão simples.

A partir de tal possibilidade de correlação, juntamente com os aspectos mencionados acima, o RCS se tornou referência na avaliação das variáveis investigadas em misturas solo-cimento (FOPPA, 2005).

## 2.6 SOLO-CIMENTO E SOLO-CAL APLICADO À PAVIMENTOS

De acordo com a norma DNIT 143/2010, base é uma “Camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado”. Já a mistura solo-cimento é definida como “Material proveniente de mistura de solo, cimento e água em proporções previamente determinadas por processo

próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade”. Ainda segundo a norma, a base de solo-cimento pode ser definida como “Camada de base obtida mediante a utilização de solo-cimento devidamente compactado e submetido a adequado processo de cura”.

Segundo a norma DNIT 143/2010, o cimento Portland utilizado deve obedecer às exigências da Norma DNER-EM 036/95 juntamente com as da Normas NBR 5732:1991 ou NBR 5735:1991. A água utilizada deve ser isenta de teores nocivos, como sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais. A mistura de solo-cimento deve apresentar o valor mínimo de 21 kg/cm<sup>2</sup>, ou 2,1 MPa para a resistência à compressão aos 7 (sete) dias (DNER-ME 201/94).

De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, os teores mínimos a serem adotados na composição da mistura, tanto para a cal quanto para o cimento, são de 3%, em relação a massa de solo seco, para possibilitar uma adequada incorporação e homogeneização do estabilizante ao solo.

Conforme a NBR 9895, a mistura solo-cal deve atender aos requisitos de resistência descritos abaixo:

- CBR ≥ 60% e expansão ≤ 0,5% na energia intermediária, conforme a norma ou os definidos em projeto para base do pavimento;
- CBR ≥ 30% e expansão ≤ 1,0% na energia intermediária, conforme a norma ou os definidos em projeto para sub-base do pavimento;
- CBR ≥ 20% e expansão ≤ 1,0% na energia normal ou intermediária, conforme a norma ou os definidos em projeto para reforço do pavimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Este tópico apresenta os materiais utilizados para a análise dos sistemas solo-estabilizantes, que foram os mesmos utilizados em estudo por Sales et al. (2017) e Cavarsan (2018), para possibilitar comparação de resultados.

##### 3.1.1 SOLO

O solo estudado foi retirado por Sales et al. (2017) na região de coordenadas 25°41'04.6"S 49°18'29.7"W, aproximadamente, de acordo com o Google Maps, e tem origem em um condomínio na Rua Francisco da Conceição Machado, bairro Gralha Azul, Fazenda Rio Grande - PR. Esta região de coleta foi escolhida por ser da formação Guabirota e por não estar contaminada, sendo uniforme na textura e na cor.

A coleta foi realizada com o auxílio de uma escavadeira, com profundidade de 1,5 metros da superfície. Na Figura 06 apresenta-se a profundidade em que o solo foi coletado.



**Fig. 06 – Profundidade em que o solo foi coletado.**  
Fonte: Sales et al. (2017)

O resultado obtido para a massa específica real dos grãos na pesquisa de Sales et al. (2017) foi de 2,75 g/cm<sup>3</sup> para o solo natural.

A partir dos dados obtidos por Sales et al. (2017) nos ensaios de caracterização por peneiramento e sedimentação, foi determinada a curva granulométrica para a amostra de solo natural da Formação Guabirotuba. Na Figura 07 tem-se a curva granulométrica.

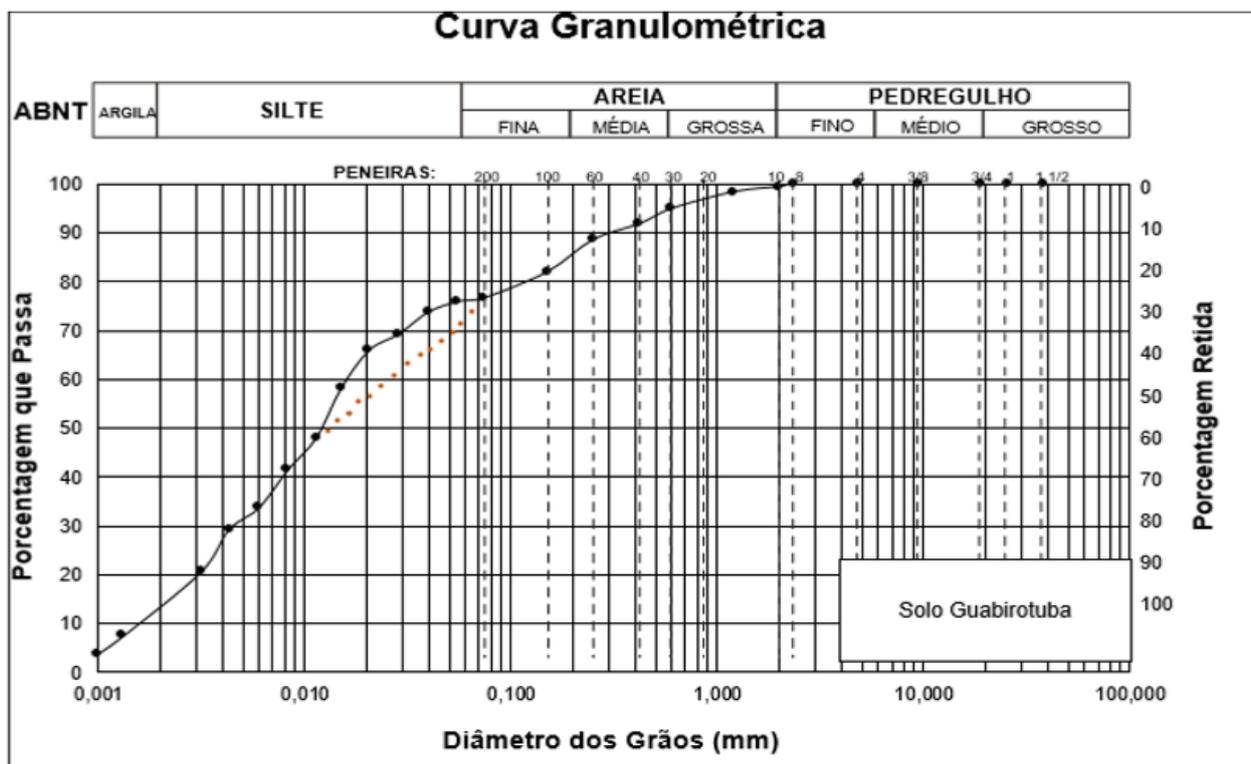


Fig. 07 – Curva Granulométrica do solo natural.  
Fonte: Sales et al (2017).

Em conformidade com a escala utilizada pela NBR 6508, a amostra estudada por Sales et al. (2017) apontou um solo com as composições indicadas na Tabela 3.

Tabela 03 – Composição granulométrica do solo natural.

Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
15%	61%	10%	9%	4%	1%

Fonte: Sales et al. (2017).

### 3.1.2 Cal

Para esta pesquisa, será utilizada a cal hidratada, tipo CH-III, regulamentada pela NBR 6473 (ABNT,2003).

A cal hidratada é conhecida pela propriedade aglomerante que transmite às argamassas, e essa capacidade é quantificada pelo teor dos hidróxidos presentes no produto. Esse material é constituído por hidróxidos de cálcio e magnésio, e por uma pequena parte de hidróxidos não hidratados, além de estarem presentes carbonatos de cálcio e magnésio. Através da exposição ao ar úmido, ou ainda por hidratadores, a cal virgem se transforma em cal hidratada ou, ainda, “extinção” da cal (MAZER, 2017).

A CH-III, escolhida para este estudo, é conhecida como cal hidratada comum com carbonatos, possuindo mais de 88% de óxidos totais na base não volátil e, no máximo, 13% de  $CO_2$ .

O resultado obtido para a massa específica real dos grãos na pesquisa de Sales et al. (2017) foi de 2,42 g/cm<sup>3</sup> para a cal.

Os limites físicos de consistência da amostra de solo para esse estudo foram os mesmos obtidos por Sales et al. (2017), através de ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e determinação do índice de plasticidade (IP). Na Tabela 4 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para o Solo-Cal.

**Tabela 04 – Resumo dos ensaios LL e LP, e determinação do IP para solo-cal.**

Ensaio	Teor de Cal				
	0%	3%	5%	7%	9%
LL(%)	48	48	49	48	47
LP (%)	34	34	33	32	34
IP (%)	14	14	16	16	13

**Fonte: Sales et al. (2017)**

### 3.1.3 Cimento

O cimento a ser utilizado para o estudo será o Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, por ter a característica de atingir altas resistências nos primeiros dias de aplicação. Isso ocorre devido à utilização de uma dosagem

diferente de calcário e argila na produção do clínquer (matéria prima básica do cimento), e também pela moagem mais fina do cimento, para que, ao reagir com a água, este possa adquirir elevadas temperaturas em um espaço de tempo menor. O CP V-ARI normalmente não contém adições, podendo ter até 5% em massa de material carbonático (CINTRA, 2008).

O resultado obtido para a massa específica real dos grãos na pesquisa de Sales et al. (2017) foi de 3,14 g/cm<sup>3</sup> para o cimento.

Os limites físicos de consistência da amostra de solo para esse estudo foram os mesmos obtidos por Sales et al. (2017), através de ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e determinação do índice de plasticidade (IP). Na Tabela 5 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para o Solo-Cimento.

**Tabela 05 – Resumo dos ensaios LL e LP, e determinação do IP para solo-cimento.**

Ensaio	Teor de Cimento				
	0%	3%	5%	7%	9%
LL(%)	48	47	46	44	45
LP (%)	34	35	36	35	36
IP (%)	14	12	10	9	9

**Fonte: Sales et al. (2017)**

### 3.1.4 Água

Neste trabalho, foi utilizada água destilada (estado puro, sem mistura com outras substâncias ou microorganismos), extraída do processo de destilação da água proveniente da rede pública de abastecimento, para a realização dos ensaios e para a moldagem dos corpos de prova.

## 3.2 MÉTODOS

É de suma importância em uma pesquisa detalhar corretamente os métodos e equipamentos utilizados, para que os resultados alcançados possam ser validados e para que outros acadêmicos possam reproduzir a metodologia da mesma forma, podendo comparar resultados.

Os ensaios reproduzidos nesse trabalho foram realizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ecoville, seguindo quase

que inteiramente os métodos utilizados por Sales et al. (2017), para permitir comparações entre os resultados.

### 3.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182. O procedimento determina o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo, resultados que nortearam a moldagem dos corpos de prova a seguir.

A rotina da norma foi reproduzida para a amostra de solo natural, para as misturas solo-cimento, e solo com adição de cal, sendo o teor de aglomerante adicionado igual a 3% da massa de solo seco. O ensaio foi restringido a adição de 3% de aditivo químico.

Na quantificação da massa do solo, cal, cimento e água, foram utilizadas duas balanças. Para realização do ensaio utilizou-se um molde cilíndrico, como o da Figura 8, um soquete grande (correspondente à energia modificada), um extrator de corpos de prova, cápsulas metálicas, e uma estufa.



**Fig. 08 – Molde cilíndrico utilizado para o ensaio de compactação.  
Fonte: Autoria própria.**

A sistemática do experimento seguiu os seguintes passos: determinação da umidade higroscópica do solo, previamente destorroado e passante na peneira de 4,8 mm, previsão e separação das massas de solo, água e aditivo

quando necessário para o planejamento dos cinco pontos que formaram a curva de compactação. Após a fase de organização, se iniciou a moldagem preenchendo o primeiro quinto do cilindro com o solo, aplicando 27 golpes de soquete, sendo que após a execução de cada camada é necessário escarificar a superfície com auxílio de espátula. Na Figura 09 é possível visualizar como se encontra o corpo de prova após a realização do ensaio.



**Fig. 09 – Corpo de prova moldado no ensaio de compactação.  
Fonte: Autoria própria.**

Em seguida, o conjunto cilindro mais solo úmido compactado foi pesado. Retirou-se a amostra do molde com auxílio do extrator, e partindo-a ao meio, coletou-se três amostras que informaram a umidade do material compactado. Para prosseguir a execução do ensaio com solo sem adição de aglomerantes é necessário desmanchar o material compactado até que o mesmo contenha partículas de diâmetro inferiores a 4,8 mm. Acrescentou-se água atingindo a umidade desejada e efetuou-se a homogeneização do solo. Para ensaio utilizando-se solo estabilizado não é possível o reaproveitamento o material, visto que o solo já não apresenta mais suas características originais após a adição de cal e/ou cimento.

### 3.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para execução dos corpos de prova (CPs), utilizou-se um molde cilíndrico 5x10 cm obedecendo à relação de 2:1 exigida. A essa escolha, justifica-se pelo fato de consumir uma menor quantidade de material para a confecção, facilidade de movimentação dos compostos, propiciar maior agilidade e velocidade na execução dos CPs, menor esforço físico do operador e melhor precisão nos corpos de prova em relação a sua massa. Na Figura 10 é possível visualizar um dos corpos de prova logo após sua moldagem.



**Fig. 10 – Corpo de prova moldado.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os corpos de prova empregados no ensaio de resistência à compressão simples foram moldados com os seguintes teores de cal e cimento, 0%, 3%, 5%, 7% e 9%, sendo que para cada teor foram moldados cinco corpos de prova. Os CPs produzidos foram embalados em papel filme, identificados e submetidos a processo de cura em câmara úmida por 28 dias. Os processos de armazenamento foram amparados pela NBR 12024 com exceção a indicação de submeter as amostras à imersão em tanque com água por um período de quatro horas antecedentes ao processo de ruptura.

A moldagem foi norteadada a partir dos resultados do ensaio de compactação, com a umidade ótima, peso específico aparente seco máximo, e os teores de aditivos informados acima.

Após o processo de moldagem para cada teor, duas amostras foram retiradas e colocadas em cápsulas para se estabelecer o teor de umidade da mistura. Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova será imediatamente extraído do molde, e sua massa, diâmetros e altura medidos com auxílio de balança e paquímetro.

### 3.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

A realização dos ensaios de compressão simples seguiu os procedimentos gerais descritos pela NBR 12025, onde os corpos de prova foram submetidos a rompimento em prensa universal, como é possível visualizar na Figura 11, sendo os respectivos valores de ruptura arquivados.



**Fig. 11 – Ensaio de resistência à compressão simples.  
Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.4 Ensaio CBR

A metodologia consiste na confecção de amostras compactadas em cinco camadas com aplicação de 55 golpes em cada uma. O processo será o mesmo para dois dos teores de aditivo propostos, ou seja, serão confeccionadas cinco amostras sendo uma de solo natural e as restantes contendo 3% e 9% de aditivo nas misturas de solo-cal e solo-cimento. Trabalhou-se com todas as amostras com teor de umidade ótimo e respectivo peso específico aparente seco máximo provenientes dos ensaios de compactação. Além disso, a energia de compactação empregada foi a do Proctor modificada.

Assim que moldados, os corpos de prova permaneceram imersos em água pelo período padronizado de 96 horas, sendo colhidas as medidas de expansão em intervalos de 24 horas e a partir de um extensômetro, como pode-se notar na Figura 12. Finalizado o período de imersão, as amostras foram submetidas ao ensaio de penetração em prensa Universal, como observado na Figura 13. Por meio da penetração da prensa foram colhidos dados de deformação por tensão aplicada que permitiram o cálculo dos valores de CBR para cada mistura moldada.



**Fig. 12 – Expansão do solo a partir de um extensômetro.  
Fonte: Autoria própria.**



**Fig. 13 – Ensaio de penetração.  
Fonte: Autoria própria.**

As padronizações e metodologias utilizadas no ensaio serão baseadas nas normas ME-049 (DNER, 1994) e na NBR 9895 (ABNT, 1997). O cálculo da expansão e do valor de índice de suporte (CBR) serão executados de acordo com a última norma citada, fornecendo dados em porcentagem.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

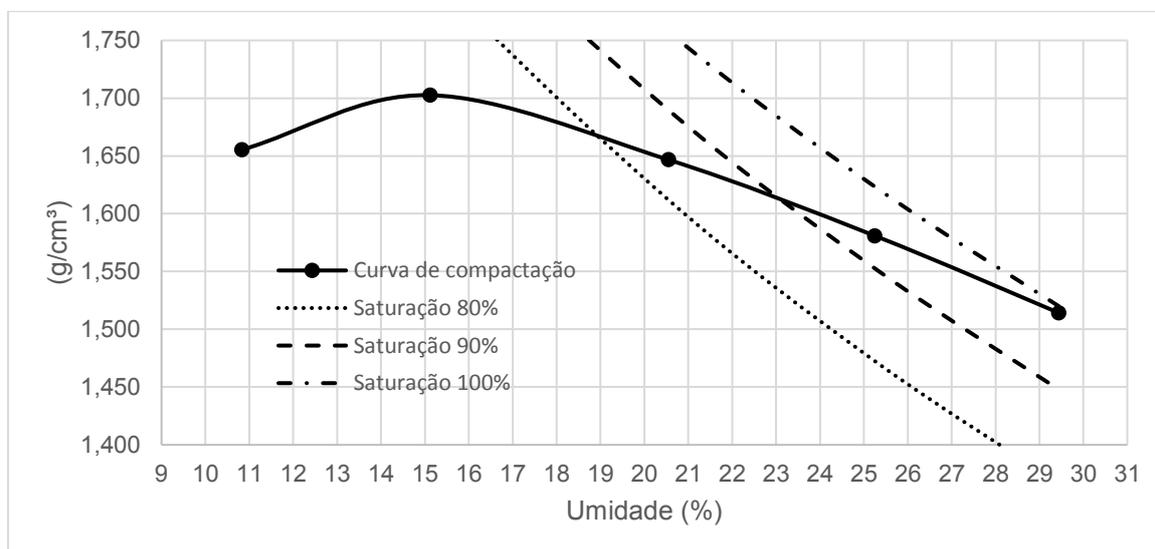
### 4.1 ENSAIO DE PROCTOR

Com a realização do ensaio de compactação para o solo natural na energia modificada, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 06. A partir da curva de compactação obtida, traçada na Figura 14, o peso específico aparente seco máximo foi definido como  $1,7 \text{ g/cm}^3$  e o teor de umidade ótimo foi definido como 15,0%.

**Tabela 06 – Dados obtidos no ensaio de compactação para solo natural, com energia modificada.**

	w(%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 100%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 90%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 80%
CP1	10,833	1,655	2,119	2,067	2,004
CP2	15,118	1,703	1,943	1,882	1,810
CP3	20,548	1,647	1,758	1,690	1,612
CP4	25,249	1,581	1,623	1,553	1,472
CP5	29,439	1,514	1,520	1,448	1,367
CP6	30,189	1,444	1,503	1,431	1,350

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 14 – Curva de compactação para o solo natural, com energia modificada.**

Fonte: Autoria própria.

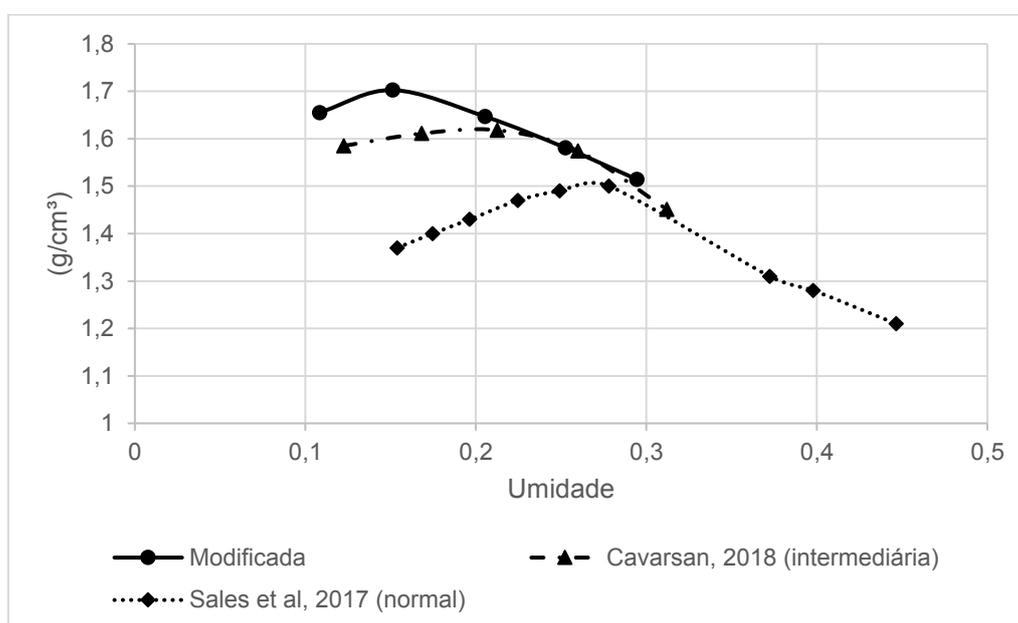
Como nota-se a partir da Figura 14, a curva de compactação encontra-se abaixo da curva de saturação 100%, e os pontos ótimos do solo (massa específica e umidade) encontram-se abaixo da curva de saturação 80%.

Os resultados obtidos por Sales et al. (2017) e por Cavarsan (2018) para o solo natural, para as energias normal e intermediária, respectivamente, podem ser observadas na Tabela 07 e na Figura 15.

**Tabela 07 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo natural.**

Energia de compactação	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,51	27,0
Intermediária (Cavarsan, 2018)	1,62	20,5
Modificada	1,70	15,0

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 15 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo natural.**  
Fonte: Autoria própria.

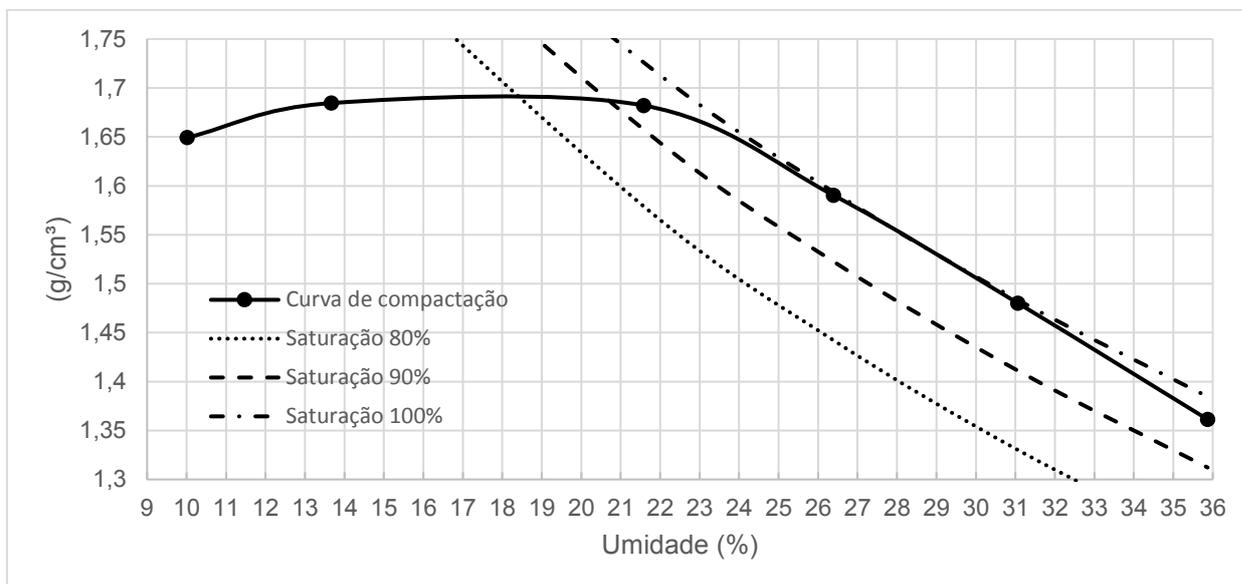
A partir dos resultados apresentados na Tabela 07 e a comparação entre as curvas de compactação na Figura 15, nota-se que com o aumento da energia de compactação, também houve um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma diminuição da umidade ótima.

Com a realização do ensaio de compactação para a mistura solo-cal 3% na energia modificada, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 08. A partir da curva de compactação obtida, traçada na Figura 16, o peso específico aparente seco máximo foi definido como 1,7 g/cm<sup>3</sup> e o teor de umidade ótimo foi definido como 18,0%.

**Tabela 08 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-cal, com energia modificada.**

	w(%)	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3) - 100\%$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3) - 90\%$	$\gamma_d(\text{g/cm}^3) - 80\%$
CP1	10,018	1,649	2,157	2,106	2,046
CP2	13,670	1,685	1,999	1,940	1,871
CP3	21,582	1,682	1,726	1,658	1,579
CP4	26,390	1,590	1,594	1,523	1,442
CP5	31,061	1,480	1,483	1,411	1,330
CP6	35,870	1,361	1,385	1,312	1,232

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 16 – Curva de compactação para a mistura solo-cal com energia modificada.**  
Fonte: Autoria própria.

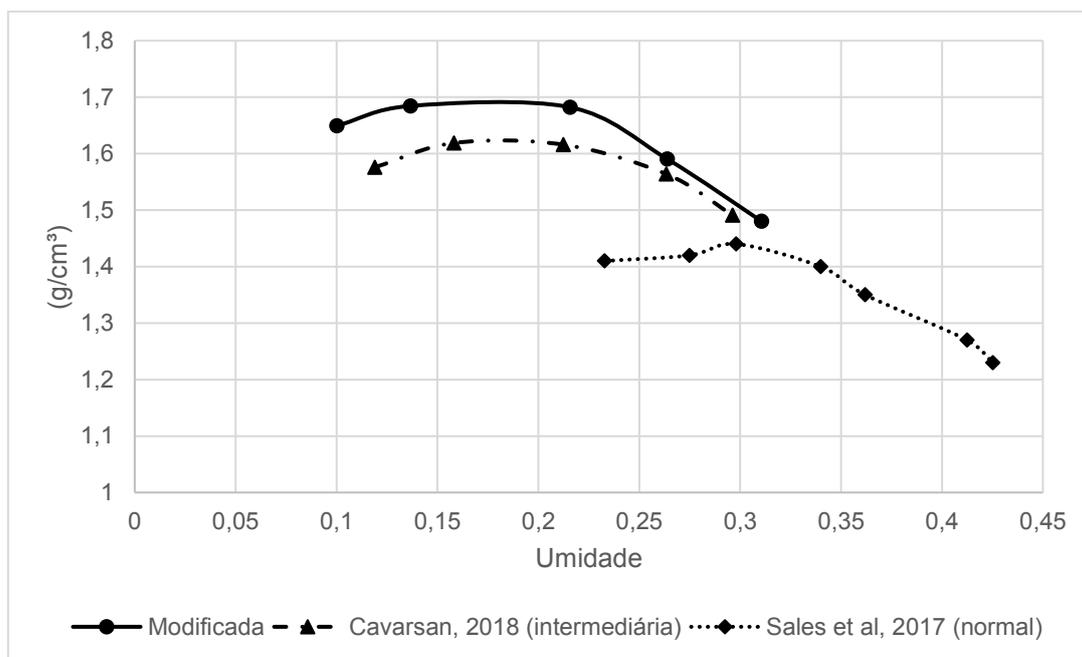
Como nota-se a partir da Figura 16, a curva de compactação encontra-se abaixo da curva de saturação 100%, e os pontos ótimos do solo (massa específica e umidade) encontram-se entre as curvas de saturação de 80 e 90%.

Os resultados obtidos por Sales et al. (2017) e por Cavarsan (2018) para a mistura do solo-cal, para as energias normal e intermediária, respectivamente, podem ser observadas na Tabela 09 e na Figura 17.

**Tabela 09 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cal.**

Energia de compactação	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,44	29,8
Intermediária (Cavarsan, 2018)	1,60	19,0
Modificada	1,70	18,0

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 17 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo-cal.**  
Fonte: Autoria própria.

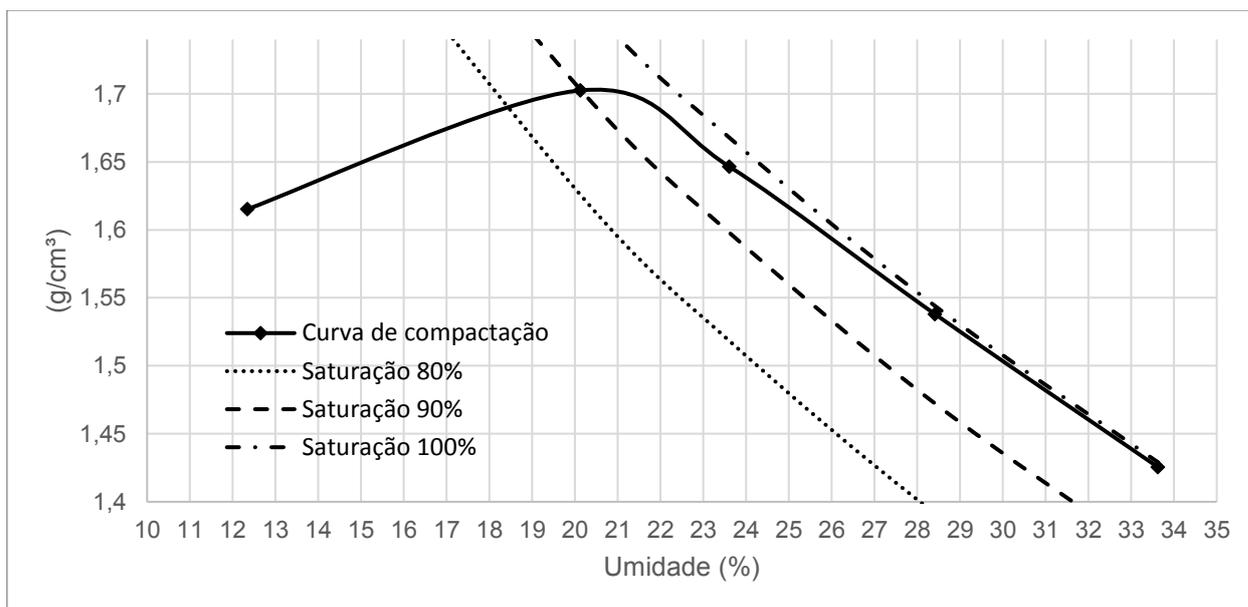
A partir dos resultados apresentados na Tabela 09 e a comparação entre as curvas de compactação na Figura 17, nota-se que com o aumento da energia de compactação, também houve um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma diminuição da umidade ótima, assim como para o solo natural.

Com a realização do ensaio de compactação para a mistura solo-cimento 3% na energia modificada, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 10. A partir da curva de compactação obtida, traçada na Figura 18, o peso específico aparente seco máximo foi definido como 1,7 g/cm<sup>3</sup> e o teor de umidade ótimo foi definido como 20,0%.

**Tabela 10 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-cimento, com energia modificada.**

	w(%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 100%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 90%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) - 80%
CP1	7,968	1,602	2,256	2,212	2,159
CP2	12,344	1,615	2,054	1,997	1,931
CP3	20,126	1,703	1,771	1,703	1,626
CP4	23,611	1,646	1,668	1,598	1,518
CP5	28,416	1,538	1,544	1,472	1,391
CP6	33,626	1,426	1,429	1,357	1,276

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 18 – Curva de compactação para a mistura solo-cimento, com energia modificada.**  
Fonte: Autoria própria.

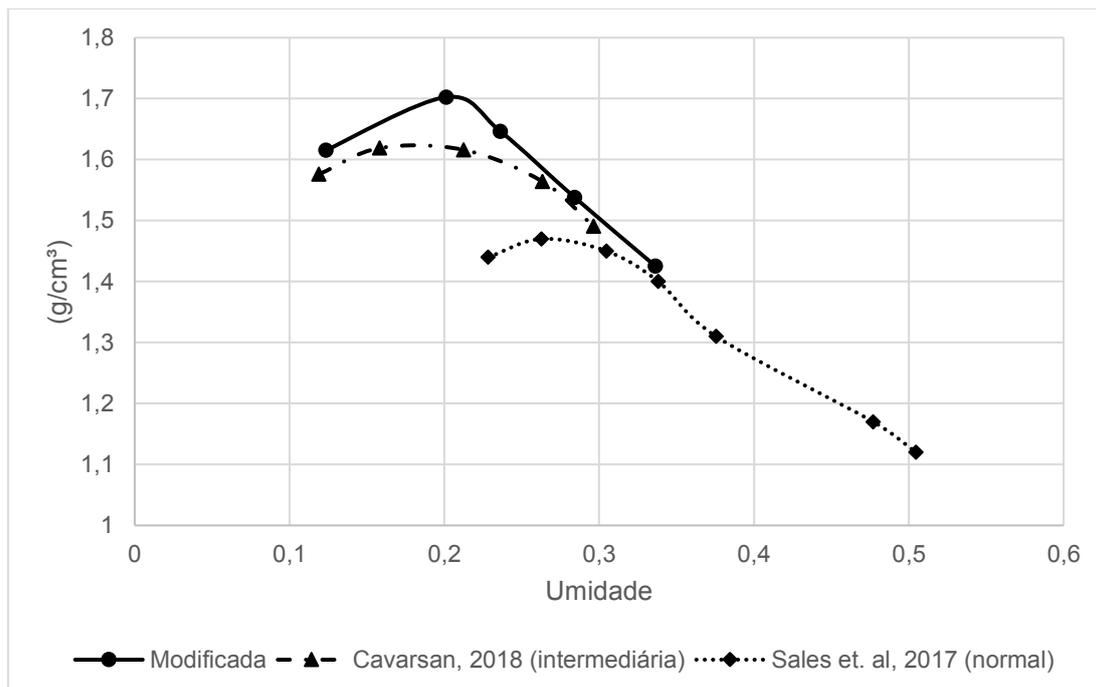
Como nota-se a partir da Figura 18, a curva de compactação encontra-se abaixo da curva de saturação 100%, e os pontos ótimos do solo (massa específica e umidade) encontram-se entre as curvas de saturação de 90 e 100%.

Os resultados obtidos por Sales et al. (2017) e por Cavarsan (2018) para o solo-cimento, para as energias normal e intermediária, respectivamente, podem ser observadas na Tabela 11 e na Figura 19.

**Tabela 11 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cimento.**

Energia de compactação	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,48	27,1
Intermediária (Cavarsan, 2018)	1,62	19,0
Modificada	1,70	20,0

Fonte: Autoria própria.

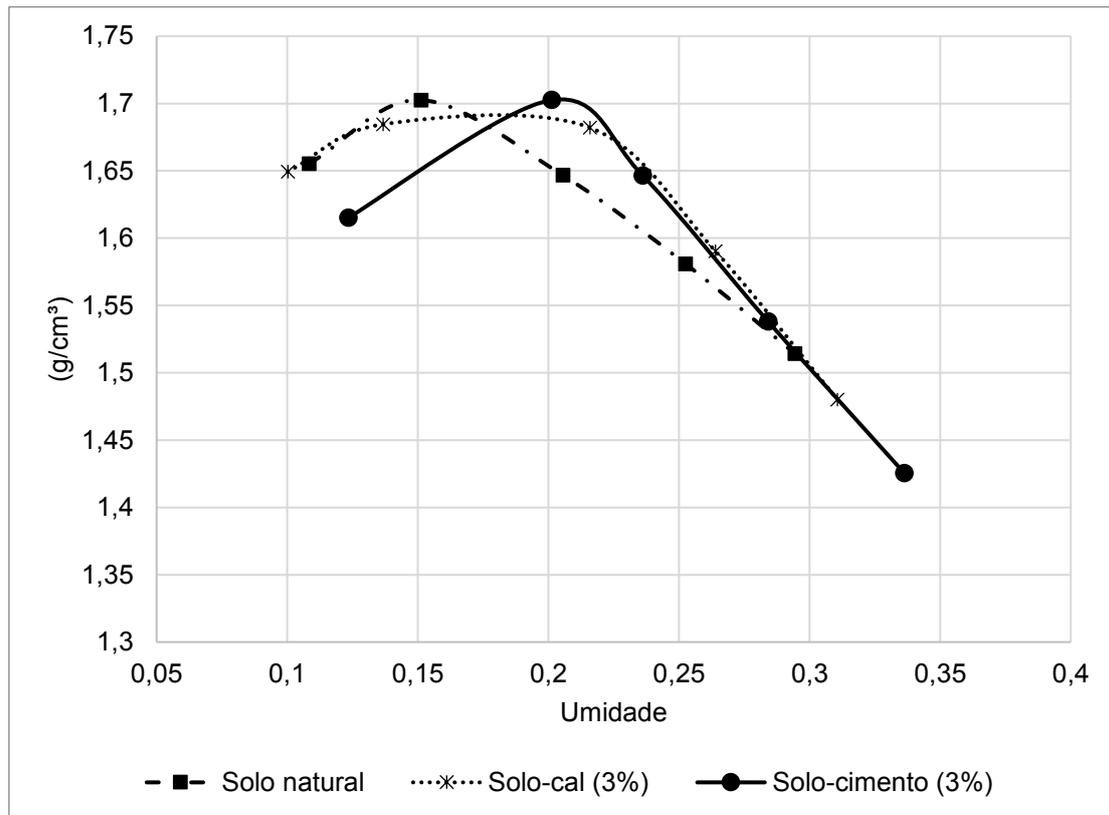


**Fig. 19 – Comparação entre as curvas de compactação para o solo-cimento.**  
Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 11 e a comparação entre as curvas de compactação na Figura 19, nota-se que com o aumento da energia de compactação, também houve um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma diminuição da umidade ótima, assim como para o solo natural e para a mistura solo-cimento.

Na Figura 20 abaixo pode-se notar que não há grande variação entre o peso específico aparente seco máximo a partir das curvas de compactação para o solo natural, solo-cal e solo-cimento. Por esse motivo, utilizou-se 1,7 g/cm<sup>3</sup> para as três misturas. Entretanto, nota-se um aumento da umidade ótima, sendo

a do solo natural mais baixa, a do solo-cal intermediária e a do solo-cimento maior em relação às outras misturas do solo.



**Fig. 20 – Comparação entre as curvas de compactação, com energia modificada.**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram realizados para corpos de prova de solo natural, solo-cimento e solo-cal, sendo estes últimos com teor de aditivo de 3%, 5%, 7% e 9%. Para moldagem dos corpos de prova, foi considerado teor de umidade de 15% para o solo natural, 18% para o solo-cal e 20% para o solo-cimento; e peso específico seco aparente máximo de 1,7 g/cm³ para todas as misturas.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para energia modificada estão expostos nas Tabelas 12 a 20.

**Tabela 12 – Resultados ensaio RCS para o solo natural**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,58	9,35	0,62
CP2	1,62	9,35	0,71
CP3	1,61	9,35	0,28
CP4	1,61	9,35	0,55
CP5	1,58	9,35	0,39

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 13 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,60	11,58	0,57
CP2	1,64	11,58	0,91
CP3	1,60	11,58	0,86
CP4	1,61	11,41	0,65
CP5	1,63	11,41	1,03

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 14 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,59	13,89	0,78
CP2	1,58	13,89	0,85
CP3	1,58	13,89	1,27
CP4	1,58	13,89	1,09
CP5	1,58	13,89	1,28

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 15 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,61	12,63	1,7
CP2	1,60	12,63	1,45
CP3	1,61	12,63	1,22
CP4	1,61	12,63	1,35
CP5	1,61	12,63	1,54

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 16 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 9%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,56	15,01	1,73
CP2	1,57	15,01	1,81
CP3	1,58	15,01	1,76
CP4	1,57	15,01	1,48
CP5	1,57	15,01	1,73

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 17 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,57	17,57	1,21
CP2	1,57	17,57	1,2
CP3	1,56	17,57	1,04
CP4	1,56	17,57	0,96
CP5	1,58	17,57	1,14

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 18 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,62	11,74	1,72
CP2	1,62	11,74	1,06
CP3	1,61	11,74	1,76
CP4	1,61	11,74	1,77
CP5	1,61	11,74	1,81

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 19 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,63	12,09	1,73
CP2	1,61	12,09	2,24
CP3	1,61	12,09	2,2
CP4	1,62	12,09	1,91
CP5	1,62	12,09	2,07

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 20 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,63	12,29	2,29
CP2	1,59	12,29	2,41
CP3	1,62	12,29	2,44
CP4	1,62	12,29	2,36
CP5	1,62	12,29	2,06

**Fonte: Autoria própria.**

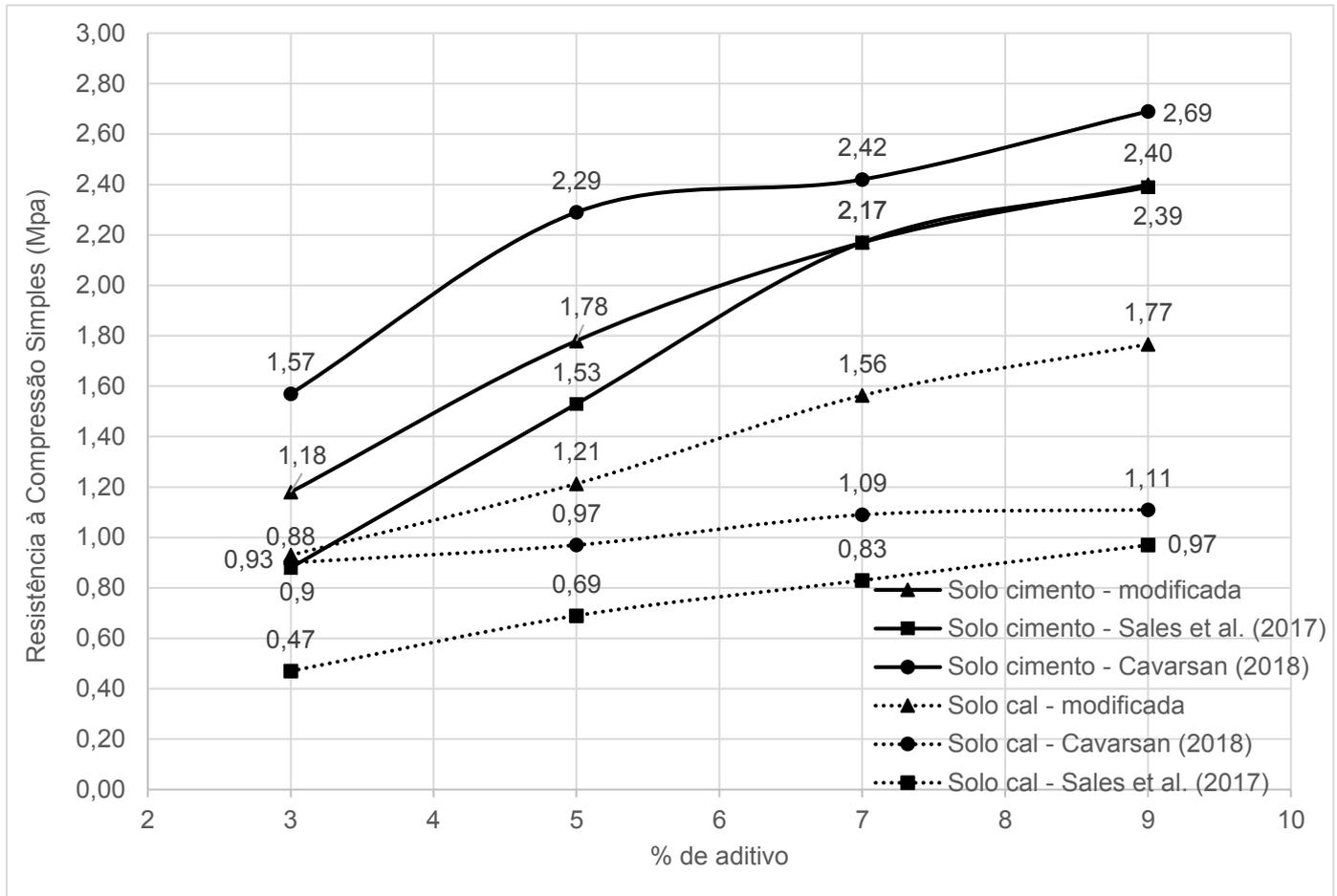
A partir dos resultados apresentados nas tabelas acima, foram calculadas as tensões médias entre os resultados que mais se aproximaram entre si, excluindo os dados que mais se afastaram da média. Esses cálculos estão presentes na Tabela 21, assim como os obtidos por Sales et al. (2017) e Cavarsan (2018).

**Tabela 21 - Resultados médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa**

	Solo Natural	Solo-cimento				Solo-cal			
		3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%
Normal (Sales et al., 2017)	0,33	0,88	1,53	2,17	2,39	0,47	0,69	0,83	0,97
Intermediária (Cavarsan, 2018)	0,59	1,57	2,29	2,42	2,69	0,90	0,97	1,09	1,11
Modificada	0,63	1,18	1,78	2,17	2,40	0,93	1,21	1,56	1,77

**Fonte: Autoria própria.**

A partir da Figura 21, nota-se que, para a compactação dos corpos de prova com a energia modificada, a resistência à compressão simples se mostrou maior para o solo natural e para a mistura solo-cal com todos os teores de adição, tanto em relação aos resultados de Sales et al. (2017) como em relação aos de Cavarsan (2018). Entretanto, em relação à mistura solo-cimento, com os quatro teores de adição, a compactação pela energia intermediária apresentou maiores resultados de resistência em relação a compactação pela energia modificada, o que contraria a teoria.



**Fig. 21 – Comparação de resultados para todas as energias de compactação.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Supõe-se que, como para todas as misturas de solo-cal e mesmo para o solo natural a compactação com energia modificada apresentou corpos de prova mais resistentes à compressão em relação as outras energias, talvez o cimento utilizado não estivesse em boas condições, afetando os resultados. Por esse motivo, novos corpos de prova foram moldados para os quatro teores de adição de cimento, utilizando um novo lote deste aditivo, afim de afirmar a suposição acima ou então, confirmar os resultados obtidos anteriormente.

Os novos resultados do ensaio de resistência à compressão simples para energia modificada para a mistura solo-cimento estão expostos nas Tabelas 22 a 25.

**Tabela 22 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 3%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade	Tensão (Mpa)
CP1	1,60	14,08	1,51
CP2	1,59	14,08	1,29
CP3	1,62	14,08	1,11
CP4	1,59	14,08	1,35

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 23 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 5%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade	Tensão (Mpa)
CP1	1,62	12,46	2,15
CP2	1,61	12,46	2,11
CP3	1,62	12,46	1,96
CP4	1,65	12,46	2,16

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 24 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 7%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade	Tensão (Mpa)
CP1	1,63	11,90	2,85
CP2	1,64	11,90	2,48
CP3	1,67	11,90	2,81
CP4	1,63	11,90	2,32

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 25 – Resultados novos ensaio RCS para o solo-cimento 9%**

	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade	Tensão (Mpa)
CP1	1,54	18,36	2,48
CP2	1,56	18,36	2,77
CP3	1,54	18,36	2,55
CP4	1,56	18,36	2,86

Fonte: Autoria própria.

A partir dos novos resultados obtidos para a mistura solo-cimento e apresentados nas tabelas acima, foram calculadas as tensões médias entre os resultados que mais se aproximaram entre si, excluindo os dados que mais se afastaram da média. Esses cálculos estão presentes na Tabela 26, assim como os obtidos por Sales et al. (2017) e Cavarsan (2018).

**Tabela 26 - Resultados novos médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa**

	Solo Natural	Solo-cimento				Solo-cal			
		3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%
Normal (Sales et al., 2017)	0,33	0,88	1,53	2,17	2,39	0,47	0,69	0,83	0,97
Intermediária (Cavarsan, 2018)	0,59	1,57	2,29	2,42	2,69	0,90	0,97	1,09	1,11
Modificada	0,63	1,38	2,14	2,71	2,82	0,93	1,21	1,56	1,77

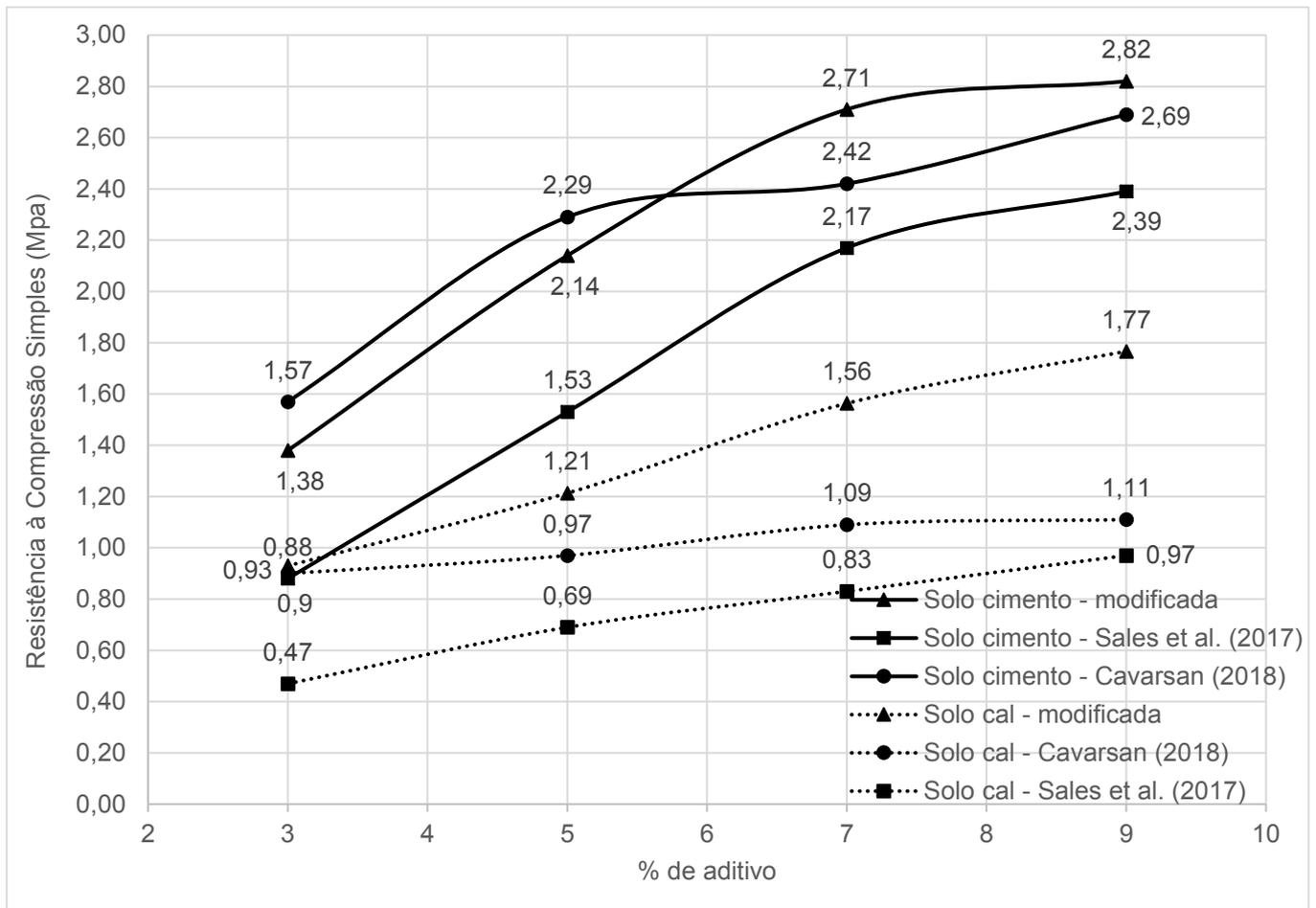
**Fonte: Autoria própria.**

A partir da Tabela 26, nota-se que os novos ensaios para a mistura solo-cimento geraram valores diferentes em relação ao primeiro ensaio. A resistência média para o solo-cimento 3% era de 1,18 Mpa e agora é de 1,38 Mpa. Para o solo-cimento 5%, a resistência média era de 1,78 Mpa e agora é de 2,14 Mpa. Já para o solo-cimento 7%, a alteração foi de 2,17 Mpa para 2,71 Mpa. Enfim, para o solo-cimento 9%, a resistência alterou-se de 2,40 Mpa para 2,82 Mpa.

De acordo com a Figura 22, é possível analisar que para o solo-cimento 7% e 9%, a resistência dos corpos de prova moldados com a energia modificada foi maior que a resistência dos mesmos moldados na energia normal e intermediária. Entretanto, a resistência dos corpos de prova moldados na energia modificada, para as misturas solo-cimento 3% e 5%, continuam abaixo da resistência das amostras moldadas na energia intermediária.

Esses novos resultados demonstram que houve diferença entre o valor de resistência dos corpos de prova moldados com o primeiro lote do cimento em relação às amostras moldadas com o segundo lote do cimento. Entretanto, como para as misturas solo-cimento 3% e 5%, a resistência das amostras moldadas com a energia intermediária continuaram maiores que a resistência dos corpos

de prova moldados com a energia modificada, não se pode afirmar que o primeiro lote do aditivo estava em condições ruins, afetando o ensaio, e também não se pode afirmar que a mistura solo-cimento, quando compactada com energia modificada, gera resultados diferentes dos esperados segundo a teoria.



**Fig. 22 – Comparação considerando os novos resultados para todas as energias de compactação.**

**Fonte: Autoria própria.**

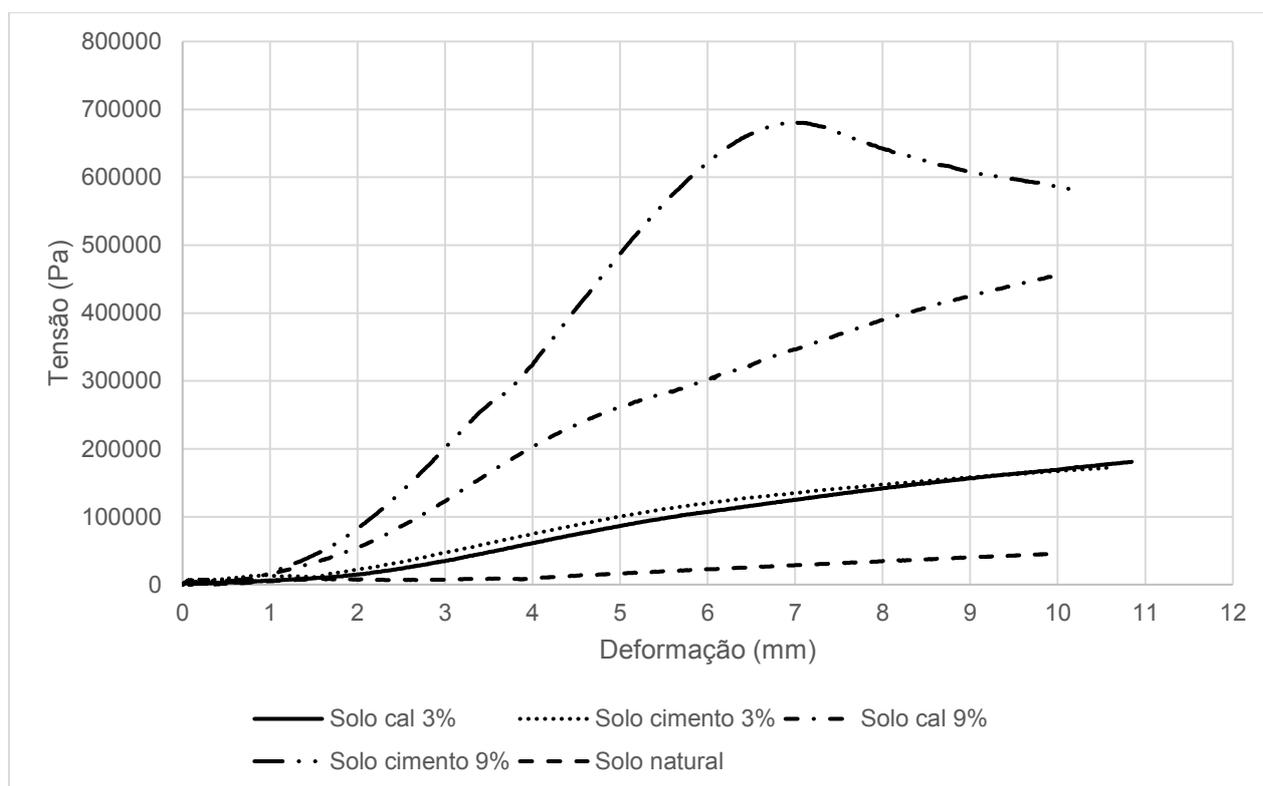
#### 4.3 ENSAIO CBR

O ensaio de CBR gerou resultados que podem ser visualizados na Tabela 27, a partir dos ensaios em laboratório para o solo natural, mistura solo-cal com teores de 3% e 9% de aditivo, e mistura solo-cimento com teores de 3% e 9% de aditivo. A partir da Figura 23, a comparação entre os resultados de CBR para as cinco amostras se torna mais visível.

**Tabela 27 – Resultados do ensaio de CBR.**

Penetração para o maior valor de tensão	Valores de CBR				
	Solo + 0% aditivo	Solo + 3% cal	Solo + 9% cal	Solo + 3% cimento	Solo + 9% cimento
2,54 mm	0,241%	0,617%	1,548%	0,601%	3,577%
5,08 mm	0,310%	1,005%	2,668%	1,043%	5,887%
CBR	0,310%	1,005%	2,668%	1,043%	5,887%

Fonte: Autoria própria.



**Fig. 23 – Comparação entre resultados do ensaio de CBR para energia modificada.**  
Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos resultados, nota-se que a mistura solo-cimento 9% apresentou maior capacidade de suporte do solo em relação às outras misturas. O solo apresenta dois valores de CBR, um para 2,54 mm de penetração e outro para 5,08 mm, e segundo a NBR 9895 (2016), deve-se adotar o maior valor.

Realizando uma comparação entre os resultados obtidos através do ensaio utilizando a energia normal de compactação e a energia modificada, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 28 abaixo.

**Tabela 28 – Resultados do ensaio de CBR para energia normal e modificada.**

Solo + % aditivo	Valores de CBR	
	Energia normal	Energia modificada
Solo + 0% aditivo	1,75%	0,31%
Solo + 3% cal	6,33%	1,01%
Solo + 9% cal	10,88%	2,67%
Solo + 3% cimento	32,88%	1,04%
Solo + 9% cimento	53,25%	5,89%

**Fonte: Autoria própria.**

É visível a diferença de valores entre os resultados obtidos por Sales et al. (2017) no ensaio de CBR utilizando a energia normal e os resultados para o mesmo ensaio utilizando a energia modificada, notando-se que a moldagem das amostras com a energia modificada não apresentou resultados mais resistentes à penetração que as amostras moldadas com a energia normal.

Em relação às amostras apenas de energia modificada, observa-se que tanto a cal quanto o cimento foram efetivos no aumento da capacidade de suporte do solo, sendo esta proporcional ao aumento de aditivo químico utilizado. Nota-se também que, entre a cal e o cimento, este último é mais efetivo no aumento da capacidade de suporte do solo.

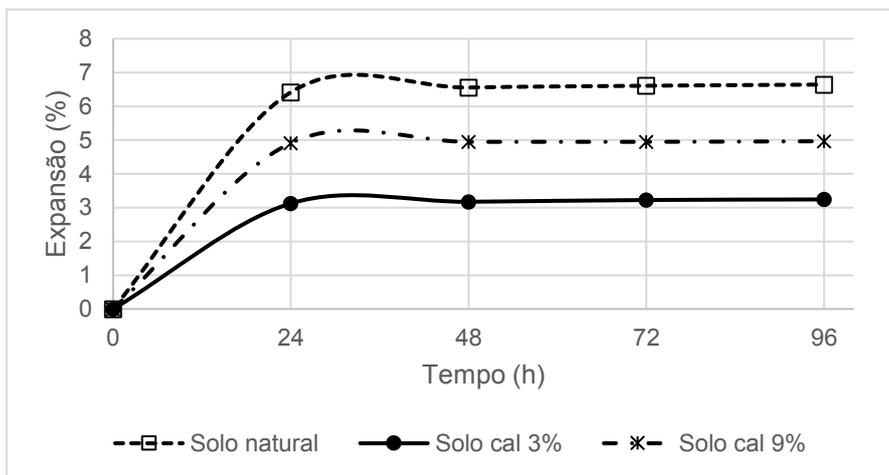
Os valores de expansão do solo imerso em água pelo período de 96 horas podem ser visualizados na Tabela 29 abaixo.

**Tabela 29 – Expansão dos corpos de prova submersos em água.**

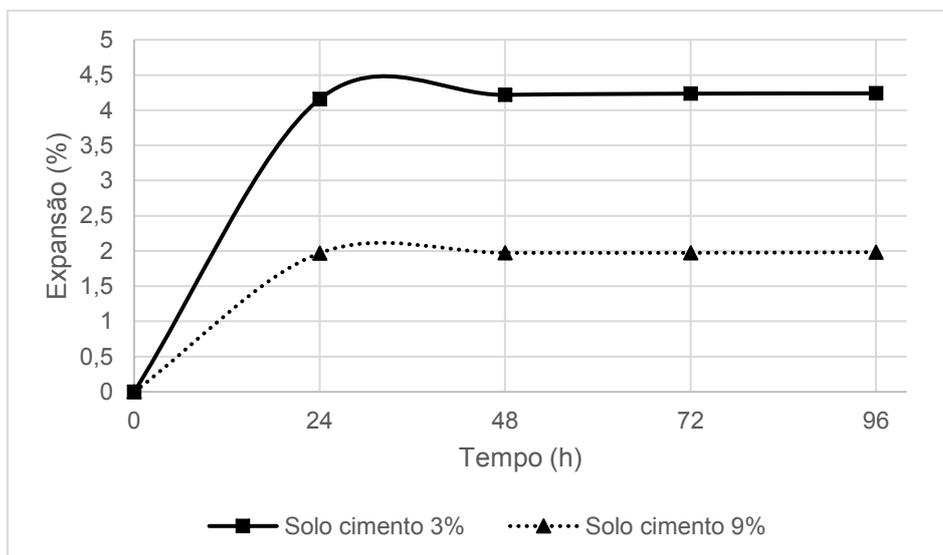
Teores de aditivo	Expansão (%)
Solo natural	6,64
Solo + 3% cal	3,24
Solo + 3% cimento	4,23
Solo + 9% cal	4,96
Solo + 9% cimento	1,98

**Fonte: Autoria própria.**

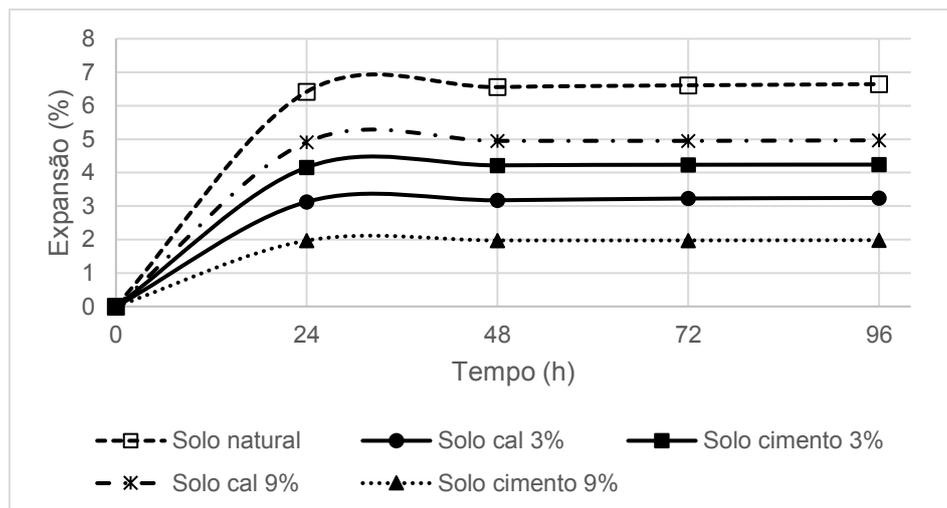
A partir das Figuras 24, 25 e 26, é possível analisar a progressão da expansão do solo submerso em água no decorrer das 96 horas de ensaio.



**Fig. 24 – Expansão dos corpos de prova solo natural e solo-cal no molde CBR, com energia modificada.  
Fonte: Autoria própria.**



**Fig. 25 – Expansão dos corpos de prova solo-cimento no molde CBR, com energia modificada.  
Fonte: Autoria própria.**



**Fig. 26 – Expansão de todos os corpos de prova no molde CBR, com energia modificada. Fonte: Autoria própria.**

Pode-se comparar os resultados de expansão do solo e das misturas com a utilização da energia modificada com os resultados obtidos por Sales et al. (2017) com a utilização da energia normal. Os dados estão explícitos na Tabela 30 abaixo.

**Tabela 30 – Comparação entre resultados de expansão para o solo submerso para energia normal e modificada.**

Teores de aditivo	Expansão (%) - energia normal	Expansão (%) - energia modificada
Solo natural	0,74	6,64
Solo + 3% cal	1,79	3,24
Solo + 3% cimento	0,70	4,23
Solo + 9% cal	1,70	4,96
Solo + 9% cimento	0,71	1,98

**Fonte: Autoria própria.**

Analisando a Tabela 30 acima, nota-se que para todos os teores de aditivo, a expansão foi maior nos corpos de prova moldados com a energia modificada de compactação em relação aos solos com energia normal de compactação.

Em relação aos corpos de prova moldados com a energia modificada de compactação, nota-se que a expansão do solo compactado na energia modificada diminui com a adição tanto de cal como de cimento, nos dois teores estudados. Além disso, é visível que a expansão para a mistura solo-cimento 9% foi bem menor em relação às outras misturas para essa energia, entretanto, foi

1,27% maior que a expansão para o solo-cimento 9% moldado na energia normal.

Realizando uma análise geral desse ensaio, a partir da Tabela 31 abaixo, conclui-se que o ensaio de CBR realizado com a energia modificada não atende as especificações do DNIT para as camadas de reforço do subleito, sub-base e base. Para a camada subleito, o solo com adição de 9% de cimento atende o parâmetro mínimo de expansão e CBR, e o solo com adição de 9% de cal atende apenas o parâmetro mínimo de CBR.

**Tabela 31 – Especificações do DNIT para CBR e expansão.**

Parâmetros mínimos de aceite do CBR e Expansão pelo DNIT		
Camada	C.B.R. (%)	Expansão (%)
Subleito	$\geq 2$	$\leq 2$
Reforço subleito	$\geq$ CBR subleito	$\leq 1$
Sub-base	$\geq 20$	$\leq 1$
Base	$\geq 80$	$\leq 0,5$

Fonte: DNIT adaptado (2006).

#### 4.4 ANÁLISE DE CUSTOS

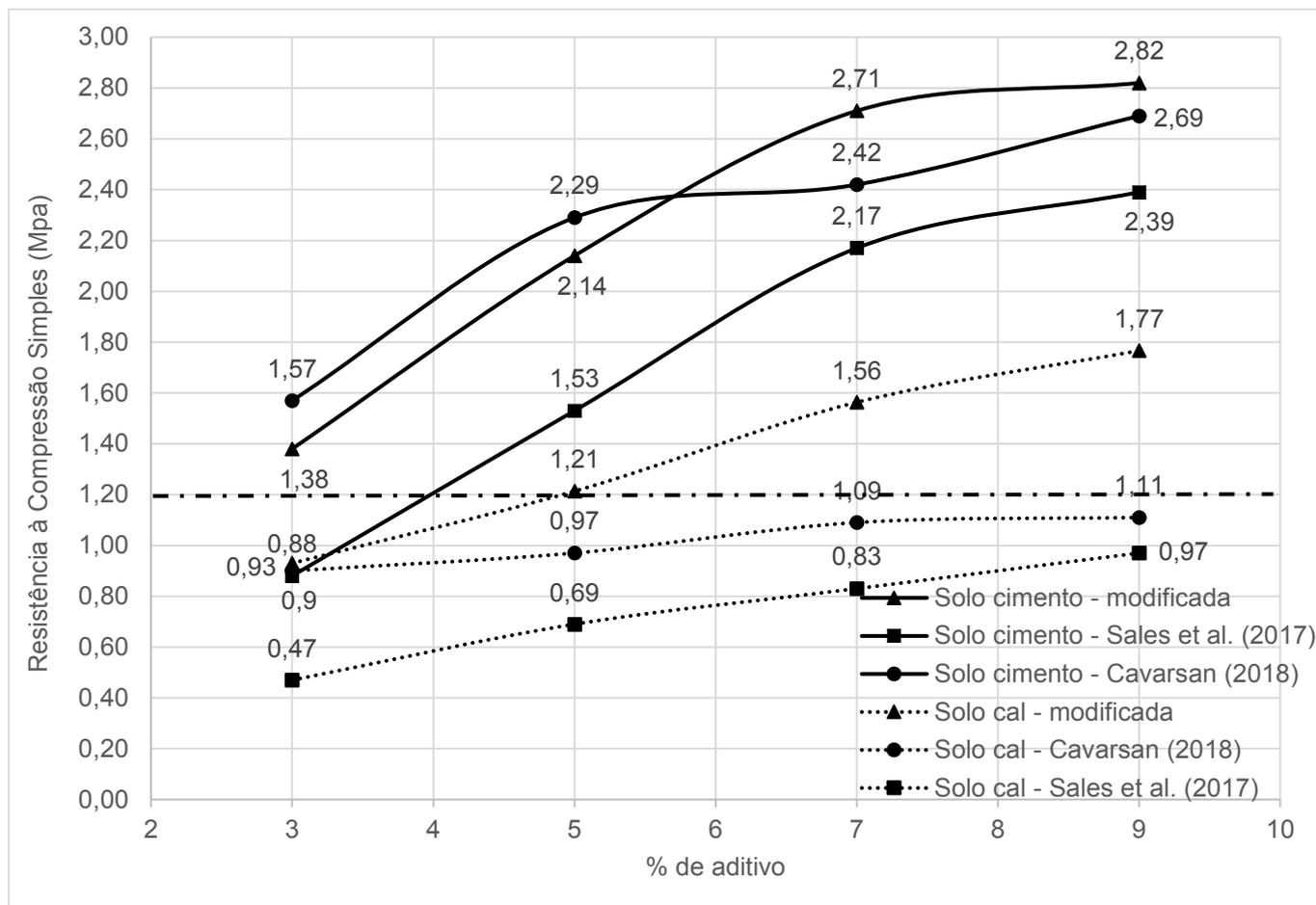
Partindo de uma resistência alvo, considerada como a resistência de projeto que um solo precisa atingir, é possível avaliar, a partir dos resultados apresentados acima, qual a melhor solução para o melhoramento do solo com relação a custo-benefício.

Escolhendo o valor mínimo de 1,2 Mpa como resistência à compressão simples que um solo silte-argiloso deve suportar em um determinado projeto de pavimentação, por ser o valor mínimo exigido pela DER/PR (2005), e considerando os valores comerciais de compactação do solo apresentados na Tabela 32 abaixo, obtidos por contato com uma empresa especializada, analisa-se, a partir da Figura 27, qual a melhor decisão a ser tomada para melhoramento do solo.

**Tabela 32 – Custos para diferentes energias de compactação de um solo.**

Energia de Compactação	Custo (R\$/m³)
Normal	17,00
Intermediária	20,00
Modificada	23,00

Fonte: Peressim (2019).



**Fig. 27 – Resultados à compressão simples para todas as energias de compactação com resistência alvo de 1,2 Mpa.**

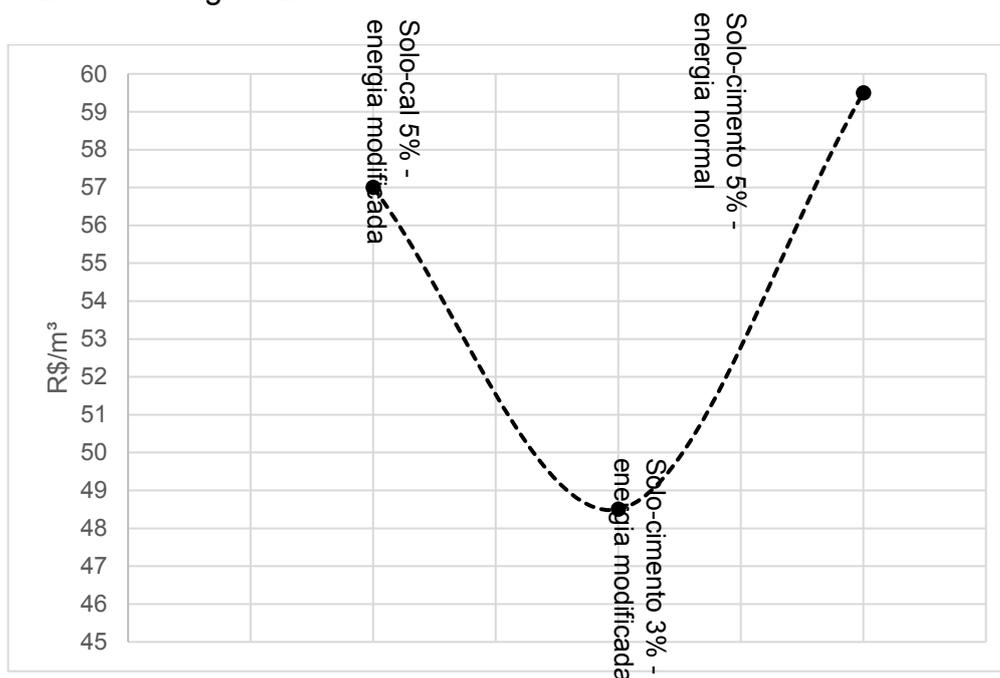
Fonte: Autoria própria.

Considerando os valores comerciais, analisados em lojas de construção comuns, da cal hidratada e do cimento CP-V ARI, materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova, adota-se o valor de R\$ 0,4/kg da cal e R\$ 0,5/kg do cimento.

Observando a Figura 27, nota-se que as misturas que atingiram a resistência à compressão de 1,2 Mpa, sem exceder muito esse valor para evitar superdimensionamento, são o solo-cal 5% com energia modificada (1,21 Mpa), solo-cimento 3% também com energia modificada (1,38 Mpa) e solo-cimento 5%

com energia normal (1,53 Mpa). Entretanto, vale relembrar que a resistência atingida foi apenas para os parâmetros de compressão, sem considerar os parâmetros de CBR.

Adotando um volume de  $1\text{m}^3$  de solo e a adição dos aditivos acima desse volume, é possível chegar ao custo final de cada procedimento de melhoramento do solo, considerando qual aditivo será utilizado, a porcentagem do mesmo e qual energia de compactação será adotada. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 28 abaixo.



**Fig. 28 – Resultados da análise de custos.**  
Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 28, nota-se que, entre as amostras analisadas tanto neste trabalho, quanto por Sales et al (2017) e Cavarsan (2018), a mistura solo-cimento 3%, compactada com energia modificada, atingiu a resistência de projeto de 1,2 Mpa e apresentou o menor custo. Na análise, não foi considerado o custo de mão-de-obra do espalhamento dos aditivos no solo, prevendo que, como todas as misturas necessitam dessa mão-de-obra e o valor não divergiria entre elas, não é necessário considerá-la na análise.

## 5 CONCLUSÃO

O ensaio de compactação – Proctor modificado, apresentou resultados esperados para o peso específico aparente seco máximo e para a umidade ótima do solo, sendo as curvas de compactação, em geral, deslocadas para a esquerda em relação às curvas de compactação nas energias normal e intermediária, o que significa uma diminuição na umidade ótima e um aumento no peso específico aparente seco máximo do solo compactado com a energia modificada. Utilizou-se o mesmo valor, de  $1,70 \text{ g/cm}^3$ , para o peso específico aparente seco máximo e uma umidade menor para o solo natural, de 15%, uma umidade intermediária para o solo-cal, de 18%, e uma umidade maior para o solo-cimento, de 20%.

O ensaio de resistência à compressão simples apresentou resultados esperados para o solo natural e para o solo com os teores de adição de cal; entretanto, os resultados de resistência para o solo com os teores de adição de cimento foram menores que o esperado, pois a mistura solo-cimento compactada na energia modificada apresentou resistência menor que a mesma mistura compactada na energia intermediária. Teoricamente, o contrário deveria ocorrer, visto que ao ser compactado com uma energia maior a quantidade de vazios no solo diminui, o que conseqüentemente o torna mais resistente devido ao maior contato entre os grãos.

Um novo ensaio foi realizado para o solo com adição dos quatro teores de cimento, utilizando um novo lote deste aditivo, para analisar se a discrepância de resultados ocorreu devido ao antigo lote de cimento utilizado. Entretanto, somente para as misturas solo-cimento 7% e 9%, os resultados foram favoráveis à revisão bibliográfica, ou seja, as resistências das amostras moldadas na energia modificada foram superiores à daquelas moldadas na energia intermediária e normal. Esse tipo de resultado dificulta uma análise concreta sobre o efeito da adição do cimento neste tipo de solo, quando compactado na energia modificada.

O Índice de Suporte Califórnia realizado para as amostras moldadas na energia modificada não apresentou os resultados esperados, assim como a expansão do solo imerso em água. Comparando os resultados com Sales et al.

(2017), notou-se um aumento da expansão do solo, tanto natural quanto com os aditivos, tornando inviável o seu uso na pavimentação segundo parâmetros do DNIT (2006).

A análise de custos indicou que, entre as análises de resistência à compressão simples do solo realizadas por Sales et al. (2017), Cavarsan (2018) e no presente trabalho, o solo com adição de 3% de cimento, compactado com energia modificada, apresentou o menor custo de projeto sem deixar de atingir a resistência necessária. Esta análise mostra-se de grande importância, visto que em uma obra de engenharia, como a pavimentação, um dos quesitos mais importantes levados em conta é o custo final da construção.

## 6 SUGESTÕES FUTURAS

Através dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a realização de um novo ensaio CBR na energia modificada, visto que os resultados não atenderam a expectativa teórica, além da realização desse ensaio para os mesmos teores de aditivos utilizados no ensaio de compactação, ou seja, solo-cal 3%, 5%, 7% e 9% e solo-cimento 3%, 5%, 7%, 9%, além do solo natural.

Também é interessante a realização desse ensaio para a energia intermediária, nas mesmas condições do ensaio nas energias normal e modificada, permitindo futuras comparações mais completas.

O ensaio de resistência à compressão simples apresentou resultados discrepantes da revisão bibliográfica em relação ao solo-cimento. Por esse motivo, recomenda-se realizar esse ensaio com as três energias de compactação e com mais teores de adição do cimento, para analisar mais a fundo a interferência deste aditivo, com a aplicação das diferentes energias de compactação neste tipo de solo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6473**. Cal virgem e cal hidratada - análise química, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo: Ensaio de compactação. Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**. Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**. Solo-Cimento – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**. Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**. Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

ARAÚJO, A. F.; BARROSO, S. H. A.; RABÊLO, A. N.; VASCONCELOS, M. A. G. **O Uso da Técnica de Solo-cal para Melhoramento das Propriedades Tecnológicas de um Solo da Região do Baixo Jaguaribe no Estado do Ceará**. Artigo, Cobramseg. Búzios, RJ. 2008.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R.; MESBAH, A., 2002. **Blocos de Concreto de Terra: Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção**. Biblioteca SEBRAE Online. Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/AE6EC233B84C285B03256F940051465F/\\$File/NT000A3516.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/AE6EC233B84C285B03256F940051465F/$File/NT000A3516.pdf)>. Acesso em: 21/11/2018.

BATISTA, C. F. N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS, 1976.

BERNUCCI, L. B; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R.; MARQUES FILHO, P. L. Considerações sobre a Formação Furnas. **Boletim Paranaense de Geografia**, Curitiba, n. 4-5, 1961.

BORDIGNON. V. R. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**.

Dissertação Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015. Disponível em: < <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1701> >. Acesso em: 06/10/2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos, volume 1. 6ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1988.

CAVARSAN, M. P. **Análise dos efeitos da adição de cal e de cimento para estabilização de solos**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Civil, Curitiba, 2018.

CINTRA, M. S. **CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial**. Disponível em: < <https://cimento.org/cp-v-ari-cimento-portland-de-alta-resistencia-inicial/> >. Acesso em: 19/10/2018.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2009.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 7ª ed. norteamericana, Ed. Cengage Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. Especificação de Serviço 07/05. **Pavimentação: Solo-cimento e Solo tratado com cimento**. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, Curitiba, 2005. p.19. Disponível em: < [www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf\\_Pavimentacao/ES-P11-05SoloCimento\\_SoloTratadoCimento.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P11-05SoloCimento_SoloTratadoCimento.pdf) >. Acesso em: 31/09/2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ. 2010.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba.** MINEROPAR, 2011. 1ª Edição. 48p. Curitiba. 2011.

FIORATTI, N. A. **Análise da influência de um reforço de solo cimento compactado na extremidade superior estacas escavadas, sob carregamentos horizontais.** Dissertação (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, SP, 2008.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7845/000558347.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 11/11/2018.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do Melhoramento de Solo com Adição de Cal Hidratada para Uso em Pavimento Urbano.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2013.

GUIMARÃES, José Epitáfio Passos. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2002.

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de compactação e caracterização.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

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

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada. 2007.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação.** Notas de Aula, Capítulo 4. UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, MG. 2009.

MAZER, W. **Materiais de construção: cal.** Notas de aula. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2017.

MILANI, A. P. **Avaliação físico mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, J. C. **Caracterização Geotécnica de Materiais Inconsolidados Arenosos do Distrito Federal Utilizados como Material de Construção.** Dissertação de Mestrado. Unb - Universidade de Brasília, DF, 2000.

ORTIGÃO, J. A. R., **Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.

PERESSIM, Alaor. **Custo real de compressão do solo.** [Entrevista concedida a] Estela Bonagurio Julio, Capivari, São Paulo, 2019.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção.** Editora Globo. Porto Alegre, 1978.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis.** 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Copiarte. 2002.

PINTO, A.R.A.G., 2008. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil.

RISSARDI, J. L. **Análise da resistência à tração de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. **Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos**. Centro Universitário de Formiga, Formiga, MG, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/663/373>>. Acesso em: 10/06/2019.

ROSA, W. de A. **Rochas e solos**. 2015. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAahUKEwjF4pur3tjGAhXEolAKHYAfBE0&url=http%3A%2F%2Fwww.profwillian.com%2Fprof%2Fmarcus%2FMaterial\\_para\\_estudos%2FTecnologia\\_e\\_Arquitetura\\_1%2FRochas\\_e\\_Solos.ppt&ei=bwOkVYXvCcTBggSAv5DoBA&usg=AFQjCNF-7EM5stVuS7WYvbdFi86diEUig&bvm=bv.97653015,d.eXY](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAahUKEwjF4pur3tjGAhXEolAKHYAfBE0&url=http%3A%2F%2Fwww.profwillian.com%2Fprof%2Fmarcus%2FMaterial_para_estudos%2FTecnologia_e_Arquitetura_1%2FRochas_e_Solos.ppt&ei=bwOkVYXvCcTBggSAv5DoBA&usg=AFQjCNF-7EM5stVuS7WYvbdFi86diEUig&bvm=bv.97653015,d.eXY)>. Acesso em: 10/06/2019.

SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR)**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 1998.

SALES, A. W.; RIBEIRO, D. D.; NERY, K. D. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Civil, Curitiba, 2017.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SIQUEIRA, L. V. M. **Laboratório de Materiais de Construção**. Notas de aula. UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, SC. 2008.

VITALI, O. P. M. **Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2008. Disponível em: < <https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/59832/1/0001-29035.pdf> >. Acesso em: 12/11/2018.